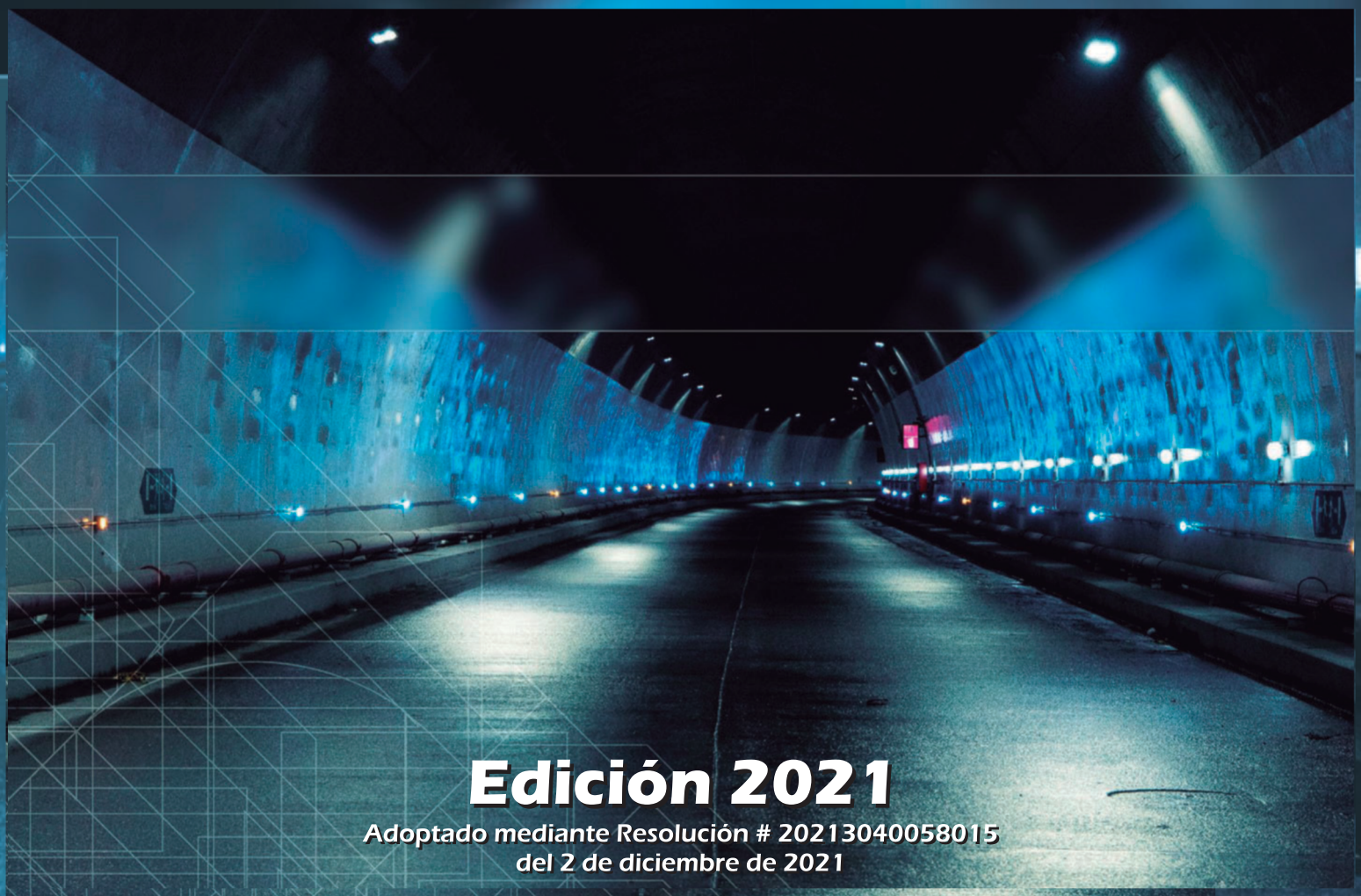
MANUAL PARA EL DISEÑO, CONSTRUCCIÓN, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE TÚNELES DE CARRETERA PARA COLOMBIA



Edición 2021

Adoptado mediante Resolución # 20213040058015
del 2 de diciembre de 2021

La movilidad es de todos

Mintransporte

INVIAS
INSTITUTO NACIONAL DE VIAS

Iván Duque Márquez
Presidente de la República

Ángela María Orozco Gómez
Ministra de Transporte

Olga Lucía Ramírez Duarte
Viceministra de Infraestructura

Esperanza Ledezma Lloreda
Coordinadora Grupo Apoyo a las Regiones

Rodolfo Castiblanco Bedoya - Asesor
Dirección de Infraestructura

Juan Esteban Gil Chavarría
Director General

Paola Constanza Romero Martínez
Subdirectora General

Guillermo Toro Acuña
Director Técnico y de estructuración

Juan Esteban Romero Toro
Director de ejecución y operación

Clara Margarita Montilla Herrera
Secretaria General

Catalina Téllez Posada
Directora Jurídica

Gladys Gutierrez Buitrago
Subdirectora de Reglamentación Técnica e Innovación

Jairo Fernando Argüello Urrego
Subdirector de Sostenibilidad

Neyla Teresa Moreno Vega
Coordinadora Normatividad Técnica

Bogotá D.C., diciembre 2 de 2021

ACTUALIZACIÓN 2021

Ing. Hermes Mauricio Alvarado Sáchica – INVIAS
Ing. Germán Pardo Albarracín – SCI
Ing. Antonio José Rodríguez Jaramillo - ACTOS

ESPECIALISTAS INVIAS

Ing. Hermes Mauricio Alvarado Sáchica
Ing. Diego Alberto Giraldo Posada
Ing. Carlos Felipe Sabogal Ocampo
Ing. Alejandro García Cadena
Dra. Luz Marina Velez Gutierrez
Ing. Mario Alejandro Casallas Rubio
Ing. Julián Leyva Diaz
Dr. Omar Camelo Osorio
Ing. Alexander Vaca Carvajal
Ing. Laura Carolina Duarte Meneses
Ing. Rory Rene Forero Tavera
Ing. Edgar Camilo Fonseca Gamba
Ing. David Ricardo Rios Aguirre
Nicolás Alvarado Romero

ESPECIALISTAS EXTERNOS

Ing. Germán Pardo Albarracín
Ing. Antonio José Rodríguez Jaramillo
Ing. Álvaro de la Cruz Correa Arroyave
Ing. Mario Camilo Torres Suárez
Ing. Luis Camilo Suescún Casallas
Ing. Juan Manuel Dávila Méndez
Ing. Javier Rodriguez Aguirre
Ing. Juan Carlos Escobar Zapata
Ing. Hugo Ignacio Torres Bahamón
Ing. Leonardo Echeverri Coba
Ing. Javier Rodriguez
Ing. José Álvaro Peña Rodríguez
Ing. Ernesto A. Parra P.
Ing. Alexander Carvajal

SECTOR EXTERNO DE APOYO

Sociedad Colombiana de Ingenieros - SCI
Asociación Colombiana de Túneles y Obras Subterráneas - ACTOS
Universidad del Quindío
Agencia Nacional de Infraestructura - ANI
Cámara Colombiana de la Infraestructura - CCI
Asociación Colombiana de Profesionales en Explosivos y Voladuras – ACPEV
Asociación Colombiana de Rociadores Contra Incendios – ANRACI
Asociación Colombiana de Hidrogeólogos - ACH
Sociedad Colombiana de Geotecnia -SCG
Cámara Colombiana de Energía - CCE

DIAGRAMACIÓN

Luis Mauricio Ubaque Ubaque - Invias
Fernando Pardo Albarracín – DyF Trading

EDICIÓN 2015

EDICIÓN Y REDACCIÓN GENERAL

Ing. Juan Carlos García Leal
Dr. Juan Manuel Dávila Méndez

ESPECIALISTAS EXTRANJEROS 2015

Graz University of Technology (Austria)
Dr. Juan M. Dávila M.
Dr. Wulf Schubert
Dr. Peter Stum
Dr. Alfred Fasching
CTES – Geoconsult (Chile)
Ing. Christaki Masad
Dr- Alexandre Gomes

UNIVERSIDAD DEL QUINDÍO

ESPECIALISTAS COLOMBIANOS 2015

Ing. Jorge E. Ardila R. (QEPD) – Geotúneles
Ing. Antonio José Rodriguez Jaramillo – Geotúneles
Ing. Germán Pardo Albarracín – Consultor
Ing. Javier Rodriguez – Geotúneles
Ing. Johanna M. Trujillo A. – Geotúneles
Geol. Marco A. Nieto P. – Mibex
Dr. Héctor Salazar B. – Geoandina
Ing. Mario A. Arias E. - EDL

ESPECIALISTAS EDICIÓN 2015

Dr. Armando Espinosa Baquero
Ing. Luis Fernando Polanía Obando
Ing. Carlos Arturo García Ocampo
Ing. Carlos Julio Arboleda Audrito
Ing. Elkin Monsalve Durango
Ing. Gabriel Lozano Sandoval
Dr. Leonardo Cano Saldaña
Ing. Maria Rosa Guzmán Meléndez
Ing. Uriel Orjuela Ospina
Ing. Wilder D. Jiménez Trujillo
Ing. Luisa Fernanda Cuartas Varón

COLABORADORES 2015

Ing. Diego F. Gil H. – Coordinación
Lic. Gustavo Giraldo G. – Estilo
Lic. Carlos Manuel Varón C. - Estilo
Sr. Juan David Torres G. – Dibujo
Ing. Luis Fernando Marín L. - Apoyo

TABLA DE CONTENIDO

1 CAPÍTULO 1 - MARCO NORMATIVO Y REGULATORIO 1-15

1.1 ALCANCE Y OBJETIVOS DEL MANUAL 1-15
1.2 CONSIDERACIONES 1-16
1.3 ORGANIZACIÓN DEL MANUAL 1-16
1.4 LEYES, DECRETOS Y NORMATIVIDAD NACIONAL 1-17
1.4.1 Ley Colombiana para Infraestructura vial 1-18
1.4.2 Decretos Nacionales para Infraestructura vial 1-19
1.4.3 Resoluciones Ministerio de transporte para infraestructura vial 1-20
1.4.4 Otras Resoluciones aplicables a proyectos 1-20
1.4.5 Marco jurídico en materia de Sostenibilidad 1-22
1.4.6 Manuales y reglamentos para infraestructura vial 1-22
1.4.7 Política pública colombiana para Infraestructura vial 1-23

2 CAPÍTULO 2 - DEFINICIONES 2-25

2.1 GLOSARIO 2-25
2.2 PROYECTO DE TÚNELES VIALES 2-31
2.2.1 Planeación 2-32
2.2.2 Estudios y diseños 2-32
2.2.3 Construcción 2-35
2.2.4 Operación y mantenimiento 2-35
2.3 CLASIFICACIÓN DE TÚNELES VIALES 2-36
2.3.1 Clasificación de túneles viales por longitud y TPD 2-36
2.3.2 Clasificación de túneles viales por cobertura 2-37

3 CAPÍTULO 3 – GESTIÓN DEL RIESGO 3-39

3.1 GLOSARIO 3-40
3.2 GENERALIDADES 3-41
3.3 INCERTIDUMBRE Y RIESGOS EN LOS PROYECTOS DE OBRAS SUBTERRÁNEAS 3-44
3.3.1 Incertidumbre y riesgo 3-44
3.3.2 Gestión de riesgos 3-45
3.3.3 Evaluación de los riesgos 3-45
3.3.4 Gestión de riesgos en la etapa precontractual 3-50
3.3.5 Gestión del riesgo durante la etapa contractual 3-51
3.3.6 Gestión de riesgos en la etapa de construcción 3-51
3.3.7 Método observacional 3-52
3.4 RIESGOS BÁSICOS CONTEMPLADOS EN PROYECTOS DE TÚNELES 3-52
3.4.1 Riesgos en estudios y diseños 3-53
3.4.2 Riesgo en la gestión social 3-53
3.4.3 Riesgo en la gestión predial 3-53
3.4.4 Riesgo en la gestión ambiental 3-54
3.4.5 Riesgo en la financiación 3-54

3.4.6 Incertidumbre geológica o riesgo geotécnico....3-54
3.4.7 Riesgos en la construcción....3-55
3.4.8 Riesgos por cambios regulatorios o normativos....3-56
3.4.9 Riesgos por eventos de fuerza mayor (asegurables)....3-56
3.4.10 Riesgos por eventos de fuerza mayor (no asegurables)....3-56
3.4.11 Riesgos eléctricos....3-56
3.4.12 Riesgos de operación y mantenimiento....3-57
3.5 DISTRIBUCIÓN DE RIESGOS....3-57
3.5.1 Documentación de seguridad....3-57
3.5.2 Proceso de evaluación y gestión de riesgo....3-58
3.5.3 Consideraciones de los análisis de riesgos adicionales....3-59
3.5.4 Auditorías de seguridad....3-60
3.5.5 Cumplimiento....3-60

4 CAPÍTULO 4 - SOSTENIBILIDAD....4-63
4.1 GESTIÓN PARA LA SOSTENIBILIDAD....4-63
4.1.1 Etapa de diseño....4-64
4.2 GESTIÓN AMBIENTAL....4-67
4.2.1 Fases de planeación - Estudios y diseños....4-69
4.2.2 Fase de construcción....4-74
4.2.3 Fase de operación y mantenimiento....4-79
4.3 GESTIÓN SOCIAL....4-82
4.3.1 Desafíos de la gestión social en la construcción de túneles....4-82
4.3.2 Instituto Colombiano de Antropología e Historia - ICANH....4-83
4.3.3 Autoridad nacional de consulta previa....4-83
4.3.4 Impactos sociales derivados de construcción y operación de túneles....4-84
4.4 GESTIÓN PREDIAL....4-87
4.4.1 Componente jurídico....4-88
4.4.2 Componente técnico....4-89
4.4.3 Componente valuatorio....4-90
4.4.4 Escenarios con características especiales....4-90

5 CAPÍTULO 5 – EXPLORACIÓN E INVESTIGACIÓN....5-93
5.1 GLOSARIO....5-93
5.2 GENERALIDADES....5-96
5.2.1 Aspectos básicos de la investigación....5-98
5.2.2 Fuentes de información secundaria....5-98
5.2.3 Fuentes de información primaria....5-100
5.3 ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO....5-100
5.3.1 Área de influencia....5-102
5.3.2 Balance hídrico....5-103
5.3.3 Inventario de puntos de agua y red de monitoreo....5-104
5.3.4 Hidrogeoquímica....5-106
5.3.5 Instrumentación para medición de niveles de agua subterránea....5-109
5.3.6 Parámetros geohidráulicos....5-111
5.3.7 Red de monitoreo....5-113
5.3.8 Direcciones de flujo subterráneo....5-113

5.3.9 Mapa hidrogeológico y geomorfológico 5-114
5.3.10 Aspectos ambientales 5-115
5.3.11 Modelos hidrogeológicos 5-116
5.4 INVESTIGACIÓN Y EXPLORACIÓN DEL TERRENO 5-125
5.4.1 Fase I: PREFACTIBILIDAD 5-125
5.4.2 Fase II: FACTIBILIDAD 5-127
5.4.3 Fase III: DISEÑOS 5-129
5.4.4 Exploración por métodos geofísicos 5-132
5.4.5 Perforaciones exploratorias 5-134
5.4.6 Otros sistemas exploratorios 5-140
5.4.7 Ensayos de laboratorio e in situ (en el sitio) 5-141
5.4.8 Mapeo y análisis de discontinuidades del macizo rocoso 5-146
5.4.9 Clasificación del macizo rocoso 5-147
5.4.10 Determinación del estado de esfuerzos in situ 5-147
5.4.11 Informes geotécnicos 5-148
5.4.12 Modelo geológico, geotécnico e hidrogeológico 5-152
5.5 INVESTIGACIÓN DE CONDICIONES AMBIENTALES 5-152

6 CAPÍTULO 6 - DISEÑO 6-155
6.1 GLOSARIO 6-155
6.2 GENERALIDADES 6-158
6.3 ASPECTOS DEL DISEÑO 6-160
6.4 DISEÑO GEOMÉTRICO 6-161
6.4.1 Criterios para la localización del túnel 6-161
6.4.2 Diseño geométrico en planta 6-162
6.4.3 Diseño geométrico en perfil 6-165
6.4.4 Secciones transversales de servicio 6-166
6.4.5 Nichos 6-172
6.5 DISEÑO GEOMECÁNICO 6-177
6.5.1 Generalidades 6-177
6.5.2 Procedimiento para el diseño 6-177
6.5.3 Nomenclatura propuesta para los sistemas de soporte 6-183
6.5.4 Reporte geotécnico del diseño 6-185
6.6 DISEÑO SÍSMICO 6-187
6.6.1 Consideraciones generales 6-187
6.6.2 Consideraciones para el análisis 6-187
6.7 DISEÑO DEL ESQUEMA DE PERFORACIÓN Y VOLADURA 6-188
6.7.1 Esquema de perforación 6-189
6.7.2 Esquema de voladura 6-195
6.8 PLAN DE SEGURIDAD GEOTÉCNICA PARA CONSTRUCCIÓN 6-202
6.8.1 Generalidades 6-202
6.8.2 Contenidos del Plan de Seguridad Geotécnica para Construcción 6-205
6.8.3 Programa de monitoreo 6-205

6.8.4 Métodos de monitoreo 6-214
6.9 MEDIDAS DE SOPORTE 6-225
6.9.1 Concreto lanzado 6-225
6.9.2 Pernos de anclaje 6-226
6.9.3 Arcos metálicos o reticulados 6-227
6.9.4 Elementos dúctiles 6-227
6.9.5 Métodos auxiliares 6-227
6.10 REVESTIMIENTO DEFINITIVO EN TÚNELES Y GALERÍAS 6-234
6.10.1 Generalidades 6-234
6.10.2 Configuración para el revestimiento definitivo 6-235
6.10.3 Fundamentos de diseño del revestimiento definitivo 6-237
6.10.4 Determinación de la susceptibilidad del terreno y los materiales de construcción a cambios 6-238
6.10.5 Aspectos generales para el diseño. 6-241
6.10.6 Aspectos generales para el revestimiento 6-242
6.11 IMPERMEABILIZACIÓN Y DRENAJE 6-244
6.11.1 Generalidades 6-244
6.11.2 Impermeabilización 6-245
6.11.3 Revestimiento en galerías de rescate o de conexión 6-250
6.11.4 Sistema compartimentado 6-251
6.11.5 Instalación 6-253
6.11.6 Control de calidad 6-258
6.11.7 Drenaje 6-261
6.12 PORTALES PARA TÚNELES 6-263
6.12.1 Elementos de un portal 6-264
6.12.2 Métodos de diseño para análisis de taludes y portales 6-264
6.12.3 Factores de seguridad 6-265
6.12.4 Determinación del coeficiente de aceleración para análisis seudoestáticos 6-266
6.13 DOCUMENTOS Y ACTIVIDADES, FASE DE ESTUDIOS Y DISEÑOS 6-268
6.13.1 Estructura del Informe 6-268
6.13.2 Fase I 6-273
6.13.3 Fase II 6-275
6.13.4 Fase III 6-278
6.13.5 Etapa de construcción 6-281

7 CAPÍTULO 7 - EQUIPAMIENTO Y SISTEMAS ELECTROMECÁNICOS 7-283
7.1 GLOSARIO 7-283
7.2 ALCANCE 7-286
7.3 CONCEPTO DE SEGURIDAD 7-287
7.4 SEGURIDAD Y CUALIFICACIÓN DEL RIESGO 7-288
7.5 GEOMETRÍA DEL TÚNEL 7-291
7.5.1 Restricciones de uso del túnel 7-291
7.5.2 Medidas estructurales pertinentes para la seguridad 7-291
7.5.3 Espacio para el equipamiento 7-292
7.6 COMPONENTES ELECTROMECÁNICOS EN TÚNELES DE CARRETERAS 7-295
7.7 DEFINICIÓN DE LOS SISTEMAS ELECTROMECÁNICOS 7-295
7.7.1 Arquitectura general 7-295
7.8 SISTEMAS DE AUTOMATIZACIÓN 7-299

7.8.1 General 7-299
7.8.2 Arquitectura 7-299
7.8.3 Controladores lógicos programables (PLC) 7-302
7.8.4 Sistema Scada 7-302
7.8.5 Programación 7-304
7.8.6 Comunicación con el centro de control 7-305
7.9 SISTEMA ELÉCTRICO 7-305
7.9.1 Sistema eléctrico de media tensión 7-305
7.9.2 Sistema eléctrico de baja tensión 7-306
7.9.3 Transformadores de distribución y potencia 7-307
7.9.4 Celdas de media tensión 7-308
7.10 SISTEMAS DE VENTILACIÓN 7-310
7.10.1 Generalidades 7-310
7.10.2 Ventilación natural 7-312
7.10.3 Ventilación mecánica o forzada 7-313
7.10.4 Operación normal 7-315
7.10.5 Operación de emergencia 7-317
7.10.6 Tipo de ventilación 7-317
7.10.7 Memorias de cálculo 7-318
7.10.8 Procedimiento de cálculo de la ventilación 7-319
7.10.9 Equipamiento del sistema de ventilación 7-319
7.10.10 Tasa de liberación de calor del fuego 7-320
7.11 SISTEMAS DE SENSORES AMBIENTALES 7-320
7.11.1 CO (monóxido de carbono): 7-321
7.11.2 VIS (Visibilidad) 7-321
7.11.3 Velocidad del aire (VE), anemómetros 7-321
7.12 SISTEMAS DE ILUMINACIÓN 7-322
7.12.1 Generalidades 7-322
7.12.2 Iluminación Permanente 7-323
7.12.3 Iluminación de seguridad 7-324
7.12.4 Iluminación de evacuación 7-324
7.13 SISTEMAS CONTRA INCENDIO 7-324
7.13.1 Solución y equipamiento 7-325
7.13.2 Protección de elementos estructurales 7-326
7.13.3 Detección y alarma de incendio 7-326
7.13.4 Tuberías principales, conexiones de manguera y suministro de agua 7-327
7.13.5 Extintores portátiles contra incendio 7-327
7.13.6 Sistemas fijos contra incendio a base de agua 7-327
7.13.7 Protección de edificaciones complementarias al túnel 7-328
7.13.8 Aceptación de los sistemas contra incendio 7-328
7.13.9 Plan de emergencias 7-328
7.14 SISTEMAS DE CONTROL DE TRÁFICO 7-330

7.14.1 Equipamiento limitado....7-332
7.14.2 Equipamiento de tráfico mínimo....7-332
7.14.3 Equipamiento de tráfico básico....7-333
7.14.4 Equipamiento de tráfico extendido....7-333
7.14.5 Señales fijas....7-333
7.14.6 Señales variables....7-344
7.15 SISTEMA DE CONTROL DE GÁLIBO....7-347
7.16 CCTV Y DAI (SISTEMA DE DETECCIÓN AUTOMÁTICA DE INCIDENTES)....7-348
7.16.1 Disposición de equipos....7-349
7.16.2 DAI....7-349
7.17 SISTEMA DE TELEFONÍA SOS Y TELEFONÍA IP....7-351
7.17.1 Teléfonos de emergencia, SOS....7-352
7.17.2 Estación SOS....7-353
7.17.3 Servidor SOS....7-354
7.17.4 Cliente....7-354
7.18 SISTEMA DE MEGAFONÍA....7-354
7.18.1 General....7-354
7.18.2 Arquitectura....7-356
7.19 SISTEMA DE COMUNICACIONES Y RED DE CONECTIVIDAD....7-357
7.20 SISTEMA DE BANDEJAS PORTA CABLES....7-358
7.21 SISTEMA DE RADIO Y EMISORA....7-359
7.22 CENTRO DE CONTROL CCO....7-360
7.23 DOCUMENTOS ENTREGABLES....7-361

8 CAPÍTULO 8 - CONSTRUCCIÓN....8-363
8.1 GLOSARIO....8-363
8.2 GENERALIDADES Y ALCANCES....8-365
8.3 ACTIVIDADES DURANTE LA CONSTRUCCIÓN....8-365
8.3.1 Determinación del tipo de terreno....8-365
8.3.2 Determinación en detalle de los factores que Influencian la excavación....8-367
8.3.3 Evaluación del comportamiento del sistema....8-367
8.3.4 Comparación con los lineamientos del anteproyecto del diseño para construcción....8-367
8.3.5 Predicción del comportamiento del sistema adelante del frente de excavación....8-368
8.3.6 Verificación del comportamiento del sistema....8-369
8.3.7 Validación y documentación del diseño....8-369
8.4 ADQUISICIÓN Y MANEJO DE EXPLOSIVOS....8-369
8.4.1 Adquisición de explosivos....8-370
8.4.2 Manejo de explosivos....8-373
8.5 ASPECTOS DE LA PLANEACIÓN EN LA CONSTRUCCIÓN....8-375
8.6 ASPECTOS ORGANIZACIONALES DURANTE LA CONSTRUCCIÓN....8-376
8.6.1 Actividades de la supervisión....8-377
8.6.2 Reuniones durante la construcción....8-378
8.7 MONITOREO GEOTÉCNICO DURANTE CONSTRUCCIÓN (EVALUACIÓN E INTERPRETACIÓN)....8-379
8.7.1 Desarrollo general de desplazamientos....8-380
8.7.2 Monitoreo de desplazamientos absolutos 3D....8-380
8.8 RECOMENDACIONES PARA RETIRO DE MATERIALES DE EXCAVACIÓN....8-396
8.9 RECOMENDACIONES PARA EL REVESTIMIENTO DEFINITIVO....8-398

8.9.1 Formaletas 8-398
8.9.2 Construcción del revestimiento 8-399
8.9.3 Vaciado del concreto de revestimiento 8-399
8.9.4 Solera curva en concreto hidráulico 8-399
8.9.5 Refuerzo para el concreto de revestimiento 8-399

9 CAPÍTULO 9 - OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO 9-401
9.1 GLOSARIO 9-401
9.2 GENERALIDADES Y ALCANCES 9-402
9.3 VELOCIDAD DE OPERACIÓN Y DISTANCIA ENTRE VEHÍCULOS 9-404
9.4 DOCUMENTACIÓN MÍNIMA DE INFRAESTRUCTURA 9-405
9.4.1 Presentación del proyecto 9-405
9.4.2 Descripción del proyecto 9-405
9.4.3 Instalaciones civiles y arquitectónicas 9-405
9.4.4 Estudio de proyección del tráfico 9-405
9.4.5 Evaluación y mantenimiento de instalaciones civiles y arquitectónicas 9-406
9.4.6 Instalaciones electromecánicas 9-406
9.5 OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE SISTEMAS 9-407
9.5.1 Sistema de control de iluminación 9-408
9.5.2 Ventilación mecánica 9-409
9.5.3 Comunicación 9-410
9.5.4 Control de tráfico 9-412
9.5.5 Sistema para cierre del túnel 9-415
9.5.6 Detección de incidentes 9-416
9.5.7 Sistemas contra incendio 9-418
9.5.8 Energía eléctrica – sistema de respaldo 9-419
9.5.9 Señalización 9-420
9.5.10 Evacuación 9-422
9.6 ORGANIGRAMA DE RECURSOS HUMANOS 9-423
9.6.1 Organigrama del equipo de mantenimiento 9-423
9.6.2 Organigrama para el equipo de operación 9-424
9.7 HERRAMIENTA Y DOTACIÓN MÍNIMA PARA EL MANTENIMIENTO 9-424
9.8 ORGANISMOS EXTERNOS DE APOYO PARA LA SEGURIDAD Y OPERACIÓN 9-425

10 ANEXOS 10-427
10.1 ANEXO A – MÉTODO EXCAVACIÓN TBM 10-427

11 REFERENCIAS 11-431
11.1 BIBLIOGRAFÍA 11-431
11.2 INDICE DE TABLAS 11-441
11.3 ÍNDICE DE ILUSTRACIONES 11-1
11.4 ÍNDICE DE FOTOS 11-3

INTRODUCCIÓN

Los cambios exigidos por la globalización, producto de las gestiones políticas, económicas, financieras (multilaterales), de gobernanza, avances tecnológicos de la industria de la construcción, las comunicaciones, de la infraestructura del transporte y otros sectores económicos, tienen que articularse como dicen los entidades multilaterales de financiamiento "…*la infraestructura se planifica, se construye y se mantiene para proveer servicios de calidad adecuada que promuevan el crecimiento sostenible e inclusivo*." Esta nueva visión concibe la infraestructura como un activo que debe ser gestionado y mantenido apropiadamente e incorpora como pilares fundamentales la sostenibilidad ambiental, social y fiscal (Estrategia de infraestructura del BID, 2014, "Infraestructura Sostenible para la Competitividad y el crecimiento inclusivo").

Y es así como de los avances tecnológicos en procesos industriales y de producción de alimentos, agroindustriales, impulsados por los países desarrollados; se impacta muy fuerte en la economía, la política y las comunidades sociales en Latinoamérica, lo cual dio origen a proponer e implementar cambios estructurales en las costumbres económicas, la producción, las finanzas, la tecnología en todos los países del tercer mundo y en vía de desarrollo de Latinoamérica; donde, a partir de la década de los años noventa, Colombia se empezó abrir a la globalización, con la implementación de planes de desarrollo nacional en favor de las políticas de apertura económica (estrategia donde los países eliminan o reducen sustancialmente sus barreras y se abren al comercio internacional y a la inversión extranjera), con una visión estratégica de la apertura de mercados hacia los países desarrollados y en vía de desarrollo, dando participación más activa a los privados, en el rol de financiar la gestión de la economía y de la administración de los bienes públicos; lo que empezó a consolidar y desarrollar cambios acelerados en lo que era nuestra economía cerrada de mercado (débil, restrictiva, centralista, de poca visión e innovación tecnológica técnica, administrativa y de control), hacia Tratados de Libre Comercio - TLC; generando una apertura a la gestión de nuevas metodologías y modelos de planificación, interesándose en la formulación e implementación de planes de desarrollo nacional, regional y territorial, en la incorporación en el proceso de gestión del entorno físico y especial del territorio, en la introducción de modelos de contratación de compra, adquisición de bienes y servicios diferentes y en introducir principios ambientales, sociales y de cambio climático, en especial, siendo más participativo en la construcción de bienes públicos nacionales y territoriales.

Los anteriores antecedentes, económicos, ambientales, sociales, industriales y productivos, fueron motivo de cambios estructurales en la carta política Nacional de 1991, la cual implementó cambios en las estrategias, mejoras en la economía, en la regulación de los mercados, modelos de administración pública, avances en legislación de todos los sectores económicos, regulación del mercado de los privados en la prestación de servicio esenciales básicos, productividad de mercado y la implementación de modelos de gestión gerenciales administrativos, financieros y técnicos, capaces de mejorar la eficiencia de la gestión de las entidades, de las empresas del Estado, como respuesta a las reformas acordadas en la constitución Nacional; desde luego, esto lleva a procesos de mejora continua y cambios en la curva de aprendizaje en la administración, regulación, control del poder público ejecutivo, la legislación y regulación, generando cambios constantes en leyes, decretos, normas regulatorias, administrativas, contractuales, financieras y técnicas, que se ajustaran a las

nuevas economías de mercado, en especial a la participación más activa a las empresas privadas, la cual conlleva a la formulación, diseño e implementación de normas técnicas adecuadas al mercado internacional competitivo y en el caso específico de la industria de la construcción de bienes públicos, para el mejoramiento en los niveles de servicio y calidad de la Infraestructura de transporte, adecuando ésta, a los adelantos organizacionales, tecnológicos y normativos, hacia los procesos de la gestión desde la planeación, estructuración sostenible, diseño, construcción y operaciones; adecuadas a la mejora e intervención de los bienes públicos, de la infraestructura vial, el carretero, ferroviario, aeroportuario, marítimo y fluvial en general.

Para ver la referida curva de aprendizaje, en el conocimiento y experticia en la construcción y operación de túneles viales, que han dejado las entidades públicas, concesionarios y contratistas del país, se hace un recuento histórico, iniciando desde la misma construcción de un túnel férreo abierto por el ferrocarril de Antioquia, llamado Túnel de la Quiebra (el 7 de agosto de 1929 con 3500 m de largo, como el segundo en América Latina y el séptimo en el mundo), el país entró en la era moderna de las construcciones civiles gigantes, como las realizadas en los Estados Unidos a comienzos del siglo XX. Más adelante, en la década de 1950 y 1960 específicamente en la vía Loboguerrero – Buenaventura, se construyeron 5 túneles cortos (entre 85 m y 480 m), para comunicar el valle del rio Cauca con el Pacifico, atravesando la cordillera occidental por el cañón del río Dagua. Posteriormente se construyeron 15 túneles con longitudes entre 90 y 1.600 m en la vía Guateque, departamento de Boyacá, atravesando la cordillera oriental con la finalidad de construir la hidroeléctrica conocida como Chivor; luego, en la Década de 1970, se construyó el primer túnel de Guarne, en la carretera Medellín – Bogotá, (295 m), como también en la vía que conduce de Pasto a Popayán, departamento de Nariño, se construyeron los túneles La Llana y Peñalisa, (200 m). Entre los años 1973 y 1976 se construyó el túnel El Espejo de (180 m), en el departamento de Caldas. También, en 1975 se construyeron los primeros túneles de la vía Bogotá – Villavicencio, conocidos como Quebrada blanca.

Para ilustrar lo que originó el inicio de la apertura económica, en los años Los 90, se continuó con la construcción de túneles como; el túnel la Llorona (435 m) en la carretera que conduce de Medellín al Golfo de Urabá ;seguidamente en la carretera entre Neiva y Florencia (Huila y Caquetá) se construyeron 4 túneles con longitudes (171 y 421 m); como también en el departamento del Meta, específicamente la carretera Bogotá – Villavicencio se desarrolló la construcción de túneles de altas especificaciones técnicas innovando en los sistemas de operación. el túnel Bijagual (185 m), el túnel Argelino Durán (también conocido como el túnel del Boquerón 2405 m), así como el túnel Misael Pastrana Borrero (Buenavista), uno de los más largos en su momento con 4520 m de longitud, puesto en servicio en el año 2002, en síntesis, en el año 2002, en Colombia ya se tenían aproximadamente unos 33 túneles viales, de los cuales, éstos ya sumaban 18000 m de longitud.

Con el Inicio de las concesiones a cargo del INVIAS, INCO, ANI y con el concurso de algunos entidades regionales de departamentos del país, se continúan propiciando aceleradamente la construcción de vías con mejores especificaciones con el propósito de brindar competitividad, confort y seguridad a los usuarios de las vías principales del país, diseñando y construyendo túneles en las principales troncales y transversales en los principales corredores logísticos de oriente a occidente; atravesando las cordilleras, entre los cuales, se pueden citar en la vía Bogotá Villavicencio, en el corredor Bogotá – Ibagué – Calarcá (Boquerón –Gualanday), Armenia (varios túneles y el túnel de la Línea); la vía Buga - Buenaventura, Pasto - Chachagüí, como también varios proyectos viales a cargo del departamento de Antioquia y otros como el de Risaralda, en la década de 2010 se llevó a

cabo la construcción del puente - túnel Helicoidal, que comunica a Pereira con Manizales, ubicado en el par vial Dos Quebradas a Santa Rosa de Cabal, con 125 m de longitud, con la firma de la doble calzada de la vía Bogotá – Villavicencio, se construyeron finalmente 18 túneles viales, que se encuentran en operación (equivalentes a 14800 m).

Con la exigencia que reviste la implementación de la segunda calzada en las vías de montaña, se ha originado un impacto de crecimiento acelerados en la ingeniería de construcción de túneles, el cual ha generado mayor desarrollo de la curva de aprendizaje en conocimiento y experiencia en el diseño y construcción de túneles viales; lo que brinda una mayor confianza al interior de las entidades gestoras, INVIAS y ANI, así como algunas entidades territoriales, mejorando e intensificando altos estándares en la planeación, estructuración e implementación de proyectos de gran impacto nacional e internacional, lo cual se evidencia en el año 2014, con el programa de vías concesionadas, llamadas las "*Autopistas de 4G*", las cuales se habían programado en el proceso de estructuración, con una potencial necesidad de construir aproximadamente 153 túneles viales carreteros (equivalentes en 140000 m de longitud); que a la fecha, de mayo de 2020, el programa de las autopista de las 4G, ya prevé la construcción de 53 túneles, de los cuales 19 ya están en obra, otros 15, se hará re-perfilamiento y los restantes en estudio, túneles cada vez más seguros, dotados con equipos de alta tecnología para su monitoreo y sistemas que permiten mayor eficiencia en la movilidad.

En el mismo contexto, se citan los 6 túneles más largos de Colombia, que son una realidad, construidos en su mayoría, por obra pública, a precios unitarios o global fijo, el más largo, que se encuentra en proceso de construcción a la fecha de adopción del presente manual y otros en la etapa de operación así: el Túnel del Toyo de una longitud de (9840 m) que termina su construcción en el año 2022, ubicado en la vía Medellín- Urabá; en segundo lugar se encuentra el Túnel de La Línea, ubicado en la vía Calarcá – Ibagué, con una longitud de (8652 m), que entró en operación en septiembre de 2020 y sirvió de referente para la elaboración de este manual; en tercer lugar el Túnel de Oriente, ubicado en la vía Medellín – Rio negro, con una longitud (8229 m) entró en operación en el año 2019; el Túnel de Occidente o San Jerónimo; Ubicado en la vía Medellín - Santa Fe de Antioquia, de una longitud de (4603 m), el cual entró en operación en el año 2006; el Túnel de Buenavista o Misael Pastrana, ubicado en la vía Bogotá – Villavicencio de 4520 m., que está en operación desde 2002; Túnel Renacer, ubicado en la vía concesionada Bogotá – Villavicencio, de una longitud de 4333 m y se encuentra en operación a partir del año 2013.

En la actualidad, el Gobierno Nacional, en cabeza del Ministerio de Transporte, con el acompañamiento del Departamento Nacional de Planeación DNP y entidades ejecutoras (INVIAS, ANI), para dar respuesta a los desafíos mundiales y estratégicos de las economías de mercado, aterrizadas a nuestra realidades topográficas, ambientales, sociales, culturales, económicas, financieras y técnicas nacionales y territoriales; ha venido interactuado con las comunidades científicas, entidades nacionales, agremiaciones, empresas y universidades, implementando los conceptos de integralidad regional, accesibilidad y conectividad del territorio, para lo cual formuló y desarrolló planes sectoriales de transporte, con un concepto estructural de la integración en la infraestructura de transporte, como complemento entre los modos y medios de transporte (intermodal) y la operatividad en el transporte de las personas, vehículos, bienes, mercancías y servicios; para que se presten los contratos multimodales, que dan respuesta a la convicción del

corredor logístico, que da paso a una infraestructura competitiva, que se fundamenta en tres factores interdependientes: la gestión logística, el servicio de transporte de la carga y el estado de la infraestructura, implicando a una disminución del tiempo de operación del vehículo, haciendo que éste sea más productivo y haga más viajes, lo cual incide en la distribución de los costos fijos y la consecuente disminución de los costos de transporte; adicionalmente, se reemplazan las vías con pendientes pronunciadas y curvas de radio reducido, por viaductos y túneles, vías con mayor nivel de servicio, mayor seguridad vial, mayor velocidad de operación, mejorando la calidad de vida de las personas, incrementando la movilidad del flujo vehicular, el comercio y el desarrollo, optimizando las comunicaciones terrestres entre las ciudades y el campo.

En general, es evidente que la modernización de la malla vial fomenta el desarrollo económico del país, dado que mejora la conectividad entre los principales centros de producción, distribución y consumo del territorio colombiano y, como un producto de políticas y estrategias concertadas, exige de la implementación de proyectos modernos de infraestructura vial en Colombia, que superen las complejas condiciones topográficas del país, con la proyección de más y mejor infraestructura, en el caso particular de Colombia, con la implementación proyectos de infraestructura vial que respondan a la estrategia del plan nacional del desarrollo Intermodal, que ha empezado cada vez más, a incorporar en un trazado óptimo de la geometría horizontal, vertical y transversal, incluyendo la implementación de obras especiales, como lo son el empleo de túneles y viaductos. Se destacan los proyectos carreteros que dan vida a los llamados Corredores Logísticos de Oriente a Occidente y viceversa, que serán los conectores de los corredores logísticos de Sur a Norte y viceversa; para los cuales se hace importante la utilización de los túneles de carretera como alternativa viable técnicamente, toda vez que la construcción de túneles viales, recorta distancias, disminuyendo el tránsito por las típicas carreteras con pendientes pronunciadas, curvas sucesivas y peligrosos abismos, que además de riesgos, también generan menor velocidad de operación, mayor revolución en los motores vehiculares y averías en los automotores. Donde se haya construido un túnel vial, allí se elimina el tránsito vehicular por pendientes pronunciadas, disminuyendo el consumo de combustible, por ende, se mitiga la emisión de material particulado contaminante del aire, siendo también los túneles viales, una alternativa ambientalmente favorable para preservar los recursos naturales en la zona de influencia, siempre a través de proyectos sostenibles que tengan un enfoque especialmente diseñado para tal fin, mitigando aún más, los impactos que estos puedan generar en su entorno.

Por tal motivo, de conformidad con el Manual de Diseño Geométrico 2008, emitido por el Instituto Nacional de Vías, en el capítulo siete, "*Diseño geométrico de casos especiales*", numeral "*7.2. Diseño geométrico de túneles*", que dice: "*En los casos en que la topografía obligue al diseño de desarrollos del eje de la vía bastante extensos y tortuosos para el cruce de accidentes geográficos como cordilleras y serranías, y como resultado de diferentes análisis de tipo técnico - económico, podrá resultar favorable la construcción de túneles viales como alternativa de diseño dentro del proyecto*", sin embargo, los túneles de carretera de longitud importante, son obras relativamente costosas tanto en construcción como en operación, por lo tanto se debe prestar mucha atención desde el comienzo del proyecto en la búsqueda de todas las optimizaciones técnicas y financieras posibles, para garantizar la calidad y la sostenibilidad del proyecto, asegurando una adecuada metodología como guía para la gestión de la planeación, el diseño, la construcción y la operación de los túneles y que esté acorde con la situación particular de los proyectos de túneles de carretera, se articulen (sin detrimento de los consignado en este manual), con las regulaciones existentes a las áreas temáticas técnicas contenidas y completarías en el manual de diseño geométrico para carreteras, diseño de Puentes CCP14, Manual de

drenaje para carreteras, Especificaciones generales de construcción de carreteras y normas de ensayo para materiales de carreteras, Guía metodológica para el diseño de obras de rehabilitación de pavimentos asfálticos de carreteras, Manual de diseño de pavimentos asfálticos para vías con bajos volúmenes de tránsito, Manual de diseño de cimentaciones superficiales y profundas para carreteras, manual de Mantenimiento de Carreteras, Manual de Gestión Vial Integral y las que la entidad continúe regulando, así como las aplicadas para zonas urbanas, que forman parte de estos nuevos proyectos de infraestructura vial. Las estructuras de este tipo demandan requerimientos mínimos que garantizan una adecuada planeación, diseño y construcción, para que, durante la fase de operación, se permita también la continuidad de la movilidad y la seguridad de los usuarios de la vía.

De acuerdo con lo anterior, el Instituto Nacional de Vías – INVIAS – presenta la actualización del documento denominado “MANUAL PARA EL DISEÑO, CONSTRUCCIÓN, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE TÚNELES DE CARRETERA PARA COLOMBIA”, el cual establece los requisitos mínimos a tener en cuenta en este sentido, buscando garantizar que los proyectos de túneles tengan una vida útil superior a 100 años, durables y estables, con costos mínimos de mantenimiento, reducida afectación al flujo vehicular, seguros y que garanticen también su correcta operación bajo condiciones de seguridad vial, sostenibilidad, eficiencia energética y diseños adecuados a las condiciones del parque automotor del país. Incluyendo, una gestión de riegos con especial énfasis en su control y seguimiento, los cuales, en algunos casos, se encuentran a cargo de la entidad o son compartidos con los contratistas ejecutores de los contratos de construcción o intervención de los túneles, de acuerdo con la modalidad contractual acordada por las entidades ejecutoras de proyectos.

Esta edición comprende los requerimientos técnicos generales y necesarios sobre aspectos de planeación, diseño, construcción, operación y mantenimiento de túneles, construidos por el método convencional, en este caso el método de perforación y voladura, y TBM. Siendo los túneles de carretera, una infraestructura vial que por sí sola, es ya una excelente alternativa ambiental, requieren de una política pública como país, visto desde la perspectiva del usuario de la vía, a través de un manual que oriente y determine que, los procesos de diseño, construcción, operación y mantenimiento de túneles de carretera, mediante el uso de energías limpias, de procesos ambientales ajustados a la norma, de la implementación de las políticas de sostenibilidad del Instituto Nacional de Vías INVIAS y la utilización de nuevas tecnologías; sea un documento guía y referente a ser implementado por los expertos, los diseñadores, las empresas constructoras y demás concesiones viales que buscan tener proyectos viales sostenibles.

Como consecuencia de la curva de aprendizaje, que se ha referido anteriormente, el Manual de diseño, construcción, operación y mantenimiento de túneles viales, se presenta como un documento dinámico, es susceptible a ser actualizado y ajustado, según sea el caso, siempre a través de los mecanismos con que cuenta el Instituto Nacional de Vías INVIAS, como es el caso del Comité Técnico del Instituto, creado bajo la Resolución 6689 de 2019. Los aspectos no tratados en el presente Manual en un momento dado, no pueden limitar la aplicación obligatoria de la Normatividad Regional, Nacional o Internacional, por tal motivo y para cualquier caso y en este mismo sentido, se deberá emplear la norma más reciente, con sustento técnico y aval de la interventoría respectiva, toda vez que las obras

públicas requieren del cumplimiento estricto de los parámetros legales exigidos, la implementación de los más altos estándares de seguridad y la aplicación de las más eficientes normas técnicas, para garantizar de esta manera, la continua operación del túnel bajo óptimas condiciones de seguridad vial, seguridad física y comodidad de los usuarios, a través de una infraestructura ambientalmente sostenible.

La construcción de un túnel es una de las empresas más complejas en el ámbito de la ingeniería, pese a multitud de estudios y sondeos previos, nunca se tiene la certeza de qué nueva dificultad encontraremos unos metros más allá. Es, por tanto, de interés estudiar las diferentes etapas que llevan a su consecución, partiendo desde la idea de la nueva línea, decidiendo qué puntos del territorio debe conectar y por dónde pasar, hasta llegar a su construcción, analizando los diferentes fenómenos que llevan a definir los parámetros que condicionan la forma de esta infraestructura y su diseño [238].

También se trata en el Manual, los métodos de excavación de túneles y su ejecución, así como la información topográfica, geológica y geotécnica necesaria durante el proceso constructivo.

El 2 de diciembre de 2021, el Ministerio de Transporte expide la Resolución número 2021 3040058015, que adopta el documento denominado "*Manual para el Diseño, Construcción, Operación y Mantenimiento de Túneles de Carretera para Colombia*", el cual hace parte integral de dicha resolución y cuyo alcance se relaciona en el capítulo 1, numeral 1.1. del presente manual.

1 Capítulo - MARCO NORMATIVO Y REGULATORIO

1.1 Alcance y objetivos del manual

El manual comprende los requerimientos generales y necesarios para la gestión de planeación, diseño, construcción, operación y mantenimiento de túneles, que abarca los lineamientos generales y las pautas a implementar por parte de las entidades públicas de orden nacional y territorial, cuando en sus proyectos se incluyan túneles viales de carretera. Con esto se pretende lograr que la gestión de planeación, el diseño, la ejecución y la operación de proyectos viables ostenten un equilibrio técnico-económico y se adelanten con los más altos estándares en términos de seguridad, eficiencia y sostenibilidad.

Foto 1-1 Túnel de la Línea, Proyecto Cruce de la Cordillera central 2020

Aunque este manual define y establece los aspectos de obligatorio cumplimiento para determinadas áreas (gestión, investigación, exploración, diseño, construcción equipamiento, sistemas electromecánicos de túneles, valoración y mitigación del riego contingente), también plantea y permite adelantar alternativas que deben definirse de manera específica en el diseño y ejecución de cada etapa del proyecto a desarrollar, y, en aquellos casos donde se presenten aspectos diferentes a los aquí tratados, éstos serán puestos a consideración de la interventoría respectiva y aprobados con el pertinente sustento técnico.

Los criterios consignados en el presente Manual, contienen una síntesis de teorías comprobadas y experiencias exitosas en los proyectos más recientes, obtenidas en los

ámbitos nacional e internacional, que primordialmente deben ser seguidas por parte de las entidades públicas de orden nacional y territorial en sus proyectos; sumado a esto, se requiere también apoyar esta gestión, con la aplicación del conocimiento profesional, el juicio ingenieril y la experiencia en cada una de las áreas que lo conforman.

1.2 Consideraciones

El presente manual, parte de las siguientes premisas:

- Quienes aplican el presente Manual, son profesionales calificados, con conocimientos y amplia experiencia en gestión, estudios, diseño, construcción, operación y mantenimiento de túneles de carretera.
- La gestión, la planeación, la recolección de datos, el diseño, la valoración y mitigación del riesgo contingente y la ejecución de los procesos constructivos de Túneles, son realizados por personal calificado idóneo y experimentado en cada tema.
- Existe una comunicación apropiada entre las partes involucradas en las etapas de proyectos de túneles de carretera, buscando integralidad de criterios en favor de un solo objetivo general.
- Los lectores conocen las normativas vigentes, las cuales son complementarias y aplicables a este manual en todo momento.

1.3 Organización del manual

El manual se ha organizado en nueve (9) capítulos, a saber:

- CAPÍTULO 1. MARCO NORMATIVO Y REGULATORIO: Define los alcances del manual; esto incluye las principales leyes, decretos y normatividad vigente en el ámbito nacional que fueron tomadas como referencia para su elaboración, las cuales deben consultarse para temas específicos que no contemple el documento.
- CAPÍTULO 2. DEFINICIONES: Incluye las definiciones para las fases de un proyecto (las definiciones de términos específicos se presentan en el inicio de cada capítulo).
- CAPÍTULO 3. GESTIÓN DEL RIESGO: En este capítulo se describen de manera general, los conceptos fundamentales sobre la amenaza, la vulnerabilidad y en general la gestión de riesgos particularmente en túneles. Así entonces, se pueden identificar los principales riesgos atribuibles a la gestión, planeamiento, estudios, diseño, construcción, operación y mantenimiento de obras viales subterráneas; y se describe cuál es el esquema para priorizar los riesgos en proyectos de túneles en Colombia y las medidas de intervención más indicadas, todo esto al amparo de la Ley 1523 de 2012 y metodologías internacionales.
- CAPÍTULO 4. SOSTENIBILIDAD: Describe los criterios y lineamientos de sostenibilidad en la gestión de proyectos de infraestructura de transporte a cargo del

Instituto, en las diferentes fases de construcción de proyectos de infraestructura de túneles viales, desde los ámbitos de la Gestión Ambiental, Gestión Predial y Gestión Social

- CAPÍTULO 5. EXPLORACIÓN E INVESTIGACIÓN: Describe las actividades y normativas que rigen los trabajos de exploración e investigación para cada etapa del proyecto. El capítulo incluye los lineamientos para la consecución del modelo Geológico y Geotécnico del terreno.
- CAPÍTULO 6. DISEÑO: Define el alcance y los contenidos mínimos de los estudios y diseños definitivos, que deberán tenerse en cuenta en cada una de las fases del proyecto. Se incluyen los aspectos relacionados con el diseño de los esquemas de perforación y voladura, diseño geométrico, los diseños geomecánicos, el diseño del plan de seguridad geotécnica, el diseño de revestimiento definitivo y taludes en zonas de los portales.
- CAPÍTULO 7. EQUIPAMIENTO Y SISTEMAS ELECTROMECÁNICOS: Define el alcance y contenidos mínimos de los diseños electromecánicos y de equipamiento. En el capítulo se explicitan la disposición de los sistemas y aquellas obras de carácter civil que son requeridas para el óptimo funcionamiento y previsiones desde la etapa de diseño.
- CAPÍTULO 8. CONSTRUCCIÓN: Expone los lineamientos y asuntos organizacionales durante la etapa de construcción; incluye los aspectos a seguir para la evaluación y ajustes menores del diseño durante la construcción, el método convencional de excavación, en este caso el método de perforación y voladura, y TBM para la construcción del túnel, así como los demás aspectos a tener en cuenta en las demás etapas de construcción.
- CAPÍTULO 9. OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO: Establece las actividades y rutinas necesarias para la adecuada operación y mantenimiento del túnel.

1.4 Leyes, decretos y normatividad nacional

En las etapas que conforman un proyecto de túneles, se deben tener en cuenta, las leyes y normas existentes en Colombia, las cuales se relacionan en el presente Manual, de forma directa o indirecta con proyectos de túneles. Habida cuenta de lo anterior, a continuación, se relacionan los decretos, leyes, resoluciones, documentos y normas establecidos y de aplicación nacional que deberán tenerse en cuenta al acometer un proyecto de túneles viales de carretera.

1.4.1 Ley Colombiana para Infraestructura vial

A continuación, una compilación de las Leyes expedidas por el Congreso de la República (ver Tabla 1-1), en ejercicio de las competencias constitucionales de las que es titular, en este caso, para referirse a la Infraestructura vial, como disposición es, principios y políticas de obligatorio cumplimiento en nuestro país.

Nombre o alcance de la Ley	N°	Año	Etapa en que incide	Incidencia en etapas de diseño, construcción, y operación de túneles viales de carretera
Por la cual el Congreso de la República, dicta Medidas Sanitarias.	9	1979	Diseño, construcción y operación	• Ley que dicta medidas en protección del Medio Ambiente, suministro de agua, salud ocupacional, saneamiento, alimentos, medicamentos, vigilancia y control epidemiológico, desastres, y otros relacionados con la salud, que inciden directamente en el manejo y control de los recursos involucrados en los proyectos de ingeniería.
Se dictan disposiciones básicas sobre el transporte, se redistribuyen competencias y recursos entre la Nación y las Entidades Territoriales, se reglamenta la planeación en el sector transporte y se dictan otras disposiciones	105	1993	Diseño	• Por ser los túneles parte de la infraestructura de transporte a cargo de la nación, se rigen por esta ley. En la etapa de diseño se deben considerar las especificaciones de la red nacional de carreteras con algunas excepciones, las cuales serán claramente especificadas en este documento. • Planes de expansión de la red de transporte a cargo de la Nación.
Disposiciones generales para los modos de transporte	336	1996	Operación	La seguridad, especialmente la relacionada con la protección de los usuarios.
Se establecen mecanismos de integración social de las personas con limitación y se dictan otras disposiciones	361	1997	Diseño y operación	Según lo establecido por esta ley, se debe evitar toda clase de barreras físicas en el diseño y ejecución de las vías y espacios públicos. Debe ser considerada para establecer las condiciones de accesibilidad para la evacuación en situación de emergencia.
Manejo de explosivos	334	2002	Diseño y operación	Por el cual se establecen normas en materia de explosivos.
Código Nacional de Tránsito terrestre	769	2002	Operación	Prohibición de peatones al interior de los túneles (Artículo 58).
Se introducen medidas para la eficiencia y la transparencia en la Ley 80 de 1993 y se dictan otras disposiciones generales sobre la contratación con Recursos Públicos.	1150	2007	Proceso de contratación	Debe ser tenida en cuenta en la etapa de participación en los procesos de contratación, según sea la modalidad de la misma.
Reforma la Ley 769 de 2002	1383	2010	Diseño y operación	• Ámbito de aplicación y principios de la Ley 769 de 2002. • Demarcación y señalización vial.
Establece el régimen jurídico de las Asociaciones Público Privadas, se dictan normas orgánicas de presupuesto y otras disposiciones.	1508	2012	Estructuración de proyectos	Estructuración de proyectos por parte de agentes privados en las etapas de prefactibilidad y factibilidad.

Tabla 1-1. (a) Leyes colombianas aplicables a proyectos de infraestructura vial

Nombre o alcance de la Ley	N°	Año	Etapa en que incide	Incidencia en etapas de diseño, construcción, y operación de túneles viales de carretera
Política nacional de gestión del riesgo de desastres y sistema nacional de gestión del riesgo	1523	2012	Estructuración de proyectos	Estructuración de proyectos por agentes privados, en las etapas de prefactibilidad y factibilidad.
Medidas y disposiciones para proyectos de infraestructura de transporte	1682	2013	Diseño, construcción y operación	Disposiciones generales, principios y políticas de la infraestructura del transporte. Disposiciones especiales en materia de contratación de infraestructura de transporte. Gestión y adquisición predial, gestión ambiental, redes de servicios públicos domiciliarios, TIC e hidrocarburos, y permisos mineros.
Por medio de la cual se regula el Derecho Fundamental de Petición	1755	2015	Diseño, construcción y operación	Puesta en marcha de un Protocolo para el Servicio de Atención al Ciudadano, por medio del cual interesados en ejercicio de su derecho a la participación mediante la radicación de peticiones puedan establecer comunicación con el Consultor o Contratista
Modifica la ley de infraestructura y se dictan otras disposiciones.	1882	2018	Diseño, construcción y operación	Por la cual se adicionan, modifican y dictan disposiciones orientadas a fortalecer la contratación pública en Colombia, la ley de infraestructura y se dictan otras disposiciones.

Tabla 1-1 (b) Leyes colombianas aplicables a proyectos de infraestructura vial

1.4.2 Decretos Nacionales para Infraestructura vial

En la Tabla 1-2, los decretos que expide el presidente de la República, clasificados de manera general en decretos legislativos, reglamentarios y administrativos, en relación a proyectos y temas alusivos a la infraestructura vial y de transporte.

Nombre del Decreto aplicable a infraestructura vial	N°	Año
Reglamenta el Código Nacional de Tránsito Terrestre	1147	1971
Por el cual se emiten normas para el manejo de armas, municiones y explosivos.	2535	1993
Reglamento el decreto 2535 de 1993 (normas sobre armas, municiones y explosivos).	1809	1994
Establece las normas en materia de explosivos	334	2002
Por el cual se reglamenta el manejo y transporte terrestre automotor de mercancías peligrosas por carretera.	1609	2002
Reglamenta parcialmente la Ley 361 de 1997 y se encuentra compilado en el Decreto 1077 de 2015 (Decreto Único Reglamentario del Sector Vivienda, Ciudad y Territorio).	1538	2005

Tabla 1-2. (a) Decretos nacionales aplicables a proyectos de infraestructura vial

Nombre del Decreto aplicable a infraestructura vial	N°	Año
Modifica el Decreto 1467 de 2012, reglamentario de la Ley 1508 de 2012; y se encuentra compilado en el Decreto 1082 de 2015 (Decreto Único Reglamentario del Sector administrativo de planeación nacional).	2043	2014
Se corrige un yerro en el Artículo 72 de la Ley 1682 de 2013	476	2014
Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Transporte	1079	2015
Por el cual se establece el Reglamento de Seguridad en las Labores Mineras Subterráneas	1886	2015
Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Hacienda y Crédito Público	1068	2015
Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Trabajo.	1072	2015
Decreto único reglamentario del sector Defensa, para adquisición, control y manejo de explosivos en Ingeniería.	1070	2015
Por medio del cual se adoptan directrices generales para la elaboración del plan de gestión del riesgo de desastres de las entidades públicas y privadas (Artículo 42, Ley 1523/2012).	2157	2017
Por el cual se adopta el Sistema Globalmente Armonizado de Clasificación y Etiquetado de Productos Químicos y se dictan otras disposiciones en materia de seguridad química.	1496	2018
Por el cual se modifica la Parte VI "Patrimonio Arqueológico" del Decreto 1080 de 2015, Decreto Único Reglamentario del Sector Cultura.	138	2019

Tabla 1-2 (b) Decretos nacionales aplicables a proyectos de infraestructura vial

1.4.3 Resoluciones Ministerio de transporte para infraestructura vial

A continuación, en la 1-3. se relacionan las decisiones emitidas con fuerza de Resolución por parte del Ministerio de Transporte, referente a los proyectos y obras de Infraestructura vial en Colombia.

Nombre o alcance	N°	Año
Se adopta el Manual de Diseño Geométrico de Carreteras.	0744	2009
Se dicta una disposición transitoria en materia de Transporte Terrestre Automotor.	9888	2002
Se adoptan algunas medidas sobre el tránsito vehicular.	16800	2002
Se establecen el diseño y los parámetros que deben contener las vallas y demás elementos de información de las obras y proyectos de infraestructura que contrate el Instituto Nacional de Vías – INVIAS.	046	2013
Adopción del Manual de Diseño de Cimentaciones Superficiales y Profundas para Carreteras.	1049	2013

Tabla 1-3. Resoluciones emitidas por el Ministerio de Transporte.

1.4.4 Otras Resoluciones aplicables a proyectos

A continuación, en la Tabla 1-4, las decisiones emitidas con fuerza de Resolución por parte del Ministerio de Ambiente y desarrollo sostenible, Ministerio de Trabajo y Ministerio de Salud, aplicable a los proyectos y obras de Infraestructura vial en Colombia.

Nombre o alcance – Resoluciones	N°	Año
Por la cual se establecen algunas disposiciones sobre vivienda, higiene y seguridad en los establecimientos y lugares de trabajo.	2400	1979
Define los requisitos mínimos de seguridad para realizar trabajos en espacios confinados.	0491	2001
Por la cual se adoptan los manuales para evaluación de Estudios Ambientales y de seguimiento ambiental de Proyecto y se toman otras determinaciones" - Informes de cumplimiento Ambiental - ICA	1552	2005
Por la cual se acogen los términos de referencia para la elaboración del Diagnóstico Ambiental de Alternativas para proyectos puntuales y se adoptan otras determinaciones	1255	2006
Por la cual se acogen los términos de referencia para la elaboración del Diagnóstico Ambiental de Alternativas para proyectos lineales y se adoptan otras determinaciones	1277	2006
Por la cual se acogen los términos de referencia para la elaboración del Estudio de Impacto Ambiental para la construcción de carreteras y se adoptan otras determinaciones	1289	2006
Por la cual se acogen los términos de referencia para la elaboración del Estudio de Impacto Ambiental para la construcción de túneles y sus accesos y se adoptan otras determinaciones.	1283	2006
Por la cual se acogen los términos de referencia para la elaboración del Estudio de Impacto Ambiental para la construcción de vías férreas y variantes de la red férrea nacional y se adoptan otras determinaciones	1271	2006
Por la cual se acogen los términos de referencia para la elaboración de los términos de referencia para la elaboración del estudio de impacto ambiental para los proyectos de construcción de las segundas calzadas en terreno plano a semi-ondulado.	1559	2009
Por la cual se adopta la Metodología General para la Presentación de Estudios Ambientales y se toman otras determinaciones (ha sido parcialmente modificada).	1503	2010
Por la cual se establece el Reglamento de Seguridad para protección contra caídas en trabajo en alturas.	1409	2012
Por la cual se modifica y actualiza el modelo de almacenamiento geográfico (Geodatabase) contenido en la metodología general para la presentación de estudios ambientales adoptada mediante la Resolución 1503	1415	2012
Por la cual se actualiza el Manual de Seguimiento Ambiental de proyectos adoptado mediante Resolución 1552 del 20 de octubre de 2005.” - Geodatabase de los Informes de cumplimiento Ambiental – ICA	188	2013
Por la cual se adoptan los términos de referencia para la elaboración del Estudio de Impacto Ambiental-EIA, requeridos para el trámite de la licencia ambiental de los proyectos de construcción de carreteras y/o de túneles con sus accesos y se toman otras determinaciones	0751	2015
Por la cual se modifica parcialmente la Resolución número 898 de 2014 que fija normas, métodos, parámetros, criterios y procedimientos para la elaboración de avalúos comerciales requeridos en los proyectos de infraestructura de transporte a que se refiere la Ley 1682 de 2013.	316	2015
Por la cual se modifica y consolida el Modelo de almacenamiento Geográfico contenido en la Metodología General para la presentación de Estudios Ambientales y en el Manual de Seguimiento Ambiental de proyectos.	2182	2016
Por la cual se reglamenta la gestión integral de los residuos generados en las actividades de Construcción y Demolición (RCD) y se dictan otras disposiciones	472	2017

Tabla 1-4. (a) Otras Resoluciones aplicables a proyectos

Nombre o alcance – Resoluciones	N°	Año
Por la cual se adopta la norma de calidad del aire ambiente y se dictan otras disposiciones.	2254	2017
Por la cual se adoptan los términos de referencia para la elaboración del Diagnóstico Ambiental de Alternativas–DAA, en proyectos lineales de infraestructura de transporte (vías carreteras y líneas férreas, incluyendo túneles) y se toman otras determinaciones	1258	2018
Por la cual se adopta la Metodología para la Elaboración y Presentación de Estudios Ambientales y se toman otras determinaciones (modificó parcialmente la Res 1503 / 2010).	1402	2018
Por la cual se establecen fechas para la presentación de Informes de Cumplimiento Ambiental en el marco del proceso de seguimiento ambiental de proyectos de competencia de la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales y se dictan otras disposiciones	77	2019
Metodología para valoración de obligaciones contingentes y el cálculo de los aportes al fondo de contingencias de las Entidades Estatales.	4859	2019

Tabla 1-4 (b) Otras Resoluciones aplicables a proyectos

1.4.5 Marco jurídico en materia de Sostenibilidad

En este numeral, se relaciona de manera especial, el marco Jurídico en materia de sostenibilidad, conforme se muestra en la Tabla 1-5, como uno de sus fundamentos.

Nombre o alcance	N°	Año
Por el cual se modifica la estructura del Instituto Nacional de Vías (INVIAS) y se determinan las funciones de sus dependencias.	Dec. 2618	2013
Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible.	Dec.1076	2015
Establecer las directrices para la gestión del cambio climático en las decisiones de las organizaciones públicas y privadas.	Ley 1931	2018
Plan Nacional de Desarrollo 2018-2022: “Pacto por Colombia, Pacto por Equidad”.	Ley 1955	2019
Política de sostenibilidad del INVIAS para la infraestructura del transporte.	Res. 405	2019

Tabla 1-5. Marco Jurídico Nacional en materia de Sostenibilidad

1.4.6 Manuales y reglamentos para infraestructura vial

Los Manuales, Reglamentos, Guías y demás especificaciones aplicables al tema de gestión, estudios, diseños, construcción, operación y mantenimiento de túneles viales que trata la Tabla 1-6, se complementan con el presente manual.

Nombre o alcance	Entidad
Manual de Diseño Geométrico.	INVIAS
Manual de Drenajes.	INVIAS
Manual de Señalización.	Ministerio de Transporte
Manual de Accesibilidad.	Ministerio de Transporte
Guía de Manejo Ambiental.	INVIAS
Especificaciones Generales de Construcción.	INVIAS
Manual de diseño de pavimentos de concreto para vías con bajos, medios y altos volúmenes de tránsito.	INVIAS
Manual de interventoría de obra publica	INVIAS
Manual de contratación	INVIAS
Volúmenes de Tránsito.	INVIAS
Manual de Gestión Vial Integral.	INVIAS
Guía de adquisición de Explosivos y accesorios de voladura	Ministerio de la protección social
Guía Técnica de Seguridad para el Uso y manejo de explosivos en voladuras bajo tierra y a cielo abierto.	Ministerio de Trabajo
Normas Técnicas Colombianas – NTC.	Icontec
Estudio de impacto ambiental para explotación de materiales de construcción.	Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial
Estudio de impacto ambiental: Proyectos de túneles y sus accesos. términos de referencia.	Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial
Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público (RETILAP [143]).	Ministerio de Minas y Energía
Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE).	Ministerio de Minas y Energía
Lineamientos de Infraestructura Verde Vial para Colombia LIVV	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible – Ministerio de Transporte

Tabla 1-6. Manuales y normas aplicables a proyectos de infraestructura vial

1.4.7 Política pública colombiana para Infraestructura vial

En la Tabla 1-7, se relacionan los documentos Conpes (Consejo Nacional de Política Económica y Social), como políticas, lineamientos y proyectos viales para Colombia.

Nombre o alcance	N°	Año
Política de Manejo de Riesgo Contractual del Estado para Procesos de Participación Privada en Infraestructura	3107	2001
Proyectos Viales bajo el esquema de Asociaciones Público Privadas: Cuarta Generación de Concesiones Viales	3760	2013
Lineamientos de Política para el desarrollo de Proyectos de Interés Nacional y Estratégicos- PINES	3762	2013
La Política de Crecimiento Verde tiene como propósito impulsar a 2030 el aumento de la productividad y la competitividad económica del país	3934	2018

Tabla 1-7. Documentos Conpes de políticas, proyectos y lineamientos aplicables

Se entenderá que, si alguno de los documentos anteriormente listados, es objeto de modificación en cualquier sentido, ya sea por derogatoria, actualización, complemento o reglamentación parcial o total, deberá tenerse en cuenta la versión más reciente aplicable y vigente al momento de ser implementada en el proyecto.

2 Capítulo - DEFINICIONES

Para asegurar que este manual sea comprendido de forma adecuada, y con el ánimo de minimizar las diferencias conceptuales entre quienes lo consulten, se presentan a continuación los principales términos empleados en el mismo. De igual manera, en este capítulo se describen, las etapas de un proyecto de túneles viales de carretera. Sin embargo, el alcance detallado de cada una de las etapas y sus entregables se indican en los capítulos respectivos.

Así mismo, se define una clasificación de túneles por su longitud, tráfico y cobertura para Colombia, la cual se tendrá como referencia en el presente manual.

2.1 Glosario

Amenaza antrópica: Peligro latente generado por la actividad humana en la producción, distribución, transporte y consumo de bienes y servicios y en la construcción y uso de infraestructura y edificios. Comprenden una gama amplia de peligros como lo son las distintas formas de contaminación de aguas, aire y suelos, los incendios, las explosiones, los derrames de sustancias tóxicas, los accidentes en los sistemas de transporte, la ruptura de presas de retención de agua, etc. (Lavell, 2007). (Tomado de la Terminología sobre Gestión del Riesgo – UNGR)

Amenazas concatenadas o complejas: La probable ocurrencia de una serie o secuencia de dos o más fenómenos físicos peligrosos donde uno desencadena el otro, sucesivamente. Un ejemplo se encuentra en la forma en que un sismo puede causar la ruptura de presas y diques, generando inundaciones que rompen líneas de transmisión de productos volátiles o contaminantes con repercusiones directas en los seres humanos u otras especies de fauna o flora (Lavell, 2007). (Tomado de la Terminología sobre Gestión del Riesgo – UNGR)

Amenaza natural: Peligro latente asociado con la posible manifestación de un fenómeno físico cuya génesis se encuentra totalmente en los procesos naturales de transformación y modificación de la tierra y el ambiente- por ejemplo, un terremoto, una erupción volcánica, un tsunami o un huracán y que puede resultar en la muerte o lesiones a seres vivos, daños materiales o interrupción de la actividad social y económica en general. Suelen clasificarse de acuerdo con sus orígenes terrestres, atmosféricos, o biológicos (en la biosfera) permitiendo identificar entre otras, amenazas geológicas, geomorfológicas, climatológicas, hidrometeorológicas, oceánicas y bióticas (Lavell, 2007). (Tomado de la Terminología sobre Gestión del Riesgo – UNGR)

Amenaza socio-natural: Peligro latente asociado con la probable ocurrencia de fenómenos físicos cuya existencia, intensidad o recurrencia se relaciona con procesos de degradación o trasformación ambiental y/o de intervención humana en los ecosistemas. Ejemplos de estos pueden encontrarse en inundaciones y deslizamientos resultantes de, o incrementados o influenciados en su intensidad, por procesos de deforestación y deterioro de cuencas; erosión costera por la destrucción de manglares;

inundaciones urbanas por falta de adecuados sistemas de drenaje de aguas pluviales. Las amenazas socio-naturales se crean en la intersección del ambiente natural con la acción humana y representan un proceso de conversión de recursos naturales en amenazas. Los cambios en el ambiente y las nuevas amenazas que se generan con el Cambio Climático Global son el ejemplo más extremo de la noción de amenaza socio-natural. Las amenazas socio-naturales mimetizan o asuman las mismas características que diversas amenazas naturales (Lavell, 2007.). (Tomado de la Terminología sobre Gestión del Riesgo – UNGR)

Análisis de riesgos: Proceso de comprender la naturaleza del riesgo para determinar el nivel de riesgo, es la base para la evaluación de riesgos y las decisiones sobre las medidas de reducción del riesgo y preparación para la respuesta. Incluye la estimación del riesgo (ISO/IEC, 2009). (Tomado de la Terminología sobre Gestión del Riesgo – UNGR)

Carretera: obra de infraestructura del transporte cuya finalidad es permitir la circulación de vehículos en condiciones de continuidad en el espacio y el tiempo, con niveles adecuados de seguridad y de comodidad. Puede estar constituida por una o varias calzadas, uno o varios sentidos de circulación o uno o varios carriles en cada sentido, de acuerdo con las exigencias de la demanda de tránsito y la clasificación funcional de la misma.

Código de construcción: Una serie de ordenamientos o reglamentos relacionados con estándares que buscan controlar aspectos de diseño, construcción, materiales, modificaciones y ocupación de cualquier estructura, los cuales son necesarios para velar por la seguridad y el bienestar de los seres humanos, incluida la resistencia a los colapsos y a los daños (UNGA, 2016). (Tomado de la Terminología sobre Gestión del Riesgo – UNGR).

Consulta Previa: Mecanismo de orden constitucional y legal mediante el cual se garantiza la participación real, oportuna y efectiva de los grupos étnicos en la toma de decisiones requeridas para la ejecución de proyectos, obras o actividades que los afecten, con el fin de proteger su identidad e integridad étnica y cultural, bajo la supervisión y seguimiento de la Autoridad Competente.

Corredor: franja geográfica de ancho variable en la cual se ubican uno o varios trayectos o alternativas para la circulación del tránsito vehicular entre dos puntos conocidos.

Desarrollo sostenible: Se entiende por desarrollo sostenible el que conduzca al crecimiento económico, a la elevación de la calidad de la vida y al bienestar social, sin agotar la base de bienes y servicios ambientales renovables en que se sustenta, ni deteriorar el ambiente o el derecho de las generaciones futuras a utilizarlo para la satisfacción de sus propias necesidades (Ley 99 de 1993).

Diagnóstico ambiental de alternativas - DAA: El diagnóstico ambiental de alternativas (DAA), tiene como objeto suministrar la información para evaluar y comparar las diferentes opciones que presente el peticionario, bajo las cuales sea posible desarrollar un proyecto, obra o actividad (Ley 1076 art. 2.2.2.3.4.1).

Estudio de impacto ambiental - EIA: es el instrumento básico para la toma de decisiones sobre los proyectos, obras o actividades que requieren licencia ambiental y se exigirá en todos los casos en que se requiera licencia ambiental de acuerdo con la ley (Ley 1076 art. 2.2.2.3.5.1).

Escenario de riesgo: Son fragmentos o campos delimitados de las condiciones de riesgo del territorio presentes o futuras, que facilitan tanto la comprensión y priorización de los problemas como la formulación y ejecución de las acciones de intervención requeridas. Un escenario de riesgo se representa por medio de la caracterización y/o análisis de los factores de riesgo, sus causas, la relación entre las causas, los actores causales, el tipo y nivel de daños que se pueden presentar, la identificación de los principales factores que requieren intervención, así como las medidas posibles a aplicar y los actores públicos y privados que deben intervenir en la planeación, ejecución y control de las líneas de acción. (Tomado de la Terminología sobre Gestión del Riesgo – UNGR).

Estado de esfuerzos: Hace referencia a la condición de esfuerzos a lo largo y a la profundidad del túnel, con miras a establecer cambios o alteraciones en estos con motivo de la construcción de las excavaciones, respecto de la condición previa in-situ (Norma ASTM D7012-10).

Estudios y/o Diseños: Corresponde a documentos técnicos elaborados especialmente por Empresas Consultoras y/o Consultores independientes y/o Universidades y/o asociaciones de ingeniería reconocidas y/o agencias de diseño normalizadoras, que contienen y/o conceptualizan soluciones en temas específicos de obras de infraestructura vial. Estos documentos deberán estar fundamentos en análisis y/o investigación de carácter ingenieril, económico, social o ambiental, etc., de acuerdo con la disciplina o área técnica que se esté estudiando y cuyo de desarrollo, muy comúnmente, puede exigir la intervención multidisciplinaria de distintos especialistas, según sea el tema o temas que se estén estudiando. Los productos que hacen parte de los estudios y diseños, según sea el tema analizado, en general, comprenden textos explicativos que contienen el tema tratado, gráficos y esquemas ilustrativos, tablas explicativas y/o de resumen, fotografías, algoritmos matemáticos, memorias de cálculo y planos que permitan materializar y/o entender las soluciones recomendadas para el proyecto estudiado. En su proceso de elaboración se expone e incorporara información técnica útil en lo que respecta a un tema (s) o disciplina (s), para realizar los diseños de un proyecto, a través de técnicas y el conocimiento proveniente de las ciencias (Ley 1682 de 2013).

Estudio predial: Es el análisis y diagnóstico que se realiza sobre los predios afectados por un proyecto de infraestructura vial que tiene como componente la validación de la información jurídica, técnica y valoratoria del corredor objeto de estudio.

Evaluación de riesgos: Proceso de comparación de los resultados de análisis de riesgos con criterios de riesgo para determinar si el riesgo y/o su magnitud es aceptable, el cual ayuda a la decisión sobre las medidas de reducción del riesgo a implementar (ISO/IEC, 2009). (Tomado de la Terminología sobre Gestión del Riesgo – UNGR).

Georreferenciación: es el uso de coordenadas para ubicar espacialmente un proyecto, sitio o punto dentro de un territorio y que se puede determinar a través de diferentes sistemas de referencia geográfica.

Gestión ambiental: Se refiere a las acciones que, en forma consciente y dirigida a propósitos definidos, realice la sociedad para administrar los recursos naturales, renovables o no. Esto implica conservar, recuperar, mejorar, proteger o utilizar moderadamente los recursos naturales; orientar los procesos culturales al logro de sostenibilidad; ocupar y transformar el territorio de manera racional y sostenible; y revertir los efectos del deterioro y la contaminación sobre la calidad de vida, el estado de los ecosistemas, y la actividad económica. (Tomado de la Terminología sobre Gestión del Riesgo – UNGR)

Gestión del riesgo: Es el proceso social de planeación, ejecución, seguimiento y evaluación de políticas y acciones permanentes para el conocimiento del riesgo y promoción de una mayor conciencia del mismo, impedir o evitar que se genere, reducirlo o controlarlo cuando ya existe y para prepararse y manejar las situaciones de desastre, así como para la posterior recuperación, entiéndase: rehabilitación y reconstrucción. Estas acciones tienen el propósito explícito de contribuir a la seguridad, el bienestar y calidad de vida de las personas y al desarrollo sostenible (Ley 1523 de 2012). (Tomado de la Terminología sobre Gestión del Riesgo – UNGR).

Informe de Datos Geotécnicos (IDG) [228]: Es un documento técnico, en donde a partir del Lineamiento geotécnico, se cartografían y describen a escala local detallada (1:5000 a 1:2000), los elementos geológicos, geomorfológicos e hidrogeológicos más relevantes, con cada una de las alternativas de túneles viales. Igualmente, se describen los regímenes tectónicos prevalentes, tipos de materiales en zonas de portales e identificación preliminar de zonas de fallas geológicas, de modo de delimitar unidades geotécnicas homogéneas, principalmente en el entorno de la excavación subterránea a la cota prevista. Esta investigación incluye perforaciones, trincheras, túnel piloto, geofísica y muestreo directo para caracterización básica en laboratorio. La data obtenida se presentará en el marco del entorno geológico-geomorfológico y no incluirá una interpretación específica, sino que se presenta como información de base para el proyecto.

Informe de Diseño Geotécnico (IDiG) [228]: Es el informe que propone las condiciones geológicas – geotécnicas del lineamiento geotécnico definitivo, con miras a explorar a escala 1:1000 o mayor.

Informe de Línea Base Geotécnica (ILBG) [228]: Documento técnico definitivo en donde confluye toda la información geológica, geomorfológica geotécnica relevante para el proyecto, que puede allegarse información proveniente de distintas fuentes y NO tiene el propósito común de asignar riesgos geológicos, dado que los mismos deberán ser asumidos en función de las condiciones contractuales que finalmente se pacten entre la entidad y el contratista. El único propósito de esta información, buscará reducir a su mínima expresión las varias incertidumbres, asociadas con: (a). Aleatoriedad; (b). Dificultad en la definición; y, (c) Disponibilidad de la información, que conduzca necesariamente a la optimización del trabajo que se realiza en las fases de Estudios y Diseños.

Impacto Ambiental: Cualquier alteración en el medio ambiental biótico, abiótico y socioeconómico, que sea adverso o beneficioso, total o parcial, que pueda ser atribuido al desarrollo de un proyecto, obra o actividad.

Intervención: Corresponde al tratamiento del riesgo mediante la modificación intencional de las características de un fenómeno, con el fin de reducir la amenaza que

representa o de modificar las características intrínsecas de un elemento expuesto para reducir su vulnerabilidad (Ley 1523 de 2012). (Tomado de la Terminología sobre Gestión del Riesgo – UNGR)

Licencia Ambiental: Autorización que otorga la Entidad ambiental competente para la ejecución de un proyecto, obra o actividad, que de acuerdo con la ley y los reglamentos pueda producir deterioro grave a los recursos naturales renovables o al medio ambiente o introducir modificaciones considerables o notorias al paisaje; la cual está sujeta al cumplimiento por parte del beneficiario de está de los requisitos, términos, condiciones y obligaciones en relación con la prevención, mitigación, corrección, compensación y manejo de los efectos ambientales del proyecto, obra o actividad autorizada. La licencia ambiental llevará implícitos todos los permisos, autorizaciones y/o concesiones para el uso, aprovechamiento y/o afectación de los recursos naturales renovables, que sean necesarios por el tiempo de vida útil del proyecto, obra o actividad, expedida por la autoridad competente. El uso aprovechamiento y/o afectación de los recursos naturales renovables, deben ser claramente identificados en el respectivo estudio de impacto ambiental. La licencia ambiental debe obtenerse previamente a la iniciación del proyecto, obra o actividad. Ningún proyecto, obra o actividad requerirá más de una licencia ambiental.

Línea Base Ambiental: Caracterización físico, biótica y social del proyecto. Con esta información se logran identificar los impactos que el proyecto genera al entorno y a la comunidad. Se deja constancia de los impactos identificados sin proyecto, o correspondientes a pasivos ambientales y de las medidas a ejecutar desde el proyecto para su atención.

Lineamiento del túnel: Línea o trazado preliminar, como alternativa seleccionada por donde se realizarán los trabajos de exploración para el diseño del túnel.

Lineamiento geotécnico: se refiere al volumen de terreno comprendido por el corredor en planta a lo largo del túnel o túneles propuestos, el cual debe considerar como mínimo una faja del orden de 5 a 10 veces el diámetro medio del túnel, incluyendo en cualquier caso los accidentes topográficos y elementos geológicos – geomorfológicos e hidrogeológicos de mayor relevancia. La profundidad debe cobijar la cobertura máxima, media y mínima sobre la clave del túnel y al menos 2 a 3 veces su diámetro medio por debajo de la rasante.

Lineamientos de Infraestructura verde vial - LIVV: aquella infraestructura vial que a lo largo de todas sus etapas de desarrollo, desde la misma etapa de planeación estratégica sectorial, y durante su planeación, construcción, operación, intervención y desmantelamiento, integra consideraciones ambientales, sociales, tecnológicas y de ingeniería, con el propósito de evitar, prevenir, mitigar y corregir los potenciales impactos ambientales negativos que genera este tipo de proyectos, sean estos directos, indirectos, sinérgicos y acumulativos, generando un balance ambiental neto positivo. Elaborado en el marco de la Agenda Ambiental Interministerial suscrita entre el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (Minambiente) y el Ministerio de Transporte (Mintransporte).

Medidas de Compensación: Acciones dirigidas a resarcir y retribuir a las comunidades, las regiones, localidades y al entorno natural por los impactos o efectos negativos generados por un proyecto, obra o actividad, que no puedan ser evitados, corregidos, mitigados o sustituidos.

Medidas de Corrección: Acciones dirigidas a recuperar, restaurar o reparar las condiciones del medio ambiente afectado por el proyecto, obra o actividad.

Medidas de Mitigación: Acciones dirigidas a minimizar los impactos y efectos negativos de un proyecto, obra o actividad sobre el medio ambiente.

Medidas de Prevención: Acciones encaminadas a evitar los impactos y efectos negativos que pueda generar un proyecto, obra o actividad sobre el medio ambiente.

Medioambiente: Sistema compuesto por los elementos naturales, sociales y culturales que existen en la tierra, sus permanentes interacciones y los resultados que de ellas se derivan.

Memoria técnica para construcción: Documento a cargo del contratista, en el cual se incluyen los aspectos organizacionales (planos y esquemas de zona de campamentos, zonas de talleres, zona de patios, acometidas de servicios) necesarios durante la etapa de construcción.

Métodos de medición de estado de esfuerzos: se refiere a las técnicas y procedimientos empleados en la estimación del estado de esfuerzos, principalmente el fracturamiento hidráulico, la sobreperforación (overcoring, en inglés) y el gato plano, entre otros.

Mitigación del riesgo: Medidas de intervención prescriptiva o correctiva dirigidas a reducir o disminuir los daños y pérdidas que se puedan presentar a través de reglamentos de seguridad y proyectos de inversión pública o privada cuyo objetivo es reducir las condiciones de amenaza, cuando sea posible, y la vulnerabilidad existente (Ley 1523 de 2012). (Tomado de la Terminología sobre Gestión del Riesgo – UNGR).

Plan de manejo ambiental: Conjunto detallado de medidas y actividades derivadas de la evaluación ambiental, que están orientadas a prevenir, mitigar, corregir o compensar los impactos y efectos ambientales debidamente identificados en el desarrollo del proyecto. Se origina en el estudio de impacto ambiental.

Riesgo de desastres: Corresponde a los daños o pérdidas potenciales que pueden presentarse debido a los eventos físicos peligrosos de origen natural, socio-natural, tecnológico, biosanitario o humano no intencional, en un período de tiempo específico y que son determinados por la vulnerabilidad de los elementos expuestos; por consiguiente, el riesgo de desastres se deriva de la combinación de la amenaza y la vulnerabilidad (Ley 1523 de 2012).

Sostenibilidad Ambiental: Uso sostenible y eficiente de los recursos naturales, incluyendo la energía, el agua y los materiales necesarios para el diseño y la operación de la infraestructura, resiliencia al cambio climático, manejo y aprovechamiento de residuos, que permitan integrar soluciones eficientes que sean producto de realizar el análisis de ciclo de vida de los proyectos para limitar de manera adecuada cualquier tipo de contaminación. Finalmente, la dimensión ambiental debe tener en cuenta principios de economía circular, inclusión de nuevas tecnologías, bien sea para el uso de fuentes de energías renovables, optimización del recurso hídrico, lineamientos de

infraestructura verde vial, documentos de transporte intermodal, normas ISO de ciclo de vida de los proyectos (Equipo de Sostenibilidad – INVIAS)

Terreno: Término general para referirse al material en el que se excava el túnel.

Túnel vial: Obra subterránea de carácter lineal que comunica dos puntos para el transporte de personas o carga.

Vulnerabilidad: Susceptibilidad o fragilidad física, económica, social, ambiental o institucional que tiene una comunidad de ser afectada o de sufrir efectos adversos en caso de que un evento físico peligroso se presente. Corresponde a la predisposición a sufrir pérdidas o daños de los seres humanos y sus medios de subsistencia, así como de sus sistemas físicos, sociales, económicos y de apoyo que pueden ser afectados por eventos físicos peligrosos Ley 1523 de 2012). (Tomado de la Terminología sobre Gestión del Riesgo – UNGR).

2.2 Proyecto de túneles viales

Un proyecto de túneles viales de carretera comprende las siguientes etapas [31], [32], [33]:

- Planeación
- Estudios y diseños
- Construcción
- Operación y mantenimiento

Foto 2-1 Proyecto cruce de la Cordillera Central, Túnel Oso de Anteojos

2.2.1 Planeación

Etapa en la cual se contempla la posibilidad de incluir uno o varios túneles como parte integral de un proyecto vial para un corredor nuevo o existente. Para llevar a cabo la planeación se deberá reunir información secundaria (numeral 5.2.2), sobre tipología del proyecto, estudios de demanda, estudios económicos, estudios técnicos existentes en el área, estudios ambientales, clasificación de la vía y cualquier otro aspecto que tenga influencia de forma directa o indirecta. Lo anterior, de tal manera que la Entidad contratante pueda realizar una aproximación al alcance del proyecto, magnitud de las inversiones, costos, plazo de ejecución, entre otros aspectos.

2.2.2 Estudios y diseños

Los estudios y diseños se subdividen en tres fases, cuyos alcances se resume a continuación.

2.2.2.1 Fase I

ESTUDIOS DE PREFACTIBILIDAD: En esta fase se realiza el diseño conceptual del túnel o túneles que se estimen necesarios para el proyecto vial, con base en información secundaria (numeral 5.2.2), visitas técnicas al lugar de emplazamiento, revisión y análisis de cartografía (escala 1:10.000 o más detallada que permita la adecuada lectura de la información conforme lo requiera la autoridad ambiental) y levantamientos geológicos-geomorfológicos - geotécnicos (en igual escala). El producto final de esta fase, es el diagnóstico ambiental de alternativas (DAA), a fin de evaluar y comparar los diferentes trazados del túnel desde los puntos de vista técnico, económico, social y ambiental, conforme a la normatividad vigente y términos de referencia de la autoridad ambiental competente.

En esta fase, se describe la amenaza, conforme la condición geológica, geomorfológica, hidrogeológica, geotécnica y ambiental del área del proyecto, para ser tenida en cuenta como insumo para identificar el riesgo en la siguiente fase.

De conformidad con lo establecido en la ley de Infraestructura Ley 1682 de 2013, el objetivo de esta fase es surtir el proceso para establecer la alternativa de trazado que a este nivel satisface en mayor medida los requisitos técnicos y financieros del proyecto.

Para tal efecto, se recomiendan algunas fuentes y tipos de información técnico – científica, como información secundaria para las actividades desarrolladas en esta fase (ver numeral 5.2.2).

2.2.2.2 Fase II

ESTUDIOS DE FACTIBILIDAD: En esta fase se realizarán los estudios y diseños del túnel con información primaria, contando con levantamientos topográficos (escala 1:2.000 y 1:1000 para el área de portales) y geológicos, geomorfológicos, geotécnicos (escalas de 1:10000 a 1:5000). A partir de la Información obtenida en esta fase de estudio, se realizará evaluación técnica, económica, social y ambiental detallada,

conforme la normatividad vigente y términos de referencia de la autoridad ambiental competente.

Conforme la Ley 1682 de 2013, se podrá elaborar el estudio de impacto ambiental de acuerdo con los términos de referencia expedidos por la autoridad ambiental competente, cuyo estudio será insumo para solicitar la licencia ambiental del proyecto al finalizar la fase de factibilidad, si así lo determinan los términos del estudio del proyecto vial. Se debe tener presente que los túneles con sus accesos requieren del trámite de licencia ambiental, conforme la normatividad vigente en estos asuntos.

En esta fase se deben realizar los diseños del lineamiento definidos para el túnel, en atención a: estudios de tránsito y ventilación, evaluación de la tipología de acuerdo con la definición de la amenaza y vulnerabilidad e identificación del riesgo, estudio geológico y geotécnico del sector, modelamiento hidrogeológico (conceptual y numérico), clasificación del terreno de acuerdo con su caracterización geológica – geomorfológica - geotécnica, caracterización del macizo rocoso (estabilidad, diseño y planeación de perforación y voladura, etc.), definición de los elementos de sostenimiento, impermeabilización, revestimiento de la sección principal del túnel, obras subterráneas adicionales (cavernas, galerías, nichos, bahías, pozos, etc.), drenaje y obras superficiales (portales, estructuras del sistema de ventilación, edificio de centro de control, etc.).

Asimismo, es preciso realizar los estudios y diseños preliminares de los sistemas de seguridad del túnel ITS a implementar, ventilación, suministro de energía, Iluminación y sistema de control de iluminación, supervisión y control, comunicaciones, contra incendio, señalización y centro de control, para la cuantificación del costo de los equipos, con base en los cuales el consultor definirá las características de operación, mantenimiento de los mismos e infraestructura necesaria para su instalación (cárcamos, gabinetes, ductos y demás espacios); teniendo en cuenta los requisitos mínimos indicados en la ilustración 7-1.

En la **fase II** es esencial prever los métodos constructivos de mayor aplicación en función de los terrenos en el lineamiento geotécnico, la incidencia que estos puedan tener sobre la infraestructura, edificaciones y terrenos en su área de influencia, los mecanismos de falla más probables que pudieran presentarse, regímenes tectónicos e hidrogeológicos regionales y locales, así como, la definición del Informe de Línea Base Geotécnica **(ILBG)**, que tiene como insumo el Informe de Datos Geotécnicos **(IDG)** del sector de análisis, los cuales deben complementarse y definirse totalmente en la fase III [228].

Dentro del **ILBG** se espera contar, al menos, con información primaria relacionada con:

- Entidades y empresas fuentes de información geológica – geotécnica.
- Restricciones particulares de la información y renuncias “disclaimer” respectivos.
- Geolocalización del proyecto, considerando que se trata de estudios previos.
- Tipo y propósitos generales del proyecto; consideraciones especiales.

- Resumen de características geométricas previas (longitudes, cotas rasantes, TPD's, tipologías de terrenos esperados, secciones transversales de referencia).
- Entorno geológico – geomorfológico, a escala 1:5.000 o mayor.
- Descripción y cartografía de las unidades, sub unidades y elementos geomorfológicos, desde el punto de vista morfogenético, morfodinámico y morfométrico a escala 1:5.000 o mayor.
- Descripción de Unidades Geológicas de Superficie (UGS); origen de los depósitos.
- Definición de Unidades Geológicas de Ingeniería (UGI).
- Modelo hidrogeológico (conceptual y numérico); mapas y memorias explicativas pertinentes a esta caracterización.
- Campañas de exploración del subsuelo (directo e indirecto), ensayos decampo y laboratorio.
- Modelo de elevación del terreno (foto interpretación de sensores remotos y geomática);
- Estructuras tectónicas, contactos litológicos, columnas estratigráficas, perfiles geológicos y geomorfológicos del terreno, todo en función de interpretaciones sugeridas.
- Aspectos sobre procesos constructivos que mayor implementación, en función de las tipologías del terreno y eventuales mecanismos de falla; experiencias en proyectos cercanos o similares, con énfasis en incidentes o problemas que se hayan registrado.
- Caracterización del terreno a partir de campañas exploratorias: levantamiento y caracterización del macizo rocoso, depósitos de suelo; condiciones de meteorización o alteración; aguas sub-superficiales y subterráneas con definición previa de unidades hidrogeológicas; resultados de ensayos de campo y laboratorio; parámetros básicos de propiedades índice, físico-químicas e hidro-mecánicas a partir del muestreo y ensayos de laboratorio hidrológicos.

2.2.2.3 Fase III

ESTUDIOS DEFINITIVOS (para licitación): En la última fase se deberá realizar la ingeniería de detalle de los estudios y diseños realizados en la **Fase II**, con base en levantamientos topográficos detallados (escala 1:1.000 para el cuerpo de túnel y 1:500 en el área de portales) y cartografía geológica e hidrogeológica y geotécnica detallada (escala 1:1.000 para el cuerpo de túnel y 1:500 o 1:250 en el área de portales). Así como también se deberá realizar la presentación de los Informes finales: Informe de Datos Geotécnicos **(IDG)** y el Informe de Línea Base Geotécnica **(ILBG)** del sector de análisis [228].

Esta fase contempla el programa de seguridad geotécnico y las especificaciones particulares de construcción, de tal manera que el producto final proporcione suficiente nivel de detalle para la ejecución y cuantificación de cada actividad o ítem, y que a su vez permita la adecuada construcción del túnel.

Es preciso presentar el plan y diseño de los esquemas de perforación y voladura, por otra parte, también presentar los diseños de los sistemas de seguridad del túnel ITS

(incluyen canalizaciones, cárcamos, nichos y demás previsiones para las instalaciones seguras), tratados en **Fase II**, que deben lograr la ingeniería de detalle de construcción necesaria, para la definición de cada ítem de una manera más precisa, dejando las previsiones para futuras actualizaciones de la tecnología cuando el túnel ya esté en construcción y a portas de adquirir los equipos.

En esta etapa se debe contar con la licencia ambiental quedando plenamente definidas las actividades a realizar en el plan de manejo ambiental y los respectivos monitoreos y seguimientos, así como los requerimientos y compensaciones ambientales.

En todo caso, los estudios y diseños realizados en cada una de las fases descritas en este numeral, deberán estar armonizados y cumplir con la normatividad ambiental vigente, exigencias y requerimientos de las Autoridades Ambientales competentes.

2.2.3 Construcción

En esta etapa se materializan los estudios y se introducen ajustes menores a los diseños. A diferencia de otro tipo de estructuras civiles, el diseño final de un túnel se ajusta durante la construcción, si se requiere también, de las medidas de soporte, perforación y voladura en el proceso de excavación, con base en el monitoreo llevado a cabo esta etapa. Estos ajustes se realizan para mantener la coherencia con las condiciones y comportamiento del terreno encontrado durante la excavación. Además, se adelantan levantamientos topográficos a escala 1:1.000 para el cuerpo de túnel y escala 1:200 en el área de portales. En cuanto a la cartografía geológica y geotécnica, se deben usar escalas 1:1.000 para el cuerpo de túnel y 1:200 en el área de portales. En todos los casos deben tenerse en cuenta los requerimientos específicos de la morfología del sector, de modo tal que puedan retratarse fielmente las condiciones de excavación de los portales.

Antes de iniciar los trabajos, el contratista debe presentar la respectiva memoria técnica para construcción, que incluye entre otros aspectos como: método constructivo, tipo de materiales y sus especificaciones, programa de obra, planes de contingencia o de mitigación, plan de seguridad geotécnico ajustado, instalaciones provisionales durante la construcción, programa de salud ocupacional, plan de manejo ambiental, dando cumplimiento a todas las obligaciones ambientales establecidas por el licenciamiento.

Durante la ejecución del proyecto del túnel, el contratista debe registrar y actualizar el modelo del terreno en cada avance y de manera detallada, documentar los sistemas de soporte implementados y generar el informe final de construcción del túnel "*as-built*".

2.2.4 Operación y mantenimiento

Durante esta etapa se realizan las actividades relacionadas con el adecuado funcionamiento del túnel. Así como se describirá con más detalle en el Capítulo 9, se deben administrar y controlar los sistemas electromecánicos, de seguridad y emergencia diseñados para la estructura. También se deben ejecutar las actividades

rutinarias de mantenimiento, de tal manera que en la medida de lo posible garanticen la vida útil del proyecto que fue concebido y diseñado.

Se debe dar a conocer la metodología del proceso de seguimiento, control y monitoreo de los programas, planes y actividades establecidos por las medidas ambientales a que haya lugar durante la operación y/o el mantenimiento.

2.3 Clasificación de túneles viales

A continuación, se indica las clasificaciones de los túneles viales en Colombia, teniendo en cuenta su longitud y TPD como características principales y por cobertura según su comportamiento geomecánico, la cual se tomará de referencia para los diferentes aspectos de diseño definidos en este manual.

2.3.1 Clasificación de túneles viales por longitud y TPD

Para Colombia se tiene en cuenta la siguiente clasificación de túneles viales (véase la Ilustración 2-1), la cual aplica principalmente para efectos de definir los componentes electromecánicos de los túneles de carreteras.

Clase A:

Longitud mayor de 3.000 metros con tránsito promedio diario anual por carril (TPDA) mayor a 100 vehículos; o longitud mayor de 500 metros con TPDA mayor a 10.000 vehículos.

Clase B:

Longitud mayor de 1.000 metros y menor o igual a 3.000 metros con TPDA mayor de 100 vehículos y menor o igual a 10.000 vehículos; o longitud mayor de 500 metros y menor o igual a 3.000 metros, con TPDA mayor de 4.500 vehículos y menor o igual a 10.000 vehículos.

Clase C:

Longitud mayor de 500 metros y menor o igual a 1.000 metros con TPDA mayor de 100 vehículos y menor o igual a 4.500 vehículos; o longitud mayor de 250 metros y menor o igual a 500 metros, con TPDA mayor a 4.500 vehículos.

Clase D:

Longitud mayor de 250 metros y menor o igual a 500 metros con TPDA mayor de 100 vehículos y menor o igual a 4.500 vehículos; o longitud mayor de 100 metros y menor o igual a 250 metros, con TPDA mayor a 4.500 vehículos.

Clase E:

Longitud mayor de 50 metros y menor o igual a 250 metros con TPDA mayor de 100 vehículos y menor o igual a 4.500 vehículos.

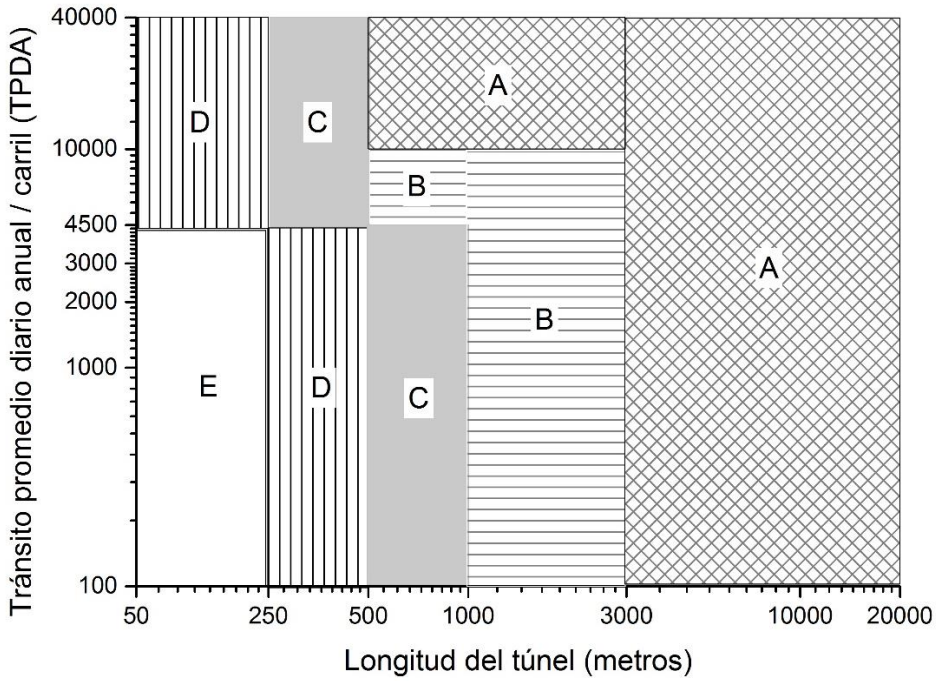


Ilustración 2-1. Clasificación de túneles viales por longitud y TPD en Colombia

2.3.2 Clasificación de túneles viales por cobertura

Desde el punto de vista de la cobertura máxima del túnel (Hmx) y para aspectos geomecánicos, los túneles pueden clasificarse en *someros* o de baja cobertura (Hmx ≤ 100 m), *semiprofundos* (100 m < Hmx ≤ 300 m) y *profundos* (Hmx > 300 m).

COBERTURA	DIMENSIÓN
someros o de baja cobertura	(Hmx ≤ 100 m)
semiprofundos	(100 m < Hmx ≤ 300 m)
profundos	(Hmx > 300 m)

Tabla 2-1. Clasificación de túneles viales por cobertura en Colombia

3 Capítulo – GESTIÓN DEL RIESGO

Todos los proyectos de túneles deben contar con un proceso de gestión de riesgos en las etapas de diseño, construcción y operación, conforme el Decreto 2157 de 2017, que aplica de igual manera a Entidades públicas y privadas. La gestión de riesgos de proyectos, busca identificar anticipadamente los eventos positivos y negativos que pueden afectar a un proyecto (alcance, tiempo costo), con el fin de incrementar su probabilidad de éxito y a la vez, mitigar y reducir el impacto que éste pueda generar en su entorno.

Foto 3-1. Proyecto Túnel del Toyo, vías mar 1 y mar 2 al occidente de Antioquia

Dentro de las regulaciones contractuales para la implementación de los proyectos de inversión, se hace obligatorio desarrollar un sistema de gestión de riesgos, el cual permite mejorar potencialmente la gestión de las empresas, especialmente en aspectos como la protección personal y material, la organización estratégica y la toma de decisiones, en especial, en todas las actividades y procesos relacionados con el desarrollo de la infraestructura de transporte. Estos estudios y regulaciones se basan generalmente en metodologías encaminadas a definir, asignar, determinar, valorar y mitigar el riesgo, dando origen a unas recomendaciones contractuales y unas matrices de asignación de riesgos, que se vuelven insumos contractuales. Estas metodologías se basan en la aplicación de la teoría de la probabilidad, para determinar la frecuencia de ocurrencia de eventos y el análisis de los posibles impactos dentro de este marco aleatorio de eventos; y se han venido implementando por las entidades públicas apropiadas e impulsadas por organizaciones financieras internacionales o nacionales, que son las que resultan financiando o regulan los cupos de la inversión pública para los proyectos de infraestructura. Según esto, se observa que las metodologías de

gestión de riesgos se han convertido en un instrumento eficiente para la mitigación de riesgo fiscal al cual se encuentra expuesto la Nación, a través de sus entidades de carácter nacional, territorial y local, según sea el caso.

3.1 Glosario

Amenaza (Art. 4 Ley 1523-2012): Peligro latente de que un evento físico de origen natural, o causado, o inducido por la acción humana de manera accidental, se presente con una severidad suficiente para causar pérdida de vidas, lesiones u otros impactos en la salud, así como también daños y pérdidas en los bienes, la infraestructura, los medios de sustento, la prestación de servicios y los recursos ambientales.

Análisis y evaluación del riesgo (Art. 4 Ley 1523-2012): Implica la consideración de las causas y fuentes del riesgo, sus consecuencias y la probabilidad de que dichas consecuencias puedan ocurrir. Es el modelo mediante el cual se relaciona la amenaza y la vulnerabilidad de los elementos expuestos, con el fin de determinar los posibles efectos sociales, económicos y ambientales y sus probabilidades.

Gerencia de riesgo: proceso global de valoración de riesgo y previsión para la reducción y control del mismo.

Gestión del Riesgo (Art. 1 Ley 1523-2012): Proceso social orientado a la formulación, ejecución, seguimiento y evaluación de políticas, estrategias, planes, programas, regulaciones, instrumentos, medidas y acciones permanentes para el conocimiento y la reducción del riesgo y para el manejo de desastres.

Incertidumbre geológica: es el grado de ignorancia, desconocimiento o falta de estudios que se tiene sobre la caracterización geológica que se debe tener del terreno en el que se construirá el túnel. Esa falta de estudios tiene importante repercusión en el planeamiento y a futuro, en el tiempo y costo final del túnel, toda vez que la falta de conocimiento del terreno, se convierte más adelante en un riesgo geológico.

Plan de gerencia de riesgo: documento que identifica los medios y métodos para el control y la revisión regular del informe de registro de riesgos de la fase de construcción del proyecto; de los peligros registrados y riesgos asociados aparecidos durante esta fase y del progreso en la reducción/mitigación del riesgo.

Riesgo: Confluencia de una amenaza y un factor vulnerable, como producto de la probabilidad de un acontecimiento entre ellos dos y de sus posibles consecuencias.

Riesgo geológico (Dec. 1068/2015): es la posibilidad de que cambios en las condiciones geológicas del proyecto, que dificulten, impidan, modifiquen o retrasen la construcción de las obras del mismo proyecto, incluyendo las que podrían ser catalogadas como complejas: por ejemplo, túneles, viaductos, puntos críticos, entre otros. Teniendo en cuenta la complejidad e incertidumbre de este riesgo, los sobrecostos se suelen compartir entre el público y el privado. Para la valoración de este riesgo también se considera una variable de corte transversal [235].

Riesgo geotécnico: es la falta de diseños adecuados, que impiden identificar las amenazas inducidas por los diversos factores geológicos, geotécnicos e hidrogeológicos durante la construcción de un túnel, y las posibles afectaciones hacia el factor vulnerable que constituyen los trabajadores, equipos y estabilidad del propio

proyecto del túnel (alcance, tiempo, costo), impidiendo, por ende, determinar las medidas tendientes a mitigar el impacto que generan. Para una adecuada identificación de los riesgos geotécnicos, se considera importante contar con un modelo que dé cuenta de los estado de esfuerzos que predominan en el entorno de la excavación subterránea, para adelantar análisis respecto de mecanismos como los desprendimientos súbitos y violentos, extrusión o empuje de terrenos, liberación de energía de deformación almacenada, desconfinamiento u otros, al igual que la identificación del régimen hídrico que la perforación induce por naturaleza.

Valoración de riesgo: Proceso de identificación de los peligros y los riesgos, asociados a la probabilidad de ocurrencia de un hecho adverso y la evaluación de sus consecuencias, que a su vez permiten la preparación de estrategias adecuadas para acciones preventivas, de contingencia y mitigación del impacto.

Vulnerabilidad: Susceptibilidad o fragilidad física, económica, social, ambiental o institucional que tiene una comunidad de ser afectada o de sufrir efectos adversos en caso de que un evento físico peligroso se presente (Ley 1523 de 2012, Art. 4 N°27).

3.2 Generalidades

En la medida en que se ha incrementado la construcción de grandes proyectos de construcción de infraestructura vial en Colombia, estos se han venido desarrollando aplicando diferentes estrategias, procedimientos, disposiciones y modalidades de selección de los contratos de obra pública, los cuales en Colombia han sido regulados por la ley de contratación general de la administración y gestión de los bienes públicos, en especial las leyes y decretos de contratación estatal. En este orden de ideas, las regulaciones más importantes corresponden a las estipuladas en la Ley 80 de 1993, la ley 1150 de 2007, y últimamente la ley 1508 de 2012 y sus decretos reglamentarios.

El Artículo 27 de la Ley 80 de 1993 de contratación estatal, Art 27 Ley 1150 de 2007, artículo 163 del Decreto 1510 de 2013 (Compilado en el Decreto 1082 de 2015) y en el Conpes 3714 de 2011, se encuentran regulados y se estipulan, los riesgos previsibles, que son todas aquellas circunstancias que de presentarse durante el desarrollo y ejecución del contrato, tienen la potencialidad de alterar el equilibrio económico del contrato, pero que dada su previsibilidad se regulan en el marco de las condiciones inicialmente pactadas en los contratos y se excluyen así del concepto de imprevisibilidad de que trata el artículo 27 de la Ley 80 de 1993. El riesgo será previsible en la medida que el mismo sea identificable y cuantificable en condiciones normales".

A partir de la Ley 448 de 1998 se reglamentó la gestión y manejo de los pasivos contingentes, dado el impacto; implícito y explícito, que dichas obligaciones pueden tener sobre las finanzas públicas del Estado. Por lo tanto, el Ministerio de Hacienda y Crédito Público, a través de la Dirección General de Crédito Público y Tesoro Nacional, diseña políticas para identificar, valorar y mitigar este tipo de obligaciones.

Por lo anterior, la Dirección General de Crédito Público y Tesoro Nacional ha asumido grandes retos en cuanto al desarrollo de metodologías para valorar los diferentes riesgos generadores de pasivos contingentes. Esta es una labor muy compleja si se considera que es necesario desarrollar modelos que estimen: las probabilidades de que ocurran las contingencias; los niveles de exposición frente a estas; el momento en el cual tendrían lugar; los plazos para el cumplimiento de las obligaciones; la cuantificación del impacto fiscal; el diseño de los mecanismos de retención y transferencia de riesgo y la adecuación de la política de riesgo contractual del Estado en la contratación pública, entre otros.

En concordancia con lo anterior, la ultima regulación relacionada con el riesgo contractual (resolución No 4859 del 23 de diciembre 2019) se recoge y compila lo relacionado a los lineamientos políticas de asunción de riesgos de los proyectos de Infraestructura, enunciados en los diferentes documentos Conpes 3107y 3133 del 2001, Conpes 3714 de 2011 , Conpes 3760 de 2013 . como también el Conpes 3760 de 2013 y las resoluciones y decretos normativos relacionado con la adopcion e implementacion de metodologia de valoracion de Obligaciones Contigentes; para lo cual trancribimos "….la implementación Adopción e implementación de las metodologías de valoración de obligaciones contingentes. Mediante la presente Resolución se adopta la metodología de valoración por concepto de las obligaciones contingentes adquiridas en Contratos Estatales de que trata el artículo 2.4.1.2.1 del Decreto 1068 de 2015. En virtud de lo anterior, la Dirección General de Crédito Público y Tesoro Nacional aprueba como parte integral de esta Resolución el documento "Metodología de valoración de obligaciones contingentes. para proyectos de infraestructura - El caso colombiano", publicado digitalmente en 2019, bajo el ISBN 978-958-59015-6-8 que implementa la metodología de valoración de obligaciones contingentes por concepto de contratos estatales en los riegos fiscales, para los cual se establecen las metodologías para la valoración de obligaciones contingentes y el cálculo de los aportes al Fondo de Contingencias de las Entidades Estatales por concepto de las obligaciones contingentes adquiridas por contratos estatales."

En terminos generales la obligacion contractual esta contenida con el Procedimiento para la valoración de obligaciones contingentes por concepto de contratos estatales en donde se identifican los factores de riesgo, Asignacion de las obligaciones contigentes, Cualificacion , Valoracion de los pasivos Contingentes , tambien define Area de Riegos, Plan de aportes al Fondo de pasivo de Contingencias en las Entidades Estatales, el Seguimiento periodico , la documentacion Minima requerida para la aprobacion de la valoracion de obligaciones contigentes, periodo de transicion, difusion de la Metodologia de Valoracion.

En lo relacionados en los proyectos de infraestructura que contiene la construccion de tuneles, puentes y sitios de inestabilidad, en esos documentos se encuentra estipulado la definicion del llamado Riesgo Geológico, que corresponde a dar la posibilidad de reconecer a los contratistas una garantía parcial, para cubrir los sobrecostos de obra derivados únicamente de riesgos geológicos. Es común en la construcción de obras de ingeniería avanzadas, tales como túneles y viaductos, en zonas inestables; para ser aplicados especialmente a los proyectos que hacen la vinculación del capital privado al desarrollo y ejecución de proyectos de infraestructura.

Es así como en la última metodología para la valoración de obligaciones contingentes y el cálculo de los aportes al Fondo de Contingencias de las Entidades Estatales,

resolución 4859 de 2019, define el riesgo geológico como "...*la posibilidad de que cambios en las condiciones geológicas del proyecto dificulten, impidan, modifiquen o retrasen la construcción de las obras del proyecto, incluyendo las que podrían ser catalogadas como complejas: por ejemplo, túneles, viaductos, puntos críticos, entre otros. Teniendo en cuenta la complejidad e incertidumbre de este riesgo, los sobrecostos se suelen compartir entre el público y el privado. Para la valoración de este riesgo también se considera una variable de corte transversal*..."

Por otra parte, la PIARC Asociación mundial de la Carretera en su último manual de túneles [234], recomienda que se realice un análisis detallado y un seguimiento de los riesgos potenciales fases de estudios y diseños (ver numeral 2.2.2) y fase de construcción, ver numeral 2.2.3, los cuales están ligados a las incertidumbres técnicas relativas fundamentalmente a la complejidad del subsuelo (incertidumbres geotécnicas).

En publicaciones técnicas, manuales y demás normatividad de países de mucha trayectoria del diseño y la construcción de túneles, se han llegado a definir estrategias contractuales que tiene la filosofía "*The traditional contracts with the unit price system, flexible quantities and a fair risk sharing profile will be needed also in the future*", el cual traduce que, "*Los contratos tradicionales con el sistema de precio unitario, cantidades flexibles y un perfil de riesgo compartido justo, serán necesarios también en el futuro*," como también han evaluado la filosofía contractual de "*Risk Sharing*" (Riego Compartido), en la que hay que analizar, estructurar y valorar muy bien las denominadas "*Ground conditions*" (condiciones del suelo incertidumbre) y el denominado Performance. En el mismo sentido, otra filosofía basada en: "*The contractor is responsible for the efficient execution of the works. He shall execute the works according to the technical specifications. He is reimbursed according to tendered unit prices for the work actually completed,* "*El contratista es responsable de la ejecución eficiente de las obras. Ejecutará las obras de acuerdo con las especificaciones técnicas. Se le reembolsa de acuerdo con los precios unitarios licitados por el trabajo realmente terminado"*; como se dijo, las anteriores filosofías contractuales, en el ámbito de los riesgos asociados a los estudios, diseño y construcción de túneles.

Ahora bien, la gestión del riesgo en Colombia está regida por la Ley 1523 de 2012 (numeral 1.4.1), como una política nacional de obligatorio cumplimiento. Allí se contemplan conceptos, lineamientos, procesos, instrumentos y disposiciones legales, indispensables para asegurar la sostenibilidad, la seguridad territorial, los derechos e intereses colectivos, mejorar la calidad de vida de la población y las comunidades en riesgo y, por lo tanto, está intrínsecamente asociada con la planificación del desarrollo seguro, con la gestión ambiental territorial sostenible, en todos los niveles de gobierno y la efectiva participación de la población (también ver artículo 42 de la ley 1523 de 2012).

A modo de conclusión, podemos inferir que resulta imperioso que todos los proyectos de túneles cuenten con un proceso de gestión de riesgos en las etapas de diseño, construcción y operación, conforme el Decreto 2157 de 2017, que aplica de igual manera a entidades públicas y privadas, teniendo en cuenta que la gestión de riesgos

de proyectos busca identificar anticipadamente los eventos positivos y negativos que pueden afectar a un proyecto con el fin de incrementar su probabilidad de éxito y a la vez, mitigar y reducir el impacto que pueda generar el proyecto en sí mismo (alcance, tiempo, costo) y en su entorno.

3.3 Incertidumbre y riesgos en los proyectos de obras subterráneas

3.3.1 Incertidumbre y riesgo

En términos generales, la incertidumbre en un proyecto de obras subterráneas, está asociada con el desconocimiento de la probabilidad de ocurrencia de un evento. Por su parte, la amenaza, se refiere al potencial probabilidad que tiene un evento de afectar los componentes de un proyecto, y pueden dar lugar a impactos no deseables. En general, las amenazas están asociadas con [1-3]:

- Seguridad y salubridad: que pueden producir pérdida de vidas de trabajadores del proyecto y de terceros.
- Ambientales: que generen contaminación del ambiente, bien sea en el aire, suelo, agua, flora y fauna.
- Financieras: que ocasione pérdidas financieras y costos adicionales no contemplados en la construcción y que están asociados con: costo de los diseños, programación de los diseños, y retrasos en la programación de la construcción.
- Impactos sobre terceros, sobre la infraestructura y otros elementos (p.e. ruinas históricas, monumentos) existentes en la superficie y debajo de esta, como edificios, puentes, túneles, carreteras, pavimentos, drenajes, canales, etc.

Como una recomendación general podemos inferir que los riesgos son eventos o condiciones que tienen un efecto positivo o negativo en los objetivos del proyecto y pueden tener causas e impactos que afectan el costo, cronograma y desarrollo del mismo. Para los administradores, diseñadores y constructores, como recomendación general, se relacionan los principales factores de asignación y valoración de riesgo en los proyectos de túneles:

- Incertidumbre geológica y geotécnica debido a una alta complejidad geológica, o insuficiente o baja calidad en la información de campo y de laboratorio en la etapa de diseño.
- Cambios en los diseños del túnel.
- Errores en los presupuestos y cronogramas del proyecto.
- Problemas ambientales asociados a la construcción del túnel.
- Cambio climático — En particular, el fenómeno de “La Niña”
- Inexperiencia del personal técnico-operativo.
- Accidentes de trabajo por incumplimiento de las normas de gestión de la salud y la seguridad en el trabajo.
- Dificultades de orden social o con los propietarios de predios y comunidades en la zona de influencia del proyecto.

Las amenazas y la gestión del riesgo se deben considerar de manera integral durante la planeación, el diseño y la construcción del túnel, con el fin de asegurar que los riesgos se reduzcan a un nivel aceptable. La responsabilidad de la gestión del riesgo se asigna a las partes que participan en el contrato, de tal forma que puedan estimarse las responsabilidades financieras de cada uno. Un sistema de gestión de riesgos es el mejor medio para documentar formalmente la identificación, evaluación y asignación de los riesgos.

3.3.2 Gestión de riesgos

Es el proceso integral y sistemático de evaluación, control y mitigación de los riesgos. Su objetivo es aumentar la probabilidad e impacto de los eventos positivos y disminuir los impactos de eventos adversos al proyecto. La gestión de riesgos consiste:

- Identificar las amenazas y las vulnerabilidades asociadas que puedan sufrir pérdida (evaluación de los riesgos), que impactan sobre los resultados del proyecto en términos de costos y programación, que a su vez afectan al ambiente y a terceros.
- Cuantificar los riesgos, incluidas sus consecuencias en la programación y los costos del proyecto.
- Identificar las acciones proactivas, buenas prácticas, planificación para el control, la reducción de los riesgos y mitigación de impactos.
- Identificar los métodos para el control de los riesgos.
- Asignar o distribuir los riesgos a las diferentes partes en el contrato.

3.3.3 Evaluación de los riesgos

Con este término se define, el proceso de identificar las amenazas y vulnerabilidades, capaces de generar condiciones de riesgo, evaluar la probabilidad de ocurrencia y los impactos potenciales, junto con las estrategias preventivas y acciones de contingencia conforme el artículo 42 de la Ley 1523 de 2012 (Tabla 1-1). Inicialmente, para hacer la evaluación se requiere analizar la probabilidad de los eventos y su impacto, y la determinación del nivel o significancia del riesgo. Los parámetros usados para la evaluación deben ser específicos de cada proyecto y propios de cada una de sus etapas.

Para cuantificar los impactos se deben describir en detalle todas las hipótesis formuladas sobre las situaciones producidas por cada evento. Posteriormente, el nivel de riesgo se obtiene como la combinación de las probabilidades y los impactos, por medio de los métodos cualitativo, cuantitativo o semicuantitativo, o bien mediante una mezcla de estos últimos. El resultado se presenta generalmente como una matriz con dos variables: impacto y probabilidad.

- La evaluación **cualitativa** radica, fundamentalmente, en priorizar los riesgos con el fin de efectuar acciones posteriores, mediante una valoración de la probabilidad de ocurrencia y el impacto sobre los objetivos del proyecto. Para obtener una adecuada confiabilidad en el análisis cualitativo de los riesgos se debe realizar un análisis acerca de la calidad de los datos sobre los riesgos seleccionados. A su vez, para evaluar la probabilidad y el impacto de cada riesgo, es necesario utilizar el juicio de expertos en particular, personas con experiencia en este tipo de valoraciones.
- La evaluación **cuantitativa** de riesgos determina la probabilidad de ocurrencia en porcentaje y el impacto en términos pecuniarios. Para realizar el análisis cuantitativo de riesgos se utilizan técnicas tales como: distribuciones de probabilidad; análisis de sensibilidad; análisis del valor monetario esperado; modelación y simulación utilizando la técnica de Montecarlo; y el juicio de expertos.

La evaluación de los riesgos en cada etapa del proyecto se debe consignar en el informe de registro de riesgos. Allí deberá indicarse claramente cuál es la parte responsable de cada uno de los riesgos identificados, de su gestión y mitigación (de acuerdo con las responsabilidades y obligaciones del contrato). Dicho informe es un documento sometido a continua revisión, que debe estar disponible para consulta en cualquier momento y debe contener trazas auditables a través de toda la vida del proyecto, que demuestren el cumplimiento del alcance, la estrategia y las políticas de gestión del riesgo. Además, allí deben estar identificadas las amenazas, los riesgos consiguientes, las medidas de mitigación y contingencia, las acciones propuestas, las responsabilidades, las fechas críticas para terminar las acciones y las fechas de cierre.

Cada proyecto de túneles tiene unas condiciones de riesgo diferentes con respecto a otro tipo de actividades, es decir factores vulnerables y amenazas diferentes, por tal motivo, debe contar con una matriz de identificación de riesgos y un plan de respuesta específico para cada caso, conforme el Decreto 2157 de 2017 (Tabla 1-2).

La Gestión del Riesgo en su contexto, se maneja secuencialmente desde el conocimiento del riesgo (análisis del riesgo), en segundo lugar la reducción del riesgo (medidas de intervención) y, dado el caso que se desencadene un evento adverso, en tercera medida está el manejo de la emergencia; por tal motivo el proceso de la Gestión del riesgo debe ser completo e integral desde el conocimiento, la reducción y el manejo, con responsabilidad, tal como lo establece en Colombia la Ley de Gestión del Riesgo (Art. 2) y bajo los quince (15) principios que trata el Artículo 3 de la precitada Ley.

En tal sentido, para caracterizar técnicamente las condiciones de riesgo en los proyectos de túneles en Colombia, se toma como referencia el Manual de Túneles de Carretera de la Asociación Mundial de Carreteras PIARC [234], donde se concibe el riesgo bajo dos enfoques diferentes de seguridad en cuanto a túneles se refiere, tomados como elementos complementarios a la ley, para la selección de sistemas de seguridad importantes:

- El enfoque **prescriptivo** (tradicional), basado en normativas técnicas de diseño, las cuales proveen especificaciones técnicas de las características de seguridad de un túnel, donde se asume un túnel como suficientemente seguro si se cumplen estas especificaciones.

- El enfoque **basado en el riesgo** (innovador), basado en un análisis de seguridad estructurado, armonizado y holístico de todo el sistema del túnel, incluyendo todas las características específicas de seguridad relevantes de un túnel individual, donde se asume un túnel y su entorno, como suficientemente seguros si se cumplen los criterios integrales de la Gestión del Riesgo predefinidos en el estudio.

Los métodos de evaluación y gestión de riesgos, representan una herramienta adicional para garantizar a los usuarios del túnel un nivel suficiente de seguridad y permiten optimizar desde el punto de vista de la rentabilidad las inversiones en seguridad del túnel en las fases de estudios y diseños (ver numeral 2.2.2) y fase de construcción ver numeral 2.2.3. En Colombia, la ley hace que sea obligatorio, que cada túnel cuente con un proceso completo de Gestión de riesgos que deberá incluir métodos para el análisis de riesgos, evaluación de riesgos (cuantitativo), reducción de riesgos (medidas de intervención) y manejo de emergencias.

Las herramientas de evaluación de riesgos se aplicarán para cada proyecto que incluya uno o varios túneles de forma independiente, tomando como referencia el túnel de mayor longitud, ya sea en fase de diseño, construcción u operación.

Como objetivos de las herramientas de evaluación de riesgos, se tienen las siguientes:

- Verificar la coherencia general del plan de seguridad y definir las decisiones de diseño en las fases de estudios y diseños (ver numeral 2.2.2) y fase de construcción ver numeral 2.2.3 (geometría del túnel, equipamiento de seguridad, entre otros.)
- Confirmar el cumplimiento de un túnel con los requerimientos mínimos de seguridad de acuerdo con las regulaciones y/o directrices existentes
- Confirmar un nivel de seguridad igual o incluso mayor, al de un túnel en caso de que los requerimientos técnicos sean obsoletos (por ejemplo, si las soluciones técnicas establecidas no se pueden lograr, o solamente se logran mediante un sobre costo que no se puede prever o se sale de los rangos establecidos).
- Escoger entre alternativas y demostrar los efectos de compensación de medidas específicas de seguridad innovadoras
- Optimizar el plan de seguridad en términos de rentabilidad

En las herramientas de evaluación de riesgos deben considerarse los valores de riesgo para todo el sistema del túnel, incluyendo todos los eventos y/o escenarios relevantes que puedan afectar la seguridad de los usuarios del túnel (método de análisis basado en el riesgo). Esto incluye, por ejemplo:

- Geometría del túnel (unidireccional o bidireccional, gradiente, sección transversal, salidas de emergencia, entre otros.)
- Equipamiento de vigilancia y seguridad del túnel (sistema de ventilación, sistemas de detección de incidentes, equipamiento de extinción de incendios, entre otros)

- Datos del tráfico y gestión (volumen de tráfico, características específicas de tráfico, frecuencia de congestión del tráfico, entre otros)
- Medidas operacionales, incluyendo respuesta de servicios de emergencia

Para estimar el riesgo para los usuarios de un túnel específico, se aplicará una metodología de evaluación de riesgos cuantitativa basada en el riesgo, incluyendo un análisis probabilístico y un análisis de consecuencias, "*Explotación de túneles de carretera*", Asociación Mundial de la Carretera PIARC [234].

En primer lugar, en el **análisis probabilístico** basado en un enfoque de árbol de eventos, se calculará la probabilidad de un conjunto de escenarios de daño, es decir, una vez identificada la amenaza, se evalúa la capacidad de daño sobre el factor que es vulnerable a sufrir pérdida.

Deberá incluir, como mínimo, los siguientes escenarios básicos de incidentes, en cada uno hay un factor vulnerable y una amenaza:

- Avería o mal funcionamiento de un vehículo causando un incendio.
- Avería o mal funcionamiento de un vehículo causando una colisión.
- Colisión de uno o varios vehículos, en la misma o diferente dirección.
- Falla en sistemas y equipos, causando incendio, fatalidades y pérdidas
- Desprendimiento de losas o sólidos presentes en la vía
- Efectos naturales y atmosféricos que afectan la operación del túnel
- Presencia de personas (manifestaciones o asonadas) y/o semovientes en la vía del túnel.

Además, el análisis del árbol de eventos abordará los tipos de vehículos relevantes (automóviles, autobuses, vehículos pesados) y diferentes tipos de escenarios de incendio, incluyendo la situación específica del tráfico (tráfico de flujo libre, tráfico congestionado, evento posterior de un incidente previo) y un conjunto de diferentes tamaños de incendio representativos de la composición del tráfico.

En segundo lugar, en el **análisis de consecuencias**, se calcularán las consecuencias (número de fatalidades) por colisiones e incendios en el túnel. Para estimar las consecuencias por escenarios de colisión (específicos o genéricos) se deben utilizar datos estadísticos cuantitativos ("*Retroalimentación de experiencias sobre seguridad en túnel*", Asociación Mundial de la Carretera PIARC [234], Comité Técnico C3.3). El análisis de consecuencias para escenarios de incendio se basará en simulaciones de flujo transiente CFD, teniendo en cuenta los factores relevantes tanto globales (movimientos de los vehículos, flotabilidad, impacto de la ventilación, etc.) como locales (sección transversal, estratificación del humo, configuración del vehículo...), que influyen en la propagación del humo. Además, se deben incluir los parámetros relevantes potencialmente afectados por las consecuencias del fuego que influyen en la salida de personas (geometría de ruta de escape, parámetros de comportamiento de las personas, efecto del humo en las personas).

Ambos análisis de probabilidad y consecuencia, deben tener en cuenta las características particulares del túnel en estudio.

La curva de riesgo de cada proyecto, así como la línea de tolerancia máxima y mínima, se deberá establecer a lo largo de las fases de estudios y diseños, conforme las condiciones particulares del mismo proyecto.

Foto 3-2. Construcción Túneles de Mulatos, comunica a los municipios de Bolombolo, La Pintada y Primavera al sur de Antioquia

Los resultados del análisis de riesgos se presentarán en un mapa, como el valor de pérdida esperado ante el riesgo que viven los usuarios del túnel (fatalidades por año en el túnel), diferenciando entre el riesgo de colisión y el riesgo de incendio, separadamente.

La **evaluación de riesgos** se realizará utilizando un enfoque relativo basado en las condiciones de referencia que representan el nivel mínimo aceptable de seguridad. Por lo tanto, si el riesgo del túnel bajo investigación excede este límite, se requiere de medidas adicionales de mitigación y reducción de riesgos con fines compensatorios.

El proceso completo de **gestión del riesgo** indica, que del análisis de riesgos surgen las medidas de intervención (planes, protocolos, programas) a manera de procesos, para mitigar y reducir cada uno de los riesgos identificados. Ahora, entendiendo que el riesgo es la confluencia de una amenaza con una vulnerabilidad y ambas ya han sido identificadas claramente, entonces las medidas de intervención referidas, deben actuar directamente en la amenaza y/o en la vulnerabilidad identificadas, así las cosas, se reduce, mitiga o elimina el riesgo.

De esta forma se establece un vínculo entre el enfoque basado en el riesgo y el enfoque prescriptivo.

Para una evaluación específica de la necesidad de restricciones al **transporte de mercancías peligrosas** a través de un túnel, se debe aplicar un modelo de riesgo específico (por ejemplo, DG-QRAM de PIARC / OCDE). Este tipo de modelos es complementario (para túneles unidireccionales o incluso con túneles paralelos, es necesaria la identificación y generación de protocolos para transporte de mercancías peligrosas).

3.3.4 Gestión de riesgos en la etapa precontractual

Una gestión de riesgos efectiva en proyectos de túneles, solo se logra cuando los procesos inician temprano desde la etapa de planeación y las fases de estudios y diseños. Además, como política de la entidad contratante, debe establecerse que, en cualquiera de las etapas del proyecto, todos los involucrados en el mismo deben tener un claro conocimiento de los procesos de gestión de riesgos [2 - 239].

Para la etapa precontractual, los pliegos de condiciones de los procesos licitatorios deben incluir las políticas de riesgo, que incluyen los lineamientos para la gestión de riesgos asociados a la construcción y el esquema indicativo de la distribución de riesgos para el proyecto. En general, en la fase precontractual, debe definirse lo siguiente [1, 2]:

- Políticas de riesgo establecidas por la entidad contratante
- Criterios o niveles del riesgo aceptable por parte de la entidad
- Evaluación cualitativa de los riesgos del proyecto y evaluación cuantitativa de los aspectos que tengan características especiales o particulares

Las políticas de riesgo deben incluir un alcance, dado por el tipo de amenazas y riesgos a considerar (numeral 3.3.1), unos objetivos y una estrategia para la gestión del riesgo, dentro de la cual se incluye la asignación o distribución de los riesgos.

Los objetivos generales para asegurar una adecuada gestión del riesgo (que puede complementarse con objetivos específicos) deben contemplar:

- Identificación de las amenazas
- Identificación de las medidas de mitigación
- Implementación de las medidas de mitigación, económicamente factibles o exigidas por las normas o regulaciones. Una medida de mitigación se considera económicamente factible cuando el riesgo se reduce al nivel más bajo posible, mediante acciones que pueden ejecutarse de forma razonable.

La estrategia para la gestión del riesgo debe incluir:

- Definición de las responsabilidades de las partes involucradas en el proyecto (entidad(es) que representa al contratante, consultores, contratistas de construcción, etc.) en la gestión del riesgo
- Evaluaciones del riesgo durante cada etapa del proyecto, de acuerdo con la información disponible
- Descripción de las actividades a desarrollar para alcanzar los objetivos en cada etapa del proyecto
- Esquema de seguimiento que debe utilizarse en las actividades de gestión de riesgos

- Especificaciones sobre el contenido y formatos que debe cumplir el informe de registro de riesgos
- Protocolos de seguimiento a las hipótesis iniciales, monitoreo, auditoría y revisión de procedimientos.

Los criterios o niveles de aceptación de riesgos deben ser [2]:

- Criterio de aceptación de riesgos para la evaluación cualitativa de los mismos
- Criterio de aceptación de riesgos para la evaluación cuantitativa de los mismos
  - Límite superior en el que el riesgo es inaceptable y debe reducirse, independientemente de los costos.
  - Límite inferior donde no se requiere una reducción adicional del riesgo.
  - Un intervalo entre los dos límites anteriores, en el cual deben implementarse medidas de mitigación económicamente factibles.

Otro aspecto que debe definirse en la etapa precontractual corresponde a la evaluación cualitativa de los riesgos, necesaria para enfocar la atención sobre los principales riesgos del proyecto y tener una base para las decisiones iniciales en los diseños. Esta evaluación debe incluir lo siguiente [2]:

- Identificación de la vulnerabilidad
- Identificación y clasificación de las amenazas.
- Análisis del riesgo
- Identificación de medidas de mitigación de riesgos
- Registro con las clases de riesgos y las medidas de mitigación para cada amenaza

3.3.5 Gestión del riesgo durante la etapa contractual

Los componentes mínimos de la gestión del riesgo en la fase contractual incluyen [2]:

- Gestión del riesgo en la preparación de los documentos de la licitación (actividades propias de la gestión del riesgo definidas en la etapa precontractual; información requerida de parte de los concursantes; y requerimientos sobre la gestión del riesgo en los pliegos de la licitación).
- Evaluación del riesgo durante la selección del contratista (evaluación de riesgos en los concursantes).
- Cláusulas contractuales para la gestión del riesgo y las medidas de mitigación pactadas entre las partes.

3.3.6 Gestión de riesgos en la etapa de construcción

En la etapa de construcción, las posibilidades de transferir los riesgos son mínimas si se considera que la asignación y distribución del riesgo fueron definidas con claridad en etapas anteriores. Por lo tanto, la estrategia usada por las partes involucradas durante

la construcción radica en disminuir la magnitud de todos los riesgos posibles, por medio de la planificación e implantación de iniciativas o tareas de reducción o eliminación del riesgo [2].

La evaluación de riesgos debe ser una actividad continua, por lo que se requiere de una periodicidad para la actualización y reporte del análisis de riesgo en la construcción de túneles, dado el cambio en las condiciones de riesgo según se estén realizando labores de excavación con sistema convencional, actividades de adecuación de la estructura del túnel, la construcción de la vía o implementación de los equipos del túnel.

A partir de lo acordado en el contrato, el contratista es el responsable del cumplimiento de la política de riesgos de la entidad contratante y en general de la Política Nacional de Gestión del Riesgo (Ley 1523 de 2012 y Decreto 2157 de 2017). Así entonces, este debe establecer un sistema de gestión de riesgos planificado, estructurado y sencillo de aplicar. A su turno, la entidad (o su representante) debe mantener activo el sistema de evaluación de riesgos y hacer la supervisión del sistema de gestión de riesgos del contratista; la atención debe dirigirse en especial a los riesgos que impliquen pérdidas económicas para la entidad contratante o retrasos en el cronograma.

3.3.7 Método observacional

El método observacional consiste en administrar, de forma integral y continua, el diseño, la construcción, el control y el monitoreo, mediante la implementación de mejoras o ajustes a las condiciones previamente definidas para el túnel durante la etapa de diseño. Estas mejoras o ajustes se implementan durante la etapa de construcción, con el fin de optimizar tiempo y recursos sin comprometer la seguridad del proyecto. El diseño inicial del túnel, si se requiere, puede ser modificado progresivamente con base en observaciones y verificaciones, hasta lograr definir las condiciones más probables del comportamiento del terreno [4 - 5]. Las incertidumbres que presenta cada túnel en su etapa de diseño, se reducen o subsanan gradualmente durante la etapa de construcción, gracias a la información real y de calidad obtenida en el terreno. No obstante, puede suceder que las condiciones encontradas durante la excavación, sean mucho peores que las asumidas por el diseñador; en este caso, el método observacional permite identificar riesgos potenciales y tomar medidas de mitigación oportunas (véase Capítulo - CONSTRUCCIÓN).

La implementación del método observacional requiere procedimientos rigurosos de supervisión geotécnica, además de control y monitoreo en el sitio, con profesionales calificados; ello permite tomar decisiones críticas a tiempo para mantener el riesgo controlado. Esto implica que el sistema solo puede implementarse cuando se elaboren, de un lado, el reporte geotécnico del diseño (numeral 6.13.4), y de otro, el plan de seguridad geotécnica (Capítulo - CONSTRUCCIÓN), con todos sus componentes.

3.4 Riesgos básicos contemplados en proyectos de túneles

La entidad o entidades que formulan, financian, viabilizan o ejecutan proyectos deben establecer los tipos y valoración de riesgos específicos para cada uno. Lo anterior por cuanto algunos riesgos pueden ser mayores en ciertos proyectos o incluso tornarse inexistentes en otros, de acuerdo con la localización geográfica, las condiciones

geológicas, socioeconómicas, de seguridad u orden público, medioambientales, históricas y arqueológicas entre otros aspectos. No procede, por lo tanto, generalizar los tipos de riesgos y su valoración.

Los riesgos para proyectos de túneles viales se describen en los siguientes numerales, los cuales han sido tomados con base en proyectos previos desarrollados por el INVIAS. Se advierte que pueden existir riesgos adicionales no incluidos aquí, los cuales deberán ser valorados y cuantificados en su momento por las entidades involucradas en el desarrollo del proyecto.

3.4.1 Riesgos en estudios y diseños

Son los riesgos asociados a la elaboración, adaptación, ajustes, actualización reglamentaria, complementación, aprobación y calidad de los estudios y diseños que resulten necesarios para el desarrollo del proyecto, en las etapas de iniciación, construcción, operación y mantenimiento, cumpliendo con las especificaciones y lineamientos del Manual de Diseño, Construcción, Operación y Mantenimiento de Túneles de Carretera o las normas complementarias.

3.4.2 Riesgo en la gestión social

Este riesgo se deriva de las actividades necesarias para presentar el proyecto a la comunidad, en las que se definen los impactos sociales y sus formas de mitigar, prevenir, controlar y compensar de acuerdo con la normatividad existente; esto incluye las gestiones con las minorías étnicas, de ser necesarias. Alude, asimismo, a las obligaciones que emanan de lo establecido en la licencia ambiental del proyecto y la implementación del respectivo plan de gestión social durante sus etapas. Esto incluye las modificaciones, adiciones, ajustes y consecución de estos documentos o nuevos licenciamientos en caso de requerirse, así como todos los demás permisos y autorizaciones de las autoridades competentes.

3.4.3 Riesgo en la gestión predial

Es el riesgo inherente al proceso técnico, jurídico y social mediante el cual se identifica el área de terreno privada o fiscal o de espacio público requerida para ejecutar el proyecto. Mediante dicho proceso se identifican los propietarios; se identifica jurídicamente la propiedad o derechos sobre dicha área (estudio de títulos); se identifica la afectación socioeconómica; se avalúa el inmueble con todas las mejoras, construcciones y cultivos que contenga y sean requeridas; y se explica formalmente al propietario sobre el interés de la Nación de adquirir la zona y el valor a pagar por la misma. Para adquirir los predios se utilizan dos mecanismos principales: la enajenación voluntaria y la expropiación judicial.

3.4.4 Riesgo en la gestión ambiental

Es un riesgo asociado a las acciones necesarias para garantizar la viabilidad ambiental del proyecto, preservar las condiciones ambientales o garantizar el cumplimiento de requerimientos que derivan de la licencia ambiental y planes asociados (plan de manejo ambiental, monitoreo y seguimiento, Calidad ambiental, contingencias, compensación, desmantelamiento y abandono), así como de permisos, concesiones, sustracciones y autorizaciones de las autoridades competentes.

En los riesgos se debe evaluar las modificaciones, adiciones, ajustes o cambios menores, consecución de documentos, cambios en los términos de referencia y metodologías para trámites ante las autoridades ambientales, análisis de oportunidad de nuevos licenciamientos, coexistencia con otros proyectos licenciados, entre otros riesgos que puedan afectar presupuestal o financieramente el proyecto, así como la oportunidad en la obtención de los instrumentos ambientales, así como el cierre y archivo definitivo dentro de los términos contractuales.

3.4.5 Riesgo en la financiación

Riesgo debido a las acciones encaminadas a la administración, consecución y disponibilidad oportuna de recursos financieros, propios o por medio de créditos en moneda interna o externa. Incluye los riesgos asociados a las fluctuaciones de las tasas de interés, plazos, tasas de cambio, ajustes por inflación y a las variaciones cambiarias y financieras por causas micro o macroeconómicas.

3.4.6 Incertidumbre geológica o riesgo geotécnico

Este riesgo es inherente a la geología y la complejidad de esta en cada zona, en cuanto a la presencia o afectación de estructuras geológicas en el macizo tales como: fallas, pliegues, estratificación o contactos geológicos, así como en las características propias de las rocas como: cementación, diaclasas y foliaciones, entre otros. En el proyecto y la construcción de túneles existen por lo tanto, incertidumbres geológico-geotécnicas [6] que dependen del nivel o alcance de la exploración geológico-geotécnica antes y durante la etapa constructiva y están relacionadas con:

- Falencias en el reconocimiento geológico, hidrogeológico y geotécnico que no permiten obtener un modelo geológico confiable del túnel.
- Variaciones en las características o localización de las formaciones geológicas estructurales, geomorfologías, fallas, o contactos geológicos, etc.
- Condiciones geotécnicas e hidrogeológicas inesperadas por la presencia de aguas subterráneas en los macizos rocosos (p.e. áreas particulares con fallas, alto caudal de agua, cavidades kársticas, etc.).
- Diferencias substanciales entre los ensayos de laboratorio y entre aquellos ejecutados en el sitio.
- Áreas donde se presentan procesos de erosión y meteorización, intrusiones mineralógicas, sistema de fallas o fallas regionales de la zona de estudio.

- Desviaciones en las mediciones, en ensayos y monitoreo, a causa de errores humanos o equipos no calibrados
- Valoraciones no objetivas o utilización de modelos geotécnicos no apropiados
- Dispersión natural (variabilidad) del comportamiento de los materiales.
- Condiciones estratigráficas especiales, para determinar los ambientes de formación (facies).
- Complejidades ambientales no previstas en toda la zona de influencia del proyecto por donde se desarrollará el túnel.

Tener presente que la incertidumbre geológica, obliga a adelantar los estudios e investigaciones pertinentes que permitan pasar a una certidumbre.

3.4.7 Riesgos en la construcción

- Licitación y negociación del contrato
  - Requerimientos establecidos en los pliegos de condiciones de la licitación o concurso
  - Evaluación de los riesgos en la valoración de las ofertas
  - Cláusulas contractuales respecto a la gestión de riesgos
- Construcción. Probabilidad de que el monto y la oportunidad del costo de la inversión y plazo de ejecución no sean los previstos por:
  - Mayores cantidades de obra
  - Aumento de costos de personal, materiales y equipos
  - Disponibilidad y calidad de los materiales
  - Disponibilidad, calidad, daño y antigüedad de los equipos utilizados y su correcta operación
  - Estudios y diseños
  - Procesos constructivos y la tecnología de construcción
  - Estabilidad de las obras ejecutadas
  - Programación de actividades
  - Variaciones en los precios de los insumos
  - Acceso y disponibilidad de las fuentes de materiales y botaderos
  - Interferencia de redes de servicios
  - Falta de coordinación entre la entidad contratante y el contratista
  - En general, todas las actividades y recursos físicos, humanos y administrativos requeridos para la ejecución del alcance del proyecto
- Riego Geológico. En los lineamientos de la política de los riegos contractuales consagrado en la ley 448 de 1998, regulado y definido en sus decretos, documentos Conpes y metodología de pasivos contingentes, inherentes a la construcción de activos viales y en especial en los túneles, hay la posibilidad de cubrir una garantía del llamado "…*Riesgo Geológico es una garantía parcial para*

cubrir los sobrecostos de obra derivados únicamente de riesgos geológicos. Es común en la construcción de obras de ingeniería avanzadas, tales como túneles y viaductos, en zonas inestables:", con el propósito de cubrir incertidumbres que se precisan en estos casos particulares; en los documentos Conpes de lineamientos de política de riesgos contractuales, estos también considera ante la posibilidad de insuficiencia en el monto de la inversión presupuestada, la garantía que se aplique a las actividades de excavación, pre soporte y soporte, durante la construcción de túneles. Por lo anterior, da resultado de poder determinar las Obligaciones Contingentes, para lo cual; el ente regulador Min hacienda, tiene determinadas unas metodologías, que tiene como objetivo general la de adoptar un procedimiento para identificar, medir, valorar y mitigar las obligaciones contingentes, como parte del proceso de gestión del riesgo en contratos estatales.

3.4.8 Riesgos por cambios regulatorios o normativos

Son los debidos a los cambios regulatorios, administrativos y legales que modifiquen de manera favorable o desfavorable los flujos financieros y el tiempo, en las actividades directamente relacionadas con el desarrollo del contrato. Se entenderá la modificación en relación con la normatividad vigente a la fecha de cierre del proceso licitatorio.

La expectativa de modificaciones normativas, así como aquellas que se encuentren en proceso de aprobación en la fecha de cierre del proceso, no serán tenidas en cuenta por no encontrarse vigentes a la fecha de cierre del proceso licitatorio.

3.4.9 Riesgos por eventos de fuerza mayor (asegurables)

Están relacionados con los impactos adversos debido a la ocurrencia de desastres naturales que afecten los bienes y equipos de propiedad del contratista y la Nación.

3.4.10 Riesgos por eventos de fuerza mayor (no asegurables)

Son los debidos a la incertidumbre de ocurrencia de actos terroristas, guerra o eventos que alteren el orden público, hallazgos arqueológicos y de minas o yacimientos.

3.4.11 Riesgos eléctricos

El uso de la electricidad en sí genera riesgos, y esto se debe tener en cuenta ya que dentro de los túneles hay ambientes agresivos con exceso de gas, vibraciones, hidrocarburos y altas temperaturas, por lo cual aumenta el riesgo de las instalaciones de potencia hacia los equipos electromecánicos, llegando a generar cortos y electrocuciones además de mal funcionamiento o daño de los equipos electromecánicos.

3.4.12 Riesgos de operación y mantenimiento

Los riesgos de operación y mantenimiento se refieren al no cumplimiento de los parámetros y especificaciones para el mantenimiento de la obra civil: costos de mantenimiento mayores a los proyectados; disponibilidad y costos de los insumos; e interrupción de la operación por responsabilidad, acto u omisión del contratista.

En este tipo de riesgos se incluyen las intervenciones por variaciones constructivas, técnicas, operativas y por aspectos geotécnicos y geológicos. Cabe anotar que debe garantizarse la estabilidad de la obra y las actividades ejecutadas en la etapa de construcción.

Para la estabilidad de la obra y todos sus sistemas debe elaborarse el análisis de riesgos estipulado en el numeral 7.4 del presente manual.

3.5 Distribución de riesgos

En Colombia, las entidades que formulan, financian, viabilizan o ejecutan el proyecto determinan cómo se distribuirán los riesgos en un proyecto específico. A este respecto existen unos lineamientos generales dictados por el Gobierno Nacional sobre el esquema de distribución de riesgos, los cuales están consignados en los documentos señalados en el numeral 1.4.

Por tanto, en cada proyecto, la entidad o entidades contratantes deberán indicar, como un componente de las políticas de riesgo, los esquemas de distribución de riesgo que regirán el contrato.

La distribución de los riesgos está relacionada con el tipo de contrato. En general, cuando el contratante realiza los diseños, los riesgos del proyecto son compartidos por las partes. Cuando existe un contrato tipo APP, la responsabilidad es asumida por el contratista, quien también está a cargo de los diseños. A este respecto, la referencia [8] contiene una importante discusión sobre el tema de los tipos de contratos y la distribución de riesgos.

También pueden consultarse publicaciones especializadas de diferentes entidades internacionales (véase una bibliografía amplia en las referencias [8 - 9]) como, por ejemplo, la Federación Internacional de Ingenieros Consultores (FIDIC) y la International Tunneling and Underground Space Association (ITA) .

3.5.1 Documentación de seguridad

Para cada túnel, se debe compilar una documentación de seguridad (“*Herramientas para la gestión de seguridad de túneles*”, Asociación Mundial de la Carretera, Comité Técnico C3.3, 2009).

Este documento es un aspecto clave para la gestión de la seguridad de un túnel vial, y debe contener toda la información relevante del túnel de forma individualizada con respecto a la seguridad de los usuarios, aspecto que debe ser verificado en las diferentes fases del desarrollo del proyecto, por los auditores.

Las demandas generales sobre los documentos de seguridad varían en función de la respectiva fase de desarrollo del proyecto del túnel: fase de diseño, fase de construcción y fase de operación.

De acuerdo con el desarrollo del proyecto en curso, el nivel de detalle de la documentación de seguridad aumenta. La documentación de seguridad debe considerarse como un documento vivo, en constante desarrollo y actualización.

En tal sentido, la seguridad en la fase de construcción del túnel en los procesos de perforación y voladura, se deben regir por el Decreto 1886 de 2015, donde se establecen las medidas de seguridad en labores Mineras bajo tierra y se dictan otras disposiciones que tienen que ver con el uso y manejo de los explosivos.

El proceso de Gestión del Riesgo permite la toma de decisiones para establecer las necesidades mínimas que garanticen la seguridad del túnel, de tal manera que sean tenidas en cuenta desde la etapa de diseño y construcción, para así obtener una infraestructura segura en su operación, por ende, el proceso de Gestión del Riesgo debe estar incluido en el proceso general del proyecto.

3.5.2 Proceso de evaluación y gestión de riesgo

El proceso de evaluación y gestión de riesgos, se desarrollará siguiendo el siguiente flujograma, tomado como referencia del Manual de Túneles de carretera de la Asociación Mundial de la Carretera - PIARC 2019) [234].

Previo a concluir el contenido del presente capítulo, se enseña el flujograma a través del cual, su puede llevar a cabo el procedimiento en una evaluación de riesgos para proyectos de túneles de carretera (ver la Ilustración 3-1), el planeamiento para reducir y mitigar los riesgos (artículo 42 de la ley 1523 de 2012), para la elaboración del informe de evaluación del riesgo, donde se muestra el ciclo que se lleva en este proceso y la respectiva retroalimentación, seguimiento, auditorias y controles, que permitan que el riesgo, el cual evidentemente existe, llegue a ser aceptable, toda vez que las medidas de intervención a implementar así lo permiten.

En síntesis, el proceso de evaluación y gestión tiene su base en el análisis del riesgo (cualitativo) y la valoración del riesgo (cuantitativo), a partir de ahí se conoce el riesgo (conocimiento), se procede con el diseño de las medidas de intervención (reducción), con el propósito de mitigar el impacto que este genera, implementando todo un programa compuesto por planes, políticas y protocolos, que deben ser llevados a la práctica a través de un proceso de divulgación y seguimiento, el cual se puede basar en PHVA (Planear, Hacer, Verificar, Actuar).

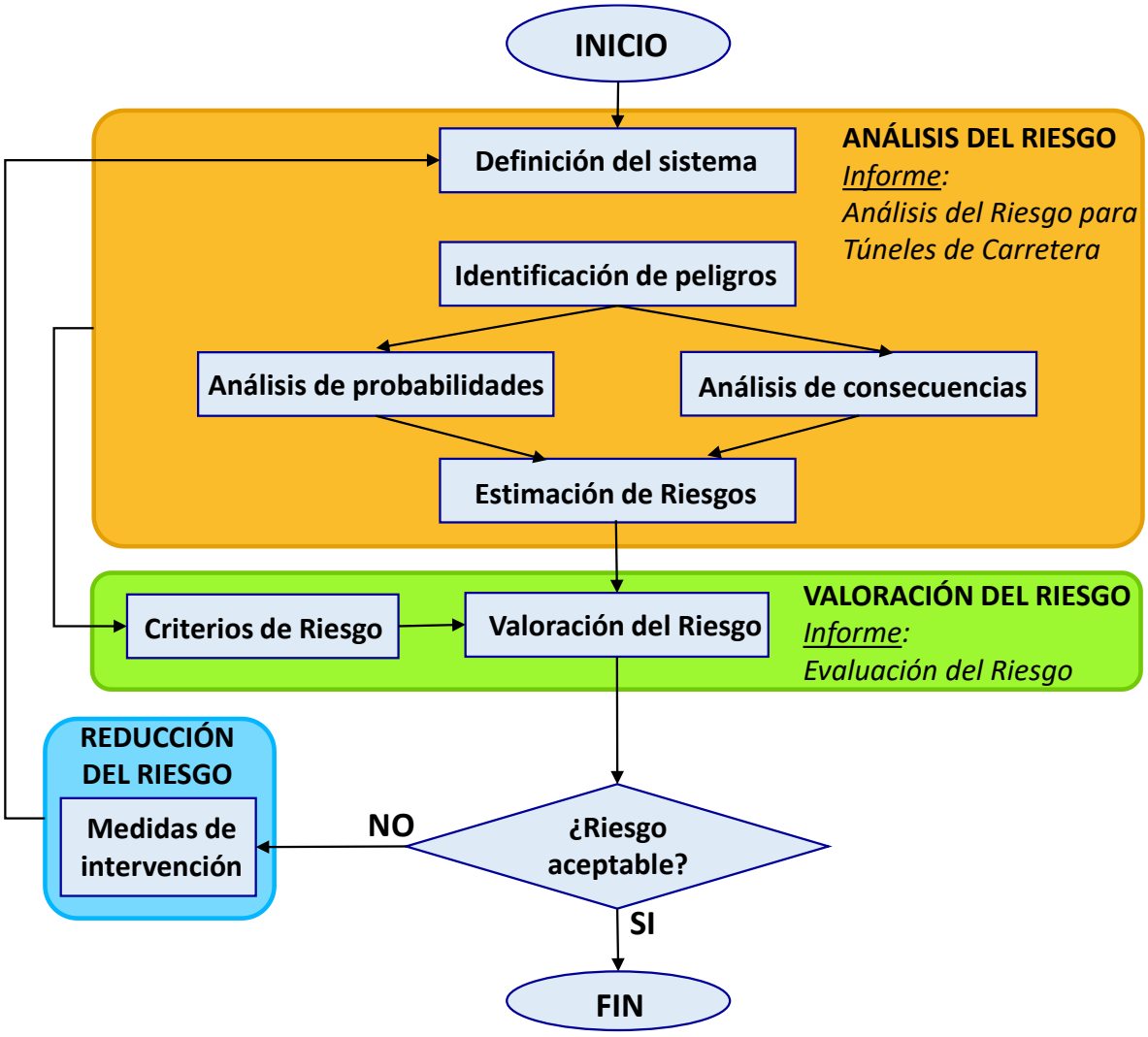


Ilustración 3-1. Flujograma de evaluación de Riesgo para su análisis, valoración y reducción
FUENTE: Manual de Túneles de carretera PIARC 2019 [234], cap. Seguridad, pág. 44

3.5.3 Consideraciones de los análisis de riesgos adicionales

Los análisis y gestión de riesgos de proyectos, serán utilizados como herramienta para apoyar y soportar decisiones, como anexos requeridos en los diseños alternativos, cuando se presenten opciones constructivas u operativas no contempladas inicialmente y cuando haya una condición temporal diferente que demande atención especial, obligando a modificar o alterar el normal desarrollo del proyecto (usualmente sucede con el transporte, almacenamiento y empleo de explosivos o sustancias peligrosas).

La Gestión del Riesgo será por lo tanto una herramienta de soporte, entre otros, para los siguientes casos:

3.5.3.1 Apoyo en la toma de decisiones

Herramienta de soporte para la toma de decisiones para las siguientes circunstancias:

- Fase de planificación (conocimiento del riesgo)
- Mitigación del riesgo (reducción del riesgo)
- Estrategias operacionales en emergencias (Manejo de la emergencia)
- Requerimientos de seguridad (medidas de intervención)

3.5.3.2 Para demostrar un nivel suficiente de seguridad

Herramienta de soporte para demostrar un nivel suficiente de seguridad las siguientes circunstancias:

- En caso de una desviación de los requerimientos prescriptivos (auditorias)
- Demostración de compensación de características específicas de medidas alternativas.
- En la fase de construcción de la modernización de los túneles existentes (implementación de nuevas medidas de intervención)

3.5.3.3 Para elegir la combinación más adecuada de medidas de mitigación del riesgo

Herramienta de soporte para elegir la combinación más adecuada de medidas de intervención en la siguiente circunstancia:

- Al combinar los resultados de la evaluación de riesgos con el análisis de efectividad de costos de las medidas de seguridad (valoración de la pérdida ante posibles eventos)

3.5.4 Auditorías de seguridad

Con el objetivo de garantizar las condiciones de seguridad del túnel se requiere la realización de auditorías sobre el proceso de Gestión del Riesgo en cuatro etapas:

- Auditoria de seguridad y riesgos a partir del análisis de los diseños en ejecución.
- Auditoria de seguridad y riesgos durante la construcción.
- Auditoria de seguridad y riesgos de la obra próxima a entrar en operación (auditoria de la puesta en marcha).
- Auditorias periódicas durante operación (aplicable a los túneles existentes).

3.5.5 Cumplimiento

El proceso de la Gestión del Riesgo en su conjunto debe garantizar finalmente, que se incremente la probabilidad de éxito del proyecto, mitigando y reduciendo el impacto que pueda generar el proyecto en el entorno, desde el conocimiento del riesgo, su reducción y en determinado caso el manejo de la emergencia.

Los entes, autoridades, niveles jerárquicos dentro del proyecto, así como las demás personas interesadas en el mismo, deben velar por la implementación y cumplimiento de todas las medidas de intervención derivadas de la Gestión del riesgo y por ningún motivo, se autorice la apertura del túnel a los usuarios de la vía, hasta tanto no se garantice la implementación de la totalidad de procesos de seguridad previstos dentro del alcance del proyecto (auditoría de la puesta en marcha).

4 Capítulo - SOSTENIBILIDAD

En el marco de la apuesta que viene desarrollando el Instituto Nacional de Vías para el desarrollo sostenible del país, mediante Resolución 405 del 13 de febrero de 2020 se adoptó la Política de Sostenibilidad para la infraestructura de transporte y se creó el Comité de Sostenibilidad del Instituto Nacional de Vías - INVIAS, liderado por la Dirección General, con el fin de incorporar los criterios y lineamientos de sostenibilidad en la gestión de proyectos de infraestructura de transporte a cargo del Instituto.

Foto 4-1. Proyecto Cruce de la Cordillera central, costado occidental a Calarcá

Así mismo, considerar la existencia de los “Lineamientos de Infraestructura Verde Vial para Colombia” LIVV (Tabla 1-6), construidos con el fin de orientar la estructuración de planes, programas y proyectos de infraestructura carretera, con el fin que contemplen, desde las etapas más tempranas de su planificación, consideraciones ambientales y de desarrollo sostenible e incorporen medidas destinadas a garantizar que la ejecución de los mismos genere un beneficio ambiental neto positivo.

4.1 Gestión para la Sostenibilidad

El Instituto Nacional de Vías – INVIAS, ve propicio la incorporación de los criterios de sostenibilidad y sus respectivos lineamientos de orden Ambiental, Predial y Social, en el Manual para el Diseño, Construcción, Operación y Mantenimiento de Túneles de Carretera para Colombia, en cada una de las fases de los proyectos de infraestructura de Túneles viales.

4.1.1 Etapa de diseño

Comprende la evaluación y seguimiento desde el componente de sostenibilidad a las fases de prefacfactibilidad (**Fase I**), factibilidad (**Fase II**) y diseños definitivos (**Fase III**) y se encuentran diferenciados por cuatro dimensiones:

- ✓ Ambiental
- ✓ Social
- ✓ Técnico
- ✓ Económico y financiero

4.1.1.1 Ambiental

Agua: El proyecto deberá contar con iniciativas de conservación del recurso hídrico local, priorizando el traslado de agua en carro tanques y no la captación de agua en los cuerpos hídricos naturales presentes en el área de influencia del proyecto.

Biodiversidad: El proyecto deberá contar con iniciativas para la conservación, restauración y reforestación de áreas estrategias y de importancia ecológica, que permitan la preservación de la biodiversidad de especies, así como iniciativas que favorezcan la conectividad ecológica a escala regional, subregional y local y la prestación de servicios ambientales, además de presentar iniciativas con la incorporación del concepto de infraestructura verde.

Uso del suelo – infraestructura asociada: En este componente, el proyecto deberá contar con iniciativas que eviten la afectación de las tierras productivas asociadas a los ecosistemas de interés. Adicional a esto, se deber contar con iniciativas que permitan la utilización de los materiales removidos durante la excavación del túnel, Materiales de Excavación de Reutilización Industrial MERI [231, 232, 233], principalmente hacia proyectos comunitarios o municipales, que se lleven a cabo en los entornos del túnel o incentivar a ello de manera sostenible, disminuyendo la utilización de terrenos como Zodmes, así como adelantar los permisos para explotar fuentes de material de préstamo.

Cambio climático y gestión del riesgo: En este componente, el proyecto deberá contar con iniciativas que aumenten la resiliencia y la adecuación a la gestión del riesgo en la infraestructura de transporte.

Certificaciones Ambientales: En este componente el proyecto deberá contar con iniciativas y/o presentar certificaciones y sellos verdes para el desarrollo de la operación y administración del proyecto.

Zodmes: se define por sus siglas, como, las Zona de Disposición de materiales sobrantes de excavación.

4.1.1.2 Social

Movilidad Inclusiva: Busca tener en cuenta la accesibilidad de todos los grupos poblacionales al área de influencia de los proyectos, teniendo en cuenta grupos con capacidades especiales, etc.

Impacto social: Luego de hacer la caracterización de la población, se debe mirar a profundidad los impactos sociales que tendrá el proyecto dentro del territorio, así como

verificar el cumplimiento de requisitos de gobernabilidad que legitimen el proceso de formulación que tendrá el proyecto dentro del territorio.

Gestión de pasivos y compromisos: Identificar los acuerdos no ejecutados de forma institucional que puedan afectar la realización del proyecto en garantía de los derechos humanos de las comunidades.

Análisis social y de conflictos – Enfoque diferencial: Evaluar la cantidad de conflictos sociales solucionados u ocasionados por el proyecto.

Alineación con estrategias y políticas: Tener en cuenta los planes de ordenamiento territorial de los lugares donde se realizan los proyectos y estar alineados con los mismos.

Se debe conseguir cartografía social disponible en entidades públicas (con el mayor detalle posible).

Foto 4-2. Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Industriales - PTARI, Túnel La Línea

4.1.1.3 Técnico

Innovación: El proyecto deberá contar con iniciativas de diseños y trazados sostenibles desde su concepción, que consideren los corredores de conectividad del nivel regional, subregional y local, así como la generación de investigación y desarrollo que permitan incorporación de nuevas tecnologías para la ejecución sostenible del proyecto, así como el concepto de infraestructura verde y Ecodiseños para su inclusión en los trazados y diseños del proyecto.

Materiales: Se deben desarrollar, entre otras, estrategias para la adquisición e incorporación de materiales de la región en donde se desarrolla el proyecto, contemplando la implementación de materiales alternativos (diferentes fuentes y tipos), así como la cantidad a ser usada en el proyecto, para garantizar un bajo impacto ambiental y la reutilización de los mismos.

Energía: Se deberá contar con iniciativas de reducción de energía, uso de energías alternativas (eólica, solar, biomasa-biogás, marítima, entre otras), equipos, y maquinaria que incorporen las mismas para su funcionamiento, lo que genera reducciones de emisiones directas e indirectas del proyecto.

Infraestructura Verde: El proyecto debe buscar estrategias que permitan la implementación de espacios verdes incorporados al diseño, como separadores verdes y redes o corredores arborizados que permitan la conectividad de los parches de vegetación utilizados como corredores biológicos para fauna y flora. De igual forma se debe priorizar la incorporación de biotecnología en procesos de conservación de suelos asociados al proyecto.

4.1.1.4 Económico y financiero

Desempeño Financiero: El proyecto debe contar con un análisis financiero sujeto al cambio climático, como transiciones no programadas. De igual forma, debe contar con iniciativas de asistencia por parte del gobierno nacional y organizaciones internacionales, con el acceso a incentivos que promuevan prácticas sostenibles en proyectos de infraestructura sostenible.

Desempeño Económico: Valoración de los impactos positivos generados por las estrategias de implementación de la sostenibilidad. El proyecto deberá estimar los beneficios directos e indirectos de la implementación de la sostenibilidad.

Adquisiciones: El proyecto deberá promover prácticas de compras verdes, así como la evolución de los riesgos relacionados a la corrupción (competencia desleal, prácticas monopólicas y contra la libre competencia).

Inversión sostenible: Se debe contar con la estimación de los recursos programados para inversión en proveedores locales, inversión en iniciativas sostenibles, mitigación de riesgos naturales, infraestructura y servicios sostenibles, mejoramiento de los ecosistemas en el área de influencia del proyecto, entre otros.

Optimización de Recursos: Se establece la suficiencia de recursos económicos, humanos y técnicos para la ejecución del proyecto.

Rentabilidad Económica y social: Tiene en cuenta el crecimiento económico, la productividad, accesibilidad del servicio y efectos indirectos del desarrollo del proyecto en el ciclo de vida de este.

4.2 Gestión Ambiental

La sostenibilidad involucra todos los procesos, procedimientos y actividades necesarias para que el Proyecto logre un adecuado manejo de los recursos empleados durante todas y cada una de sus fases, garantizando la sostenibilidad del ambiente a través de una adecuada Gestión Ambiental y especialmente, a través de diferentes ámbitos como el técnico, ambiental, social, predial, económico y financiero.

La identificación de los impactos que el proyecto puede generar en los diferentes ámbitos se convierte en la puerta de entrada para lograr su viabilidad, y es a partir de allí, donde se puede garantizar el éxito del mismo.

Es así como todos los proyectos, incluyendo los de túneles, deben contar con un proceso de planeación y gestión técnica, social, ambiental, predial, económica y financiera desde su inicio, es decir, desde las etapas de planeación y diseño, y deberá contemplarse e implementarse este proceso, durante las fases de construcción y operación para que sean sostenibles.

Foto 4-3. Recuperación Quebrada La Gata, Cajamarca Tolima

El involucrar los procesos de gestión ambiental desde el inicio de los proyectos permitirá identificar anticipadamente los posibles impactos que puede generar un proyecto, verificando la viabilidad del mismo, con el fin de incrementar su probabilidad de éxito y a la vez, mitigar, prevenir, controlar y de ser necesario compensar el impacto que pueda generar en su entorno, buscando la sostenibilidad del mismo.

En este sentido, ya existen lineamientos que han sido emitidos por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y por parte de la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales – ANLA para la elaboración de los estudios ambientales requeridos para lograr la viabilidad ambiental de los proyectos.

Es así como, mediante Resolución 1503 del 4 de agosto de 2010 se profirió la Metodología General para la Presentación de estudios ambientales y posteriormente,

mediante Resolución 751 del 26 de marzo de 2015 se emitieron los Términos de Referencia para la Elaboración de Estudios de Impacto Ambiental - EIA en Proyectos de Construcción de Carreteras y/ o Túneles. Asimismo, mediante Resolución 1258 del 10 de julio de 2018 se emitieron los Términos de Referencia para la elaboración del Diagnóstico Ambiental de Alternativas – DAA en proyectos lineales de infraestructura de transporte (vías carreteras y líneas férreas, incluyendo túneles), TdR-022, los cuales son el primer insumo a revisar previo a la construcción de un Proyecto vial que involucre túneles en su diseño.

Se aclara que actualmente, se expidió la Resolución 1402 del 25 de julio de 2018 por la cual se adopta la metodología general para la elaboración y presentación de estudios ambientales y se toman otras determinaciones, sin embargo, su régimen de transición se ha modificado progresivamente a través de las Resoluciones 114 del 29 de enero de 2019, 1107 del 01 de agosto de 2019 y 629 del 31 de julio de 2020.

Es de gran importancia que durante las fases de planeación, diseño y construcción del Proyecto, se identifiquen los riesgos desde el punto de vista ambiental con el fin de prevenir, controlar, mitigar y por supuesto compensar los posibles impactos, disminuyendo al máximo los riesgos, lo que redundará en enormes beneficios durante la entrada en operación y mantenimiento del Proyecto, a través de la disminución de costos en el control, recuperación y/o compensación de los impactos causados, así como prevenir la ocurrencia de contingencia y la generación de pasivos ambientales posterior a su ejecución.

Igualmente, como una medida de gestión ambiental y de sostenibilidad del proyecto, diseñar una política de utilización de los materiales producto de la excavación y encontrar su aprovechamiento como Materiales de Excavación de Reutilización Industrial - MERI [233], de manera tal que, mediante una buena caracterización del terreno a excavar, se clasifique geotécnicamente, para conocer sus características geológicas, litológicas y composicionales, buscando que se pueda prever de antemano su utilidad y se haga un esfuerzo por su aprovechamiento en las vías adyacentes, en proyectos sociales de las poblaciones del área de influencia del proyecto o como materia prima a ser transformada en nuevos materiales de Ingeniería, reduciendo ostensiblemente el acarreo y disposición de estos materiales hacia las zodmes y reduciendo así mismo, los costos del proyecto.

Ahora bien, para lograr una adecuada gestión ambiental en un proyecto, es necesario que como mínimo se contemplen en su planeación los cuatro (4) elementos que se presentan a continuación, durante todas las fases del Proyecto:

a) La verificación de los posibles impactos directos, indirectos, sinérgicos y/o acumulativos del proyecto, con el fin de determinar la viabilidad ambiental del Proyecto.

b) El manejo adecuado de los recursos intervenidos o utilizados, y su adecuada gestión durante todas las fases del proyecto, para una óptima utilización o disposición final.

c) Los estudios y diseños necesarios para la obtención de la licencia o aprobación del instrumento de manejo ambiental, así como de los permisos necesarios para su ejecución.

d) Programa para el máximo aprovechamiento del material natural removido de la excavación del túnel como Materiales de Excavación de Reutilización Industrial MERI [233], en la construcción de obras al interior del mismo proyecto o en otros que la comunidad y las autoridades municipales lo determinen, bajo la aprobación del Ministerio de Ambiente y Ministerio de Minas.

e) El análisis de la mejor información disponible para apoyar la toma de decisiones, incluyendo análisis de ordenamiento territorial a nivel de paisaje, estudios de conectividad ecosistémica y de capilaridad, conglomerados viales y análisis de variabilidad climática.

Es claro que la Gestión Ambiental de un proyecto y específicamente de túneles, podría abarcarse desde diferentes ángulos y/o de diferentes maneras dependiendo del observador, sin embargo, con el fin de orientar al constructor hacia los aspectos fundamentales y determinantes que deberían ser tenidos en cuenta para una adecuada Gestión Ambiental, y que además proporcionen elementos de juicio en la búsqueda de la Sostenibilidad Ambiental del Proyecto, se propone que en este manual se aborde desde la evaluación de los diferentes impactos sobre los recursos a intervenir y desde las fases mismas de proyecto, abarcando desde su inicio los componentes biótico (fauna y flora); abiótico (Suelos, geología, geomorfología), socioeconómico, con un enfoque fundamentado en lo definido en los LIVV".

4.2.1 Fases de planeación - Estudios y diseños

Es importante que, durante las fases de planeación y diseño, el dueño del proyecto, el diseñador, el constructor o el concesionario, según sea la etapa o responsabilidad, verifique como mínimo los siguientes elementos según aplique:

- Diseño del sistema de conducción, tratamiento y descarga final o reúso de las aguas residuales para la fase de construcción.
- Diseño del sistema de tratamiento y disposición final de lodos para las fases de construcción y operación. Verificar su posible uso en comunidades asentadas en inmediaciones del proyecto para evitar su desmantelamiento y posible utilización para los acueductos veredales.
- Diseño del sistema de conducción y descarga final de las aguas de infiltración para las fases de construcción y operación.
- Diseño del sistema de captación, conducción, almacenamiento y distribución de las aguas de infiltración para las fases de construcción y operación.
- Diseño del sistema de conducción, tratamiento y descarga final de las aguas residuales generadas por el funcionamiento normal, mantenimiento y limpieza del túnel, y derrames accidentales (aguas con productos químicos, aceites, hidrocarburos, hollín, partículas generadas por el desgaste de neumáticos o frenos) para la fase de operación.
- Modelación del abatimiento del nivel freático y los efectos en cursos y cuerpos de agua inventariados en la zona de influencia del Proyecto.

- Diseño de la red de monitoreo piezométrico.
- Diseño de una red de monitoreo de la calidad del aire.
- Sustracción de áreas de reserva forestal en portales, zodmes, vías de acceso y demás infraestructura asociada o locaciones.
- Levantamientos de veda en portales, zodmes, vías de acceso y demás infraestructura asociada o locaciones.
- Cuantificación del material de excavación – Balances de Masa.
- Cuantificación del material de demolición.
- Formulación del Plan de gestión de residuos de construcción y demolición RCD, de tal manera que éste permita adoptar estrategias para minimizar la disposición final y maximizar el aprovechamiento de los RCD, generados durante la ejecución de proyectos constructivos.
- Localización puntual, capacidad volumétrica y estudios ambientales para el sitio de disposición final de material de excavación. Por tanto, se deberá verificar la disponibilidad de escombreras y zodmes para la ejecución del Proyecto.
- Diseño de la red de monitoreo topográfico y geotécnico del sitio de disposición final de material de excavación.
- Diseño de un sistema de caracterización, identificación, separación, clasificación, acopio temporal y disposición final de materiales de excavación.
- Medidas por captación del agua (inversión forzosa de no menos del 1%).
- Medidas de compensación por el abatimiento del nivel y medidas de compensación por la sustracción de áreas de reserva forestal en portales, Zodmes, vías de acceso y demás infraestructura asociada o locaciones, que sean agregadas y complementarias a las propuestas por otros proyectos.
- Medidas de compensación por la sustracción de áreas de reserva forestal en portales, zodmes, vías de acceso y demás infraestructura asociada o locaciones.
- Medidas de manejo por el levantamiento de veda en portales, zodmes, vías de acceso y demás infraestructura asociada o locaciones.
- Eficiencia energética de los equipos electromecánicos para la fase de operación.
- De no existir información con estaciones cercanas, contemplar el diseño de la red hidrometeorológica con el fin de realizar la modelación matemática para evaluar la variación del nivel freático antes de la construcción del túnel, durante y posterior a la construcción, la cual también estará alimentada por los monitoreos en la red de monitoreo piezométrica, con la debida sustentación de la selección de la modelación matemática o numérica del agua subterránea, entre otros criterios con base en requerimientos adicionales que tengan o puedan definirse desde el Ministerio de Ambiente.
- Los Estudios hidrogeológicos deben incluir además el inventario de puntos de agua subterránea, validación de direcciones de flujo de agua y análisis de riesgo de contaminación del agua subterránea por el desarrollo de las actividades planteadas.
- Diseño de un sistema de evaluación y valoración económica ambiental para el análisis costo beneficio del proyecto.
- Corredores de conectividad a escala regional, subregional y local.
- Estudios de capilaridad, conglomerados viales y análisis de variabilidad climática.
- Aplicación de los Lineamientos de Infraestructura Verde Vial – LIVV, conforme a la fase del proyecto.

Foto 4-4. Zona de Disposición de materiales sobrantes de excavación ZODMES, Túnel La Línea

Desde la fase de concepción del Proyecto, es decir de planeación y diseños, estará definido el éxito en la sostenibilidad ambiental del mismo, lo anterior teniendo en cuenta que es desde esta fase, donde se pueden identificar las áreas a intervenir, los recursos a aprovechar, los insumos requeridos, y es desde allí donde se pueden evitar o disminuir los impactos que un proyecto pueda ocasionar en cada uno de ellos.

Es por lo anterior, que desde la fase de diseño del Proyecto se deberá evaluar el impacto del mismo sobre cada uno de los bienes y servicios ambientales, fauna, cobertura del suelo (Natural o Antrópica), agua, aire, suelo y subsuelo, en este último se concentran dos aspectos muy relevantes para la intervención tales como geología e hidrogeología. Es por ello que, se hace necesario evaluar los impactos o cambios que se podrían generar con el diseño presentado con respecto a cada uno de los recursos de tal forma que se vea reflejado en el estudio de impacto ambiental, así mismo realizar la valoración económica ambiental para el análisis costo beneficio del proyecto y la viabilidad del mismo.

4.2.1.1 Fauna

Con respecto a este recurso, se deberá evaluar en la fase de diseño el tipo de fauna asociada al área de intervención del Proyecto, corredores biológicos, sitios de paso, entre otros. Lo anterior, con el fin de diseñar protocolos para la identificación de la misma y diseñar las estrategias de ahuyentamiento, traslado o construcción de sitios de paso para la misma, según corresponda.

De ser necesario contemplar el permiso de recolección de especímenes de especies silvestres de la biodiversidad.

4.2.1.2 Cobertura del Suelo

Con respecto a este recurso se deberá evaluar en la fase de diseño el tipo de cobertura natural o antrópica. Con respecto a la primera debemos verificar si existe cobertura vegetal en pastos, rastrojos, bosques, cuerpos de agua (lagos o lagunas, ríos) que se puedan ver afectados por la intervención. Con respecto a la antrópica es necesario verificar si existen construcciones como viviendas, vías, e infraestructura asociada al área de intervención.

Lo anterior ya nos proporcionará los elementos necesarios para determinar las afectaciones sobre cada una de las coberturas y determinará los permisos, autorizaciones y concesiones que deberán ser tramitados dentro de la Licencia Ambiental o Instrumento de Manejo Ambiental.

En el caso de coberturas naturales, se deberá verificar si estas hacen parte de una de las categorías del Sistema Nacional de Áreas Protegidas - SINAP, del departamento o regionales SIRAP, o de los municipios o locales SILAP, es decir, áreas protegidas declaradas por los entes territoriales, verificando si el proyecto se localiza en Reserva Forestal de Ley 2 de 1959, y en caso positivo la zona en que se encuentra. Lo anterior nos permitirá definir si es necesario contemplar el trámite de sustracción de un área de reserva o de otra área protegida y ante qué Autoridad Ambiental se realizará dicha solicitud.

Así mismo, el análisis de coberturas permitirá definir si será necesario solicitar permiso de aprovechamiento forestal y el levantamiento de veda para especies declaradas en peligro por la autoridad ambiental competente. De otra parte, si la cobertura a intervenir es un cuerpo de agua, este análisis nos permitirá evaluar la necesidad de solicitar permisos de concesiones de aguas u ocupación de cauce.

Se podría pensar que para un proyecto de construcción que involucre uno o varios túneles, el análisis de la cobertura del suelo resultaría casi irrelevante, sin embargo, no es así, debido a que para su construcción se requiere un sistema de accesos o en muchos casos, hasta la construcción de vías industriales o vías permanentes, lo que involucrará tanto la gestión de la cobertura existente, como de los predios a intervenir, con el fin de obtener el paso a los portales mediante permisos o servidumbres, compra de predios o de no ser posible la enajenación voluntaria, realizar el trámite de expropiación de los terrenos, lo cual impactará considerablemente el componente social y predial del mismo.

4.2.1.3 Agua

Con respecto al recurso hídrico se debe evaluar varios aspectos, uno de ellos es el uso de agua para la obra, la cual puede darse de dos formas, de fuentes naturales o suministrada por carrotanques. Para el primer caso se deberá tener en cuenta que, si se realiza el uso del recurso hídrico directamente de fuentes naturales, el proyecto deberá contemplar dentro de su presupuesto la Inversión forzosa de no menos del 1%, la cual dependerá del costo total del proyecto y, además, deberá contemplar las tasas por el uso del recurso, así como el trámite del permiso de concesión de aguas, que debe estar inmerso en el instrumento ambiental de seguimiento, es decir, en la Licencia Ambiental. Para el segundo caso, se puede contar con el suministro de agua a través de un tercero denominado proveedor, el cual debe contar con los permisos ambientales

para el suministro de agua, tanto para uso industrial o doméstico, en este caso no se requiere contemplar recursos para la inversión forzosa de no menos del 1%.

Es importante que durante la fase de diseño, se contemple en el levantamiento de la línea base, la modelación de los niveles freáticos y los posibles efectos de abatimiento durante la fase constructiva mediante el diseño de una red de monitoreo piezométrica, acompañada de una red de estaciones hidro-meteorológicas que permitan realizar la modelación del sistema y evaluar los impactos generados con respecto a la línea base, los cuales generaran compensaciones por éste hecho, como medidas de manejo del impacto ambiental.

De igual manera es necesario contemplar los monitoreos fisicoquímicos y microbiológicos de línea base de la calidad de agua para concesiones de agua superficial y subterránea, vertimientos (cuerpos receptores) y ocupaciones de cauce.

Otro aspecto a contemplar es con respecto a las aguas de infiltración, de presentarse al interior del túnel, estas deberán ser separadas de las aguas utilizadas durante la construcción, ya que, de no preverse dicha separación desde el diseño, acarreara costos adicionales para el tratamiento de los vertimientos, debido a los mayores volúmenes a tratar.

De esta manera, las aguas de infiltración de túneles deben ser recolectadas, transportadas, tratadas, de ser necesario reutilizadas y vertidas cumpliendo con lo establecido en la en la Resolución 631 de 2015 o aquella que la modifique o sustituya. De presentarse vertimientos, el proyecto deberá contemplar el trámite del permiso de vertimiento para disponer las aguas industriales, previo tratamiento, para lo cual adicionalmente se deberá diseñar el respectivo sistema de tratamiento de aguas residuales industriales STARI o la Planta PTARI, a la salida de los sistemas de conducción de dichas aguas, el cual también podrá contemplar un sistema de recirculación de las aguas para su reutilización.

En este sentido, se debe proveer la descripción detallada de la infraestructura asociada al reúso y del proceso asociado, incluyendo el almacenamiento, trasiego, manejo, tratamiento y reúso de los residuos líquidos, desde que es generado, hasta su reutilización.

Producto del tratamiento de las aguas industriales se generarán lodos de materiales finos, los cuales serán caracterizados para su reutilización o disposición final. Estos lodos deberán ser deshidratados para lo cual se deberá diseñar una planta de secado. De otra parte, se deberá contemplar el diseño de un sistema para la conducción y entrega final de las aguas de infiltración en las zonas de almacenamiento o a las fuentes naturales cercanas, previo estudio de la capacidad hídrica de la cuenca en la cual se van a verter.

4.2.1.4 Aire

Con respecto al recurso aire, es necesario buscar una adecuada gestión del recurso, principalmente evaluando los posibles impactos por emisión de partículas en las zonas

de intervención del proyecto, para lo cual se deberá implementar una red de monitoreo que tendrá como finalidad verificar la calidad del aire y mantener los niveles dentro de los rangos permitidos, con el fin de garantizar un ambiente sano y minimizar el riesgo sobre la salud humana. Este sistema de monitoreo también debe ser implementado en las Zonas de Disposición de Materiales Sobrantes de Excavación, en adelante zodmes.

4.2.1.5 Suelo

Con respecto al recurso suelo se deberá contemplar la afectación sobre el mismo, para lo cual se identificará los horizontes a intervenir buscando caracterizar los diferentes tipos de materiales, con el fin de que durante la etapa de construcción se acopie por tipos de suelo y, por capas u horizontes, separando la capa orgánica de los demás horizontes, los cuales serán identificados, clasificados, separados y dispuestos en acopios temporales para su reutilización o posteriormente para su disposición final en las zodmes, de no ser aptos para uso. En la identificación se tendrá en cuenta la caracterización física, química y biológica de los suelos.

4.2.1.6 Subsuelo

Al igual que el suelo, la gestión del subsuelo es fundamental y dependerá de previo análisis del mismo, lo cual podrá arrojar la identificación y clasificación de los materiales a excavar. Este material deberá clasificarse previa intervención a partir del análisis geológico. Así mismo, se deberá evaluar el componente hidrogeológico, debido a la posible presencia de acuíferos, y fallas en el macizo, así como la conducción y distribución de las aguas subterráneas y sus flujos, con el fin de contemplar desde la concepción del proyecto la separación de las aguas de infiltración o provenientes de acuíferos del macizo, de las aguas utilizadas para la construcción, las cuales si requerirán ser tratadas para su disposición final. Es necesario entonces verificar la geología estructural del macizo, e identificar las fallas en el mismo, con base en información secundaria (ver numeral 5.2.2), la cual será objeto de validación durante la construcción.

Tanto para los recursos de suelo y subsuelo se deberá contar con el balance de masas, con el fin de proyectar las zonas que se requieren para el acopio temporal del material para su reutilización tanto en el propio proyecto como en otros que se definan con la comunidad y las administraciones municipales del entorno y que tengan la aprobación de las autoridades mineras y ambientales, en el caso que existan excesos de material, se deben proyectar las zonas para su disposición definitiva del material denominadas Zonas de Disposición de Materiales Sobrantes de Excavaciones o ZODMES.

4.2.2 Fase de construcción

En la interface entre el diseño y construcción del Proyecto, se deberán contemplar como mínimo los siguientes elementos, según aplique:

- Sectorización hidrogeológica del trazado del túnel para identificar las áreas con mayores caudales de infiltración.
- Separación de las aguas de infiltración (del macizo rocoso) y residuales (en contacto con carga contaminante).

- Implementación del sistema de conducción, tratamiento y descarga final o reúso de las aguas residuales.
- Implementación del sistema de tratamiento y disposición final de lodos.
- Autoliquidación y pago de tasas retributivas.
- Implementación del sistema de conducción y descarga final de las aguas de infiltración.
- Implementación del sistema de captación, conducción, almacenamiento y distribución de las aguas de infiltración.
- Implementación de un sistema de caracterización, identificación, separación, clasificación, acopio temporal y disposición final de materiales de excavación.
- Autoliquidación y pago de tasas por uso de agua.
- Implementación de una red hidrometeorológica.
- Monitoreo de vertimientos, aguas superficiales y subterráneas.
- Medición y actualización de la modelación del abatimiento del nivel freático y los efectos en cursos y cuerpos de agua inventariados.
- Monitoreo del nivel piezométrico.
- Plan de monitoreo de calidad de agua superficial y subterránea, así como de vertimientos (Cuerpos receptores) y de ocupación de cauce.
- Ejecución de las medidas de compensación por el abatimiento del nivel y medidas de compensación por la sustracción de áreas de reserva forestal en portales, ZODMES, vías de acceso y demás infraestructura asociada o locaciones, que sean agregadas y complementarias a las propuestas por otros proyectos.
- Ejecución de las medidas de compensación por la sustracción de áreas de reserva forestal en portales, zodmes, vías de acceso y demás infraestructura asociada o locaciones.
- Ejecución de las medidas de manejo por el levantamiento de veda en portales y demás infraestructura asociada o locaciones.
- Ejecución del rescate, traslado y reubicación de individuos por el levantamiento de veda en portales, zodmes, vías de acceso y demás infraestructura asociada o locaciones.
- Ejecución de la inversión forzosa de no menos del 1%
- Reusó de material de excavación en obra y donación del material sobrante.
- Medición de calidad de aire y ruido al interior del túnel y en inmediaciones de las bocas del túnel o de los pozos de extracción.
- Mediciones de vibraciones producidas por la perforación y voladura con explosivos.
- Monitoreo geotécnico del sitio de disposición final del material de excavación.
- Paisajismo en taludes frontales y/o laterales de portales, zodmes, vías de acceso y demás infraestructura asociada o locaciones.
- Contar con escombreras y zodmes autorizados los cuales correspondan en su capacidad con los volúmenes resultantes del balance de masas de materiales producto de excavaciones y/o cortes.

- Implementación de un sistema de evaluación y valoración económica ambiental para el análisis costo beneficio del proyecto.
- Ejecución de estrategias y acciones para preservar y consolidar corredores de conectividad ecológica.
- Ejecutar obras de drenaje que no afecten o minimicen la afectación de cuerpos de agua y sus rondas
- Generar infraestructura de mitigación de impactos negativos sobre la cobertura vegetal y la flora silvestre.
- Generar infraestructura de mitigación de impactos negativos sobre la fauna silvestre.

Teniendo en cuenta que, desde la fase de diseño del Proyecto, se realizó una adecuada verificación y diagnóstico sobre las posibles afectaciones a cada uno de los bienes y servicios ambientales a intervenir, durante la interface entre el diseño y el inicio de la construcción se deberá proyectar el manejo de dichos recursos, su utilización, reutilización o su disposición final. Así mismo, durante la fase de construcción se deberá contar con la línea base del balance de masas proyectado con los volúmenes de los materiales a disponer en las zodmes y en las escombreras, por tanto, para esta fase ya se deberá contar con los sitios de disposición final.

En esta fase se recomienda la Implementación de un sistema de evaluación y valoración económica ambiental para el análisis costo beneficio del proyecto y por recurso. En esta Evaluación Económica Ambiental, se debe incluir dentro de los impactos, entre otros, la disminución de la productividad de los predios que se encuentran sobre el túnel, teniendo en cuenta la pérdida del nivel freático del suelo. De no contar con la implementación de una medida de manejo dentro del PMA para estos, se debe presentar dentro de la valoración económica ambiental para el análisis costo beneficio.

En general se debe propender por el aumento de los beneficios directos e indirectos que hacen parte del análisis costo beneficio del proyecto en la Valoración Económica Ambiental, tener en cuenta que la infraestructura es económicamente sostenible si genera un equilibrio entre el rendimiento económico neto positivo y la protección de los servicios ecosistémicos a largo plazo, a partir de una adecuada valoración económica, teniendo en cuenta todos los beneficios y costos durante el ciclo de vida del mismo.

En este sentido se deberá evaluar e incorporar nuevas fuentes de financiación para el desarrollo del proyecto y para dar cumplimiento a las obligaciones ambientales que se adquieran en la Licencia Ambiental (Bancos de Hábitat, Pago por servicios ambientales, entre otros acuerdos o mecanismos de inversión).

4.2.2.1 Fauna

Con respecto al recurso Fauna, se deberá realizar previo a la fase de construcción del proyecto y en toda el área de intervención e influencia del Proyecto, la identificación de la misma e implementar las estrategias y los protocolos para el ahuyentamiento o traslado, y de ser necesario la construcción de sitios de paso para la recuperación de la misma.

4.2.2.2 Cobertura del Suelo

Teniendo en cuenta que durante la fase de diseño ya se identificó el tipo de cobertura natural o antrópica a intervenir, esto nos proporciona los elementos necesarios para buscar la menor afectación previa y durante la fase de construcción.

En caso de proyectar intervenir coberturas naturales durante la fase de construcción, previo al inicio, se deberá contar con la aprobación por parte de las autoridades ambientales competentes de los permisos de sustracción, aprovechamiento forestal, levantamiento de veda, ocupación de cauce, es decir, los necesarios para poder avanzar sin contratiempos en la etapa constructiva.

En esta fase se contará con los sitios de acopio temporal y definitivo y se deberá tener definidas las actividades que se realizaran con los materiales obtenidos.

En caso de aprovechamiento forestal se contará con el permiso de aprovechamiento y el salvoconducto para la movilización de la madera, además con el registro ante el Instituto Colombiano Agropecuario ICA, de ser plantaciones.

En el caso de intervención de rastrojos o pastos, en la medida de lo posible se contemplará la implementación de composteras para la reutilización de dicho material orgánico para abono, que eventualmente podría ser reutilizado en la fase de construcción o en la de desmantelamiento y abandono, en donde se tendrá que efectuar el mejoramiento paisajístico de las áreas intervenidas.

Foto 4-5. Compensaciones siembra de árboles (bosques consolidados), Túnel La Línea

4.2.2.3 Aire

Con respecto al recurso aire, se implementará un sistema de monitoreo de la calidad del aire y se mantendrán los niveles dentro de los rangos permitidos con el fin de

garantizar un ambiente sano y minimizar el riesgo sobre la salud humana. Este sistema de monitoreo también debe ser implementado en las Zonas de Disposición de Materiales Sobrantes de Excavación, en adelante ZODMES.

4.2.2.4 Agua

Como se mencionó en la fase de diseño, para esta etapa ya estará definido si el uso del recurso hídrico se realizará a través de captación de agua directamente de fuentes naturales, o en su defecto de un tercero, por lo que para esta fase ya se deberá contar con los permisos necesarios o con la concesión de agua, con el volumen necesario a captar. Así mismo, de requerir uso de fuentes naturales, se deberá iniciar con la implementación del plan de Inversión forzosa de no menos del 1% presentada en la etapa de Licenciamiento Ambiental y tendrá que ser contemplada en los costos generales del Proyecto. Este plan de Inversión se desarrollará durante la etapa de construcción del proyecto, por tanto, los tiempos de ejecución del plan no deberán superar los tiempos contractuales para la construcción del proyecto.

Ya identificada durante la etapa de diseño la presencia de acuíferos en la zona, se deberá implementar el sistema de monitoreo de la zona en la parte superior del alineamiento del túnel con instalación de piezómetros, con el fin de levantar la línea base, y detectar el posible abatimiento del nivel freático mediante el monitoreo periódico de los mismos. De otra parte, se implementará el sistema de conducción de las aguas industriales, es decir las aguas contaminadas por la construcción del proyecto. Previo a la intervención se deberá contar con el permiso de vertimiento para poder disponer las aguas industriales, para lo cual se deberá diseñar el respectivo sistema de tratamiento de aguas residuales industriales STARI o la Planta de tratamiento de aguas residuales industriales PTARI, de acuerdo con los volúmenes calculados a tratar en la fase de diseño.

Con respecto a las aguas de infiltración se deberá implementar el diseño para la conducción y evacuación de dichas aguas, con el fin de evitar su contaminación, y así poderlas transportar directamente a las zonas de almacenamiento o a las fuentes naturales de acuerdo con la capacidad de carga de la cuenca, para lo cual deberá implementarse el diseño de entrega de dichas aguas para los dos sistemas.

4.2.2.5 Suelo

Una vez identificados los diferentes tipos de materiales se dispondrá de sitios especializados para la clasificación, separación, y disposición en acopios temporales para su reutilización o posteriormente para su disposición final en las zodmes. En caso de contar con suficiente material útil, éste podrá ser donado a los entes territoriales previa solicitud de los mismos e informe del respectivo cambio menor a la autoridad competente.

4.2.2.6 Subsuelo

De igual manera, la gestión del subsuelo dependerá de previo análisis del mismo, una vez identificados y clasificados los materiales a excavar, deberán clasificarse, separarse y disponerse en acopios temporales para su reutilización o posteriormente para su disposición final en las zodmes. En caso de contar con suficiente material útil, éste

podrá ser donado a los entes territoriales previa solicitud de este material e informe a la autoridad competente del respectivo cambio menor (ver numeral 4.1.1.1 utilización de materiales MERI). Como ya se mencionó con respecto al recurso hídrico, y específicamente a la gestión de las aguas de infiltración, se deberá implementar el diseño para la conducción y evacuación de dichas aguas evitando su contaminación, y así poderlas transportar hacia tanques de almacenamiento o directamente hacia las fuentes naturales.

Foto 4-6. Peaje y Zodme Naranjal - Túnel Renacer, Vía Bogotá Villavicencio

4.2.3 Fase de operación y mantenimiento

Para los proyectos de infraestructura la licencia solo aplica hasta la fase de construcción, una vez entre en operación el proyecto se debe informar a la Autoridad Ambiental competente, sobre la fecha de terminación de la fase constructiva y fecha de inicio de la fase de operación. A pesar de ello, previo a la entrada en operación del proyecto se hace necesario que se verifiquen los siguientes aspectos según aplique:

- Implementación del sistema de captación, conducción, almacenamiento y distribución y entrega final de las aguas de infiltración.
- Autoliquidación y pago de tasas por uso de agua.
- Implementación del sistema de conducción, tratamiento y descarga final de las aguas residuales generadas por el funcionamiento normal, mantenimiento y limpieza del túnel, y derrames accidentales (aguas con productos químicos, aceites, hidrocarburos, hollín, partículas generadas por el desgaste de neumáticos o frenos) o llamadas aguas de mantenimiento.

- Actualización de la modelación del abatimiento del nivel freático y los efectos en cursos y cuerpos de agua inventariados.
- Medición de calidad de aire y ruido al interior del túnel y en inmediaciones de portales, pozos de ventilación y galerías de escape, zodmes, vías de acceso y demás infraestructura asociada o locaciones.
- Elaboración de un plan de contingencia con los posibles eventos que se puedan suscitar dentro del túnel (derrames, incendios, inundaciones, desplomes o derrumbes, entre otros) con el fin de implementar las medidas necesarias con el fin de evitar impactos sobre los bienes y servicios ambientales y en especial evitar vertimientos a las fuentes naturales cercanas al Proyecto.
- Entrega de las compensaciones ejecutadas a la autoridad ambiental competente.
- Realizar el monitoreo a las coberturas naturales durante la operación de la obra de infraestructura.
- Realizar el monitoreo a la movilidad de la fauna silvestre durante la operación de la obra de infraestructura.
- Preservar y mantener la infraestructura de mitigación de impactos negativos sobre la fauna silvestre durante la operación de la obra de infraestructura.
- Preservar y mantener la infraestructura de mitigación de impactos negativos sobre la cobertura vegetal y la flora silvestre durante la operación de la obra de infraestructura.

Teniendo en cuenta que, desde la fase de diseño del Proyecto se realizó una adecuada verificación y diagnóstico sobre las posibles afectaciones a cada uno de los bienes y servicios ambientales a intervenir, durante la interface entre la construcción y la operación se deberá verificar el cumplimiento de lo proyectado en la fase de diseño para el debido manejo de dichos recursos, su utilización, reutilización o su disposición final. Para la fase de operación se deberá verificar el estado final de cada uno de los recursos, dejándolos en el estado en que se encontraron o en un mejor estado. Así mismo, se deberá asegurar que durante la operación se mantenga el estado de los recursos, como fueron dejados en la etapa de desmantelamiento y abandono, y para ello se elaborará el Plan de Contingencia en el cual se abordará cada una de las posibles situaciones que se pueda presentar en el túnel como son derrames, incendios, inundaciones, desplomes o derrumbes, entre otros.

4.2.3.1 Fauna

Con respecto al recurso Fauna, durante la fase de operación ya se habrán desarrollado todos los protocolos de ahuyentamiento o traslado a sitios similares a los habitados por esta. Para esta fase se tendrán los resultados de la implementación de dichos protocolos y la efectividad de los mismos lo cual se deberá dejar plasmado en los respectivos informes.

4.2.3.2 Cobertura del Suelo

Durante la fase de operación ya se deberán tener consolidados las áreas y los tipos de cobertura natural o antrópica intervenidas, por tanto, para la fase de operación se realizarán las entregas de las compensaciones exigidas y realizadas durante la

construcción. En esta fase se deberá contar con todos los balances de materiales acopiados, reutilizados y dispuestos tanto en escombreras como en las zodmes.

En la interface entre construcción y operación se debe contemplar el proceso de cierre ante las autoridades ambientales competentes de todos y cada uno de los permisos obtenidos durante el diseño y construcción tales como sustracciones, aprovechamientos forestales, levantamientos de veda, ocupaciones de cauce, vertimientos, entre otros. Así mismo se deberá contemplar el cierre de los sitios de acopio temporal y definitivo, así como de la Licencia Ambiental.

De otra parte, en las áreas intervenidas se ejecutará el plan de abandono y el desmantelamiento de toda la infraestructura de apoyo, y se realizará el mejoramiento paisajístico a que haya lugar, entre otros, limpieza, empradización utilizando el sustrato orgánico enriquecido con cascarilla de arroz, y el abono obtenido de la implementación de composteras, y siembra de árboles empleando los mismos insumos que en la empradización.

4.2.3.3 Agua

Teniendo en cuenta que durante la fase de diseño y construcción se realizó una adecuada gestión del recurso hídrico, en esta fase ya estará definido el sistema de entrega final tanto de las aguas de infiltración como de las aguas de mantenimiento del túnel o túneles construidos.

Se deberá evaluar el estado de implementación del Plan de Inversión forzosa de no menos del 1%, en compensación por la captación de agua de fuentes naturales y calcular el rubro al cierre presupuestal y final de obra, el cual deberá seguir siendo implementado hasta el agotamiento del recurso calculado y certificado por parte del área contable encargada y recibo final por parte de la autoridad ambiental competente.

Para esta fase se realizará la modelación matemática con los datos obtenidos durante la ejecución del proyecto mediante el sistema de monitoreo ubicado en la parte superior del túnel conformado por los piezómetros y se verificará el abatimiento del nivel freático. Así mismo, se realizará el cierre del permiso de vertimiento ya que finalizada la construcción cesa el objeto por el cual se obtuvo el permiso de vertimiento de aguas industriales, y se deberá realizar el desmantelamiento del sistema de tratamiento de aguas residuales industriales STARI o la Planta PTARI. Con respecto a las aguas de infiltración ya estará construido el sistema de entrega de dichas aguas directamente a las fuentes naturales. De ser posible se evaluará si este sistema puede ser de utilidad para las comunidades asentadas en el entorno del Proyecto e en especial para acueductos veredales.

4.2.3.4 Suelo

Durante esta fase se evaluará las cantidades de material obtenido, reutilizado y dispuesto en las zodmes, el cual deberá ser comparado con los balances de masa proyectados con el fin de verificar la eficiencia en la gestión del recurso.

4.2.3.5 Subsuelo

De igual manera, durante esta fase se evaluará las cantidades de material obtenido, reutilizado y dispuesto en las zodmes, el cual deberá ser comparado con los balances de masa proyectados con el fin de verificar la eficiencia en la gestión del recurso.

4.3 Gestión Social

En consideración a las particularidades sociales que conlleva el diseño, construcción y mantenimiento de este tipo de obras civiles, el Grupo de Gestión Social de la Subdirección de Ambiente y Gestión Social, ha identificado una serie de actividades sociales comunes a desarrollar en todos los contratos del Instituto Nacional de Vías - INVIAS. Estas actividades responden a mandatos constitucionales y legales. La implementación de estas actividades es de obligatorio cumplimiento para el Consultor o Contratista, independientemente de la cuantía, objeto o plazo del contrato.

4.3.1 Desafíos de la gestión social en la construcción de túneles

A continuación, se especifican los desafíos de la gestión social en la construcción de túneles, de acuerdo con las normas que son fundamento para su regulación:

- ✓ Puesta en marcha de un Protocolo para el Servicio de Atención al Ciudadano, por medio del cual los interesados en ejercicio de su derecho a la participación mediante la radicación de peticiones puedan establecer comunicación con el Consultor o Contratista (de acuerdo con la Ley 1755 de 2015).
- ✓ Socialización a la comunidad al inicio, avance y cierre de los estudios y/o obras a realizar. Por tratarse de proyectos que se realizan con recursos del Estado, las socializaciones deben incluir a todos los actores sociales implicados en el proyecto (ver Articulo 2 de la Constitución Política de Colombia). Con el fin de priorizar el recurso humano local y en concordancia la Plan Nacional de Desarrollo, el Consultor o Contratista debe registrar y divulgar la contratación de mano de obra local (calificada y no calificada) empleada para el proyecto.
- ✓ Dar respuesta oportuna a las inquietudes de las Veedurías Ciudadanas creadas con el propósito de realizar vigilancia pública a la ejecución del contrato de interés (de acuerdo con la Ley 850 de 2003). Cuando se cree este mecanismo de participación, su acompañamiento estará a cargo de la interventoría. De esta manera el Consultor o Contratista debe cumplir con la entrega de informes a los interesados según la Ley 1757 de 2015.
- ✓ Para determinar la responsabilidad civil que debe asumir el Contratista y los propietarios de predios cercanos a la obra, según lo previsto en el Código Civil, el Contratista debe realizar el levantamiento de Actas de vecindad de inicio y cierre, siempre que estén involucrados predios cercanos a las obras a ejecutar.
- ✓ Incorporar medidas de manejo tendientes a evitar los conflictos sociales y ambientales asociados al proyecto y/o contribuyan a su gestión, generando el empoderamiento del componente ambiental del proyecto por parte de las comunidades.

- ✓ Garantizar una gestión armónica entre organizaciones sociales y las instituciones del Estado, y garantizar el respeto de las determinantes ambientales del ordenamiento del territorio

También es importante mencionar aquellas actividades reglamentadas, que dependen de otras entidades del Estado y que regulan el cumplimiento de derechos fundamentales. Estas actividades son comunes a todos los contratos del INVIAS, pero su desarrollo depende del pronunciamiento de dichas entidades y la fase de construcción en la que se encuentre el proyecto.

4.3.2 Instituto Colombiano de Antropología e Historia - ICANH

Dando cumplimiento a la normatividad vigente en materia de protección al Patrimonio Arqueológico de la Nación, que incluye la ejecución del Programa de Arqueología Preventiva, se debe garantizar el cumplimiento de cada una de las seis fases del programa, cuando sea necesario (Decreto 138 de 2019).

Foto 4-7. Comunidad y proyecto – vía Bogotá Villavicencio - Guayabetal Cundinamarca

4.3.3 Autoridad nacional de consulta previa

Se debe realizar la consulta de presencia o no de comunidades étnicas ante dicha autoridad. De encontrarse con presencia certificada el Consultor y Contratista deben realizar, desde el inicio (protocolización de acuerdos), hasta su cierre, los procesos de

Consulta Previa, necesarios para mitigar los impactos generados a las comunidades, por el alcance de las obras.

Podrían ser necesarias otras consultas de acuerdo con la ubicación del proyecto, en procura de garantizar el derecho a víctimas del conflicto armado en Colombia De esta situación deriva la revisión del alcance del Plan Nacional de Desarrollo y consultas a la Agencia Nacional de Tierras, La Agencia para la Reincorporación y la Normalización, la Unidad de Restitución de tierras, entre otros, que deben ser tenidas en cuenta desde la fase de diseños de los proyectos.

4.3.4 Impactos sociales derivados de construcción y operación de túneles

De acuerdo con la experiencia en este tipo de proyectos a cargo del INVIAS, desde la Subdirección de Ambiente se identificaron una serie de impactos sociales a tener en cuenta en el diseño, construcción y operación de túneles y viaductos. A estos impactos se ha determinado un nombre, una descripción, posibles medidas para que el impacto sea controlado, prevenido, mitigado, corregido o compensado y posibles actividades a desarrollar en concordancia a las medidas propuestas.

De esta identificación previa de impactos se deriva la revisión del Consultor y Contratista, para determinar si dicho impacto de genera por el alcance del proyecto y es necesario según su concepto, la inclusión de medidas para su manejo en las fichas del Estudio de impacto Ambiental (EIA) o los proyectos del Plan de Adaptación de la Guía Ambiental (PAGA).

Título: Impacto socioeconómico a acueductos comunales por posible abatimiento		
Descripción el impacto: Afectación a las actividades socioeconómicas por desecación y/o contaminación de fuentes hídricas que proveen acueductos de uso comunal.		
Medida: Prevenir las posibles afectaciones a acueductos comunales (corregimientos, veredales).		
Actividades		
Diseño	**Construcción**	**Operación**
Identificación en la línea base de la existencia de acueductos comunales.	Actividades concertadas con la comunidad para la construcción, preservación y/o mejoramiento del acueducto comunal (mejoramiento y saneamiento de bocatomas; reposición de medios de conducción (mangueras, tubería, etc.)	Seguimiento a las mejoras realizadas en el acueducto comunal: verificación con la comunidad de las adecuadas condiciones de operación del acueducto, una vez finalizadas las intervenciones al mismo.

Tabla 4-1. Impacto socioeconómico a acueductos comunales por posible abatimiento

Título: Levantamiento de Actas de vecindad con ocasión de actividades de voladuras en túneles.		
Descripción el impacto: Las actividades de voladuras en túneles pueden generar afectación en instalaciones sociales. Esta actividad, también puede generar efectos en las comunidades.		
Medida: Controlar las posibles afectaciones producto de las voladuras.		
Actividades		
Diseño	**Construcción**	**Operación**
Planear realización de actas de vecindad.	Levantar actas de vecindad 15 días antes y 15 días después.	N/A
	Socializar cronogramas de desarrollo de actividades de voladura.	
	Gestionar el acompañamiento de ente institucional de control encargado de proteger y vigilar derechos de las comunidades.	

Tabla 4-2. Levantamiento de Actas de vecindad con ocasión de actividades de voladuras en túneles

Título: Impacto a las cadenas productivas y unidades económicas con arraigo en el área de influencia.		
Descripción el impacto: Disminución en la economía local, de circulación local de bienes y servicios producidos con arraigo en el área de influencia.		
Medida: Mitigar la posible disminución de rentas económicas y empleabilidad en el área de influencia.		
Actividades		
Diseño	**Construcción**	**Operación**
Identificar en la línea base, a través de fuentes primarias y secundarias, de la Unidades económicas asentadas en el área de influencia del proyecto.	Gestionar con organismos locales y nacionales, la promoción del emprendimiento y fomento de oportunidades de empleabilidad, para el acompañamiento de las Unidades Económicas presentes en el área de influencia del proyecto.	Promocionar la inserción laboral de mano de obra calificada y no calificada, de la población del área de influencia.
Identificar en la línea base de organismos locales y nacionales, con presencia en el territorio, que promuevan el emprendimiento y fomento de oportunidades de empleabilidad. (SENA; CAJAS DE COMPENSACIÓN; CAMARAS DE	Apoyar la divulgación e inserción de la comunidad, a las estrategias municipales y regionales de promoción del emprendimiento, así como del fomento de oportunidades de empleabilidad.	
	Promocionar la inserción laboral de mano de obra calificada y no calificada, de la población del área de influencia.	

Tabla 4-3. Impacto a las cadenas productivas y unidades económicas con arraigo en el área de influencia.

Título: Impacto por vías que quedan en desuso en proceso de construcción de túneles.		
Descripción del impacto: La construcción de túneles puede dejar vías inutilizables/vías en desuso, las cuales suelen ser ocupadas por las comunidades generando asentamientos ilegales.		
Medida: Prevenir y mitigar posibles impactos por vías en desuso por la construcción de túneles.		
Actividades		
Diseño	**Construcción**	**Operación**
Localizar las posibles vías en desuso e impactos en las comunidades.	Señalizar adecuadamente usando estrategias de comunicación visible, el peligro y consecuencias que puede generar usar estos espacios como asentamientos humanos.	Efectuar seguimiento a las vías en desuso con las autoridades correspondientes.

Tabla 4-4. Impacto por vías que quedan en desuso en proceso de construcción de túneles

Título: Impactos en las comunidades por cambios en dinámicas de transito		
Descripción del impacto: Con la construcción de túneles se aumentan las velocidades, densidad de tráfico, frecuencias de transporte público.		
Medida: Mitigar los posibles impactos generados por las nuevas condiciones de transitabilidad que acarrea la puesta en operación de los túneles.		
Actividades:		
Diseño	**Construcción**	**Operación**
Identificar en la línea base los asentamientos poblados, instituciones educativas - I.E., centros comunitarios - C.C, instituciones de salud- I.S ubicados en el área de influencia del proyecto.	Implementar metodologías participativas donde se incluyan diseñadores de la vía y líderes comunitarios, directores de i.e, directores de i.s, presidentes de Juntas de Acción Comunal, identificando pasos peatonales habituales, rutas de desplazamiento de la comunidad (principales y alternativas), con el fin de planificar concertadamente soluciones viales seguras (puentes peatonales, pasos desnivel, zonas de velocidad reducida, reductores de velocidad, etc).	Mantenimiento periódico y mejoramiento de soluciones viales seguras implementadas en fase constructiva.

Tabla 4-5. Impactos en las comunidades por cambios en dinámicas de transito

<table>
<tr><th colspan="3">Título: Confinamiento</th></tr>
<tr><td colspan="3">Descripción el impacto: Limitación parcial y/o definitiva en el acceso a servicios educativos, de salud y actividades laborales de los habitantes del área de influencia, reflejada en el aumento de tiempos de desplazamiento y restricciones a las formas de movilidad prexistente al proyecto; atribuibles a las nuevas condiciones de operación de la vía, con ocasión de la puesta en operación definitiva del túnel.</td></tr>
<tr><td colspan="3">Medida: Prevenir, Mitigar, Corregir y Compensar las posibles afectaciones al acceso de servicios educativos, de salud y actividades laborales, impactando en los usos y costumbres que del territorio hacen las comunidades</td></tr>
<tr><th colspan="3">Actividades</th></tr>
<tr><th>Diseño</th><th>Construcción</th><th>Operación</th></tr>
<tr><td>Identificar en la línea base, centros poblados que, con ocasión de los Diseños Técnicos de la Obra y la condición de operación definitiva del túnel, tendrán una disminución en las dinámicas sociales de desplazamiento y movilidad, para accesos a servicios de educación, salud y actividades</td><td rowspan="2">Propender por medidas de mitigación que mejoren los tiempos de movilidad, que en ocasiones se ven aumentados con la puesta de operación de los túneles, en especial dirigidas para las comunidades asentadas en las inmediaciones de los portales de entrada y salida y las vías superiores existentes (ejemplo: Transportes circulares a cargo de la operación del túnel; frecuencias de transporte público con empresas locales; entre otros).</td><td rowspan="2">N/A</td></tr>
<tr><td>Diseñar y proponer las medidas de manejo que conlleven a la mayor mitigación posible de los impactos evaluados.</td></tr>
</table>

Tabla 4-6. Confinamiento

4.4 GESTIÓN PREDIAL

La Gestión Predial, es el procedimiento de adquisición por parte del Gobierno Nacional - Instituto Nacional de Vías – INVIAS o quién este delegue, de las franjas de terreno necesarias para la construcción de proyectos viales, que comprende las siguientes actividades: elaboración de las fichas prediales, estudios de títulos, práctica de avalúos, enajenación voluntaria directa y/o expropiación administrativa o judicial, constitución y/o imposición de servidumbres de los predios requeridos.

El presente documento tiene por objeto señalar los aspectos a tener en cuenta en los procesos de Gestión y Adquisición Predial para el desarrollo de los proyectos que contemplen la construcción de túneles, que adelante el Instituto Nacional de Vías - INVIAS.

En ese sentido, es importante resaltar que la planificación y desarrollo de proyectos de infraestructura vial, tiene dentro de sus condicionantes iniciales, la efectiva y oportuna disponibilidad física y jurídica de las áreas requeridas para las obras. El proceso para la obtención de estas áreas que se adquieren para mejoramiento y construcción conlleva variables de tipo ambiental, social, técnico, jurídico, económico y cultural, que solo se

evidencian en el momento en que se está analizando y materializando en terreno el diseño definitivo del proyecto y se conocen las especificaciones técnicas de construcción, el alcance de las obras a desarrollar y las necesidades de espacio físico para la obra.

4.4.1 Componente jurídico

Inicialmente es pertinente anticipar que los trámites y procedimientos asociados a los procesos de adquisición de inmuebles por motivos de utilidad pública son de creación legal, esto es, se sustentan en un marco normativo especial, amparado en reglas tanto origen constitucional como legal, merced a lo cual su cumplimiento no depende de la administración por constituir normas de orden público.

Dichos procesos y trámites asociados a la adquisición de inmuebles necesarios para la ejecución de obra pública y/o de interés general, tiene su amparo inicial en el artículo 58 de la Constitución Política, según el cual*: "Se garantizan la propiedad privada y los demás derechos adquiridos con arreglo a las leyes civiles, los cuales no pueden ser desconocidos ni vulnerados por leyes posteriores. Cuando de la aplicación de una ley expedida por motivos de utilidad pública o interés social, resultaren en conflicto los derechos de los particulares con la necesidad por ella reconocida, el interés privado deberá ceder al interés público o social."*

Para el caso específico de los proyectos de infraestructura que contemplan la construcción de túneles, adicionalmente se debe tener en cuenta lo dispuesto en el artículo 332 constitucional: *"El Estado es propietario del subsuelo y de los bienes y servicios ambientales no renovables, sin perjuicio de los derechos adquiridos y perfeccionados con arreglo a las leyes preexistentes."*

Por tanto, el esquema jurídico que opera para efectos de la adquisición de bienes inmuebles para proyectos de infraestructura vial está contenido, en las siguientes normas:

- ✓ Constitución Política de Colombia
- ✓ Ley 9 de 1989
- ✓ Ley 388 de 1997
- ✓ Ley 1682 de 2013 (Ley de Infraestructura)
- ✓ Ley 1673 de 2013 (Ley del Avaluador)
- ✓ Ley 1882 de 2018
- ✓ Decreto 1420 de 1998
- ✓ Decreto reglamentario 556 de 2014 (Categorías de los avaluadores)
- ✓ Decreto 1079 de 2015
- ✓ Decreto 738 de 2014
- ✓ Resolución 620 de 2008 (IGAC)
- ✓ Resolución 898 de 2014
- ✓ Resolución 1044 de 2014
- ✓ Resolución 316 de 2015

4.4.2 Componente técnico

Bajo la normatividad anteriormente señalada, será necesario que, dentro del proceso de gestión predial adelantada para los proyectos de infraestructura mencionados, el ejecutor deberá determinar los predios a adquirir o afectar para:

- Portales de accesos: Se debe adelantar el proceso de adquisición predial para las zonas requeridas.
- Vías de accesos: Se deberá verificar la pertinencia de adquirir las zonas de terreno requeridas o la constitución de servidumbres de paso en las mismas, lo anterior teniendo en cuenta la utilización de los predios para el tránsito de maquinaria y equipo tanto en la etapa constructiva como en el posterior mantenimiento de los túneles o construcciones anexas.
- Subestaciones: En caso de que el proyecto requiera la instalación y puesta en funcionamiento de equipos electromecánicos, es importante determinar si los mismos se requieren la construcción de subestaciones eléctricas, lo cual hará necesaria la compra de predios de acuerdo con el diseño.
- Constitución servidumbres para redes eléctricas y de datos: En caso de que el proyecto requiera la instalación y puesta en funcionamiento de equipos electromecánicos, es importante determinar si los mismos se abastecerán del servicio local o de los diferentes proveedores o si será necesario la construcción de líneas eléctricas o de datos, lo cual hará necesario la constitución y/o imposición de servidumbres eléctricas.
- Zonas de disposición de materiales de excavación - ZODMES: Para dar cumplimiento a las disposiciones ambientales que regulan la materia, se deberá adelantar el proceso de adquisición predial para las zonas requeridas.
- Vías industriales: Teniendo en cuenta que al terminar las obras deben ser recuperados los terrenos y dejados en las mismas condiciones (o mejores) de acuerdo con los inventarios y actas de vecindad, es necesario realizar un seguimiento en el proceso de la construcción, cierre y terminación, para que a futuro, no se presenten reclamaciones al quedar abiertas esas vías que puedan llegar a generar riesgo a los túneles, a las obras y reclamaciones de las comunidades ante posibles daños, en razón a ello, se debe revisar la necesidad de constitución y/o imposición de servidumbres de paso.
- Centros de Control de Operaciones: En caso de que se requiera para el proyecto debe prever la necesidad de uno o varios centros de control de operaciones y respaldo del mismo.

Foto 4-8. Puente San Miguel, entre túneles 14 y 15, Vía Bogotá Villavicencio

4.4.3 Componente valuatorio

Los avalúos comerciales corporativos para adquisición de predios para el desarrollo de proyectos de infraestructura deben realizarse bajo las precitadas normas y para ello el ejecutor deberá adelantar esta actividad de conformidad con lo dispuesto en el artículo 23 de la Ley 1682 de 2013, y en caso de que los informes de avalúos sean elaborados por una lonja, ésta deberá tener mínimo cinco (5) años constituida y la naturaleza de la misma deberá ser entidad sin ánimo lucro.

La entidad ejecutora del proyecto deberá establecer los parámetros y lineamientos que deben tener en cuenta para presentar los informes de avalúo comercial corporativo para la entidad ejecutora del proyecto, con el fin de articular y armonizar las normas que lo rigen y que no presenten contravención con el normalizado.

Dicho documento será de estricto cumplimiento para el contratista y la interventoría este último deberá acreditar la idoneidad de los profesionales que realicen la aprobación de los informes de avalúo.

4.4.4 Escenarios con características especiales

En los contratos de obra pública se ha realizado la elaboración de avalúos comerciales corporativos para la adquisición de franjas para mejoramiento, ampliación y rehabilitación vial, no obstante, los procedimientos han sido orientados netamente a las actividades de la intervención física del proyecto, sin embargo, en este documento se

fijarán casos especiales que si bien corresponden a la construcción de los túneles no están relacionados directamente con la ampliación, mejoramiento y rehabilitación de la vía y son los que se enuncian a continuación:

4.4.4.1 Elaboración de avalúo comercial corporativo por obligaciones ambientales

En este escenario se evidencia que la gestión y adquisición predial no corresponden al mejoramiento, ampliación y rehabilitación de la vía, sino que se deriva de una obligación de tipo ambiental que constituye una directriz emitida por la autoridad ambiental, que exige a los contratos de obra pública la compensación mediante adquisición de predios cuando requieren enajenación de los terrenos.

En el caso de los túneles, es fundamental que la elaboración del avalúo debe estar sujeto a la normatividad vigente y con los procedimientos consignados por la entidad ejecutora del proyecto, por lo que es importante que la misma tenga dentro de su planta de personal, profesionales idóneos que realicen la verificación de los insumos (ficha predial y el estudio de títulos), que se encuentren debidamente aprobados por los profesionales técnicos y jurídicos de la interventoría.

4.4.4.2 Elaboración de avalúo comercial corporativo de servidumbres

Para la elaboración de los avalúos comerciales se deberá verificar el tipo de servidumbre que se va a imponer (eléctrica, hidrocarburos, etc.), se aclara que el cálculo de dichas servidumbres estará ligado a la limitación que tendrá el predio luego de ejecutar la servidumbre y la tasación de la misma será calculada de acuerdo con la limitación al aprovechamiento del predio.

Podrán apoyarse en el marco normativo que tengan las entidades públicas que hayan regulado el tema ejemplo la norma RETIE (Reglamento técnico de Instalaciones eléctricas), se enfatiza que dicho valor no podrá pagarse al 100% del valor comercial del predio si no se justifica correctamente que el predio no tendrá ningún aprovechamiento después de imponer la servidumbre.

De todas maneras, las firmas valuatorias deberán someterse a lo regulado en la Resolución IGAC No. 620 del 2008, con respecto a la investigación económica, es decir, identificar el método más apropiado para estimar el valor del terreno (Método de Comparación o de mercado, Método de capitalización o rentas de trabajo y /o Método Residual) y sobre dicha investigación darle el porcentaje requerido al valor adoptado, teniendo en cuenta el grado de afectación del mismo, es decir, si la afectación es total, parcial o indiferente sobre la franja de terreno afectada, bajo esta condición es potestad de la firma avaluadora tasar el porcentaje de valoración.

La gestión predial se realizará sin excepción a partir de la información suministrada en la etapa de diseño a **Fase III**, (definición de áreas a adquirir o imposición de servidumbres), la Gestión Predial se adelantará en lo definido en el respectivo documento técnico predial de la entidad ejecutora. Para efecto del cálculo de

servidumbres se deberá tener en cuenta posibles desvalorizaciones (daño al remanente) mediante el cálculo de la correspondiente indemnización.

4.4.4.3 Elaboración de avalúo comercial corporativo de terrenos por motivos de riesgo

Las construcciones de túneles pueden llevar a cabo la adquisición de predios que, por motivos de estabilización, fallas geológicas o por vulnerabilidad de los propietarios que se encuentran en la zona superficial que colindan con la construcción de esta obra, generan un riesgo el cual se debe mitigar.

Así las cosas, a fin de que la entidad ejecutora no tenga implicaciones por mala ejecución y control de una posible amenaza que comprometa el tránsito de la vía, la obra o las vidas de las personas, se deberá contar con el concepto técnico de la adquisición del terreno realizado por el contratista y aprobado por la interventoría, con la justificación y viabilidad de la compra de los predios necesarios que mitiguen esta acción.

Para el caso de la elaboración de los informes, adicionalmente se deberá anexar el documento expedido por la entidad competente que ratifique el riesgo en la zona para continuar con el proceso de gestión y adquisición predial, con el fin de respaldar el concepto técnico elaborado por el contratista. En caso de identificar zonas inestables, es importante el diligenciamiento de documentos técnicos como lo son ficha predial y la identificación de zonas inestables, como insumo previo para elaboración de avalúo corporativo.

Nota: Se aclara que para la elaboración de los avalúos comerciales corporativos se debe regir por los lineamientos de la Resolución 620 del 23 de septiembre de 2008 del IGAC y el contenido del peritazgo debe estar sujeto a los parámetros contenidos en los documentos técnicos de la entidad ejecutora.

5 Capítulo – EXPLORACIÓN E INVESTIGACIÓN

5.1 Glosario

Abatimiento o descenso: Descenso del nivel freático o de la superficie piezométrica debido a la extracción del agua subterránea por bombeo, por el drenaje de una galería o túnel, al flujo artesiano de una perforación o a la descarga de un manantial.

Acuífero: Formación geológica permeable capaz de almacenar, transmitir y proporcionar cantidades aprovechables de agua [10].

Acuífero poroso o dendrítico: son acuíferos de rocas o sedimentos detríticos. Su permeabilidad se debe a la porosidad intergranular (de tipo primario) se pueden modelar mediante la Ley de Darcy (flujo laminar). Usualmente se encuentra en suelos y rocas sedimentarias.

Acuífero fracturado: son acuíferos con porosidad secundaria producto de los efectos de esfuerzos. Para estos tipos de depósitos el componente de geología estructural es vital, por lo cual es necesario establecer parámetros como familias de fracturas, y medir su orientación, buzamiento, apertura y separación. En estos medios, usualmente el flujo también es laminar, pero muchas veces alcanza la transición; por tanto, deben modelarse por medio de la ley cúbica de placas paralelas, red de fracturas discretas o medio de doble porosidad.

Acuíferos kársticos: asociados con la disolución de rocas calcáreas o carbonatadas (calizas/dolomías) y evaporitas (yeso o domos salinos). Debido a los fenómenos de disolución, el agua utiliza las zonas que son más fáciles de disolver, lo que vincula al componente de zonas de debilidad y variación de su composición química interna. Los tipos de flujo pueden variar desde difusivo en las fracturas a turbulento en las cavernas. Es necesario realizar estudios de familias de fracturas, espeleología en este tipo de acuíferos y otros métodos para su investigación (hidrodinámica, balance hídrico, hidroquímica, trazadores, simulación matemática) sobre los fenómenos de flujo y de transporte de soluto).

Acuícludo: formación geológica que contiene agua en cantidad apreciable y que no permite que el agua circule a través de ella. Ejemplo, limos, arcillas.

Acuífugo: Formación geológica sin poros interconectados y, por tanto, incapaz de contener o transmitir agua. Ejemplos son la mayoría de rocas ígneas y metamórficas sin meteorización ni alteración

Acuitardo: estrato o unidad litológica de baja conductividad hidráulica que transmite agua muy lentamente; sin embargo, bajo condiciones especiales, puede servir de recarga vertical para otros acuíferos.

Acuífero libre, acuífero no confinado o freático: Acuífero cuyo límite superior es el nivel freático y en donde la presión hidrostática es igual a la presión atmosférica.

Acuífero confinado o artesiano: Acuífero limitado superior e inferiormente por formaciones impermeables o casi impermeables y cuya superficie piezométrica se encuentra por encima de la superficie del suelo.

Acuífero semiconfinado: Acuífero cubierto y/o sustentado por una capa de material semipermeable a través de la cual existe flujo hacia o desde el acuífero.

Acuífero colgado: Región dentro de la zona no saturada en la que se pueden dar localmente condiciones de saturación cuando existe una capa subyacente de baja permeabilidad.

Área de influencia directa del túnel: Extensión donde se expresarán los efectos de la construcción del túnel, donde el área es la entrada al modelo hidrogeológico.

Balance hídrico: medición de las entradas y salidas de agua dentro de un sistema hídrico y cambios en el almacenamiento en una masa de agua a lo largo de un período de tiempo.

Cobertura: corresponde a la dimensión en términos de longitud vertical u horizontal, comprendida entre la superficie del área excavada en el túnel y la superficie del terreno natural; esta puede ser vertical o lateral, según sea el caso.

Coeficiente de almacenamiento: Volumen de agua liberado o añadido a un acuífero por unidad de superficie del acuífero y por unidad de variación de carga hidráulica.

Conductividad hidráulica: Propiedad de un medio poroso que, de acuerdo con la ley de Darcy, relaciona el caudal específico con el gradiente hidráulico.

Diaclasa: también denominada junta, es una fractura en la cual no es visible algún desplazamiento paralelo a su plano, ocasionado por tectonismo.

Discontinuidad: término general que denota cualquier separación en el macizo rocoso con baja o nula resistencia a la tracción. El término reúne múltiples tipos de diaclasas, planos de debilidad, planos de esquistosidad, planos de foliación, planos de estratificación y fallas.

Ensayos básicos: son los ensayos de laboratorio e *in situ* aplicables para definir las propiedades y características relevantes del terreno.

Ensayos opcionales: son los ensayos de laboratorio e *in situ* que sirven para ampliar o profundizar en la determinación de las propiedades y características relevantes, u otras necesarias, a juicio del diseñador.

Ensayo o prueba de inyección: Ensayo que consiste en medir y analizar la respuesta de un acuífero frente a una perturbación (inyección de fluido a presión) con el fin de determinar sus propiedades hidráulicas.

Ensayo o prueba de interferencia: Ensayo que consiste en extraer una cantidad conocida de agua de un pozo y medir los cambios de la carga hidráulica producidos en pozos de observación próximos durante y tras el período de inyección o extracción.

Flujo de agua subterránea: flujo de agua subterránea que obedece a la respuesta de los gradientes potenciales hidráulicos, unido a las pérdidas y ganancias del sistema hidrogeológico.

Hidrogeología: Rama de la hidrología que estudia las aguas subterráneas y se basa en la geología y la mecánica de fluidos.

Información primaria: Es la que se obtiene con contacto directo del objeto del estudio, numeral 5.2.3.

Información secundaria: Es la que se obtiene mediante un contacto indirecto con el objeto del estudio; está relacionada con otro proyecto o investigación, numeral 5.2.2.

LiDAR: (Light Detection And Ranging, por sus siglas en inglés) Técnica de teledetección óptica que utiliza un láser aerotransportado para escanear la superficie del terreno y obtener una representación precisa de las formas.

Macizo rocoso: Conjunto de roca intacta y discontinuidades.

Modelo del terreno: Conjunto de los diferentes factores que caracterizan el área del proyecto (modelo topográfico, geológico, geomorfológico, geotécnico, hidrogeológico). En este se reúnen todas las características y las condiciones predominantes del terreno.

Modelo Hidrogeológico Conceptual (MHC): Un modelo conceptual de agua subterránea es una simplificación de un problema de agua subterránea del mundo real de tal manera que (1) captura las características esenciales del problema del mundo real y (2) puede describirse matemáticamente (Haitjema, 1995). Definimos un modelo conceptual como una representación cualitativa de un sistema de agua subterránea que se ajusta a los principios hidrogeológicos y se basa en información geológica, geofísica, hidrológica, hidrogeoquímica. El diseño de un modelo conceptual normalmente debe considerar nueve fuentes de datos: geomorfología, geología, geofísica, clima, vegetación, suelos, hidrología, hidroquímica / geoquímica y aspectos antropogénicos (Kolm, 1996).

Modelo Hidrogeológico Numérico (MHN): Describe y traduce matemáticamente el modelo conceptual del flujo de agua subterránea a través del diseño de una geometría (malla) 2D o 3D, la selección de las condiciones iniciales y de contorno, el establecimiento de valores de parámetros hidráulicos y requiere calibración con datos observados en campo. Emplea para su solución métodos analíticos, elemento analítico y modelos numéricos (diferencias finitas, elementos finitos y volúmenes finitos)

Nivel piezométrico: Suma de la altura geométrica y la carga hidrostática de un líquido, expresada en unidades de altura; en aguas subterráneas, coincide con la altura que alcanza el agua en un piezómetro conectado a un punto de un acuífero.

Observación: Recolección en campo de información cualitativa o cuantitativa.

Permeabilidad: Propiedad física que representa el traspaso de fluidos dentro de un cuerpo a través de sus intersticios porosos.

Piezómetro o pozo de observación: Pozo completamente entubado excepto en su base o en diferentes tramos aislados (multi-piezómetro), utilizado para medir la carga hidráulica en ese punto.

Porosidad: Relación entre el volumen de intersticios en una muestra dada de un medio poroso y el volumen total del medio poroso, incluidos los vacíos. Estos intersticios están

relacionados con el volumen de una roca, expresándose entre 0 y 1 en cuanto a su proporción en la misma.

Porosidad primaria: Porosidad originada durante la sedimentación o diagénesis (formación) generando espacios vacíos no rellenados por los minerales en una roca. Estos espacios intersticiales suelen ser llenados por fluidos (gases o líquidos).

Porosidad secundaria: Porosidad causada por fracturación o meteorización de una roca o un sedimento con posteridad a su formación generando espacios vacíos en una roca.

Propiedades relevantes del terreno: Propiedades del terreno que dictan su comportamiento y modo de falla.

Prueba de bombeo: Ensayo que consiste en bombear agua en un pozo con uno o más caudales previamente elegidos (continuo o escalonado), durante el cual se miden regularmente los niveles piezométricos en el pozo de bombeo y en pozos de observación cercanos (piezómetros); los datos obtenidos se utilizan para determinar los parámetros del acuífero en las proximidades del pozo de bombeo.

Roca intacta: También se conoce como matriz de roca, es aquella que no contiene discontinuidades.

Suelo: Material producto de la acumulación de partículas sólidas minerales, con presencia esporádica de material orgánico.

Terreno: Término general para referirse al material en el cual se excava el túnel, compuesto por roca y suelo; incluye discontinuidades y vacíos con presencia de fluidos.

Unidad hidrogeológica: Conjunto de formaciones geológicas de una extensión considerable que tienen propiedades hidrogeológicas bien diferenciadas.

5.2 Generalidades

Las actividades de investigación y exploración para un túnel vial y su entorno están encaminadas a definir de la manera más precisa, la condición geológica, geomorfológica e hidrogeológica del terreno para definir la construcción del modelo geológico, que servirá a la caracterización geotécnica del macizo rocoso y el área de influencia en donde se construirá el túnel. Se subraya que en la construcción del modelo geológico, se tienen en cuenta, ente otros, la topografía, la geomorfología, geología estructural, hidrogeología y la caracterización geotécnica que se obtienen a partir del levantamiento en campo de datos específicos (estructurales y geomecánicos) e información relevante para cada ítem, de manera que permitan sustentar el modelo geológico-geotécnico, que será input para la realización del modelo hidrogeológico, y la caracterización y entendimiento de las propiedades geomecánicas y estado de esfuerzos, que caracterizan el terreno por donde irá el túnel [14]. La integración de toda la información, conduce al adecuado conocimiento de las condiciones de cada macizo rocoso en particular. Este capítulo hace referencia a estos modelos y a las actividades específicas para su consecución.

Las dimensiones del modelo geológico-geotécnico dependen de cada proyecto. Adicionalmente se deben tener en cuenta aspectos medioambientales, sociales y climáticos del área de influencia del mismo. Como mínimo, incluirá el corredor previsto

para la localización del túnel, la distancia mínima antes y después de sus portales y su extensión dependerá de los impactos analizados por cada componente, pero en cualquier caso no deberá ser menor de 500 m.

El proceso de investigación del macizo, se lleva a cabo a través de una campaña de exploración encaminada a encontrar y determinar todos los aspectos necesarios para el diseño del túnel, y lograr así, la optimización del mismo, en términos de tiempos y recursos. La investigación, además está encaminada a conocer y disminuir los posibles impactos ambientales en el área del proyecto.

La investigación se realiza de forma gradual a través de las diferentes fases del proyecto; por esta razón, su documentación y trazabilidad son esenciales para la optimización del modelo del terreno obtenido en una fase anterior. La investigación realizada para un túnel en sus diferentes etapas permite reducir la incertidumbre en las condiciones del mismo y su etapa de construcción, lo que permite una optimización del diseño general del túnel.

Los resultados obtenidos en la etapa de exploración e investigación deben ser confiables y sustentables desde el punto de vista estadístico o probabilístico de manera que el proceso sea sostenible, y se facilite así, estimar los riesgos asociados a la ejecución del proyecto.

Foto 5-1. Ecosistema cruce cordillera Central, Túnel de la Línea, Cajamarca Tolima

5.2.1 Aspectos básicos de la investigación

Los aspectos objeto de investigación en cada etapa del proyecto, incluyendo su método, secuencia, frecuencia, duración y precisión, deberán ser definidos y presentados de manera particular en un documento a la entidad contratante para su aprobación o comentarios. Es importante tener en cuenta que la investigación para un proyecto de túneles viales de carretera deberá contemplar aspectos como la existencia de comunidades étnicas, redes de servicio público, características y servicios ambientales de la zona y patrimonio arquitectónico, cultural y arqueológico que pueda impactar el proyecto, así como la existencia de títulos mineros en proceso de adjudicación, otorgados, existentes y en explotación.

5.2.2 Fuentes de información secundaria

Para el desarrollo de la investigación y estudios en las diferentes fases, se podrán evaluar entre otras, las siguientes fuentes de información:

- *Fotografías aéreas e imágenes satelitales*, para identificar aspectos geológicos y geomorfológicos de mayor relevancia, características estructurales como lineamientos de falla y otras en mayor escala. Igualmente, contactos tanto litológicos como estructurales y posibilidades preliminares de lineamientos geométricos para las alternativas.
- *Mapas topográficos*, proveen mapas índices del sitio y permite la estimación a nivel topográfico del terreno. Igualmente sirven para identificar restricciones de los alineamientos preliminares e identificar cambios morfológicos del terreno.
- Mapas e informes geológicos, hidrogeológicos, geomorfológicos, amenaza, etc., para obtener información de las formaciones geológicas principales, a la escala de interés, de modo que se pueda evidenciar tanto las características litológicas como estructurales, así como aspectos hidrogeológicos y ambientales más relevantes.
- *Informes preliminares de investigación subsuperficial*, que proporcionan datos sobre condiciones regionales y locales de los materiales, suelos y rocas, que se encuentran en los lineamientos geométricos preliminares. Para ello se podrán hacer recorridos por cada uno de los lineamientos para su reconocimiento.
- *Informes de proyectos de infraestructura o edificaciones* construidas en el área de influencia de los lineamientos previos, para proveer información relacionada con los tipos de suelos y rocas, sus características geomecánicas y aspectos de interés a la hora de evaluar las condiciones y métodos de construcción del túnel.
- *Mapas elaborados en el marco de estudios de amenaza o riesgo* por remoción en masa, inundaciones, avenidas torrenciales, incendios, actividad volcánica u otras con que se cuente.
- *Informes de registro de pozos de aguas subterráneas* y en general mapas de características hidrogeológicas, a las escalas de interés o mayor, que existan.

En lo concerniente a los mapas, los Ministerios e instituciones como el Servicio Geológico Colombiano (SGC), Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), Instituto Nacional de

Investigaciones Marinas y Costeras (INVEMAR), Agencia Nacional de Minería (ANM) o quienes cumplan estas funciones, son las instituciones oficialmente encargadas de la cartografía geológica, topográfica básica, hidrología y otras investigaciones dentro del territorio nacional.

En relación con los aspectos ambientales, sin que exima la consulta de la normatividad ambiental y social aplicable, se debe consultar las disposiciones establecidas en la Resolución 1415 de 2012, del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) a través de la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA), que abordan lo relacionado con el modelo de almacenamiento Geodatabase, así como la Resolución 1503 de 2010 (modificada parcialmente por la res. 1402 de 2018) y establecen la metodología general de presentación de estudios ambientales o las normas que las modifiquen, deroguen o sustituyan, por último, deben consultar los términos de referencia aplicables para el proyecto y los anexos que el MADS establezca, referente a los Planes de Manejo y Ordenamiento de la Cuenca (POMCA) de las zonas a estudiar y/o intervenir y Consulta de los Planes o esquemas de ordenamiento territorial pertinentes.

Los documentos de consulta referente a estas entidades, como fuentes y tipos de información técnico – científica, corresponden a [40 - 41]:

- Mapas topográficos
- Mapas históricos (anteriores usos del suelo)
- Mapas y descripciones geológicas y geomorfológicas
- Mapas y descripciones hidrogeológicas
- Mapas o estudios geotécnicos en el área de influencia del proyecto
- Reportes y mapas e inventarios sobre sismicidad
- Reportes y mapas e inventarios de movimientos en masa, caída de rocas, actividad volcánica, geotérmica, licuación, etc.
- Fotografías aéreas e imágenes satelitales (de distintas épocas y al menos dentro de un período de tiempo entre 20 y 30 años)
- Investigación/exploración existente en el área de estudio
- Experiencias previas en el área de estudio
- Información meteorológica
- Mapas con fuentes de agua (pozos, manantiales, etc.)
- Reportes mineros
- Análisis e interpretación geológica de fotografías satelitales y aéreas.
- Entre otros documentos técnicos e investigativos que sean requeridos.

5.2.3 Fuentes de información primaria

Corresponde a la información levantada en campo, analizada y procesada en laboratorio, con evaluación y modelación rigurosa a nivel de experto, que se realizará dentro de la campaña de investigación y exploración del proyecto a partir de **Fase II**, cuyos entregables corresponden a:

- Formatos
- Ensayos
- Parámetros
- Registros
- Carteras de campo
- Mapas
- Planos
- Reportes
- Modelos
- Perfiles
- Informes
- Fotografías e imágenes
- Análisis de interpretación
- Entre otros resultados

5.3 Estudio hidrogeológico

Las investigaciones hidrogeológicas buscan desarrollar el modelo hidrogeológico que permita evaluar la influencia de un nuevo elemento (túnel) dentro del equilibrio hidráulico que existe en el terreno. Este modelo permite, a su vez, cuantificar caudales de infiltración en el túnel y comprender los efectos ambientales que se puedan presentar en el entorno.

El modelo hidrogeológico busca identificar, caracterizar y clasificar las unidades hidrogeológicas o tipos de acuíferos en el área de influencia del túnel proyectado, además de localizar zonas de recarga, direcciones de flujo y zonas de descarga para definir parámetros hidráulicos del sistema en donde se construirá el túnel.

El modelo hidrogeológico ayuda a resolver las principales incógnitas de la intervención del medio hidrogeológico como son: conceptualizar el movimiento del agua subterránea, niveles piezométricos y sus implicaciones durante la construcción del túnel (caudales y presión), comprender los efectos ambientales que se puedan presentar en el entorno (alteración de condiciones de flujo locales en la descarga de manantiales), cuantificar los caudales de infiltración en el túnel y salida de este en los portales, y proyectar los posibles impactos en los recursos hídricos superficiales y subterráneos para proponer medidas de manejo acertadas.

En general, las investigaciones que son necesarias adelantar desde el punto de vista hidrogeológico para cada etapa del proyecto deberán corresponder a aquellas encaminadas a resolver los planteamientos técnicos del proyecto y los requerimientos de la autoridad ambiental. Por lo tanto, durante la ejecución de cada una de las etapas será imprescindible consultar con la autoridad ambiental competente. Las exigencias

deben estar reflejadas en el documento “Planeación y alcances de la campaña de exploración”.

Los sistemas hidrogeológicos corresponden a sistemas hidrodinámicos con entrada y salida de agua al medio geológico (porosos y de fractura), a través de recarga y descarga que interactúan con los procesos de infiltración y percolación de las lluvias [15] y a corrientes de aguas superficiales intermitentes, temporales, efímeras o perennes conectadas a los tipos de acuíferos. Los sistemas hidrogeológicos involucran diferentes tipos de rocas presentes en el sistema, que se describen como permeables, poco permeables e impermeables, que permiten, el tránsito y la acumulación del agua subterránea dentro de las mismas, además de su interacción con el exterior por medio de ingresos (recargas) y salidas (descargas).

El modelo hidrogeológico depende directamente del modelo geológico; por tal motivo, el estudio parte del reconocimiento de las unidades geológicas a detalle y la geología estructural, como: fallas, contactos, discontinuidades, diaclasamientos, pliegues, etc., de especial interés en la hidrogeología de proyectos de túneles, además de eventos dinámicos (deslizamientos o zonas de inundación), que son elementos esenciales en los modelos hidrogeológicos que se desarrollen [15, 17].

Todas estas herramientas permiten fortalecer el Modelo Hidrogeológico Conceptual MHC al caracterizar las diferentes unidades que constituyen el sistema hidrogeológico, conforme a sus características litológicas (acuíferos, acuífugos, acuícludos, acuitardos, etc.), su conectividad (poroso, fracturado o kárstico), hidróstaticas (acuífero libre, confinado, semiconfinado, colgado, multicapas)

Las principales herramientas para la generación de modelos hidrogeológicos que están involucrados en el desarrollo de la fase de diseño del túnel, son los trabajos de exploración de campo, que incluyen métodos directos como las perforaciones exploratorias, ensayos hidráulicos y métodos indirectos como los estudios geofísicos, que obtienen información del subsuelo a partir de técnicas como la geoeléctrica [18], la refracción o reflexión sísmica y en algunos casos la magneto-telúrica. El reconocimiento de campo incluye el inventario de puntos de agua, identificación de niveles freáticos medidos con piezométros y la instalación de pozos de monitoreo con piezómetros construidos durante la fase de diseño. Los estudios de laboratorio en esta fase parten de la recolección de muestras de agua para su clasificación fisicoquímica y mineralógica.

La investigación hidrogeológica para la correcta definición del modelo hidrogeológico conceptual incluirá diversas temáticas y se complementarán con las exigencias de las autoridades ambientales orientadas a:

- Identificación de las unidades hidrogeológicas en el área de estudio, según su porosidad, conductividad hidráulica y almacenamiento, según la leyenda hidrogeológica internacional adoptada por el Servicio Geológico Colombiano
- Identificación de los rasgos estructurales asociados a lineamientos, fallas, fracturas, diaclasas, indicando su orientación, sentido, ancho de la zona de falla,

presencia de brechas, entre otras características, definiendo su comportamiento como barrera o como camino preferencial de flujo.

- Modelo geológico tridimensional describiendo la geometría de las unidades hidrogeológicas y sus perfiles.
- Inventario de puntos de agua subterránea (pozos, aljibes, manantiales y piezómetros), debidamente georreferenciados y nivelados topográficamente y su registro en el Formulario Único Nacional para Inventario de puntos de Agua Subterránea (FUNIAS).
- Evaluación hidrológica (balance hídrico) identificando las fuentes que aportan a la recarga del sistema hidrogeológico o aquellas que son alimentadas por el sistema y las zonas de descarga.
- Calidad del agua subterránea y superficial (hidrogeoquímica) mediante la determinación de la línea base caracterizando como mínimo los parámetros físico-químicos (al menos los iones mayoritarios), siguiendo los protocolos de toma de muestras y cadenas de custodia definidos por las autoridades ambientales (se sugieren isotopos ((Oxígeno 18 (^{18}O), Deuterio (^{2}H)) y algunos radioactivos (Tritio (^{3}H)) como complemento al análisis hidrogeoquímico, con interpretación y validación de los datos fisicoquímicos e isotópicos).
- Evaluación hidráulica del sistema, mediante la estimación de los parámetros geohidráulicos de las unidades hidrogeológicas identificadas y los lechos de cauces o cuerpos de agua.
- Descripción e identificación del sistema de flujo subterráneo a partir de la construcción de la red de flujos subterránea, mediante mapas de niveles de agua subterránea para cada unidad hidrogeológica clasificando los sistemas de flujo locales, intermedios y regionales.
- Vulnerabilidad de las unidades hidrogeológicas de interés objeto de intervención o susceptibles de afectación.

Las salidas de un sistema hidrogeológico se pueden clasificar en dos tipos: natural (manantiales o afloramientos) y artificial (pozos, aljibes y drenajes). En este caso, el túnel corresponde a una nueva salida del sistema y pueden generar efectos en los niveles piezométricos, en el flujo del agua subterránea (salidas naturales o artificiales) y en las fuentes superficiales del sistema conectadas del sistema hidrológico (ríos, quebradas, lagos, manantiales, etc.) [13] o en la generación de nuevas direcciones de flujo que pueden cambiar la dinámica del sistema [16]. Así mismo, puede originar la fluencia de recursos hídricos subterráneos que pueden ser aprovechados con galerías de infiltración, y que en cuyo caso deberán ser concesionadas (aprovechadas), siempre y cuando su calidad y cantidad sean óptimos de acuerdo con la normatividad ambiental.

5.3.1 Área de influencia

La determinación del área de influencia del túnel deberá incluir el estudio de al menos los siguientes factores:

- Litologías
- Disposición estructural (rumbos y buzamientos).

- Catálogo de procesos morfodinámicos.
- Trenes de fallas y diaclasamientos.
- Morfología y topografía.
- Cobertura del túnel.
- Cuencas hidrográficas cerradas a la mínima cota del túnel.
- Cuerpos de agua lénticos y lóticos.
- Inventario de fuentes hídricas.
- Otras temáticas que la autoridad ambiental recomiende.

Es preciso observar todos los factores en contexto con la cobertura del túnel; es decir, el área de influencia en un túnel con cobertura de 50 m no es igual a la de otro con cobertura de 1 km. Sin embargo, tomando el caso de coberturas someras (numeral 5.4.5.1), deberá respetarse un área mínima con franjas de 50 m a cada lado del eje del trazado y 150 m a cada lado. En todo caso, la identificación y delimitación del área de influencia, deberá realizarse atendiendo los lineamientos que emita la autoridad ambiental competente.

5.3.2 Balance hídrico

Se deberá realizar el balance hídrico de la zona de estudio considerando los parámetros de la(s) cuenca(s) hidrográfica(s), parámetros climatológicos y lograr obtener datos de caudales de escorrentía, valores de recarga por infiltración y percolación en el sistema hidrogeológico. Realizar balance hídrico con información secundaria existente (numeral 5.2.2) principalmente con los datos recolectados por redes de estaciones meteorológicas del IDEAM, corporaciones autónomas, comité de cafeteros o redes privadas. Dicho balance se ajustará con información de los parámetros hidrológicos, mediciones pluviométricas de la red de monitoreo propia al proyecto, mediciones de caudal en corrientes superficiales y pruebas de infiltración.

El balance hídrico junto con el estudio hidrológico y climatológico es un insumo del estudio hidrogeológico del proyecto, y en relación con el túnel debe tener énfasis en los siguientes elementos:

- Inventario de las fuentes hídricas superficiales que están sobre el trazado del túnel o bien en la zona de influencia definida para el estudio ambiental.
- Definir los regímenes de niveles y caudales de las corrientes superficiales.
- Estimación de parámetros y tasas de infiltración en los diferentes tipos de suelos (se recomienda aplicar la técnica de anillos concéntricos).
- Estimar valores de recarga de las unidades hidrogeológicas.

Es necesario que el balance hídrico considere los efectos climáticos estacionales (época de estiaje y de lluvias), los fenómenos macroclimáticos ENSO (El Niño South Oscillation, por sus siglas en inglés) y explorar posibles efectos del cambio climático.

Es preciso que el estudio hidrológico esté disponible para elaborar el Modelo Hidrogeológico Conceptual (MHC) y el Modelo Hidrogeológico Numérico (MHN).

5.3.3 Inventario de puntos de agua y red de monitoreo

Usualmente se toma como información básica el punto de inicio de los cauces o drenajes intermitentes de orden 1 (Horton, 1945) cartografiados en escala 1:10.000 a 1:25.000, que indican el origen del escurrimiento superficial. Dentro del área de influencia hidrogeológica del túnel, deberá determinarse la presencia de diferentes puntos de agua subterránea y superficial, principalmente aquellos que sirven de abastecimiento a las comunidades, también afloramientos o manantiales de las diferentes unidades hidrogeológicas. El inventario será insumo para el Modelo Hidrogeológico Conceptual MHC y Modelo Hidrogeológico Numérico MHN y este último se detallará a través de monitoreos y demás estudios que se realizarán sobre la zona de influencia definida para el trazado.

El inventario de puntos de agua deberá estar lo más completo posible y en caso de que sea para uso de recurso hídrico, deben integrarse a las actas de vecindad del proyecto. Por normativa el uso de los recursos hídricos debe estar concesionado ante las corporaciones regionales para obtener los permisos de ocupación de cauces y permiso de concesión de aguas. En caso de que alguno de los propietarios de los predios de la zona no permita el paso del personal, se sugiere realizar un acta en la que se informe de dicha situación. Esto se hará con el fin de documentar las dificultades de orden social y como un soporte en las situaciones jurídicas que puedan presentarse.

El inventario deberá estar enfocado en conocer la cantidad, calidad y distribución espacial de los puntos de agua, los niveles freáticos o piezométricos; en manantiales, piezómetros, aljibes y pozos en operación, será necesario realizar pruebas de bombeo para conocer las propiedades hidráulicas del sistema, la medición de la recuperación de los niveles piezométricos, el estado de la captación (diseño de los pozos y aljibes) y el caudal de extracción y su duración de operación, todo con el propósito de reconocer el estado de los usos del recurso hídrico subterráneo y superficial, y su estado inicial antes del proyecto. Toda esta información deberá estar registrada en el Formulario Único Nacional para Inventario de puntos de Agua Subterránea (FUNIAS).

El inventario de puntos de agua y red de monitoreo debe incluir:

- Análisis de la calidad del agua incluyendo la correlación de datos fisicoquímicos, e isotópicos.
- Cálculo del Índice de Langelier y de la Capacidad Buffer (Tampón) del cuerpo de agua a fin de implementar las medidas de gestión ambiental respectivas.
- Estimación del Índice de Calidad del Agua - ICA y el Índice de Alteración del Potencial de la Calidad del Agua - IACAL para las corrientes correspondientes a las Subzonas Hidrográficas y niveles subsiguientes (de acuerdo con la clasificación establecida por el IDEAM para la ordenación y manejo de las cuencas).
- Se deben incluir en el análisis los cuerpos de agua tributarios principales y los que tengan concesiones que sean de uso para consumo humano y doméstico, agrícola, pecuario y/o recreativo.

Caracterización fisicoquímica y microbiológica de las corrientes hídricas ubicadas en el área de análisis, incluyendo aquellas susceptibles de intervención por el proyecto (concesión, vertimientos y/u ocupaciones de cauces), considerando las dos (2) épocas climáticas (época seca y época de lluvias). La caracterización se debe realizar siguiendo la misma masa de agua sobre la corriente muestreada.

El inventario deberá reunir las siguientes condiciones:

- Cada punto deberá estar georeferenciado (GPS), se debe contar con una sonda de longitud para determinar la posición del nivel de agua con respecto al nivel del terreno, y una sonda multiparámetros que deberá determinar como mínimo la temperatura, conductividad eléctrica, pH, ORP y oxígeno disuelto.
- El inventario deberá seguir los formatos establecidos por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales y el Servicio Geológico Colombiano, y el Formato Único de Inventario de Puntos de Agua Subterránea [24].
- Usar el GPS, además una sonda de longitud, para determinar la posición y nivel de agua, en este caso, se deberá establecer las características mínimas del instrumento a implementar y la calibración del mismo.

Los puntos de agua tendrán que separarse en manantiales o afloramientos, aljibes y pozos, tal como se define a continuación:

- Manantiales o afloramientos

  Los manantiales son puntos o áreas de la superficie del terreno donde de manera natural aflora un flujo de agua proveniente de un acuífero o embalse subterráneo [10]; se pueden clasificar en las siguientes categorías:

  - Manantiales por contacto geológico: este tipo de ocurrencia se da cuando una formación permeable se encuentra sobre un estrato o formación de baja permeabilidad, lo que resulta en un manantial en el contacto entre ambos.
  - Manantiales por control estructural: las ocurrencias de este tipo se producen a partir del movimiento relativo entre bloques a lo largo de fallas que ponen en contacto formaciones permeables con formaciones impermeables.
  - Manantiales por depresión: este tipo de ocurrencia se da cuando la superficie del terreno se encuentra por debajo del nivel freático.
  - Agua: esto forma una depresión que puede crear un sistema de flujo local, convirtiendo el manantial en un punto de descarga.
  - Manantiales kársticos: Este tipo de ocurrencia se da sobre formaciones de calizas y dolomitas, donde comúnmente los manantiales descargan hacia cavernas que están siendo disectadas por la incisión de los drenajes superficiales.

Los términos coloquiales hacen referencia a nacederos, nacimientos, surgencia de agua, ojos de agua, estos se incluyen en el inventario y deben ser integrados a la clasificación anterior.

- Captaciones (toma de acueductos veredales y soluciones individuales -aljibes o pozos):
  - Aljibes: Los aljibes corresponden a excavaciones antrópicas cuyo objetivo es captar el flujo de las aguas subterráneas en los niveles más superficiales. Se caracterizan por su escasa profundidad, pues normalmente los excavan entre 15 y 20 m, y tienen un diámetro regular de 1,0 m Este tipo de captación se hace normalmente sobre depósitos no consolidados (cuaternarios).
  - Pozos: Los pozos son perforaciones mecánicas o manuales (barrenos) en diámetros de 4 a 18 pulgadas (o un poco más), revestidas y cuyo objetivo es captar el agua subterránea en los niveles más profundos del acuífero de interés, la extracción del agua es mediante bombeo.
- Piezómetro

Pozo de observación cuya rejilla está situada a una determinada profundidad del acuífero, que sirve para medir variables hidrogeológicas y químicas, y forma parte de una red de monitoreo.

5.3.4 Hidrogeoquímica

La hidrogeoquímica aborda el campo de las ciencias químico, mineralógico e hidrológico y permite mediante su estudio conjunto, relacionar los componentes físico – químicos del agua y los minerales disueltos durante el tránsito en el medio geológico desde su ingreso hasta aflorar en superficie. Por tanto, la hidrogeoquímica permite inferir las condiciones de origen y destino de las aguas subterráneas y su relación con la geología.

La disolución de sustancias sólidas y de gases en el agua subterránea es el proceso más importante de la hidrogeoquímica, conocido también como la mineralización del agua subterránea. El agua es un disolvente fuerte, no existe agua pura bajo la superficie de la tierra. Incluso el agua de lluvia y la nieve contienen sustancias disueltas en cantidades no despreciables. El aumento de la mineralización del agua obedece al tiempo y residencia durante el paso por las zonas del sistema hidrogeológico, en el suelo, en la zona no saturada y en la zona saturada.

Una vez la precipitación ocurre y llega al suelo, inicia un proceso de disolución durante la infiltración, las sustancias y gases que se encuentran en el suelo y los minerales que forman parte de las rocas, así como las emanaciones volcánicas y otros distintos agentes, se adhieren a la molécula de agua mediante procesos fisicoquímicos, esto le da al agua una característica particular del medio donde ha transitado, un sello o huella, que condiciona la calidad de agua.

La zona del suelo tiene capacidades únicas y poderosas para alterar la química del agua, ya que la infiltración ocurre a través de esta delgada zona biológicamente activa. En las zonas de recarga la zona del suelo sufre una pérdida neta de materia mineral con el flujo del agua. A medida que el agua subterránea se mueve a lo largo de las

líneas de flujo desde la recarga hasta las áreas de descarga, su química se ve alterada por los efectos de una variedad de procesos geoquímicos. Asociada a los cambios en la química del agua que comúnmente ocurren a medida que se desplaza el agua subterránea a lo largo de sus trayectorias de flujo (Freeze & Cherry, 1979).

A medida que el agua subterránea se mueve a lo largo de sus trayectorias de flujo en la zona saturada, se presenta un aumento en los sólidos disueltos totales y la mayoría de los iones principales normalmente ocurren. A partir de esta generalidad, se ha observado en muchas partes del mundo, que el agua subterránea superficial en las zonas de recarga presenta sólidos disueltos más bajos que el agua más profunda en el mismo sistema y menor en sólidos disueltos que el agua en zonas poco profundas en las áreas de descarga, este fenómeno puede ser representado por la secuencia de Chebotarev (1955).

Las principales características fisicoquímicas que se deben medir son: temperatura, pH, total de sustancias disueltas, conductividad eléctrica, alcalinidad y dureza y potencia redox *Eh*. La toma de las muestras de agua se realizará bajo los protocolos del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y normas técnicas NTC-ISO 5667-1, NTC ISO 5667-11, NTC-ISO-5667-3 y NTC ISO 5667-18 (establecidas por el ICONTEC), o sus respectivas actualizaciones.

De manera similar, las muestras serán analizadas en un laboratorio con certificación vigente ante este instituto (IDEAM). Los parámetros que deben analizarse se encuentran en la Tabla 5-1.

El estudio se inicia con un muestreo representativo de los puntos de agua del inventario (pozos, piezómetros, aljibes, manantiales o afloramientos); se recomienda realizar un muestreo no menor al 5% de los puntos de agua encontrados en el inventario y por lo menos buscar la representatividad de una (1) muestra por cada unidad hidrogeológica.

Cabe resaltar que los lugares analizados deben mostrar una representatividad general; además, es necesario que caractericen la calidad de las aguas subterráneas contenidas dentro de las unidades hidrogeológicas que pueden surtir las actividades domésticas y pecuarias de la comunidad en la zona.

Estos muestreos hidrogeoquímicos para la caracterización hidrogeológica del área de proyecto del túnel, están acompañados y comúnmente ligados a los muestreos de agua requeridos para otras actividades ambientales de solicitud de concesiones de agua y permisos de vertimientos y de interés social, ambos muestreos comparten parámetros físico-químicos y microbiológicos de análisis.

PARÁMETRO	UNIDAD	PARÁMETRO	UNIDAD	PARÁMETRO	UNIDAD
Acidez Total	mg/L CaCO3	Cromo (Cr)	mg/L	Nitritos (N-NO2)	mg/L
Alcalinidad	mg/L	Demanda Bioquímica de Oxígeno a cinco (5) días (DBO5)	(mg/L O2)	Oxígeno Disuelto (OD)	mg/L
Alcalinidad Total	mg/L CaCO3			pH	N.A
Aluminio (Al)	mg/L	Demanda Química de Oxígeno (DQO)	(mg/L O2)	Plomo (Pb)	mg/L
Amonio (NH4+)	mg/L	Dureza Cálcica	mg/L CaCO3	Potasio (K+)	mg/L
Arsénico (As)	mg/L	Dureza Total	mg/L CaCO3	Potencial Oxido Reducción (Eh)	(mV)
Bario (Ba)	mg/L	E. Coli	NMP/100 mL	Salinidad	ppt
Bicarbonato (HCO3-)	mg/L	Estroncio (Sr)	mg/L	Selenio (Se)	mg/L
Bromo (Br)	mg/L	Fenoles	mg/L	Sílice (SiO2)	mg/L
Cadmio (Cd)	mg/L	Fenoles Totales	mg/L	Sodio (Na+)	mg/L
Calcio (Ca++)	mg/L	Fluoruros (F-)	mg/L	Sólidos Disueltos Totales (SDT)	mg/L
Carbonato (CO3=)	mg/L	Grasas y Aceites	mg/L	Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/L
Carbono Orgánico Total (COT)	mg/L	Hierro Total (Fe)	mg/L	Solidos Totales (ST)	mg/L
Cloruro (CL-)	mg/L	Magnesio (Mg++)	mg/L	Sulfato (SO4=)	mg/L
Cobalto (Co)	mg/L	Manganeso (Mn)	mg/L	Sulfatos	mg/L
Coliformes Fecales	NMP/100 Ml	Mercurio (Hg)	mg/L	Sulfuros	mg/L
Coliformes Totales	NMP/100 mL	Nitrato (N-NO3)	mg/L	Temperatura	(°C)
Conductividad eléctrica	Us/cm	Nitratos	mg/L	Turbiedad	(UNT)
Otros que la autoridad Ambientral competente asigne					

Tabla 5-1. Parámetros básicos a analizar en muestras de agua subterránea

No todas las sustancias se presentan en las mismas cantidades y frecuencia, lográndose distinguir constituyentes mayoritarios, o principales, y secundarios o minoritarios, estos se analizan conjuntamente para caracterizar las aguas subterráneas. Entre los parámetros fisicoquímicos requeridos para la caracterización de las muestras de agua subterránea se encuentran el calcio, potasio, sodio, magnesio, manganeso, bicarbonatos, carbonatos, sulfatos y cloruros.

CONSTITUYENTES MAYORITARIOS O FUNDAMENTALES			CONSTITUYENTES MINORITARIOS O SECUNDARIOS	
ANIONES	**CATIONES**	**OTROS**	**ANIONES**	**CATIONES**
$HCO_3^- + CO_3^{2-}$	Ca^{2+}	CO_2	F	Mn
Cl^-	Mg^{2+}	SiO_2	S	Fe
SO_4^{2-}	Na^+	O_2	Br^-	Li
NO_3^{2-}	K^+		NO_4^{2}	Sr
	NH_4^+		PO_4^{2-}	Zn

Tabla 5-2. Constituyentes Fundamentales y Secundarios del agua Subterránea
Fuente: MADS – IDEAM, 2015

La caracterización y análisis de la química de las muestras de agua subterránea podrá realizarse bajo varios tipos de metodologías (guía metodológica para la formulación de planes de manejo ambiental de acuíferos min ambiente 2014.), con representación de los datos hidroquímicos a través de gráficas sintéticas que muestren las características químicas principales del agua y faciliten su clasificación como los diagramas de Piper, Collins (Collins, 1923), diagramas de Stiff (Stiff, 1951), y los diagramas Schoeller-Berkaloff (Schoeller, 1955). La caracterización deberá incluir una correlación entre puntos de características similares, asociados a las diferentes unidades hidrogeológicas en el área de influencia del túnel y asociado al muestreo de los cuerpos de agua superficial, así como del agua lluvia (Tabla 5-2). A partir de los resultados hidroquímicos los análisis podrán fortalecerse con gráficos y mapas que diferencien sectores con

similares concentraciones iónicas, de relaciones o parámetros físicoquímicos, pH y CE, construyendo curvas de isoconcentraciones para las unidades hidrogeológicas.

En la práctica los análisis químicos siempre presentan un grado de error, deberá tenerse en cuenta que el error del balance iónico se encuentre por debajo del 5%.

En casos muy puntuales y cuando se requiera resolver aspectos de la hidrogeología o por solicitud de la autoridad ambiental, se puede recurrir a muestreo de isótopos estables de agua (Oxígeno 18 (^{18}O), Deuterio (^{2}H)) y algunos radioactivos (Tritio (^{3}H), Carbono 14 (^{14}C)), que tienen como principal objetivo determinar la edad del agua. El muestreo de agua lluvia se debe realizar mínimo durante un año hidrológico a nivel mensual y a diferentes alturas del área de influencia, con el fin de construir la línea meteórica local. Con base en los resultados se debe establecer las relaciones existentes entre el agua meteórica, superficial y subterránea, y emplear los resultados para la identificación de las zonas de recarga, tránsito y descarga, los tiempos aproximados de tránsito, la comparación con la línea meteórica mundial y local para Colombia y determinar la edad promedio de las muestras.

Durante el proceso de licenciamiento ambiental, la autoridad proyecta el seguimiento y monitoreo de puntos de agua conforme a una red de seguimiento. Otros parámetros físico-químicos pueden ser solicitados para aspectos ambientales, ambas campañas pueden integrarse.

5.3.5 Instrumentación para medición de niveles de agua subterránea

Con base en la información de las fases de diseño anteriores (I, II y III), y una vez se haya comprobado la presencia de agua subterránea, tendrá que establecerse una red de monitoreo que permita observar el comportamiento de niveles de agua subterránea en el área de influencia del túnel.

Aunque la construcción de piezómetros en este manual se recomienda para la fase de construcción, se debe recordar que la autoridad ambiental en ocasiones solicita la construcción e instrumentación de la zona de estudio; previamente a la construcción de la obra, se requieren registros estacionales (invierno - verano) de nivel de agua freática o piezométrica, incluyendo las variaciones estacionales (invierno - verano) del nivel freático.

En este sentido, los piezómetros que se requieran instalar a profundidad, no deben estar con respecto a la línea teórica de excavación del túnel, a una distancia menor entre 30 m y 40 m.

La red de monitoreo de niveles de agua subterránea en la fase de construcción, tiene en el estudio hidrogeológico dos objetivos principales: primero, reconocer el efecto del túnel dentro del Modelo Hidrogeológico Conceptual MHC generado, con definición del Modelo Hidrogeológico Numérico MHN; y segundo, tener conocimiento de la línea base ambiental de las condiciones del sistema hidrogeológico para hacer el seguimiento ambiental. El tipo y número de elementos que conformarán la red de monitoreo deberán

diseñarse para cada proyecto de acuerdo con requerimientos específicos. Algunos elementos que pueden conformar esta red son los siguientes:

- Piezómetros en las paredes del túnel.
- Piezómetros en la superficie.
- Seguimiento al inventario de puntos de agua.

Elemento	Longitud	Especificación	Objetivo
Piezómetros superficiales	10 m, o hasta superar el nivel freático.	Cantidad: mínimo 2 piezómetros. En túneles de más de 500 metros, 2 piezómetro cada 250 m adicional.	Nivel freático o piezométrico
		Espaciamiento: con respecto al eje longitudinal del túnel entre C/3 y 3/2C, siendo C en metros la profundidad del túnel o cobertura en el sitio de medición.	
		En coberturas menores a 50 m (profundidad máxima C/2).	
		Toma de datos: frecuencia máxima quincenal o menor.	
Piezómetros en las paredes del túnel	Según diseño o fabricación	Cantidad: mínimo 1 piezómetro. En túneles de más de 500 m, 1 piezómetro adicional cada 500 m.	Niveles acuíferos Inferiores
		Toma de datos: frecuencia máxima quincenal o menor.	
Inventario de puntos de agua	Variable	Toma de datos de niveles en el inventario de la fase III, con frecuencia máxima quincenal o menor.	Niveles de acuíferos superiores e inferiores

Tabla 5-3. Recomendaciones para la red de monitoreo de agua subterránea

Se recomienda el esquema para el monitoreo en la construcción indicado en la Tabla 5-3. Los piezómetros construidos pueden integrar la red de monitoreo hidrométrica presentada en el numeral 5.3.7.

Los registros de niveles del agua subterránea se pueden llevar de manera automática con sensores de presión calibrados y compensados a barómetros, los cuales pueden tomar lecturas de presión de agua y temperatura en frecuencias mínimas de segundos, minutos, horas o días.

Otro aspecto importante de monitoreo, son los aforos de caudales superficiales y la precipitación, en este caso es importante la instalación de algunos pluviógrafos y el seguimiento de caudales en algunos puntos de agua o bien aquellos bajo el requerimiento de la autoridad ambiental competente.

Foto 5-2. Proceso constructivo, Túnel Guillermo Gaviria Echeverri (Túnel del Toyo)

5.3.6 Parámetros geohidráulicos

Las propiedades más importantes de un acuífero son la de trasmitir o fluir el agua (permeabilidad, conductividad hidráulica y transmisividad) y almacenarla (coeficiente de almacenamiento, porosidad y rendimiento especifico). Es importante reconocer cuales de estas propiedades son útiles para caracterizar el medio hidrogeológico y cómo se emplearán en los cálculos numéricos para realizar un adecuado levantamiento de información.

Cuando se empleen otros ensayos diferentes a las pruebas de bombeo para determinar la permeabilidad (Lefranc, Lugeon, Gilg-Gavard, u otro tipo de pruebas como: pruebas de carga ascendente, descendente y de cabeza constante; pruebas de empacador, etc.), es necesario justificar e indicar el alcance de los parámetros interpretados en estos casos.

Los principales parámetros geohidráulicos incluyen:

- ✓ Conductividad hidráulica
- ✓ Capacidad específica
- ✓ Transmisividad
- ✓ Coeficiente de almacenamiento
- ✓ Rendimiento especifico
- ✓ Porosidad (intergranular, por fisuración, disolución)

Dependiendo del tipo de acuífero podrán realizarse pruebas de bombeo, pruebas tipo Slug (absorción/recuperación):

Prueba de Bombeo: Este tipo de pruebas se emplea principalmente para acuíferos no confinados, semiconfinados o libres. Son herramienta común utilizada en hidrogeología para determinar los parámetros geohidráulicos de un sistema pozo-acuífero, a través de un bombeo continuo o escalonado y permite medir los descensos y recuperación de niveles piezométricos en el mismo pozo o en el (los) pozo(s) de observación (si es posible).

La logística y condiciones físicas para implementar la prueba en zonas de montaña donde se proyectan túneles es compleja y podría no lograr ser efectuada, aún si se logra realizar, debe cumplir varios requisitos; debe haber dos perforaciones, que alcancen una profundidad entre 5 a 40 m por debajo del nivel freático, separadas por una distancia no superior a 100 m. La prueba tendrá que realizarse extrayendo el agua del pozo a una tasa constante, en un periodo de 24 a 72 horas o hasta que el pozo se estabilice, es decir, hasta que los niveles dejen de descender. Posteriormente, una vez suspendido el bombeo, se deberá medir la recuperación del nivel del agua en un lapso de tiempo o hasta cuando iguale el nivel inicial (nivel estático) [25 - 26], en un 90%.

Estas pruebas se podrían ejecutar en los pozos existentes, identificados en el inventario de puntos de agua, cuando se obtengan las autorizaciones de los propietarios. Deberá realizarse al menos una prueba de bombeo por cada unidad hidrogeológica reconocida.

Cuando se hayan identificado puntos de agua subterránea en el inventario, pero no se disponga de pozos construidos en el área de influencia del túnel, se recomienda instalar piezómetros y ejecutar otras pruebas para obtener los parámetros geohidráulicos de la unidad hidrogeológica. Por consideraciones económicas, es conveniente construir estos piezómetros en sitios adecuados para que se integren o correspondan a la red de monitoreo proyectada para la fase de construcción y operación, y además, aprovechar la campaña de las perforaciones exploratorias para instalar piezómetros en los sitios de perforación geotécnica y complementar los perfiles litoestratigráficos con una data de medidas piezométricas cronológicas. La construcción de estos debe seguir las recomendaciones definidas en la NTC 3948 y documentos adicionales que la actualicen.

Otras pruebas geohidráulicas en la caracterización hidrogeológica que generan resultados igualmente aceptados, son las tipo Slug y Packer, se emplea para suelos, medios fracturados o de baja permeabilidad y pueden elaborarse unidas a la prospección del subsuelo durante la etapa de exploración geotécnica (numeral 5.4.7.2).

Prueba Slug: Estas pruebas con carga variable o constante son una alternativa para determinar las propiedades geohidráulicas, en este caso la permeabilidad de los tipos de acuíferos; el ensayo consiste en llenar o bombear agua del piezómetro hasta un nivel determinado y tomar el tiempo que se tarda en descender o recuperar el nivel inicial. Se recomienda emplear sensores de presión para el registro de niveles pues en tiempos de descenso o recuperación cortos se debe tomar medidas con mayor frecuencia, equipo que permite disminuir los errores sistémicos y en tiempos largos, no requiere pernoctación de personal; estos sensores deben estar acompañados de un sensor de presión barométrica para la corrección o compensación, o una sonda de niveles electroacústica para verificación.

Prueba Packer: también llamada prueba de Lugeon, es un método de prueba *in situ* ampliamente utilizado para estimar la conductividad hidráulica promedio de la masa de roca o para estimar la permeabilidad del suelo, se aplica principalmente en rocas fracturadas. De hecho, es una prueba *in situ* de la permeabilidad de la formación que se realiza midiendo el volumen de agua tomada en una sección del pozo o piezómetro de prueba, cuando el tramo de estudio se presuriza a la presión deseada (10 bares -150 psi).

Nota: La medición de la permeabilidad se complementará, en caso necesario, durante la etapa de exploración geotécnica (numeral 5.4.7.2).

5.3.7 Red de monitoreo

Tanto los puntos de agua de interés hidrogeológico como social y ambiental se agrupan para conformar una red de monitoreo que sea representativa, oportuna y confiable, es decir, los puntos seleccionados deben tener características particulares de tal manera que permita la representatividad (espacial y temporal) del medio, la oportunidad de toma reflejada en condiciones de acceso y seguridad al sitio, y confiabilidad en relación a la frecuencia en la medición y al cumplimiento de los protocolos de toma y análisis de muestras en laboratorios certificados por el IDEAM.

Por lo anterior, los puntos de agua que conforman la red deben en lo posible monitorear:

- Captaciones (toma de acueductos veredales y soluciones individuales -aljibes o pozos).
- Puntos de interés ambiental –Manantiales o afloramientos.
- Unidades hidrogeológicas
- Sitios de captaciones proyectadas para el proyecto (concesiones de aguas superficial o subterránea).
- Puntos de vertimientos proyectados para el proyecto.
- Piezómetros (los proyectados para el diseño e instrumentación y seguimiento ambiental – numeral 5.3.5.
- Pluviómetros (los proyectados o requeridos para el seguimiento ambiental).
- Estaciones hidrométricas o aforos programados para seguimiento ambiental. No son únicamente estaciones con obra civil sino secciones hidrométricas geoposicionadas.
- Puntos de calidad de agua, Hidrogeoquímica, numeral 5.3.4.

5.3.8 Direcciones de flujo subterráneo

Con el análisis de las mediciones de nivel piezométrico se realizará un análisis de los patrones de flujo de agua subterránea teniendo en cuenta los efectos de la morfología

de la cuenca o área de influencia del túnel y la geología sobre los niveles piezométricos para la construcción de un mapa piezométrico de isopiezas (líneas de igual nivel piezométrico). Así mismo, se podrá comprender la dinámica del agua subterránea a través del sistema de flujo local, intermedio o regional dependiendo las zonas de recarga y descarga y los altos y mínimos topográficos.

Esta información cartográfica proporciona direcciones y gradientes del flujo subterráneo, es posible que se deba trasponer, interpolar o completar información siendo necesario tener en cuenta los siguientes factores:

- ✓ Efectos de la morfología de la cuenca o área de influencia del túnel (límites y forma de la cuenca, carga hidráulica y profundidad [28]).
- ✓ Efectos de la geología (estratificación, aparición de lentes y anisotropía [28]).
- ✓ Efectos de las fallas (permeabilidad de la falla, grosor de la zona de falla, permeabilidad de las rocas en contacto con la falla, buzamiento y orientación de la falla).

5.3.9 Mapa hidrogeológico y geomorfológico

Se elaborará el mapa hidrogeológico en la misma escala del geológico a partir del Modelo Hidrogeológico Conceptual MHC y del Modelo Hidrogeológico Numérico MHN.

En el mapa deberán identificarse, como mínimo, los siguientes elementos:

- ✓ Unidades hidrogeológicas
- ✓ Zonas de recarga y descarga
- ✓ Puntos de agua (manantiales, aljibes, pozos, afloramientos, etc.).
- ✓ Información hidrográfica (ríos, quebradas, lagos, lagunas, etc.)
- ✓ Direcciones de flujo
- ✓ Piezometría (Isopiezas).
- ✓ Localización de las estructuras subterráneas (Túnel, puntos de monitoreo, pozos, aljibes,) etc.

En las mismas condiciones, se debe elaborar un mapa geomorfológico, con el fin de identificar situaciones adversas en el terreno, tales como la presencia de coluviones, depósitos de taludes, procesos morfodinámicos, unidades, sub unidades y otros, que puedan afectar la estabilidad de los portales y que, a su vez, puedan alertar sobre la presencia de lineamientos y/o corredores de fallas activas en la zona.

Estos mapas deberán elaborarse siguiendo los estándares del Servicio Geológico Colombiano que se fundamentan principalmente en la referencia International Association of Hydrogeologists (IAH), Hydrogeological Maps a Guide and a Stardard Legand, Struckmeier, Wilhem F, 1995. Propuesta metodológica para el desarrollo de la cartografía geomorfológica para la zonificación geomecánica, volumen 1, Ingeominas 2004. Guía metodológica para la elaboración de mapas escala 1:100.000, IDEAM, 2013.

5.3.10 Aspectos ambientales

Desde el punto de vista de la obra civil, que es la construcción el túnel, se deben considerar los posibles impactos o afectaciones al ambiente, relacionados con:

- El principal impacto que puede llegar a ocurrir en un sistema hidrogeológico es que el túnel sea una nueva salida (descarga) sin control, teniendo implicaciones en las labores de construcción de la obra subterránea.
- Es necesario evaluar los cauces receptores con el nuevo aporte del caudal de infiltración desde aspectos hidrológicos, hidráulicos y geomorfológicos, [13 -19].
- Es muy importante documentar y evaluar las posibles afectaciones en cuerpos de agua en superficie que puedan relacionarse o estar claramente conectados a la red de flujo de aguas subterráneas.
- La nueva salida controlada puede convertirse en una fuente para el aprovechamiento del recurso hídrico subterráneo (respecto a la calidad del agua), en las actividades de operación del túnel y/o en el uso de diferentes actividades comunitarias (estas aguas podrán ser solicitadas en concesión).
- Otro aspecto positivo es el mejoramiento ambiental paisajístico de cauces receptores por aumento de los caudales ambientales.
- Debe realizarse un manejo adecuado de los caudales de infiltración, evitando en gran medida que estos discurran sin control y directamente sobre la solera o sección inferior o sobre vía, arrastrando sedimentos y residuos de construcción o que se mezclen y aumenten el caudal de las aguas industriales (usadas en las actividades de perforación), estas prácticas indebidas aumentan la contaminación del agua lo que implica sistemas de tratamiento más robustos y mayores costos de tratamiento; pues se debe cumplir con la normatividad ambiental de vertimientos.
- Debe determinarse la vulnerabilidad, identificarse y analizarse el riesgo de acuíferos: En la **Fase II** será necesario elaborar un análisis de vulnerabilidad de acuíferos para la propuesta de medidas de manejo como parte de los requerimientos de licenciamiento ambiental del proyecto. Este análisis considerará el tipo de acuífero o modo de confinamiento u ocurrencia del agua subterránea, la litología de la zona no saturada, la profundidad del agua subterránea o del acuífero y vertimientos. En la **Fase III** de los estudios y diseños se identificará, analizará y caracterizará el riesgo de las fuentes potenciales de contaminación de acuíferos, entre otros aspectos.

Es necesario que se adelante un reconocimiento de la vulnerabilidad de los acuíferos relacionada con la polución que pueda afectar el agua subterránea, la naturaleza de los estratos geológicos que conforman el acuífero y la profundidad de la zona no saturada o el espesor de los depósitos confinados [29]. Aunque existen varias metodologías, se recomienda que el análisis sea enfocado con el método GOD, que involucra las características intrínsecas del medio con la vulnerabilidad intrínseca, esto es, la

sensibilidad del acuífero para ser afectado por una carga contaminante [30]. Otras metodologías son aceptadas dependiendo el tipo de litología y disponibilidad de información (i.e., DRASTIC, EPIK, SINTACS) (MADS, 2014) y su análisis se debe realizar a través de un algebra de mapas (GIS) identificando el tipo de vulnerabilidad a la contaminación.

5.3.11 Modelos hidrogeológicos

El modelo hidrogeológico se construye a partir de dos modelos: Un Modelo Hidrogeológico Conceptual (MHC), que es la representación gráfica del sistema de flujo del agua subterránea, frecuentemente en forma de bloque diagrama o en un corte; y el Modelo Hidrogeológico Numérico (MHN) o matemático, que busca cuantificar los parámetros hidráulicos del sistema, permite su calibración a partir de las mediciones de nivel, pero no es la finalidad del modelo numérico como tal. Los objetivos del modelo numérico serían la estimación de caudales de infiltración para la planeación de las actividades durante la construcción y operación y, la cuantificación de la posible afectación sobre niveles y caudales.

5.3.11.1 Modelo hidrogeológico Conceptual - MHC

El modelo hidrogeológico conceptual debe presentar para cada unidad hidrogeológica, de manera tabulada y resumida, los atributos numéricos o descriptivos de espesor total y saturado, porosidad (valor y tipo), parámetros hidráulicos, continuidad lateral, litología, clasificación en acuíferos libres, semiconfinados, confinados o unidades confinantes; la clasificación del medio existente en poroso, fracturado o cárstico y un balance hídrico conceptual detallando las entradas y salidas de flujo del sistema.

Además, debe contener las condiciones de frontera que no varían en el tiempo: las cargas hidrostáticas, las zonas de recarga, tránsito y descarga direcciones de flujo, conexiones hidráulicas entre las diferentes unidades geológicas, sistemas acuíferos y fuentes superficiales.

Con la representación gráfica del sistema de flujo de agua subterránea, el Modelo Hidrogeológico Conceptual MHC deberá contener la definición de todas las unidades hidrogeológicas, barreras o caminos preferenciales de flujo de aguas subterráneas (fallas, discontinuidades), la distribución del sistema de agua subterránea en los diferentes tipos de acuíferos, tanto en la extensión vertical como en horizontal del sistema que cruce el túnel y debe realizarse a través de un bloque diagrama que represente tridimensionalmente el sistema y con diferentes cortes en sección que permitan comprender el entorno hidrogeológico.

Para los cortes en sección o perfiles que identifiquen de manera representativa, los espesores y continuidad lateral de las unidades hidrogeológicas, se deben identificar los límites y condiciones de frontera considerando los rasgos estructurales, geológicos, hidrológicos e hidrogeológicos, generando como resultado. Se recomienda emplear software geológicos o GIS para su elaboración.

5.3.11.2 Modelo Hidrogeológico Numérico - MHN

A partir de la información levantada, procesada e interpretada para la construcción del Modelo Hidrogeológico Conceptual, se deben definir los límites y fronteras del área de estudio para la construcción de un modelo numérico de flujo de agua subterránea tridimensional que permita evaluar la afectación espacial y temporal del comportamiento de recurso hídrico superficial y subsuperficial, como resultado de la construcción del túnel. El modelo numérico debe ser consistente con el modelo conceptual planteado, con especial atención en la consistencia de los balances hídricos y su correcta representación dentro del modelo y debe seguir el siguiente esquema metodológico (Ilustración 5-1) y recomendaciones de guías de modelación numérica aplicadas en aguas subterráneas.

El Modelo Hidrogeológico Numérico (MHN) una vez calibrado deberá arrojar resultados tales como: a) valores de las salidas o caudales de infiltración dentro del túnel a construir, b) posible interacción entre aguas superficiales y aguas subterráneas, c) efectos en el nivel piezométrico o freático (acciones en desarrollo al instalar instrumentos de medición para captura de datos). Estas formulaciones asumen una carga constante durante el periodo de simulación de manera que sólo permitirían conocer caudales de infiltración.

Estas soluciones analíticas se basan en la solución de la ecuación de pozo en pequeños dx, de manera que asume unidades verticales uniformes y luego se realiza la convolución de los caudales; bajo esta suposición es importante conocer si el medio geológico en la zona de interés podría ser aproximado de esta manera.

En túneles de baja cobertura, la zona no saturada cobra mucha importancia pues la presión hidrostática está condicionada por la precipitación y, por consiguiente, su interacción con un túnel y la estabilidad geotécnica de la zona.

Las formulaciones analíticas empleadas solo serán válidas en condiciones transitorias para túneles de baja cobertura (túneles cortos) y de grandes coberturas (túneles profundos) (Perrochet y Dematteis [2007] y Yang y Yeh [2007] y Maréchal et al. [2014]). Para ello se debe emplear los avances de excavación esperados por el tipo de RQD y tipo de terreno encontrado, los hidrogramas o caudales transientes esperados con la excavación, los parámetros hidráulicos para acuíferos confinados o libres y el Modelo Hidrogeológico Conceptual MHC de referencia empleado.

La posible interacción entre aguas superficiales y aguas subterráneas, efectos en el nivel piezométrico o freático, y la posible afectación a puntos de agua del inventario o de la red de medición. Igualmente, será necesario establecer los efectos en el flujo subterráneo que podrían ocurrir por la construcción del túnel en el área de influencia

La modelación analítica y numérica para predicción y calibración de caudales de infiltración en obras subterráneas – Túneles. Casos de estudio: Colombia, Francia/Italia y España, de la Ilustración 5-1, fue adaptada por Suescún Casallas, Luis Camilo (2016) [230], tomada de Anderson et al (2015); Reilly y Harbaugh (2004); Singhal y Gupta (2010).

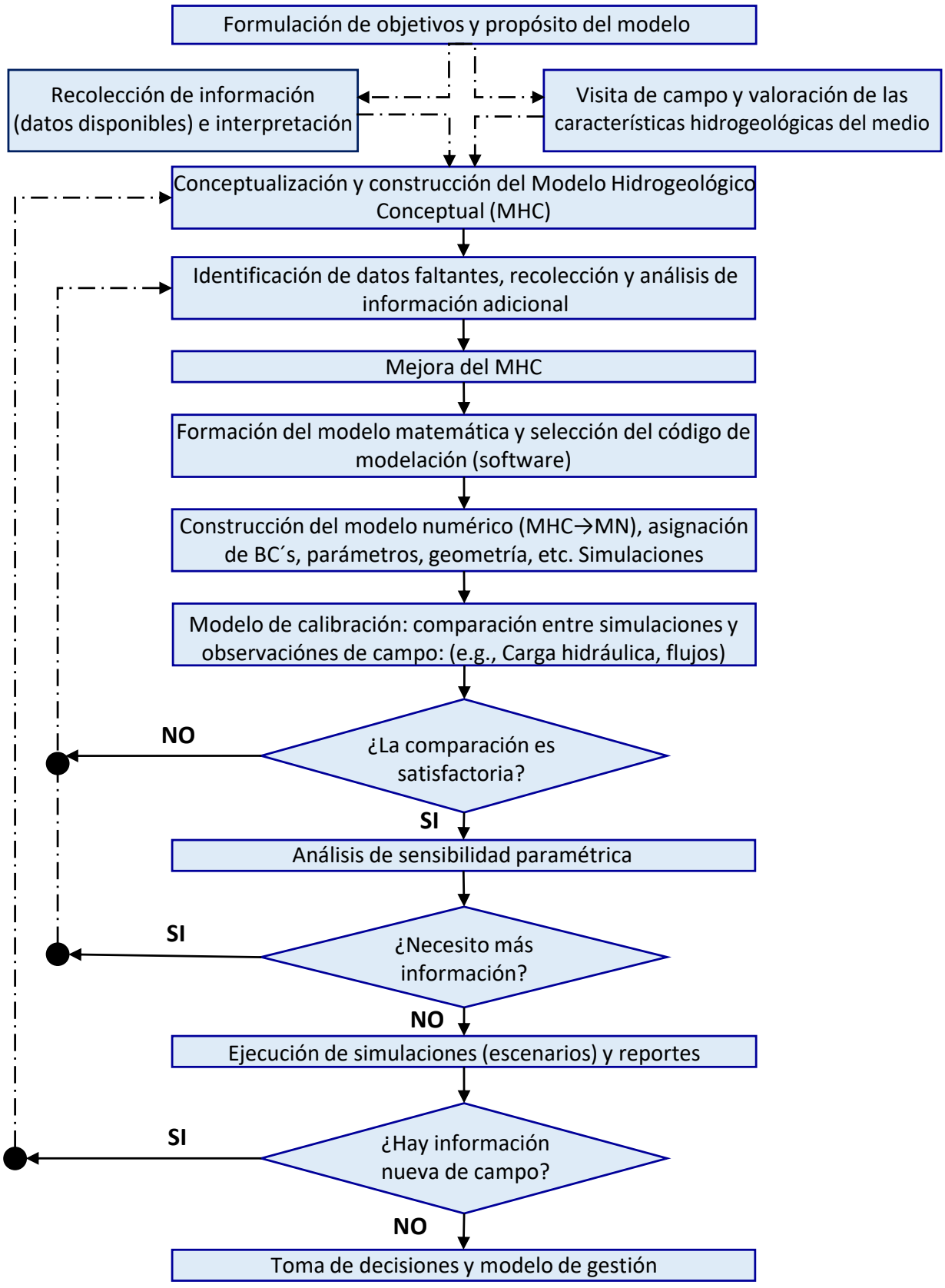


Ilustración 5-1. Esquema metodológico para un modelo numérico [230].

El Modelo Hidrogeológico Numérico MHN debe describir la estructura de la variabilidad espacial y temporal, la estructura del modelo y la estructura computacional empleada (i.e., diferencias finitas, elementos finitos o volúmenes finitos) para ello se deben tener en cuenta los siguientes aspectos:

A. Estructura de la variabilidad espacial y temporal:

La variabilidad espacial considera la definición del dominio, las condiciones de frontera, la geometría, la discretización del modelo y la temporalidad de los procesos a modelar (estado estacionario y/o transitorio): dominio, geometría y discretización del modelo, condiciones de frontera, condiciones iniciales.

i. Dominio

Se debe presentar el área del Modelo Hidrogeológico Numérico (MHN), la cual debe ser representativa de toda la longitud del túnel y extenderse hasta donde dicho túnel pueda tener un grado de influencia, y no tenga influencia con las condiciones de contorno. El dominio de modelación debe ser definido y acotado, por los contornos asociados a las cuencas o limites hidrogeológicos identificados en el Modelo Hidrogeológico Conceptual (MHC) y trazarse de acuerdo con el conocimiento confiable del comportamiento hidráulico del sistema, de tal forma que puedan ser representados mediante condiciones de borde (contorno) conocidas o simples de establecer (carga hidráulica (Dirichlet), flujo (Neumann) o mixta (Cauchy)). Al momento de definir dicho dominio, se deben considerar y clasificar los límites con base en la siguiente distinción: Límite superior o techo, Límite inferior o basamento y Límites laterales o contactos laterales.

ii. Geometría y discretización del modelo

Se deben describir los elementos geométricos que emplea la malla prismática o no estructurada seleccionada, el número o cantidad y las dimensiones de las celdas o elementos empleados en el Modelo Hidrogeológico Numérico (MHN) tridimensional y justificar la discretización horizontal, y vertical de acuerdo con los elementos hidrogeológicos del dominio, de control (i.e., ríos, pozos, y de la geometría del túnel o los túneles, galerías de conexión y de las fracturas o conductos o redes kársticas, si existen).

La discretización tanto espacial como temporal del modelo debe cumplir criterios de estabilidad numérica (p.e., Número de Courant para flujo o Peclet para transporte) y de calidad para mallas prismáticas o no estructuradas (p.e, ángulos internos, ángulos máximos y mínimos diedros, cumplimiento de criterio de Delaunay, etc.).

En caso de emplear un código basado en diferencias finitas la discretización vertical debe evitar el secado de celdas, lo que las inactiva de la simulación. Para el caso de elementos o volúmenes finitos, los grupos de elementos o elementos discretos de fractura deben garantizar un grado de refinación progresivo de un elemento de dimensión pequeña a grande, para evitar inestabilidades numéricas, más de dos

nodos de conexión en zonas que tienen contrastes de baja a alta permeabilidad y nodos duales para garantizar la conexión de los conductos o elementos discretos de fractura con el medio poroso y el medio fracturado o kárstico representado por el Modelo Hidrogeológico Conceptual (MHC).

iii. Condiciones de frontera

Se deben presentar en un mapa por cada capa y en modo tridimensional (3D), las condiciones de frontera establecidas en el modelo, su descripción, su justificación, clasificación (Dirichlet – Tipo I, Neumann – Tipo II, Cauchy – Tipo III) y la asignación de valores numéricos, restricciones o constraints, y funciones matemáticas que las estimen durante los pasos de tiempo (consideraciones transientes) o configuraciones numéricas que las modifiquen/actualicen con códigos externos (c++, pyhton). Para los elementos discretos de fractura se deben justificar las configuraciones geométricas de los elementos 1D o 2D empleados, las variables o parámetros asignados y esquema matemático empleado (p.e., Darcy, Hagen-Poiseuille, Maning-Strickler, etc.).

Se deben considerar las características de la cobertura del terreno como determinantes de las condiciones de infiltración, escorrentía y recarga.

Para el caso de la recarga o variables hidrológicas, se deberán incluir dentro de las simulaciones transientes mediante funciones temporales los efectos climáticos estacionales (época de estiaje y de lluvias) y en análisis de sensibilidad los fenómenos macroclimáticos.

iv. Condiciones iniciales

Se deben indicar los valores específicos para las variables dependientes (niveles o concentraciones) en todo el dominio al comienzo del período de simulación para los modelos transitorios y que estarán estimados en la etapa de calibración. Para el caso de niveles o cargas hidráulicas iniciales que corresponden a los puntos de observación identificados por el monitoreo de niveles piezométricos. En el Modelo Hidrogeológico Conceptual MHC, se debe tener en cuenta:

- Seleccionar aquellos puntos de monitoreo y pozos representativos basados en su distribución espacial, calidad y cantidad de información disponible para cada uno. Los pozos que sean seleccionados como puntos de observación y monitoreo, deben estar presentes dentro del dominio activo.
- Presentar registros lo más completos posibles dentro del período de calibración.
- Tener una cota o elevación del nivel de terreno confiable.
- Conocer la profundidad de su lectura.

Se deben incluir como puntos de observación del modelo, los manantiales identificados en el inventario de puntos de agua y se debe evidenciar y justificar la asignación de pesos empleados para la etapa de calibración.

Foto 5-3. Túnel vía Cisneros Loboguerrero, Proyecto Buga - Buenaventura

B. Estructura del modelo:

Se debe presentar el protocolo, metodología o marco de modelación, indicando el esquema de modelación adoptado (*p.e.* medio poroso equivalente, medio discreto, medio fracturado, fracturas embebidas). Este debe incluir la descripción general de la estructura del modelo seleccionado (p.e. diferencias finitas, elementos o volúmenes finitos), las ecuaciones a resolver de acuerdo con los procesos modelados, las variables de estado, los parámetros del modelo, ventajas, limitaciones, recomendaciones y suposiciones.

C. Parametrización:

Se debe presentar la selección de cualquier parámetro numérico usado en el modelo numérico tales como las propiedades hidráulicas (p.e. conductividad hidráulica, coeficiente de almacenamiento, etc.), anisotropía, coeficientes, etc. Se deben mostrar en una tabla los intervalos mínimos y máximos, y los valores paramétricos asignados para dichos parámetros deben ser acordes con los resultados del Modelo Hidrogeológico Conceptual (MHC) y datos de campo.

D. Estructura computacional:

El código o programa seleccionado para la simulación numérica de las condiciones hidrogeológicas del sistema, debe ser específico para la simulación de flujo y transporte de aguas subterráneas y, tener la capacidad de representar la complejidad de las unidades geológicas (p.e. geometría, componentes estructurales, anisotropía), la geometría del túnel, túneles o galerías proyectados, resolver las ecuaciones de flujo en medios saturados y no saturados, bajo condiciones de estado estacionario y transitorio, según sean las condiciones del sistema a modelar.

En túneles en materiales no consolidados, se deben considerar los efectos de las fluctuaciones del nivel de agua subterránea y la distribución de las presiones hidrostáticas en el medio ante la intensidad y estacionalidad de la precipitación, y sus implicaciones en la estabilidad del terreno.

Para el caso de acuíferos costeros o con potencial geotérmico y/o proyectos que impliquen flujo a presión o cambios de densidad, el programa debe tener la capacidad de modelar flujo de densidad variable o transporte de calor, y en especial si el emplazamiento de estos proyectos cruza estos medios.

E. Calibración:

El Modelo Hidrogeológico Numérico (MHN) tridimensional construido debe ser calibrado en estado estacionario, utilizando para tal fin los niveles de agua subterránea registrados y cuando se tenga un periodo de monitoreo debe realizarse una calibración transiente. Se debe describir el algoritmo de búsqueda y optimización, la función objetivo, los criterios de regularización empleados, indicar los intervalos de los parámetros mínimos y máximos que son base del Modelo Hidrogeológico Conceptual (MHC) e indicar los criterios de aceptabilidad del modelo a través de estadísticos de calibración, mapas de residuales, pesos en las observaciones, diagramas de distribución espacial e histograma de residuales. Si se emplean métodos de calibración por puntos pilotos, descripción de la distribución de los puntos empleados por capas o 3D y los variogramas asociados con la longitud de correlación de estos o métodos estocásticos o de Monte Carlo para su estimación.

Si se tienen mediciones de caudales de infiltración de túneles durante la fase de construcción o nuevos diseños, se requerirá que se calibren los flujos de salida en condiciones transientes.

Se debe realizar un análisis de sensibilidad paramétrica, indicando los procedimientos usados, los resultados del análisis y sus efectos en el modelo. El análisis se debe enfocar en parámetros críticos del modelo como las conductividades hidráulicas, el almacenamiento especifico, la recarga y las condiciones de frontera impuestas.

F. Predicciones:

El Modelo Hidrogeológico Numérico (MHN) se generará en **Fase II**, se definirá en **Fase III** y se continuará ajustando en la etapa de construcción del túnel. Durante esta etapa, dicho modelo incluirá información de los niveles del agua subterránea de la red de monitoreo construida en esta etapa. Los cálculos estadísticos darán la medición del efecto del túnel sobre el nivel freático o piezométrico.

Una vez calibrado el modelo, se deben hacer predicciones para analizar como mínimo los siguientes escenarios:

- Condición sin proyecto (línea base estado estacionario).
- Condición con proyecto: construcción del túnel + operación (estado transitorio).
- Condición con proyecto: construcción del túnel + escenario de mitigación/impermeabilización + operación (estado transitorio).

El Modelo Hidrogeológico Numérico (MHN), deberá ser detallado durante la excavación de la obra, enfocado en la determinación de los flujos y la definición de posibles medidas de mitigación.

Se debe presentar el balance de masa para el área de modelación y los volúmenes de control definidos, contemplando como mínimo cada una de las condiciones de frontera consideradas. El balance se debe presentar tanto en estado estacionario como en estado transitorio.

Cada escenario contemplará las medidas de prevención y mitigación sobre la infiltración hacia el túnel (impermeabilización, inyecciones, entre otras), cuando aplique.

Se debe indicar el porcentaje de efectividad de las medidas de impermeabilización respecto a un caudal máximo esperado en un escenario sin medidas de prevención y mitigación sobre la infiltración.

A partir de los escenarios de modelación, se deben presentar los siguientes aspectos de acuerdo con los resultados obtenidos:

- Caudales de infiltración esperados durante la perforación y su evolución temporal en función del avance de la perforación. Considerar como mínimo, tramos con condiciones geológicas similares, indicando los caudales esperados en el frente de perforación y en cada portal de acuerdo con el plan de obras propuesto.
- Caudal de infiltración esperado para la nueva condición de estado estacionario del sistema con el túnel.
- Evolución espacio temporal de los niveles de agua subterránea.
- Evolución espacio temporal y descripción de las posibles afectaciones en fuentes superficiales o subterráneas
- Efectos en la calidad del agua por el transporte de contaminantes y/o la evolución hidrogeoquímica del sistema.
- Análisis de los conflictos con los usos actuales y potenciales del recurso hídrico.
- Se debe presentar la evolución temporal del nivel de agua subterránea en los puntos de observación.
- Se deben generar mapas donde se presenten los abatimientos calculados respecto a la condición actual para diferentes ventanas de tiempo, presentando como mínimo para el año 1, 2, 5, 10, 50 años y hasta alcanzar una nueva condición de estado estacionario del sistema.

- Se debe analizar a partir de los resultados del modelo numérico, la posible afectación de manantiales.
- Se deben presentar secciones de control perpendiculares al eje y sobre la traza o eje del túnel mostrando la evolución temporal del nivel freático ante los fenómenos de despresurización comparando escenario sin proyecto, con proyecto y con medidas de mitigación del proyecto.
- Se debe realizar un análisis de trayectoria de partículas y definir las nuevas direcciones y tiempos de tránsito que tendrá el agua subterránea que saldrá por el túnel.
- A partir de los resultados del modelo numérico, presentar el porcentaje de afectación en el balance en los volúmenes de control definidos.
- Se deben presentar los archivos fuente o nativos en los cuales se preparó el modelo numérico, especificando la versión del programa utilizada, con los componentes o extensiones necesarias para el completo cargue y corrida del modelo y los escenarios considerados.
- Se debe establecer un protocolo básico de actualización del modelo que incluya las fuentes de datos a utilizar, la disponibilidad requerida de los mismos y el modo o frecuencia de actualización a partir de los datos esperados de la red de monitoreo que se defina para el proyecto.

El modelo numérico debe ser actualizado y calibrado periódicamente durante la etapa de construcción, utilizando como insumo los caudales de infiltración registrados, niveles de agua subterránea y las características geológicas identificadas durante la perforación, de manera que se ajuste a una representación cercana a las condiciones encontradas durante la ejecución de los trabajos, de manera que sirva como herramienta de toma de decisiones. Se debe verificar la consistencia del modelo respecto a las condiciones geológicas, hidrológicas y constructivas registradas en campo.

Foto 5-4. Investigación de campo e información secundaria, cruce cordillera central

5.4 Investigación y exploración del terreno

El objetivo principal de las actividades de investigación y exploración del terreno es desarrollar un modelo geológico, geotécnico e hidrogeológico a la escala y con la longitud y profundidad requeridas, dependiendo de la fase del proyecto en que se encuentre [31], [32], [33].

A partir de la recolección y análisis de información secundaria (numeral 5.2.2), se definirán los sitios donde se diseñará y construirá el túnel, las fuentes de materiales y Zodmes. Con esta, se planeará y diseñará la respectiva campaña de exploración en el área del proyecto que permita la recolección de información primaria en las áreas de topografía, geología, hidrogeología, geomorfología, geotecnia, ambiental y social. Se espera que la investigación y caracterización del terreno, desarrolle los siguientes aspectos, de manera progresiva en cuanto al alcance y escala, a través de cada fase del proyecto, esto es:

5.4.1 Fase I: PREFACTIBILIDAD

5.4.1.1 Topografía

Durante esta fase se tendrá en cuenta:

El trabajo de topografía debe realizarse a escalas semi-detalladas y locales, esto es a escala 1:10.000 o más detallada para el cuerpo del túnel y escala 1:5.000 para los portales, que permita la adecuada lectura de la información conforme lo requiera la autoridad ambiental, a partir de la cartografía existente o de imágenes satelitales recientes, en un ancho mínimo de 200 m que puede reevaluarse en función del Lineamiento Geotécnico.

A partir de la cartografía existente se deberán localizar las posibles fuentes de materiales de construcción e identificación de posibles sitios de disposición de material sobrante Zodmes.

5.4.1.2 Geología

Durante esta fase, tanto para el alineamiento, como para las fuentes de materiales y Zodmes, se tendrá en cuenta:

- Actividades como:
  - Reconocimiento geológico geotécnico de cada alternativa y de fuentes de materiales y Zodmes.
  - Mapeo de unidades geológicas y geotécnicas a nivel de grupo y formación.
  - Descripción y definición litológica.
  - Identificación y caracterización de fallas geológicas, incluyendo su posible orientación y evidencia neotectónica.
  - Construcción de columna litológica regional.
  - Elaboración de cortes geológicos que incluyan el lineamiento del túnel.

- Con la información recolectada se verificará el marco geológico regional (con litología y patrones de afloramientos a nivel de grupo y formación), estratigrafía, se actualizará el modelo geológico proveniente de información secundaria (ver numeral 5.2.2). Toda la información del mapeo se presentará en la misma escala de los levantamientos topográficos.
- El componente de los entregables, corresponde a los anexos derivados de las actividades realizadas, como Mapas, planos, cortes, columnas, modelos etc.

5.4.1.3 Hidrogeología y Geomorfología

Durante esta fase se tendrá en cuenta:

En la **Fase I** se identificará el recurso hídrico subterráneo (manantiales, aljibes, pozos profundos, etc.), a partir de información secundaria debidamente referenciada (numeral 5.2.2), e información literaria o de estudios de referencia cercanos al proyecto, se propondrá esquema Conceptual que servirá como insumo para el Modelo Hidrogeológico Conceptual (MHC) en **Fase II**, ver numeral 5.3.11.1.

- Actividades de hidrogeología como:
  - Identificación de fuentes subterráneas (manantiales, aljibes, pozos, etc.).
  - Evaluación preliminar de condiciones hidrogeológicas.
  - Identificar las formaciones respecto a la facilidad de almacenar, transitar y mantener el agua, conforme a la escala de trabajo.
  - Análisis hidrológico a nivel de cuenca.
  - Definición preliminar del modelo de flujo a nivel regional.
  - Proponer esquema conceptual del modelo hidrogeológico, relacionado con el área que implica el túnel.
- Actividades de geomorfología como:
  - Localización y caracterización de procesos morfogenéticos.
  - Realizar fotointerpretación y procesamiento digital de sensores remotos.
  - Mapeo de unidades, sub unidades geomorfológicas.
  - Elaboración de cortes geomorfológicos que incluyan el lineamiento del túnel.
- La información relacionada con geología, tectónica, hidrología, morfodinámica y foto interpretación, será integrada y relacionada mediante algebra de mapas para definir las unidades geomorfológicas a nivel regional, proveniente de información secundaria (numeral 5.2.2), a escala 1:10.000 o más detallada.
- El componente de los entregables, corresponde a los anexos derivados de las actividades realizadas, como Mapas, planos, cortes, columnas, modelos etc.

5.4.1.4 Geotecnia

Durante la **Fase I,** se tendrá en cuenta la información secundaria para la elaboración del lineamiento geotécnico de cada alternativa geométrica, tanto en planta como en profundidad, a escala 1:10000 o mayor, para la elaboración del Informe de Datos Geotécnicos IDG y el Informe de Línea Base Geotécnica ILBG, que se inician a elaborar en **Fase II** y se entregan detallados en **Fase III**, que se detallan más adelante en el numeral 5.4.11.

- Actividades como:
  - Revisión de información secundaria relacionada en el numeral 5.2.2.
  - Trazado del Lineamiento del túnel para las diferentes alternativas.
  - Elaboración del Lineamiento geotécnico para las diferentes alternativas.
  - Propuesta del plan de exploración, geológica geotécnica para la definición de los datos geotécnicos.
- El componente de los entregables, corresponde a los anexos derivados de las actividades realizadas, como Mapas, planos, cortes, columnas, modelos, etc., a partir de información secundaria.

5.4.2 Fase II: FACTIBILIDAD

5.4.2.1 Topografía

Durante esta fase se tendrá en cuenta lo siguiente:

- Topografía del área del túnel para la definición del perfil longitudinal, a escala semidetallada 1:2000 o más detallada para el cuerpo del túnel y escala 1:1000 para los portales, que puede estar apoyada sobre la cartografía definida por imágenes satelitales o fotografías aéreas.
- En las zonas de portales para galerías de escape y portales del túnel principal, se requiere topografía convencional (levantamientos topográficos terrestres).
- En los portales deberá cubrirse un ancho mínimo de 50 m en cada costado perpendicular al eje, y mínimo 100 m en dirección del eje.

  A partir de la cartografía existente se deberán localizar las fuentes de materiales de construcción y levantamiento de los sitios de disposición de material sobrante ZODMES.

5.4.2.2 Geología

Durante esta fase, tanto para el alineamiento, como para las fuentes de materiales y Zodmes, se tendrá en cuenta:

- Actividades como:
  - Levantamiento geológico – geotécnico de la alternativa seleccionada.
  - Levantamiento geológico y geotécnico a nivel de bloque o miembro litológico escala 1:10000 a 1:5000.
  - Descripción y definición litológica a la escala de trabajo.
  - Identificación y caracterización de fallas, fracturas, alineamientos, discontinuidades, etc., incluyendo su orientación preferencial y evidencia neotectónica, a la escala de trabajo.
  - Construcción de columna estratigráfica local.
  - Elaboración de cortes geológicos que incluyan el lineamiento del túnel según escala de trabajo.

- Elaboración De bloque-diagrama a escala 1:10000.
- Definición del modelo geológico, que permitirá caracterizar cada una de las unidades geológicas presentes en el alineamiento del túnel, y en aquellas zonas donde se anticipa que existen estructuras geológicas para generar una caracterización geotécnica del macizo.

- Con la información recolectada se verificará el marco geológico local (con litología y patrones de afloramientos a nivel de bloque), estratigrafía, se actualizará el modelo geológico proveniente de información primaria. Toda la información del mapeo se presentará en la misma escala de los levantamientos topográficos.
- El componente de los entregables, corresponde a los anexos derivados de las actividades realizadas, como Mapas, planos, cortes, columnas, modelos etc.

5.4.2.3 Hidrogeología y Geomorfología

Durante esta fase se tendrá en cuenta que:

En la **Fase II** se generará el modelo hidrogeológico conceptual (MHC), que incluye los parámetros hidrogeológicos de cada unidad, posiciones del nivel freático o piezométrico, superficies piezométricas, direcciones de flujo del agua subterránea y caracterización hidrogeoquímica. De igual manera, es necesario tener en cuenta las áreas de recarga y descarga, identificadas en el mapa hidrogeológico con base en el inventario de puntos de agua. El propósito de la creación de un modelo conceptual radica en simplificar el entendimiento hidrogeológico a partir de la organización sistemática de los datos.

- Las actividades para definir el modelo hidrogeológico, están contenidas en el Modelo Hidrogeológico Conceptual (MHC) que se detallan en el numeral 5.3.11.
- Actividades de hidrogeología como:
  - Realizar el inventario y caracterización de fuentes subterráneas (manantiales, aljibes, pozos, etc.).
  - Definir las unidades hidrogeológicas.
  - Identificar los bloques o miembros litológicos respecto a la facilidad de almacenar, transitar y mantener el agua, conforme a la escala de trabajo.
  - Realizar cálculo del balance hídrico.
  - Definición el modelo de flujo (red de flujo) a nivel zonal.
  - Caracterización fisicoquímica e isotópica de las fuentes subterráneas
  - Elaborar el Modelo Hidrogeológico Conceptual (MHC), relacionado con el área que implica el túnel.
  - Elaborar el Modelo Hidrogeológico Numérico (MHN), relacionado con el área que implica el túnel, que se detallará en **Fase III**.
- Actividades de geomorfología a nivel de portales como:
  - Localización y caracterización de procesos morfodinámicos.
  - Realizar fotointerpretación y procesamiento digital de sensores remotos.
  - Mapeo de componentes geomorfológicos.
  - Elaboración de cortes geomorfológicos que incluyan los portales del túnel.
- Los procesos morfodinámicos (áreas inestables, escarpes, deslizamiento, zonas de reptación, grietas, subsidencias, etc.), de los entornos y áreas de influencia del túnel, deben ser definidos y descritos de manera detallada.

- La información relacionada con geología, tectónica, hidrología, morfodinámica y foto interpretación, será integrada y relacionada mediante algebra de mapas para definir los componentes geomorfológicos a nivel local, proveniente de información primaria, a escala 1:10000 a 1:5000.
- El componente de los entregables, corresponde a los anexos derivados de las actividades realizadas, como Mapas, planos, cortes, columnas, modelos etc.

5.4.2.4 Geotecnia

Durante la **Fase II** de los diseños, se tendrá en cuenta información primaria para elaborar el Informe de Datos Geotécnicos IDG (detalle en el numeral 5.4.11.2) y a su vez se inicia la elaboración del Informe de Línea Base Geotécnica ILBG (detalle en el numeral 5.4.11.1), que se entregan con nivel de detalle en **Fase III**:

- Actividades como:
  - Adopción del Lineamiento del túnel para el diseño.
  - Ajuste del Lineamiento geotécnico de la alternativa seleccionada.
  - Elaboración y ejecución del plan de exploración, geológica - geotécnica para el levantamiento y consolidación de los datos geotécnicos en el lineamiento geotécnico seleccionado a escala 1:10000 a 1:5000
  - Elaborar propuesta de la campaña exploratoria que deberá ser adelantada en la siguiente fase del proyecto.
  - Propuesta del Plan de monitoreo, teniendo en cuenta aspectos técnicos y organizacionales, ver 6.5.4.
- Definición y caracterización de Unidades Geológicas para Ingeniería – UGI.
- Descripción de tipos y condiciones de la roca, discontinuidades (numeral 5.4.8), y clasificación del macizo rocoso (numeral 5.4.9).
- El componente de los entregables, corresponde a los anexos derivados de las actividades realizadas, como Mapas, planos, cortes, columnas, modelos etc.

5.4.3 Fase III: DISEÑOS

5.4.3.1 Topografía

Durante la **fase III**, se tendrá en cuenta que:

- Tendrá que definirse con precisión el perfil longitudinal.
- El ancho de la franja alrededor del alineamiento se definirá con criterio geológico e hidrográfico para aportar información topográfica al componente hidrogeológico; se requiere que el área del levantamiento topográfico cubra una franja de 300 m como mínimo alrededor del alineamiento y en caso de requerirse, bajo criterios geológicos e hidrográficos, se adelante el levantamiento topográfico de otras áreas que permita evaluar potenciales inestabilidades tanto de la estructura subterránea como de taludes de corte o portales en el área de influencia del proyecto.

- La información se plasmará a escala 1:1000 o más detallada para el cuerpo de túnel con curvas de nivel cada 1,0 m y escala 1:500 a 1:250 para los portales con curvas de nivel cada 0,50 m.
- En esta fase, además de las áreas de portales y galerías de escape, se recomienda levantar por medio de topografía terrestre las zonas de accidentes geográficos (*p.e.* quebradas).
- El componente de los entregables, corresponde a los anexos derivados de las actividades realizadas, como Mapas, planos, cortes, modelos, etc.
- Cartografía y levantamiento a detalle para fuentes de materiales de construcción y sitios de disposición de materiales sobrantes ZODMES.

5.4.3.2 Geología

Durante esta fase, tanto para el alineamiento, como para las fuentes de materiales y Zodmes, se tendrá en cuenta:

- Actividades como:
  - Levantamiento geológico – geotécnico de la alternativa seleccionada a nivel de detalle.
  - Levantamiento geológico y geotécnico a nivel de capa o estrato escala 1:1.000.
  - Descripción y definición litológica a la escala de trabajo.
  - Identificación y caracterización de fallas, fracturas, alineamientos, discontinuidades, etc., incluyendo su orientación preferencial, espaciamiento, relleno, condición y evidencia neotectónica, a la escala de trabajo.
  - Elaboración de secciones delgadas para descripción petrográfica de las unidades geológicas.
  - Construcción de columna estratigráfica local.
  - Elaboración de cortes geológicos verticales transversales y longitudinales al eje del túnel (mínimo cada 100 m), que incluyan el lineamiento del túnel según escala de trabajo.
  - Elaboración de bloque-diagrama a escala 1:2.000.
  - Definición del modelo geológico, que permitirá caracterizar cada una de las unidades geológicas presentes en el alineamiento del túnel, y en aquellas zonas donde se anticipa que existen estructuras geológicas para generar una caracterización geotécnica del macizo.
- Con la información recolectada se verificará el marco geológico local (con litología y patrones de afloramientos a nivel de capa o estrato), estratigrafía, se actualizará el modelo geológico proveniente de información primaria. Toda la información del mapeo se presentará en la misma escala de los levantamientos topográficos.
- El capítulo de geología contendrá el marco geológico regional y de detalle, geomorfología, hidrogeología, estratigrafía, geología estructural, condiciones geológicas esperadas en la excavación del túnel, geología detallada de los portales, pozos de ventilación, galerías de escape y mapeo de la información estructural complementaria.
- En el apéndice 3 de la referencia [6] se presentan algunos lineamientos sobre los elementos que deberá contener la información geológica y la interpretación

requerida, para que el modelo geológico sea una herramienta útil en la evaluación de los riesgos en cada etapa del proyecto (numeral **3.4.6**.).

- Para esta fase, se deberá contar con el licenciamiento minero y ambiental de fuentes de materiales y Zodmes.
- El componente de los entregables, corresponde a los anexos derivados de las actividades realizadas, como Mapas, planos, cortes, columnas, modelos etc.

5.4.3.3 Hidrogeología y Geomorfología

En la **Fase III**, se detalla el Modelo Hidrogeológico Numérico (MHN) del túnel, con ajuste del modelo Hidrogeológico Conceptual (MHC), para ello, se alimentará de la mayor información recolectada de la etapa de diseño, Estudio de Impacto Ambiental (EIA) y campañas exploratorias adicionales; el Modelo Hidrogeológico Numérico (MHN), es la representación matemática del sistema de flujo del agua subterránea. Este modelo se sustenta con los valores de los parámetros geohidráulicos y la geometría de las unidades hidrogeológicas, caudales superficiales, resultados del balance hídrico como datos o registros de precipitación y valores de recarga por infiltración o percolación. Además, debe contener las condiciones de frontera que no varían en el tiempo: las cargas hidrostáticas, las zonas de recarga, tránsito y descarga, direcciones de flujo, conexiones hidráulicas entre las diferentes unidades geológicas, sistemas acuíferos y fuentes superficiales.

- Las actividades para elaborar el Modelo Hidrogeológico Numérico (MHN) que se detallan en el numeral 5.3.11.2. relacionadas con:
  - Efectuar validación e interpretación de los datos de análisis fisicoquímicos e isotópicos.
  - Georreferenciación y nivelación topográfica de precisión, de las fuentes subterráneas (manantiales, aljibes, pozos, etc.).
  - Cuantificar o parametrizar las unidades hidrogeológicas (permeabilidad, transmisividad, etc.).
  - Identificar los estratos, respecto a la facilidad de almacenar, transitar y mantener el agua, conforme a la escala de trabajo.
  - Ajuste del balance hídrico.
  - Definición el modelo de flujo (red de flujo) a nivel local.
  - Validación e interpretación los datos fisicoquímicos e isotópicos de las fuentes subterráneas.
  - Detallar el Modelo Hidrogeológico Numérico (MHN), relacionado con el área que implica el túnel.
- Actividades de geomorfología a nivel de portales como:
  - Ajustar la caracterización de procesos morfodinámicos.

  - Reprocesamiento digital de sensores remotos.
  - Construcción del mapa geomorfológico a detalle.
  - Elaboración de cortes geomorfológicos que incluyan los portales del túnel a escala 1:500 a 1:250.

- El componente de los entregables, corresponde a los anexos derivados de las actividades realizadas, como Mapas, planos, cortes, columnas, modelos etc.

5.4.3.4 Geotecnia

Durante esta fase de los diseños, con base en el Informe de Datos Geotécnicos IDG (detalle en el numeral 5.4.11.2) se construye y entrega final del Informe de Línea Base Geotécnica ILBG (detalle en el numeral 5.4.11.1) a escala 1:2000 a 1:1000:

- Actividades como:
  - Definición y caracterización de Unidades Geológicas para Ingeniería – UGI.
  - Definición y caracterización de Unidades Geotécnicas Homogéneas – UGH.
  - Descripción de tipos y condiciones de la roca, discontinuidades (numeral 5.4.8), y clasificación del macizo rocoso (numeral 5.4.9).
  - Elaboración y ejecución del plan de exploración, geológica – geotécnica, para el levantamiento y consolidación a detalle, de los datos geotécnicos del lineamiento geotécnico.
  - Ajuste del Lineamiento geotécnico de la alternativa seleccionada.
  - Construcción del Informe de Línea Base Geotécnica ILBG escala 1:2000 a 1:1000.
  - Elaboración del Informe de Diseño Geotécnico (IDiG) del lineamiento geotécnico del túnel, galerías y portales escala 1:1000 o mayor.
  - Propuesta del plan de seguridad geotécnico a realizarse durante la construcción, numeral 6.8.
- El componente de los entregables, corresponde a los mapas de UGI y UGH, al Informe de Línea Base Geotécnica - ILBG, al Informe de Diseño Geotécnico (IDiG), así como sus anexos derivados de las actividades realizadas, como Mapas, planos, cortes, columnas, modelos etc., en las actividades de diseño a las condiciones geológicas – geotécnicas.

5.4.4 Exploración por métodos geofísicos

La exploración por métodos geofísicos debe considerarse como la etapa previa para evaluar, planear y emprender un programa de perforaciones exploratorias indirectas, siendo importante establecer, que la fuente de energía a utilizar debe ser en función de la profundidad de exploración (métodos superficiales y/o métodos profundos).

Aunque estos métodos presentan incertidumbres en la interpretación de los resultados, ofrecer un panorama inicial y general de la geología, permite localizar y delimitar zonas con características de interés, que pueden o deben contrastarse con la información obtenida de las perforaciones. Un programa de exploración geofísica no sustituye las perforaciones, pero permite hacer una mejor programación y complementar la información para lograr optimizar la cantidad de puntos de perforación a realizar.

Los métodos geofísicos de mayor utilización en el campo de túneles y estructuras subterráneas son la refracción/reflexión sísmica, métodos acústicos y métodos eléctricos.

Existen múltiples correlaciones para la determinación de las propiedades de los materiales con base en los resultados de la exploración geofísica.

Para la selección de los métodos geofísicos pueden seguirse los lineamientos dados por la norma ASTM D6429-20 y las recomendaciones de la ISRM (International Society for Rock Mechanics) [68 - 69], así como el uso de otras metodologías para la estimación del estado de esfuerzos "IN-SITU", en los casos que aplique.

MÉTODOS APLICABLES	APLICABILIDAD
Refracción sísmica de superficie	Alcance: normal, 30-50 m de profundidad. Utilidad: litología; resistencia, densidad de grietas; grado de meteorización o metamorfismo; zonas de fallas.
Reflexión sísmica de superficie	Alcance: normal, 15-300 m de profundidad; para mayor profundidad se puede requerir una licencia ambiental en Colombia. Utilidad: estratigrafía de rocas sedimentarias; contactos geológicos, cavidades (*karst*), y fallas.
MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves)	Alcance: normal, 10 m; pero puede llegar hasta 100 m. Utilidad: interpretación geológica del terreno; distribución detallada de zonas fuertes y débiles del terreno; detección de zonas fracturadas, alteradas,
Resistividad eléctrica	Alcance: hasta cientos de metros, dependiendo de espacio disponible y de la energía de la fuente. Utilidad: detección de agua subterránea; delimitación de zonas de falla; y grados de meteorización.
Sísmica directa en la perforación (*crosshole* , *downhole* , *uphole*)	Alcance: normal, 30-150 m; pero puede llegar hasta 600 m. Utilidad (material cercano a la perforación): propiedades físicas y dinámicas elásticas; grado de meteorización y fracturamiento; y perfil sísmico.
Tomografía sísmica	Alcance: normal 30-150 m, pero puede llegar hasta 600 m. Utilidad: interpretación geológica del terreno; distribución detallada de zonas fuertes y débiles del terreno; detección de zonas fracturadas, alteradas,
Tomografía eléctrica	Alcance: normal, 30-150 m; pero puede llegar hasta 600 m. Utilidad: interpretación geológica del terreno; zonas de cavidades y de fracturas; grado de meteorización; y trayectorias del agua subterránea.

Tabla 5-4. Aplicabilidad de algunos métodos geofísicos en la exploración para túneles [69-72]

En la Tabla 5-4 se presentan algunos criterios que orientan la selección del método de exploración geofísica, en función de la cobertura del túnel y la aplicabilidad para determinar las características del terreno.

En **la fase II**, se aplicarán métodos geofísicos de superficie, enfocados en la búsqueda de contactos litológicos y posibles zonas de falla. También se puede utilizar la tomografía sísmica para determinar los parámetros geomecánicos.

En la **fase III**, se profundizará y detallará la exploración geofísica de la fase anterior. En función de la longitud del túnel, se definirá el número de líneas de sísmica necesario para la interpretación geológica en la longitud total del mismo. De acuerdo con la litología y la interpretación de la geología mediante la sísmica de superficie 2D y/o 3D, se realizará tomografía sísmica y eléctrica para complementar la determinación de los parámetros geomecánicos suelo, roca y la zonificación de la calidad del macizo.

Para garantizar una exploración geofísica adecuada al sistema de riesgos, es conveniente que la investigación de la **fase III** tenga en cuenta algunos aspectos importantes [6]:

- Elegir, preferiblemente, métodos con alta resolución.
- Elegir el método adecuado a las características del terreno que se quieren conocer.
- Calibrar el método geofísico por medio de perforaciones.
- Investigar un número suficiente de secciones que permita caracterizar la totalidad del alineamiento.
- Tener una profundidad de investigación adecuada a la profundidad del túnel y lo más cerca posible de su eje.
- En zonas tectónicamente complejas deberá estar orientada de tal forma que se obtenga la posición real de las estructuras.
- Complementar el análisis con la observación de los núcleos obtenidos de perforaciones.
- Realizar una interpretación conjunta entre un geofísico y un geólogo.

Además, se realizará exploración geofísica en las zonas de portales, encaminada a determinar:

- Espesor de los depósitos
- Localización de contactos
- Localización de posibles fallas o estructuras tectónicas
- Localización del nivel freático
- Valores de velocidad de onda para determinar parámetros

5.4.5 Perforaciones exploratorias

Las perforaciones exploratorias, o perforaciones con recobro de muestras, deben estar estrictamente enfocadas a la verificación o ajuste del modelo del terreno, incluyendo:

- Localización de contactos entre unidades geológicas (cambios en la litología)
- Determinación de la orientación y magnitud de estructuras geológicas (fallas)
- Determinación del estado de los materiales (detalle del perfil de meteorización)
- Recolección de muestras para ensayos de laboratorio
- Realización de ensayos (desde o en la perforación)

Dentro de la planeación y alcances de la campaña de exploración, se definirán todos los aspectos considerados en este numeral. La campaña de exploración estará obligada a definir, por lo menos [40]:

- Ubicación donde se ejecuta la exploración y su objetivo (con justificación).
- Tipo de investigación a realizar.
- Profundidad de las investigaciones (profundidad de perforaciones, profundidad de toma de muestras superficiales, etc.).
- Tipo de muestreo (especificaciones de número y localización para toma de muestras).
- Especificaciones para la toma de muestras de agua.
- Tipo de equipos a utilizar.
- Las normativas o estándares que deberán aplicarse en las distintas actividades.

5.4.5.1 Aspectos generales

A continuación, se describen algunos elementos que deben contemplarse en referencia a las perforaciones con recobro:

- Antes de emprender la campaña de exploración con perforaciones u otros sistemas exploratorios, se recomienda realizar un análisis en el cual se tenga en cuenta la información existente y el aporte de los métodos geofísicos.
- La ubicación y profundidad de las perforaciones deberá estar justificada en los modelos preliminares: geológico, geotécnico e hidrogeológico. Es decir, ambas características estarán directamente ligadas a la complejidad geológica del área del proyecto.
- La ubicación y la profundidad estarán ligadas a una incertidumbre por resolver dentro del modelo del terreno (p.e. localización de contacto entre unidades, recolección de muestras para ensayos de laboratorio, orientación de estructuras geológicas, ejecución de ensayos in situ).
- La utilidad para determinar la orientación y ubicación de contactos entre unidades geológicas.
- La utilidad para ampliar la información en cuanto a presencia, orientación y extensión de estructuras geológicas relevantes (fallas).
- La utilidad para la calibración de los métodos geofísicos.
- La representatividad, teniendo en cuenta que la información solo es obtenida para un determinado punto y profundidad de perforación (necesidad de interpretación).
- En las zonas de los portales, considerar que la profundidad deberá superar cualquier superficie de falla potencial y en todo caso no ser inferior a tres (3) diámetros del túnel.
- En las zonas del cuerpo del túnel, las perforaciones deben encaminarse a obtener muestras estadísticamente representativas de todos y cada uno de los tipos de roca que se planean excavar durante la construcción del túnel, de acuerdo con el

modelo geológico. El objetivo de las mismas, es poder soportar el modelo geológico propuesto con información in situ, y en especial poder obtener muestras para análisis de laboratorio de los diferentes tipos de roca, y aquellas en donde de acuerdo con el modelo, se presenten estructuras geológicas como fallas o contactos entre unidades. En la evaluación de este requerimiento se pueden incluir perforaciones inclinadas, verticales y horizontales.

- Cada portal debe contar al menos con una (1) perforación que permita determinar el perfil de meteorización; el espesor de los depósitos; la localización de la roca in situ, determinar el nivel freático; la clasificación de los suelos y rocas y obtener muestras para ensayos de laboratorio. Estas perforaciones pueden ser verticales, horizontales o inclinadas dependiendo de las condiciones de las capas del perfil estratigráfico.
- Las perforaciones deberán ser ejecutadas por personal experimentado. El equipo empleado tendrá que adaptarse a las condiciones del terreno y necesidades del grupo diseñador.

En la **fase II** y **fase III** se ejecutarán perforaciones con recuperación de muestras en sitios definidos de acuerdo con las condiciones geológicas, con el fin de elaborar el modelo geomecánico del terreno. El número y longitud de las perforaciones estarán enfocados a disminuir las incertidumbres remanentes de las fases anteriores y dependerán de la extensión de los túneles.

Se realizará como mínimo, una (1) perforación por cada unidad geológica o cada vez que se identifiquen estructuras geológicas o condiciones relevantes que influencian el comportamiento de la excavación. Si el macizo que se estudia contiene múltiples fallas y fracturas subverticales, se recomienda realizar múltiples perforaciones: verticales, inclinadas u horizontales, especialmente en el área de los portales. La profundidad y los equipos de perforación deben estar acorde con el objetivo de la perforación (*p.e.* muestreo de una unidad geológica específica, determinación de la orientación de un lineamiento).

La definición sobre la cantidad final de perforaciones a ejecutar en cada campaña de exploración, será propuesta por el diseñador, aprobada por el interventor y estará contenida dentro del Informe de Datos Geotécnicos **IDG** y del Informe de Línea Base Geotécnica **ILBG**, donde se debe precisar el número de perforaciones y la justificación para cada una de ellas, teniendo presente para dicho juicio, los conceptos de riesgo geológico e incertidumbre geológica, relacionados en el capítulo 3.

Es pertinente enfatizar que, en las zonas donde se planteen construir túneles donde se encuentre una geología particular, es decir, condicionada principalmente a la tectónica y sus mayores consecuencias (fallas, plegamientos, etc.), en estos casos particulares, se recomienda incrementar el número de perforaciones y de ensayos respectivamente, que será propuesto por el diseñador y aprobado por el interventor.

Para garantizar una exploración adecuada al sistema de riesgos, es conveniente que en la exploración de la **fase III** se tenga en cuenta lo siguiente [6]:

- Realizar un número suficiente de perforaciones, que permita caracterizar la totalidad del alineamiento del proyecto.
- Hacer muestreo de núcleos en la totalidad de la longitud perforada.
- Realizar sondeos adecuados a la profundidad del túnel y lo más cerca posible del alineamiento.
- Hacer muestreo representativo de todas las unidades geotécnicas identificadas.
- Realizar ensayos in situ para una caracterización más precisa.

Se recomienda que, previo al inicio de la construcción y para iniciar la construcción de los portales, previamente estén construidos y medidos los inclinómetros y piezómetros cercanos a ellos, de forma tal, que se pueda contar con verdaderas lecturas ceros del terreno en su estado original.

Las perforaciones de exploración que no se vayan a utilizar como piezómetros se deben inyectar con el fin de que queden clausuradas.

5.4.5.2 Registro de la perforación

Durante la perforación se llevará un registro de, por lo menos, los siguientes elementos [41]:

- Profundidad y ubicación (coordenadas) de la perforación.
- Especificaciones de la broca de perforación y tubería de perforación.
- Especificaciones y profundidad del revestimiento.
- Profundidad del nivel freático.
- Longitudes de perforación.
- Registro de las condiciones encontradas durante la perforación:
  - Porcentaje y calidad del recobro; la tasa de recobro tendrá que reflejarse en los registros y en las cajas para almacenar la muestra.
  - Pérdida o ganancia de fluido durante la perforación, profundidades del agua antes y después de cualquier parada del trabajo (cuando aplique).
  - Cambios en la tasa de avance (presión hidráulica en el taladro de perforación).
  - Cambios en el color del agua.
  - Temperatura del agua.
  - Dificultades en la instalación del revestimiento.
  - En rocas, el valor del RQD (Rock Quality Designation) de acuerdo con las normas (ASTM D6032); este deberá registrarse al abrir el ´*toma muestras*´.

Los registros de perforación deberán ser presentados dentro del informe (perfiles), a una escala de 1:100. Se recomienda tener registro fotográfico de las actividades realizadas durante la ejecución de la perforación y realizar un registro con cámaras endoscópicas en toda la longitud de la perforación.

El registro de perforación deberá contar con los siguientes elementos, como mínimo [41]:

- Profundidad y ubicación (coordenadas) de la perforación.
- Descripción de los materiales.
- Registro fotográfico.
- Estimación de la resistencia del material (ensayos índice):
  - Para suelos, resistencia no drenada por medio de penetrómetro de bolsillo, ensayo de veleta de campo y ensayo de penetración estándar SPT.
  - Para rocas, los ensayos sugeridos de la ISRM y adaptadas a Colombia por la Sociedad Colombiana de Geotecnia - SCG, resistencia por medio de estimación empírica, ensayo de carga puntual (ASTM D 5731) o resistencia a la compresión basado en resistencia por rebote (ASTM D5873) [72, 220].
  - Se recomienda incluir la determinación del módulo de elasticidad del material por medio de la prueba de velocidad ultrasónica.
- Dentro del registro se deberá hacer referencia a las observaciones realizadas durante la ejecución de la perforación.
- Ubicación de la perforación en planta y perfil.

5.4.5.3 Muestreo de suelo y núcleos de perforación

La toma de muestras de suelo está enfocada a su utilización en ensayos de laboratorio. No obstante, siempre es conveniente calibrar los ensayos con los ensayos de laboratorio del mismo sitio, para obtener correlaciones confiables.

El número y cantidad de muestras se determinará de acuerdo con el propósito de la investigación y la complejidad geológica en el área de estudio. Se recomienda tomar una suficiente cantidad de muestras (y testigos), previniendo los posibles daños de estas durante el almacenamiento y transporte.

Para la toma de muestras de suelo, los muestreadores deberán ser de pared delgada y cumplir la norma I.N.V-E-105. El muestreo deberá hacerse mediante un impulso continuo; nunca usando golpes de martinete o martillo (I.N.V.E-109).

El muestreo y transporte de las muestras deberá seguir los lineamientos definidos en I.N.V.-E-103, I.N.V.-E-113. Todas las muestras deberán estar acompañadas de un registro con la descripción geotécnica (tipo de suelo, color, etc.) y la identificación del tipo de material (I.N.V.-E-102) [42] [43].

Con el objetivo de aumentar el recobro y calidad de los núcleos de perforación de roca, se recomienda emplear técnicas de perforación por rotación, con recuperación de muestra en diámetros superiores a 60 mm (diámetro del núcleo recuperado). No se permitirán núcleos con diámetro inferior a 45 mm. Se recomienda usar un barreno interno con hendedura, el cual se puede separar del conjunto ´*toma muestras*´.

El registro de núcleos requiere la presencia de personal experimentado y calificado para hacer la descripción. Los núcleos deberán ser descritos en un lenguaje claro, no ambiguo, que permita a terceros identificar la profundidad y reconocer las principales características del núcleo. Este registro contendrá:

- Descripción geológica y petrográfica [42] [43]:
  - Identificación del tipo de roca (EN ISO 14689-1)
  - Mineralogía (identificación de minerales)
  - Unidad geológica
- Grado de meteorización (EN ISO 14689-1:2003 sus numerales 4.2.4 y 4.3.4)
- Grado de fracturación (RQD) (ASTM D6032)
- Textura
- Estructura
- Color
- Descripción de discontinuidades (EN ISO 14689-1):
  - Tipo
  - Espaciamiento
  - Condición
  - Rugosidad
  - Relleno
  - Orientación relativa con respecto al eje de la perforación

Se proveerán todas las perforaciones con cajas portanúcleos metálicas, de madera de buena calidad o plásticas rígidas, cumpliendo la norma ASTM D2113. En estas cajas se guardarán y preservarán los núcleos recobrados, en la secuencia correcta, con separadores entre cada barrenada e identificación clara de la profundidad. Las muestras tendrán que ser revisadas por un geólogo de campo.

Posteriormente, el geólogo deberá describir completamente la perforación y documentarla en el formato de registro de perforaciones. Para la correcta interpretación, el geólogo o geotecnista encargado del registro deberá contar con los elementos descritos en el numeral5.4.5.2, para interpretar y correlacionar las eventualidades registradas durante la ejecución de la perforación.

5.4.6 Otros sistemas exploratorios

En sectores con materiales heterogéneos donde exista una alta incertidumbre por parte de los geólogos y geotecnistas, se recomienda la exploración con apiques, pozos (Ilustración 5-2) y/o galerías exploratorias de gran diámetro, que permitan registrar metro a metro el material encontrado y realizar ensayos *in situ*.

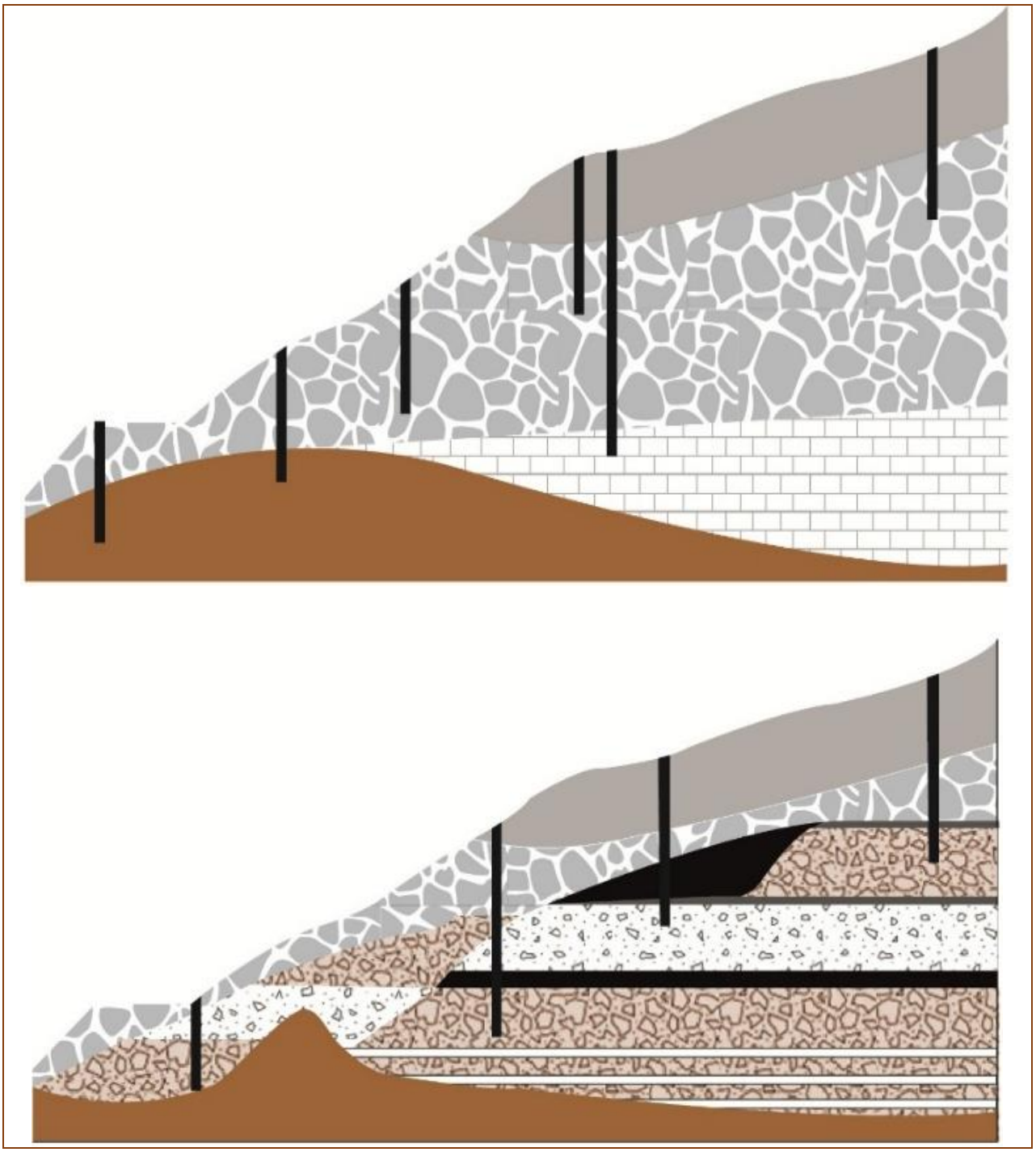


Ilustración 5-2. Representación de los resultados de la exploración con perforaciones y combinada. Arriba: exploración con perforaciones; abajo: con pozos adicionales a las perforaciones

Las galerías exploratorias son requeridas en ambientes geológicos complejos, donde este puede ser el único recurso que reduce significativamente las incertidumbres. Para el mapeo geológico-geotécnico en las galerías de exploración puede seguirse el estándar ASTM D4879. Además, se recomienda la utilización de los ensayos de placa (ASTM D4394) y resistencia al corte de las discontinuidades (ASTM D4554-12), para tener información directa sobre el módulo de deformación del macizo rocoso y la resistencia al corte de las discontinuidades.

5.4.7 Ensayos de laboratorio e in situ (en el sitio)

Los ensayos de laboratorio y en el sitio se enfocan en las propiedades relevantes de los materiales (roca/suelo), que influyen el comportamiento del túnel durante la excavación [73 - 74]. Dentro de este numeral se resumen los principales parámetros y ensayos, las normativas que aplican y las referencias recomendadas para la caracterización de esos materiales.

La Tabla 5-5 se presenta como guía de los parámetros relevantes del terreno para diferentes tipos de roca y suelo; debe entenderse que dependerán de las condiciones de cada proyecto.

Previo a la ejecución de los ensayos de laboratorio, será necesario establecer un modelo preliminar del terreno. Este modelo permite prever las unidades geológicas que influyen en el comportamiento del túnel, así como su condición. De esta manera, se planeará el muestreo dentro de las diferentes unidades o sitios de interés geotécnico que deben ser investigados en profundidad.

Dependiendo de las condiciones específicas del proyecto, puede ser necesaria la determinación de parámetros diferentes o adicionales, pero deberá comprobarse que los parámetros seleccionados permiten la determinación del comportamiento del terreno [74]. Los tipos y cantidades de ensayos de laboratorio e *in situ* dependen de los objetivos de la fase de estudios y diseños (**Fase II** o **Fase III**), la complejidad geológica, la información existente y la factibilidad práctica para realizar los ensayos. El diseñador analizará la cantidad de ensayos básicos requeridos y luego estudiará cuáles ensayos opcionales son necesarios, su cantidad y localización. De cualquier forma, estará obligado a sustentar la metodología para conseguir la caracterización del terreno o la ampliación, profundización o afinación de la caracterización obtenida en la fase de diseño anterior. Los trabajos necesarios se describirán en la campaña de exploración. Dentro de este plan de exploración a cargo del diseñador, se mostrarán los alcances, la justificación y los detalles de la metodología.

TIPO DE MATERIAL		PARÁMETROS RELEVANTES																		
		Roca intacta													Discontinuidades					
		Composición mineralógica	Presencia minerales arcillosos (cualitativo)	Presencia minerales arcillosos (cuantitativo)	Cementación	Tamaño del grano	Textura	Porcentaje volumétrico de bloques	Porosidad	Alteración/meteorización	Susceptibilidad a soluciones	Propiedades expansivas	Propiedades de resistencia	Anisotropía	Orientación de la discontinuidad	Tamaño de la discontinuidad	Geometría de la discontinuidad	Persistencia	Apertura	Resistencia al corte/rugosidad	Material de relleno
ROCAS	Rocas plutónicas	■	–	–	–	■	■	–	–	□	–	–	■	–	■	■	■	□	■	□	□
	Rocas volcánicas (masiva)	□	–	–	–	–	■	–	–	■	–	–	■	–	■	■	■	□	■	□	■
	Rocas volcánicas clásticas	□	□	–	□	□	□	■	–	■	–	□	■	–	■	–	–	–	–	–	–
	Rocas clásticas de grano grueso (masiva)	□	–	□	■	■	□	■	■	□	–	–	■	–	■	□	□	□	□	–	–
	Rocas clásticas de grano fino (masiva)	–	■	■	■	■	■	–	–	□	–	■	■	–	■	□	□	–	–	–	–
	Rocas clásticas de grano grueso	□	–	□	■	■	□	■	■	□	–	–	■	□	■	–	–	–	–	■	–
	Rocas clásticas de grano fino	–	■	■	■	■	□	–	–	□	□	■	■	■	■	–	–	–	–	■	□
	Rocas carboníferas (masiva)	■	–	–	–	–	□	–	–	–	■	–	■	–	–	□	■	□	■	–	□
	Rocas carbiníferas (estratificada)	■	–	–	–	–	□	–	–	–	■	–	■	□	–	■	–	–	–	□	□
	Rocas sulfáticas	■	–	–	–	–	–	–	–	–	■	■	■	–	–	–	–	–	–	–	–
	Rocas metamórficas (masivas)	■	–	–	–	■	■	–	–	□	–	–	■	–	■	■	■	□	■	–	–
	Rocas metamórficas (foliadas)	■	□	–	–	■	■	–	–	□	–	–	■	■	■	■	■	□	–	■	■
	Zona de falla	□	■	■	■	–	–	■	■	□	–	■	■	–	–	–	–	□	■	–	□
SUELOS	Suelos con bolos y bloques rocosos	–	–	–	□	–	–	■	□	–	–	–	□	–	–	–	–	–	–	–	–
	Suelos de grano grueso (grava)	–	–	–	–	■	–	■	□	–	–	–	□	–	–	–	–	–	–	–	–
	Suelos de grano grueso (arenas)	–	–	–	–	■	–	□	□	–	–	–	■	–	–	–	–	–	–	–	–
	Suelos de grano grueso (gravo-arenoso)	□	–	■	–	■	–	■	□	–	–	□	□	–	–	–	–	–	–	–	–
	Suelos de grano fino (limo)	–	–	■	–	■	–	–	□	–	–	–	■	–	–	–	–	–	–	–	–
	Suelos de grano fino (arcilla)	□	–	■	–	■	–	–	□	–	–	■	■	–	□	–	–	–	–	–	–
		■ Relevante						□ Limitada						– no aplica							

Tabla 5-5. Ejemplo de parámetros relevantes dependiendo del tipo de material

A continuación, se listan los principales ensayos de laboratorio y ensayos *in situ* para suelos y rocas. Es necesario recalcar que los ensayos seleccionados deberán estar encaminados a la consecución de los parámetros relevantes del terreno o

requerimientos específicos en las etapas de diseño (*p.e.* caracterización hidráulica del terreno para hidrogeología).

5.4.7.1 Ensayos de laboratorio

5.4.7.1.1 Túneles en suelo

Ensayos básicos:

- Clasificación
  - Descripción visual (I.N.V.-E-102)
  - Clasificación (USCS) (I.N.V.-E-181)
  - Distribución granulométrica (I.N.V.-E-123, I.N.V.E-213, I.N.V.-E-214)
  - Plasticidad y consistencia (I.N.V.-E-125, I.N.V.-E-126, I.N.V.-E-127, I.N.V.-E-136)
  - Presencia de materia orgánica (I.N.V.-E-121)
- Propiedades del suelo
  - Humedad; peso específico del suelo y de las partículas sólidas (I.N.V.-E-122, I.N.V.-E-128, I.N.V.-E-222, I.N.V.-E-223)
  - Textura (I.N.V.-E-123, I.N.V.-E-213, I.N.V.-E-214)
  - Parámetros de resistencia al corte (I.N.V.-E-152, I.N.V.-E-153, I.N.V.-E-154)
  - Parámetros esfuerzo-deformación (I.N.V.-E-151, I.N.V.-E-153)
  - Expansividad (I.N.V.-E-132)
  - Conductividad hidráulica (ASTM D5084)
- Evaluación de la "composición mineralógica", si se sospecha la presencia de minerales expansivos.

Ensayos opcionales:

  - Composición mineralógica [75].

5.4.7.1.2 Túneles en roca (ensayos a la roca intacta)

Ensayos básicos[1]:

- Petrografía, composición, identificación y descripción del grano; descripción de componentes relevantes, intercalaciones y variaciones como proporciones volumétricas y frecuencias (ASTM C295)
- Densidad, porosidad (ASTM D7263)

[1] Los ensayos de laboratorio de rocas deben realizarse de conformidad con la serie completa de los métodos recomendados por la ISRM para la caracterización de rocas en laboratorio, traducida y adaptada del original Blue Book de la ISRM, documento que fue editado por la Sociedad Colombiana de Geotecnia-SCG, Sociedad correspondiente de la SCI.

- Potencial expansivo [76 - 77].
- Resistencia de la roca intacta (compresión, corte, tracción indirecta) (ASTM D2938, ASTM D5731, ASTM D3967, ASTM C39) [78 - 79].
- Parámetros para obtener criterios de falla Coulomb/Hoek-Brown [62, 80 - 83].
- Resistencia contra el desgaste, cambios de temperatura, erosión, inmersión (I.N.V.-E-218, I.N.V.-E-219, I.N.V.-E-220, I.N.V.E-236) [83].

Ensayos opcionales:

- Constantes elásticas (E, ν, G) (ASTM D3148, ASTM C469)
- Comportamiento tiempo-dependiente [84].
- Microestructura [85 - 86].
- Anisotropía con respecto a la resistencia de la roca intacta y el macizo rocoso [49 - 87].
- Abrasividad (ASTM D7625) [88 - 89].
- Ensayo de velocidades de ondas mediante la técnica de Ultrasonido (ISRM, 2007; traducido en Colombia por la Sociedad Colombiana de Geotecnia, 2013.

5.4.7.2 Ensayos y métodos de evaluación en la perforación (*in situ*)

5.4.7.2.1 En roca

Ensayos básicos:

- Registro de desviación de la perforación (ASTM D5753)
- Perfil sísmico vertical (VSP) (ASTM D7400, ASTM D5753)
- Ensayos de permeabilidad Lugeon. Este requerimiento se formulará en el desarrollo del componente hidrogeológico (numeral 5.3)
- Ensayos para determinar el estado de esfuerzos (ver numeral 5.4.10)
- Evaluación de la "composición mineralógica", si se sospecha la presencia de minerales expansivos.

Ensayos opcionales:

- Visualización óptica (Borehole video) (ASTMD5753)
- Registro de densidad Gamma-Gamma (ASTM D6274, ASTM D5753).
- Caliper (ASTM D6167).
- Registro de rayos Gamma naturales (ASTM D5753) Sonda de fractura simple (Borehole-jack) (ASTM D4971)

5.4.7.2.2 En suelo

Ensayos básicos:

- Ensayo de penetración estándar (SPT) (I.N.V.-E-111), donde sea aplicable
- Ensayo de veleta de campo (I.N.V.-E-170), donde sea aplicable

- Ensayos opcionales:
- Dilatómetro plano (ASTM 6635)
- Piezocono (ASTM D5778)
- Ensayos de permeabilidad Lefranc. Este requerimiento se formulará en el componente hidrogeológico (numeral 5.3)

Se recomienda la instalación de piezómetros dentro de cada perforación (numeral **6.8.4.5.1**).

Durante la etapa de construcción, se recomienda complementar la información sobre el módulo de deformación del macizo rocoso y la resistencia al corte de las discontinuidades, mediante ensayos de placa (ASTM D4394) y resistencia al corte de las discontinuidades (ASTM D4554-12).

5.4.7.3 Número de ensayos

Para túneles viales, el número de ensayo es función del problema geotécnico especifico (ej. diseño de portales), la complejidad geológica, la geología local y los parámetros requeridos para ejecutar el diseño [40]. Las unidades geológicas que influyen en el comportamiento del túnel son establecidas dentro del modelo del terreno y los ensayos deben estar encaminados a caracterizar cada unidad o diferentes condiciones del terreno dentro de la unidad, con la precisión que se haya establecido para cada una de las fases.

Será obligatorio tener en cuenta las siguientes consideraciones en el momento de determinar la cantidad de ensayos a realizar:

- El número de ensayos a ejecutar es inversamente proporcional a la homogeneidad del terreno, presencia de afloramientos y experiencias previas que permitan caracterizar los tipos de terreno.
- Según el tipo de ensayo, se dispondrá de múltiples muestras. La planeación se hará considerando las exigencias consignadas en las normativas de los ensayos. Algunos especímenes adicionales para ensayos tendrán que estar disponibles, siempre que se requiera (ver anexo L-W en [40]).
- El número de ensayos puede depender de la adopción de parámetros conservadores para caracterizar el material, en combinación con ensayos índice.

En proyectos de túneles que atraviesan zonas urbanas, la intensidad del muestreo y ensayos del laboratorio aumentan de forma considerable. Se recomienda seguir los lineamientos descritos en las referencias [41, 42] para este tipo de proyectos.

5.4.8 Mapeo y análisis de discontinuidades del macizo rocoso

Aunque se ha determinado con claridad que los macizos de rocas lodosas e inclusive con otros comportamientos especiales, como las rocas volcánicas y las rocas solubles (salinas, yeseras, etc.) se comportan geomecánicamente muy diferente a los macizos controlados por discontinuidades, generalmente estas controlan el comportamiento mecánico del macizo rocoso, incluyendo sus propiedades de resistencia, deformabilidad y conductividad hidráulica. Por ese motivo, es imperativo describirlas de forma cuidadosa y detallada.

El mapeo de discontinuidades es una de las herramientas más útiles para la consecución del modelo del terreno. Éste debe estar enfocado en la identificación de estructuras geológicas relevantes, la caracterización de la roca intacta y el macizo rocoso.

A continuación, se presentan los elementos que componen esta actividad con algunas referencias bibliográficas que pueden consultarse para su ejecución:

- Descripción de la roca, macizo rocoso o suelo [42 - 44].
- Descripción petrográfica [45]
- Grado y clasificación de la meteorización [46 - 48].
- Estructuras geológicas (plegamientos, estratigrafía, esquistosidad, foliación, etc.), tipo de discontinuidad, génesis.
- Descripción cuantitativa de las discontinuidades [49]
- Alteraciones tectónicas o hidrotermales, desintegración, cataclasitas [50].
- Identificación de grupos de discontinuidades [51]. Número y geometría de los grupos de discontinuidades principales, geometría, tamaño (ASTM D4879)
- Análisis estadístico de las discontinuidades [52]
- Evaluación del espaciamiento e intensidad de discontinuidades presentes en el macizo rocoso [53].
- Determinación de la resistencia de las paredes por medio del índice de rebote (ASTM D5873) [54].
- Tamaño y geometría (longitud, persistencia, área, apertura, terminación)
- Alteración, relleno [49] (ASTM D2488).
- Rugosidad, ángulo de dilatación, parámetros de resistencia al corte y rigidez de la discontinuidad [52 - 55].
- Densidad e intensidad de fracturas, conductividad de discontinuidades [53 - 59 - 60].
- Excavaciones subterráneas en roca E. Hoek I. et. Brown.

Se recomienda seguir una metodología para la descripción de las discontinuidades; por ejemplo, el Engineering Geology Field Manual [61 - 62].

5.4.9 Clasificación del macizo rocoso

Como en la **Fase I** no se dispone de una información detallada del macizo rocoso, que permita entender su estado de esfuerzos y las condiciones geológicas o hidrogeológicas, del mismo, el uso de los sistemas de clasificación sólo es útil para estimar algunas propiedades del macizo y plantear algún tipo de soporte del túnel. En las fases siguientes (**II y III**), y en la medida que se cuenta con información primaria, se debe actualizar la clasificación del macizo elaborada en la fase anterior, utilizando los modelos geológicos, geotécnicos e hidrogeológicos planteados. Sin embargo, es importante entender que los sistemas de clasificación no pueden reemplazar los procedimientos detallados de diseño [63].

La clasificación del macizo rocoso debe hacerse, como mínimo, por medio de dos (2) sistemas de aceptación reconocida. Los lineamientos metodológicos para varios sistemas reconocidos están dados en la norma ASTM D5878.

En el país, los sistemas de caracterización y clasificación del macizo rocoso más frecuentemente usados son: Rock Mass Rating (RMR) [64 - 66]; Rock Tunnelling Quality Index (Q-System o NGI) [67]; Geological Strength Índex (GSI) [35] y RMi (Rock Mass index, de Palmstrom, Romana SMR y la).

5.4.10 Determinación del estado de esfuerzos in situ

La determinación del estado de esfuerzos *in situ* se llevará a cabo en la **fase II** de los diseños. Deberá complementarse, ampliarse y precisarse en la **fase III**, y durante la etapa de construcción.

Para la determinación de los esfuerzos en el terreno se recomienda seguir los lineamientos establecidos por la ISRM (International Society for Rock Mechanics) [90 - 94]. La metodología recomendada para determinar el estado de esfuerzos tendrá el siguiente desarrollo [90]:

A. Utilizar la información secundaria disponible (numeral 5.2.2), sobre el estado de esfuerzos en el terreno.
B. A partir de la topografía, evidencias geológicas o cualquier otra información, estudiar la orientación de los esfuerzos principales.
C. Con base en la densidad y profundidad del terreno, estimar la magnitud del esfuerzo vertical.
D. Estudiar las direcciones y la relación de los esfuerzos principales, por medio de mecanismos focales o mediante la anisotropía de la velocidad de onda de cortante.
E. Determinar la orientación del esfuerzo principal menor con base en ensayos de fracturamiento hidráulico (ASTM D4645) [92] o por la orientación de las fracturas de perforación (observadas por registros de video o fotográficos) [95].

F. Determinar los componentes del tensor de esfuerzos por medio de métodos indirectos aplicados a los núcleos de perforación (numeral 5.4.5.3), tales como el análisis del efecto Kaiser [96] y el análisis diferencial de deformación [97 - 98].
G. Determinar el estado de esfuerzos completo mediante los métodos de sobreperforación (*overcoring*) (ASTM D4623) o mediante ensayos hidráulicos sobre las fracturas preexistentes [92]. Como alternativa, se pueden determinar los esfuerzos principales máximo y mínimo mediante fracturamiento hidráulico (ASTM D4645).
H. Determinar la variación del estado de esfuerzos en todo el terreno debido a la litología y las estructuras.

Los pasos desarrollados en la metodología son una función de los objetivos y alcances de la fase de estudios y diseños (**fases II** o **fase III**); la factibilidad práctica para implementar los métodos; y la disponibilidad de los equipos. De cualquier forma, es necesario hacer varias mediciones o estimativos, integrar dos o más métodos, y tener en cuenta que las incertidumbres de cada método son diferentes y no puede hacerse una ponderación simple de los resultados. La metodología a desarrollar se consignará en la campaña de exploración, en **Fase II** y **Fase III** de estudios y diseños. En ese documento, que estará a cargo del diseñador, se mostrarán los alcances, la justificación y los detalles de la metodología a desarrollar para determinar el estado de esfuerzos.

5.4.11 Informes geotécnicos

Estos entregables completan el diseño conceptual del proyecto y el alcance de la infraestructura a construir, a nivel prefactibilidad, factibilidad y de diseño (tal como se detalla en el numeral 2.2.2), por lo tanto, los estudios e informes son más detallados.

A partir del lineamiento del túnel y del lineamiento geotécnico desarrollados en **Fase I**, se definirá la línea base geotécnica, como insumo para el Informe de Datos Geotécnicos **IDG** y el Informe de Línea Base Geotécnica **ILBG** a desarrollar en **Fase II**, que posteriormente se detallan en **Fase III** conforme la profundidad y alcance de los mismos; estos informes dependen del nivel de exploración, reconocimiento e investigación adelantado según los requerimientos establecidos para cada fase.

Los informes que se presentan en estudios y diseños, se relacionan a continuación como el Informe de Datos Geológicos IDG, el cual contiene información base para la elaboración del Informe de Línea Base Geotécnica ILBG, que se relacionan en el numeral 5.4.11.

5.4.11.1 Informe de Datos Geotécnicos - IDG - ILBG [228].

Ofrece información geológica – geotécnica obtenida directa e indirectamente, sobre las características y condiciones que en esta área resulten más relevantes para el proyecto, incluyendo análisis y datos sobre todos los corredores previstos. La escala de observación varía entre lo local y detallado (Escala1:10000 a 1:5000), en función de las longitudes de los túneles. La unidad de trabajo es el denominado Lineamiento Geotécnico, y por tanto en función de las recomendaciones del Informe del componente geotécnico de la fase anterior, se requerirán las campañas de exploración del terreno para toma de información primaria, prefiriéndose para ello la

realización de campañas de levantamiento geológico – geotécnico en afloramientos sobre los lineamientos, en donde se adquiera altísima capacidad de información in situ. Igualmente se implementarían campañas de caracterización con técnicas geofísicas, para poder integrar los datos e incrementar la resolución de la información tectónica, geológica y geotécnica de mayor relevancia. En esta etapa debe quedar abierta la posibilidad de desarrollar exploración directa con perforaciones, trincheras, túneles piloto y la respectiva campaña geotécnica para el proyecto.

- *Componentes del entregable*:
  - Introducción: Generalidades; Propósito y alcance; Control de topografía; Organización y Limitaciones del Informe
  - Información de Soporte: Generalidades; Investigaciones previas; Entorno Geológico Regional y Local
  - Investigaciones de campo: Generalidades; Perforaciones para ensayos; Apiques y Trincheras; Pozos de observación; Investigaciones Geofísicas; Ensayos in-situ; Mapeo Geológico
  - Programa de Ensayos de Laboratorio: Generalidades; Ensayos de Suelos; Ensayos de Rocas
  - Referencias; Tablas, Figuras, Apéndices y anexos.

5.4.11.2 Informe de Línea Base Geotécnica - ILBG [228].

Este Informe constituye, como su nombre lo indica, la base geotécnica del proyecto, por tanto, requiere adelantar una serie de actividades que permiten la caracterización con una mayor resolución, de los terrenos por donde discurrirán los lineamientos geométricos preliminares. El propósito esencial es la caracterización directa de las formaciones geológicas, a nivel de macizos rocosos y depósitos de suelos, que resulten representativas o con mayor grado de complejidad geológico – geotécnica, según los resultados del **IDG**. Se tomará como referencia la información, orientada a geolocalización espacial de las alternativas como de los sitios donde se adelanten actividades de investigación y exploración del terreno. Dentro del entregable se debe precisar el ambiente tectónico prevalente y régimen de esfuerzos esperados de conformidad con las campañas realizadas, particularmente las de geofísica. El alcance del **ILBG** busca servir como fuente de información cruda y de consulta, obtenida a escala 1:2000 o mayor, que permita una adecuada comprensión de la naturaleza de los terrenos, así como las interacciones que se prevén con las infraestructuras.

- *Componentes del entregable*:
  - Introducción: Nombre del Proyecto; Propietario; Equipo de Trabajo; Propósito del Informe; Organización y Limitaciones del Informe; Restricciones del Informe y del Proyecto
  - Descripción del Proyecto: Localización; Tipo y Propósito del Proyecto; Resumen de Características Principales (dimensiones, longitudes, secciones transversales, formas, orientaciones, tipos de soporte y de revestimientos de

mayor aplicación, secuencias de construcción esperadas en función de los terrenos)

- Fuentes de Información Geológico – Geotécnica: Referencias al **IDG**; Informes Geológica -Geotécnica disponibles; Precedentes Históricos de Fuentes de Información.
- Entorno Geológico del Proyecto: Breve descripción de los entornos geológicos, geomorfológicos e hidrogeológicos, origen de los depósitos, con referencia a mapas, memorias y figuras; Breve descripción de la exploración del terreno y los programas de ensayos (evitar repetición del **IDG**); Aspectos del terreno, la topografía y condiciones ambientales que afectan el proyecto; Afloramientos y superficies expuestas; Perfil geológico a lo largo de los alineamientos previos, con estratigrafía y formaciones rocosas / depósitos de suelos, y registros con datos de las perforaciones, sitios, profundidades y orientaciones.
- Caracterización del terreno: características físicas y condiciones de los macizos rocosos y los depósitos de suelos, incluyendo rellenos, suelos naturales y lechos rocosos, describir el grado de alteración / meteorización, incluyendo unidades superficiales para tuberías y cimentaciones; condiciones de agua subterránea, profundidad de niveles freáticos, niveles colgados, acuíferos confinados y presiones hidrostáticas, pH, y otros detalles de la química de las aguas; requerimientos de desechos y contaminación de aguas subsuelo y suelos / rocas; resultados de ensayos de campo y laboratorio presentados en histogramas agrupados por formaciones rocosas / depósitos de suelos, referencias al **IDG**; rangos y valores para los propósitos del **ILBG**, explicaciones acerca de los histogramas de datos, lineamientos para propósitos de interpretación de la data, datos de conteo de golpes incluyendo factores de correlación usados para determinar el SPT (Ensayo de Penetración Estándar) u otros ensayos dinámicos, velocidades de onda; presencia de bloques y otras obstrucciones; factores de expansión; descriptores de profundidad, tipos de terreno o estratos a encontrar durante excavación, propiedades esperadas de cada tipo de terreno; valores esperados de permeabilidad; condiciones especiales para túneles con TBM (Ver anexo A).
- Consideraciones para diseño – Túneles y Pozos: descripción de los sistemas de clasificación de terrenos a usar para propósitos de diseño, incluyendo nomenclatura de comportamientos esperados; criterios y metodologías de mayor aplicación para el diseño del soporte del terreno y de los sistemas de estabilización incluyendo cargas del terreno; consideraciones ambientales tales como limitaciones en asentamientos y desagüe de niveles de agua; modo mediante el cual distintos requerimientos de soporte se han usado en diferentes tipos de terreno, y si se requiere, protocolo para la determinación de tipos de terreno para pago; aspectos para un programa de instrumentación y monitoreo del terreno, incluyendo el anteproyecto y las especificaciones.
- Consideraciones de diseño – otras excavaciones y cimentaciones: criterios y metodologías para el diseño de sistemas de soporte de excavaciones, incluyendo diagramas de presión lateral de tierras y requerimientos de control de deflexiones / deformaciones; definición de sistemas de soporte factibles;

criterios para pilotes hincados; fricción lateral admisible para tablestacas; consideraciones ambientales; instrumentación y monitoreo

- Consideraciones de construcción – túneles y pozos: comportamiento anticipado del terreno en respuesta a operaciones de construcción dentro de cada macizo rocoso / depósito de suelo; secuencias estimadas de construcción – o en especificaciones y anteproyectos; estimados de aguas subterráneas durante construcción y requerimientos estimados de manejo de aguas; potenciales fuentes de retrasos, como infiltraciones de aguas subterráneas, fallas y zonas de corte, bloques, estructuras enterradas, otras obstrucciones, gases, suelos contaminados, aguas termales, etc.
- Consideraciones de construcción – otras excavaciones y cimentaciones: similares a las anteriores; *ripabilidad* de la roca y otros materiales, incluyendo requerimientos o limitaciones para voladuras; requerimientos para control de aguas subterráneas y métodos de control factibles; pozos y requerimientos de sostenimiento; dificultades especificas anticipadas de construcción; estimados base de infiltraciones que pueden presentarse durante construcción, requerimientos de bombeo de la excavación; técnicas aplicables para mejoramiento de terrenos y métodos de control de aguas subterráneas; fuentes potenciales de retrasos, como aguas de infiltración, zonas de corte y fallas geológicas, estructuras enterradas, gases o suelos o aguas subterráneas contaminadas.

Para adelantar los diseños preliminares del túnel así como los análisis de riesgos geotécnicos, se requiere conocer el régimen de esfuerzos que ostentan los macizos rocosos o depósitos que serán atravesados por la infraestructura, por tanto es indispensable que para los estudios y diseños, se implementen técnicas o procedimientos para la estimación de los estados de esfuerzos, considerando las particularidades geológicas y geomorfológicas del Lineamiento Geotécnico, utilizando la alternativa más adecuada.

Es fundamental contar con cuadros resumen donde se consignen por sondeo los resultados de los ensayos de campo y laboratorio, adicionalmente se requiere la revisión de todos los testigos recuperados por parte de los geólogos.

- Una vez definida la alternativa más adecuada y sostenible en los aspectos, técnico, ambiental, social y económico o financiero, resultado de la **Fase I** y del pronunciamiento que emita la autoridad ambiental competente, se procederá con los estudios y diseños propios de las siguientes fases del proyecto.
- De los estudios y diseños, deberá emitirse un **Informe de Diseño Geotécnico (IDiG)**, conforme la información referida en el numeral 2.2.2.3.

Las condiciones del terreno anticipadas durante las diferentes etapas de diseño, tendrán que verificarse y ajustarse durante la etapa subsecuente. En la medida que la investigación y exploración del terreno se adelante progresivamente a lo largo de todas las etapas del proyecto, mediante diversos propósitos y escalas de aproximación, se

puede reducir ostensiblemente la investigación para estudios y diseños definitivos, la cual tendrá un carácter complementario y muy específico para el túnel a construir.

5.4.12 Modelo geológico, geotécnico e hidrogeológico

Los modelos son representaciones gráficas y/o en volumen del terreno, dentro del cual se definen las condiciones geológicas, de agua subterránea, los materiales presentes y sus características, que de manera directa (*p.e.* materiales atravesando el eje del túnel) o indirecta (*p.e.* una formación geológica que no cruza el alineamiento) afectan el comportamiento de cualquier estructura construida dentro de dicho espacio. Durante la construcción de los modelos se estudia de manera general toda el área de influencia del túnel y, posteriormente, se detalla para disminuir el grado de incertidumbre geológica a lo largo de un alineamiento definido.

Un modelo geológico debe contener, por lo menos, información sobre: las diferentes unidades geológicas, estructuras, y contactos litológicos; de manera que se comprendan las características del macizo rocoso; en cuanto a su geomorfología; litologías, características de los suelos y espesores de meteorización, además de la existencia, posición y flujo del agua.

Se considera fundamental contar con un mapeo de esfuerzos a lo largo del lineamiento y a la profundidad del túnel, con miras a los análisis posteriores de riesgos por diversos mecanismos de fallas que puedan llegar a presentarse, durante construcción como tiempo después, por desconfinamiento de los materiales térreos, por probable pérdida de rigidez y movilización de los parámetros de resistencia o para el diseño de los sostenimientos correspondientes, dato este por demás que está involucrado en prácticamente todas las metodologías de diseño de túneles.

A partir de un correcto modelo geológico, se define el modelo geotécnico y se construye o genera el modelo hidrogeológico, que deben ajustarse durante la fase de diseño (**Fase III**). La procedencia y calidad de la información para los modelos dependen del desarrollo de cada fase del proyecto. La incertidumbre de estos modelos depende de la cantidad, calidad, extensión y cobertura de información que se adquirió en las fases de investigación y exploración del terreno durante las etapas de diseño. Inicialmente se desarrollan modelos preliminares, que se revisan y actualizan de forma paulatina sobre la base de los resultados obtenidos en cada etapa de estudio (numeral 5.4). En consecuencia, es necesario que las campañas de exploración del terreno se enfoquen en el adecuado conocimiento del suelo (suelo, terraza y/o roca) que se intervendrá durante la construcción. En las **Fase II** y **Fase III**, aumentando la intensidad de la exploración e investigación del área del proyecto, se refinan el modelo geológico, geotécnico e hidrogeológico definitivo del túnel.

5.5 Investigación de condiciones ambientales

Estos estudios integrarán la información adquirida acerca del ambiente social, humano y natural, así como las regulaciones y leyes generales que proveen restricciones a la construcción de proyectos, especialmente los que involucren las áreas vecinas en donde se planea la construcción del túnel, buscando siempre, determinar si hay

viabilidad ambiental o no. Sin embargo, en cualquier caso, será la legislación ambiental vigente la que rige en el proyecto, por encima de cualquier otra norma.

Es necesario minimizar los efectos adversos de la excavación sobre los entornos natural (aguas subterráneas, aguas superficiales, flora y fauna), social (utilización de tierras, activos culturales, etc.) y humano (ruido, vibración y polución del aire), considerando, no solamente los impactos directos asociados a la obra, sino todos aquellos a ella relacionados, incluyendo los indirectos, sinérgicos y/o acumulativos del proyecto.

Los aspectos relevantes para preservar el ambiente tendrán que incluirse desde la fase de planeación (hasta la de mantenimiento y operación del proyecto), teniendo en consideración lo establecido en los Lineamientos de Infraestructura Verde Vial LIVV (ver Tabla 1-6), de manera que cubran el área de influencia del túnel.

Foto 5-5. Cruce cordillera Central, Cajamarca Tolima, investigación de campo

La investigación ambiental debe registrar también, en un componente hídrico para el área de influencia, en el cual se conozcan las condiciones hídricas existentes, con el fin de identificar las fuentes de agua que pueden ser potencialmente afectadas por el proyecto. De igual forma, se debe realizar el registro de los corredores de conectividad que pueden ser potencialmente afectados por el proyecto, con el propósito de establecer las medidas necesarias para llevar al mínimo los impactos ambientales (acorde con la jerarquía de mitigación) y garantizar un balance ambiental neto positivo.

Por lo tanto, la investigación ambiental involucrará tres aspectos:

- Conocer las condiciones ambientales, humanas y sociales que pueden ser afectadas por la construcción y posterior uso del túnel.

- Mediciones para el control de la polución y la preservación ambiental, con el fin de prevenir efectos en las comunidades circundantes.
- En planeación de proyectos a gran escala, para los cuales la valoración ambiental requiere leyes y regulaciones, el efecto sobre el ambiente tendrá que ser valorado y preestablecido de forma exhaustiva.

En general, las investigaciones que es necesario llevar a cabo desde el punto de vista ambiental y local para cada una de las etapas del proyecto corresponderán a aquellas exigidas por las autoridades ambientales nacionales y regionales, y podrán variar dependiendo de cada proyecto específico. Por tanto, durante la ejecución de cada una de las etapas del proyecto, será obligatorio consultar con la entidad encargada sobre sus requerimientos e incluirlos como tal en las actividades que se desarrollen, presentando para ello la metodología y el plan de investigación respectivo para aprobación del cliente o dueño del proyecto.

6 Capítulo - DISEÑO

6.1 Glosario

Andén: franja longitudinal al interior del túnel, destinada exclusivamente a la circulación de peatones en caso de emergencia o para labores de mantenimiento.

Avance de excavación: distancia paralela al eje del túnel de excavación por ciclo.

Barreno: Perforación hecha en roca, para colocar una carga de explosivo, con el fin de ejecutar una voladura.

Burden: Llamado borde, siendo la distancia o espacio calculado que existe entre el borde del cuele o cara libre fabricada y la distancia perpendicular de la fila del barreno o barrenos que detonarán de manera sincronizada, basada en un diseño previo.

Calzada: zona de la vía destinada a la circulación de vehículos.

Carril de emergencia: franja por fuera de las líneas que delimitan la calzada, la cual permite el estacionamiento de vehículos averiados.

Cobertura: corresponde a la dimensión en términos de longitud vertical u horizontal comprendida entre la superficie del área excavada en el túnel y la superficie del terreno natural, esta puede ser cobertura vertical y/o lateral, según sea el caso.

Comportamiento del terreno: reacción del terreno a la excavación en sección completa sin consideraciones de secuencia de excavación o medidas de soporte.

Comportamiento del sistema: comportamiento que resulta de la interacción entre el terreno y el sistema de soporte.

Convergencia: Unión en un punto de varias líneas o trayectorias de desplazamiento del terreno por esfuerzos alrededor del túnel, como consecuencia de la excavación y/o movimientos propios el terreno.

Corete: círculo de cuero que se instala en las cabezas de los pernos.

Cuele: Las voladuras en Túneles se caracterizan por no existir, inicialmente, una cara libre que permita generar un abanico inicial de salida de los primeros fragmentos de roca, por tal motivo se diseña el cuele, siendo éste, el hueco libre creado para cumplir esta función. El cuele tiene una distribución diferente y especial de disposición de los barrenos desde su diseño.

Curva horizontal: unión entre dos tangentes horizontales consecutivas. Puede estar constituida por un empalme básico o por la combinación de dos o más de ellos.

Curva vertical: unión entre dos tramos de diferente pendiente. Generalmente se construye con una curva parabólica, que permite evitar sobresaltos de vehículos durante la transición entre los tramos.

Destroza: Zona de la sección del diseño de la voladura, donde la disposición de barrenos está geométricamente hacia el interior de los barrenos de contorno y zapateros, así mismo, inmediatamente alrededor del cuele.

Diagnóstico ambiental de alternativas: evaluación de tipo ambiental que permite revisar y comparar las diferentes opciones de trazado, bajo las cuales sea posible desarrollará un proyecto, obra o actividad.

Diseño en planta: proyección sobre un plano horizontal del eje real o espacial. Dicho eje está constituido por una serie de tramos rectos o tangentes, enlazados por trayectorias curvas.

Diseño en perfil: proyección del eje real o espacial de la vía sobre una superficie vertical paralela al mismo.

Espaciamiento: Distancia calculada que hay entre el eje de perforación de los barrenos de la misma fila, esto es, paralelo a la conformación cronológica de la cara libre en el planeamiento de un esquema de voladura.

Estudio de impacto ambiental: su finalidad es determinar de manera detallada los efectos producidos por el proyecto vial, sobre los componentes abiótico (recursos hídricos, aire, suelo y formaciones geológicas) y biótico (flora y fauna), elaborar el plan de manejo ambiental y calcular los costos de las obras de mitigación ambiental.

Frente de excavación: hace referencia a la superficie temporal (durante construcción) de terminación del túnel, usualmente perpendicular al eje del túnel.

Gálibo: altura existente entre la superficie de rodadura y aquella línea imaginaria que limita la altura máxima permitida para el tránsito de vehículos al interior del túnel.

Gunita: mortero de similares propiedades del concreto neumático o proyectado; no incluye árido grueso.

GSI: índice geológico de resistencia que permite la caracterización del macizo rocoso, relacionado con las características de la roca intacta.

Lectura cero: primera medición de un parámetro físico dentro de la campaña de monitoreo.

Lechada: suspensiones altamente concentradas de partículas sólidas en agua u otro solvente, con consistencia de un líquido viscoso y permite ser utilizado para rellenar cavidades y juntas entre materiales adyacentes.

Método de excavación: procedimiento de construcción seleccionado para la excavación del túnel.

Método convencional de excavación: método de excavación que se realiza mediante avances secuenciales, los cuales incluyen procedimiento de avance (*p.e.* perforación, carga y voladura, o excavación mecánica), retiro de rezaga, instalación de soporte, etc.

Método de excavación con tuneladora TBM (Tunnel Boring Machine) Anexo A: Método de excavación que, mediante el empleo de un escudo (cabeza giratoria equipada con elementos de corte), permite el avance de la sección completa del túnel, junto con la extracción del material de corte y la colocación del sostenimiento o un revestimiento simultáneamente (Ver anexo A).

Método observacional: revisión y ajuste continuo del diseño, considerando las condiciones del terreno encontradas durante la etapa de construcción.

Modelo del terreno: conjunto de los diferentes factores que caracterizan el área del proyecto (modelo topográfico, geológico, geotécnico, hidrogeológico). En este se reúnen todas las características y las condiciones predominantes del terreno.

Monitoreo: medición de parámetros físicos.

Nivel de servicio: refleja las condiciones operativas del tránsito vehicular en relación con variables tales como la velocidad y tiempo de recorrido, la libertad de maniobra, la comodidad, los requerimientos del usuario y la seguridad vial.

Observación: recolección en campo de información cualitativa o cuantitativa.

Propiedades relevantes del terreno: aquellas que dictan su comportamiento y modo de falla.

Revestimiento definitivo: estructura permanente que se instala posterior a la estabilización total de la excavación.

Róndelas: discos del mismo material de la membrana impermeabilizante sujetados por medio de clavos al concreto neumático o a la cara de la roca. Actúan como fijaciones para, en conjunto con la soldadura térmica, soportar la membrana alrededor el túnel.

Sección transversal de servicio: sección en la cual se encuentran definidos los elementos geométricos necesarios para la adecuada operación y mantenimiento al interior del túnel.

Secuencia de excavación: combinación de avance de excavación (longitudinal) y división o seccionamiento del área transversal del túnel.

Sistema de soporte: es el conjunto de elementos de soporte y secuencia de excavación que se emplean para lograr la oportuna estabilización del túnel, antes de la instalación del revestimiento definitivo.

Soporte primario: se refiere a todas aquellas medias de soporte implementadas durante la excavación, antes de la instalación del revestimiento definitivo.

Subsidencia: proceso mediante el cual se altera la superficie del terreno natural debido a cambios inducidos en el terreno como consecuencia de la excavación de túneles con baja cobertura.

Suelo: material producto de la acumulación de partículas sólidas inorgánicas con presencia esporádica de material orgánico.

Taco: Término utilizado para referirse a la distancia calculada entre el tope máximo de la columna del explosivo y el plano de la cara o sección, así mismo, el taco es el material con el cual se ocupará el espacio libre que deja el explosivo y con el cual se le va a confinar para evitar que haya fuga de energía del explosivo al momento de liberar gases.

Terreno: término general para referirse al material en el que se excava el túnel.

Vástago: longitud libre de la varilla o perno de refuerzo.

Voladura: Es el resultado de la interacción mecánica entre la potencia de un explosivo y la resistencia a la carga dinámica de la roca, se diseña para lograr resultados calculados de fragmentación de roca y corte de perfil, en el caso de túneles, el contorno.

Voladura de Contorno: Técnicas de voladura especial, que permite el corte regular del contorno del túnel, evitando la sobre excavación y mitigando significativamente las vibraciones hacia el macizo rocoso, reduciendo el consumo de energía de explosivo y por ende reduce su consumo, ganando en estructura y sostenimiento del túnel.

Foto 6-1. Proyecto túnel cruce de la cordillera central – Galería 9A

6.2 Generalidades

El diseño de un túnel vial incluye aspectos geométricos; ubicación y diseño de portales; diseños geomecánico, del revestimiento y del plan de seguridad geotécnico; evaluación del riesgo; y aspectos operacionales durante construcción y operación (como monitoreo, suministro de energía, diseños electromecánicos, iluminación, etc.). Desde el punto de vista geomecánico, es preciso diseñar los túneles viales de carretera de forma tal que los sistemas de soporte para cada terreno previsto sean versátiles y cumplan con los requerimientos específicos dados por las condiciones particulares de cada proyecto. El proceso del diseño debe ser congruente con los resultados obtenidos en las actividades de exploración e investigación, tomando en cuenta los

requerimientos evaluados desde el punto de vista técnico, económico, de seguridad, ambientales y aspectos relacionados con la operación y manteniendo del túnel.

El proceso del diseño de túneles, también debe contemplar en la sección transversal, con las previsiones necesarias para reservar el espacio para la posterior instalación del equipamiento, de sistemas electromecánicos, geotécnicos, ambientales, los cuales se instalarán en la etapa de construcción, además serán necesarios en la etapa de mantenimiento, como lo son cárcamos, gabinetes, armarios SOS, tuberías y otros; de manera tal, que a lo largo de la vida útil del túnel, se logre conservar los espacios necesarios para cada fin y no incurrir posteriormente en la ocupación de espacios determinados para otra actividad, realizar excavaciones o modificaciones que deterioren el túnel, pongan en riesgo el sostenimiento de su estructura, generen condiciones de riesgo a los usuarios de la vía o simplemente la afectación visual.

El diseño de túneles viales de carretera es diferente, en sus fundamentos y métodos de diseño, de otro tipo de estructuras de ingeniería civil. En el caso de las obras subterráneas lineales, la capacidad (aporte) del terreno, que constituye un parámetro importante para el diseño, por lo común es difícil de estimar con suficiente detalle debido a la alta variabilidad del terreno, a su composición y estructura.

El proceso de diseño de un túnel está obligado a involucrar todos los aspectos que, de manera directa o indirecta, influencian la estabilidad del túnel. Estos factores se pueden dividir en:

- Factores intrínsecos del terreno: condiciones, composición y características específicas de cada terreno. Estos dictan el comportamiento del terreno y son específicas para cada material (*p.e.* la relación volumétrica de bloques es un factor importante en materiales de tipo depósito, pero insignificante para rocas). Dentro de estos factores es importante involucrar cualquier característica particular que dicte el comportamiento del terreno (parámetros relevantes).
- Factores determinantes del estado de esfuerzos: el estado de esfuerzos es un componente fundamental del diseño y debe ser cuidadosamente evaluado en la campaña de investigación y exploración. Los factores que determinan el estado de esfuerzos igualmente son particulares para cada proyecto (*p.e.* un túnel en un ambiente urbano está enmarcado por bajas coberturas y la influencia directa de estructuras aledañas al túnel, factores que no juegan un papel importante para túneles carreteros profundos). De igual manera, las condiciones de agua y orientación de las estructuras relevantes son factores que dictan el estado de esfuerzos y, por lo tanto, influencian el comportamiento de la excavación.
- Factores socioambientales y requerimientos específicos: estos factores hacen parte de cualquier proyecto y establecen limitantes-requerimientos a cumplir dentro del diseño del túnel (*p.e.* asentamientos máximos, niveles máximos de ruido o vibraciones, protección de aguas subterráneas). En general, la protección de los bienes y servicios ambientales, aspectos bióticos, abióticos y el ser humano.

- Otros factores: existen factores particulares a un proyecto que igualmente influencian el comportamiento y que, por lo tanto, deben ser incluidos dentro del diseño. (*p.e.* agentes corrosivos en el agua subterránea, cambios importantes de temperatura en el terreno, gases producidos dentro del túnel, prácticas locales de construcción, experiencia de constructores, grado de incertidumbre de los materiales a excavar y calidad de los diseños preliminares).

Los factores mencionados interactúan entre sí, y dictan los requerimientos a cumplir en el diseño. Igualmente, es necesario considerar la estabilidad del túnel a largo plazo mediante la evaluación del deterioro en el tiempo, causado por la interacción de los factores (características del terreno y los materiales de soporte, nivel de esfuerzos y la interacción con agentes externos como el agua subterránea).

Los túneles deben diseñarse combinando los elementos que se presentan a continuación, teniendo como prioridad la estabilidad de la obra a corto, mediano y largo plazos:

a. Aspectos geométricos (alineamiento y geometría de la estructura).
b. Modelo del terreno, el cual reúne el modelo topográfico, geológico, geotécnico e hidrogeológico.
c. Evaluación e identificación de riesgos inherentes del terreno.
d. Definición de los requerimientos específicos del proyecto.
e. Diseño de los elementos de soporte y secuencia de excavación que cumplan con los requerimientos establecidos.
f. Diseño del revestimiento definitivo para la vida útil del proyecto.
g. La vida útil del túnel debe considerar 100 años.

En líneas generales, los diseños geomecánicos y estructurales para túneles viales de carretera tienen que garantizar la estabilidad durante la ejecución y posterior operación de los mismos. Para ello, el túnel debe incluir elementos auxiliares como ventilación, medidas de prevención de desastres, equipo de iluminación y señalización, entre otros, los cuales se describen en el capítulo 7.

6.3 Aspectos del diseño

Es necesario diseñar los túneles viales de carretera de forma tal que se controlen los posibles modos de falla del terreno. En general, deben diseñarse para alcanzar de manera precisa los requerimientos particulares del proyecto, una condición de seguridad integral, la eficiencia económica, la facilidad de la construcción, la durabilidad y el mantenimiento durante su operación.

Independiente de la etapa en la cual se esté desarrollando el proyecto, el diseño de túneles viales de carretera para Colombia tiene que contemplar, como mínimo, los siguientes aspectos:

- Propiedades y comportamiento del terreno: en una etapa inicial debe evaluarse el comportamiento del terreno (posibles modos de falla) enmarcado por las características del terreno y las condiciones específicas del proyecto que influencian la excavación.
- Determinación de los requerimientos a cumplir en cuanto a aspectos socioambientales como nivel de ruido y vibración; interrupción del tráfico; caída

en los niveles de agua de ríos; quebradas y en el nivel freático; cambios en la calidad del agua y contaminación de la misma; subsidencia y levantamiento del terreno; efectos sobre estructuras vecinas; efectos que puede producir un portal sobre el paisaje circundante; efectos en la flora y la fauna y el impacto en los alrededores; y disposición de material producto de la excavación y de procesos constructivos, entre los más importantes.

- Evaluación de la respuesta sísmica, de la estructura, en casos donde la rigidez de la estructura es relativa con el macizo rocoso o suelo circundante, el efecto de la interacción con la estructura debe ser tomados en consideración especialmente en el caso de túneles con baja cobertura, excavados en depósitos del cuaternario o recientes.
- El efecto de las presiones del agua (presión de agua interna, presión de agua externa), nivel freático o descenso del nivel piezométrico y cantidad de infiltraciones de agua.

Es preciso tener en cuenta que el impacto e intensidad de los aspectos anteriores variarán de acuerdo con las características de cada proyecto. El diseñador está obligado a presentar el enfoque y la metodología detallada previamente al inicio de los trabajos ante la entidad contratante o a su representante, en el documento denominado “Reporte geotécnico del diseño”.

6.4 Diseño geométrico

Se describen las recomendaciones y parámetros mínimos en cuanto al diseño geométrico de túneles viales de carretera. El diseño en planta y perfil tiene que atender las regulaciones del *Manual de diseño geométrico* del INVIAS [99] adoptado mediante Resolución 0744 de 2009 o su versión más reciente, en conjunto con las directrices que se presentan a continuación.

6.4.1 Criterios para la localización del túnel

En el diseño geométrico de un túnel es necesario evaluar las ventajas y desventajas de la localización de la estructura en un área determinada. De esta manera, es posible determinar un trazado que disminuya los problemas asociados con la localización y orientación del túnel. Los factores más relevantes son los siguientes [100]:

- Factores financieros:
  - Costos de construcción
  - Costos de mantenimiento y operación
  - Beneficios financieros

- Factores técnicos y de movilidad:
  - Efectividad para resolver problemas geológicos y geotécnicos en superficie, lo cual aumenta sustancialmente los costos y el riesgo de la operación de la vía a cielo abierto.
  - Efectividad para resolver problemas geológicos y geotécnicos y para disminuir costos y riesgos asociados a la operación de la vía a cielo abierto.
  - Aspectos de seguridad para la movilidad (pendiente longitudinal, galerías de escape, iluminación, ventilación, estaciones SOS, etc.)
  - Intersecciones (rampas, galerías de escape, etc.)
  - Disminución o afectación en la movilidad de vías adyacentes durante y después de la construcción
  - Riesgo por derrumbes, inundaciones, etc.
  - Problemas de tipo topográfico, geológico y geotécnico.
  - Afectación a estructuras, taludes y fuentes hídricas.
  - Cronograma de ejecución y su impacto en la movilidad
- Factores socioambientales:
  - Emisiones (ruido, gases)
  - Localización de los portales como puntos de concentración de emisiones, por ejemplo, propagación de ondas sonoras y gases[2].
  - Zonas de protección, conservación y reserva
  - Uso de la tierra
  - Incidencia de la separación de comunidades
  - Rellenos antiguos
  - Impacto en el balance hidrogeológico del área.
  - Impacto en las comunidades y asentamientos
  - Paisajismo

6.4.2 Diseño geométrico en planta

El diseño geométrico en planta de un túnel vial de carretera está usualmente condicionado por el trazado geométrico de la vía existente. Sin embargo, el túnel debe ser uno de los factores determinantes para el ajuste del alineamiento, en búsqueda de las mejores condiciones para ubicar los portales, evitar las zonas identificadas como potencialmente inestables o interferencias urbanas existentes, y orientar el túnel de manera favorable con respecto a estructuras geológicas importantes y coberturas verticales y laterales (*p.e.* zonas de falla).

El diseño en planta deberá garantizar las distancias de visibilidad mínima, tanto en los accesos como en el interior del túnel, a partir de la velocidad y los criterios de diseño establecidos, con el fin de obtener un diseño en planta y perfil acorde con los requisitos técnicos establecidos en el presente manual.

[2] Para cada caso donde se requiere seleccionar la ubicación de portales, se deberá realizar un análisis del estudio de tráfico, potencia de incendio, condiciones geométricas, geográficas y climáticas del túnel e incluso se puede implementar una simulación de flujo CFD para validar dicha condición, así como también, se deberá tener en cuenta el empuje adicional que inyectan los Jet Fan para vencer el posible efecto chimenea que tenga el túnel y el sentido de tráfico del mismo.

El diseño geométrico en planta de un túnel vial de carretera y sus accesos, debe contemplar aspectos como:

- La localización de los portales y sus accesos
- Coberturas verticales y laterales
- La visibilidad en curva en el interior del túnel
- La distancia de parada
- Las curvas horizontales
- Las conexiones con galerías al interior del túnel

Es imperativo evaluar estos aspectos apropiadamente con el fin de lograr un diseño óptimo desde el punto de vista técnico-económico y de seguridad, de acuerdo con las políticas ambientales, de transporte y planeación. Es importante anotar que este diseño estará eventualmente condicionado por factores de tipo geomorfológico y geológico, así como por las futuras condiciones de operación del proyecto como tal.

6.4.2.1 Radio mínimo de curvatura

El radio de curvatura mínimo dentro del túnel depende de la visibilidad en curva al interior de este. Para este manual se adoptan las recomendaciones dadas en la referencia [100]. El radio mínimo de curvatura está dado por la siguiente fórmula:

$$R_{min} = \frac{3,5}{2} + \frac{D_s^2 + 4*a^2}{8*a} \qquad a = \frac{3,5}{2} + S_{ancho} + P_{dist}$$

R_{min} Radio de curvatura mínimo dentro del túnel [m]

Ds Distancia de seguridad en túneles [m] (Tabla 6-1 y Tabla 6-2)

S_{ancho} Sobreancho [m] (**Tabla 6-5**)

P_{dist} Distancia entre el fin de calzada y la pared del túnel [m]. Generalmente aplica el ancho del andén (**Tabla 6-5**)

La Ilustración 6-1 muestra esquemáticamente los parámetros para el cálculo del radio mínimo (el radio obtenido, debe ser igual o superior al radio mínimo recomendado en el Manual de Diseño Geométrico, para la velocidad de diseño de la carretera).

Velocidad (km/h)	60	70	80	90	100
Distancia de seguridad DS (m)	85	105	130	160	185

Tabla 6-1. Distancia de seguridad en túneles [99]

En caso de que la concepción y competencia del proyecto no permita la aplicación de los radios definidos en este manual, se deben usar los radios definidos en el Manual de

Diseño Geométrico del INVIAS, acompañado de análisis de la visibilidad/señalización dentro del túnel (análisis de riesgo).

Desde el punto de vista de la operación, se recomienda restringir la velocidad dentro del túnel a 80 km/h en los túneles unidireccionales y a 60 km/h en los túneles bidireccionales, o a la velocidad de operación de la vía de acceso, en caso de que esta sea inferior. Es necesario que cualquier cambio en estas velocidades esté soportado por un análisis de riesgos, que tenga en cuenta las condiciones de seguridad al interior del túnel durante la operación normal.

Velocidad (km/h)	Distancia de seguridad en túneles - DS (m)							
	Descenso				Ascenso			
	-6%	-4%	-2%	-1%	1%	2%	4%	6%
60	92	90	86	85		83	79	77
70	116	114	108	105		103	99	97
80	144	141	133	130		125	120	118
90	174	170	162	160		153	144	141
100	207	204	191	185		178	170	167

Tabla 6-2. Corrección de la distancia de parada según la pendiente [99]

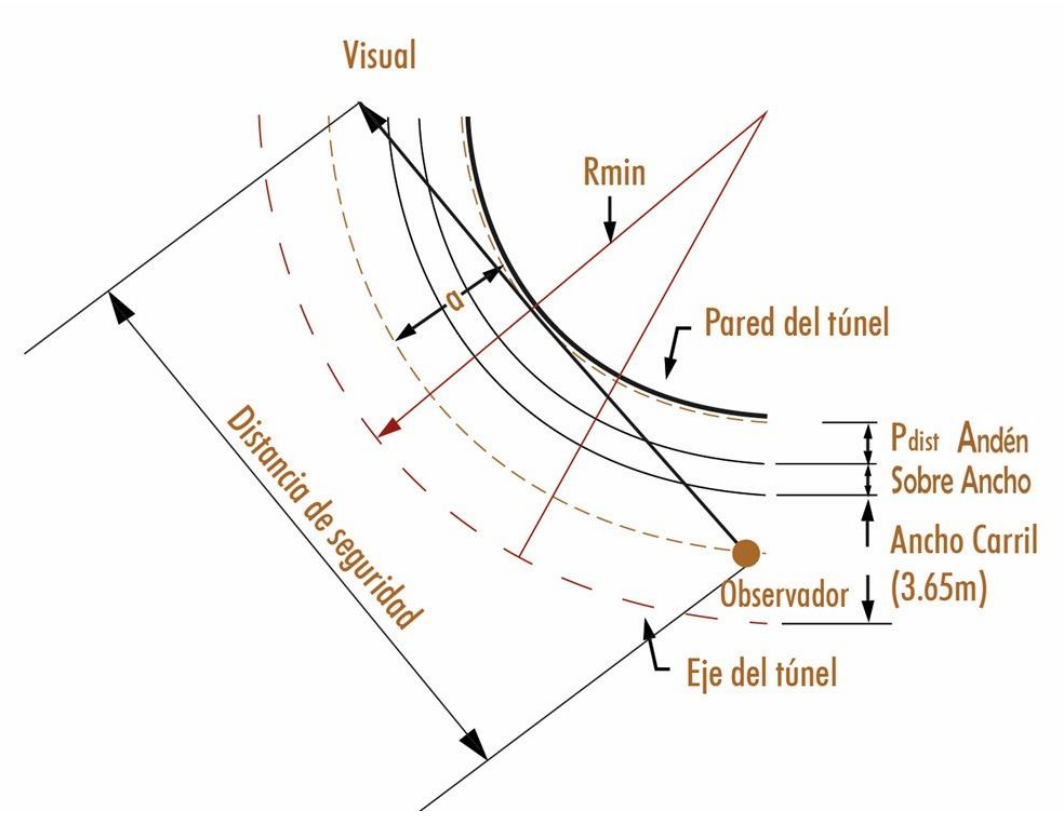


Ilustración 6-1. Representación esquemática para el cálculo del radio de curvatura [100]

Aspectos generales para el diseño geométrico en planta:

- Se recomienda diseñar curvas del tipo espiral – círculo – espiral.
- Se debe evitar que el usuario visualice los portales a grandes distancias. Por tanto, se recomienda diseñar curvas horizontales en sus proximidades.
- En los casos de túneles de longitudes mayores a mil quinientos metros (1500 m) se recomienda diseñar adicionalmente una curva horizontal aproximadamente en la mitad de la longitud del túnel buscando disminuir el efecto de cansancio generado por la monotonía en la operación, tal como lo recomienda el Manual de Diseño Geométrico 2008.
- El diseño debe adaptarse a las condiciones de la localización del túnel y debe ser homogéneo con respecto al diseño geométrico de la carretera.

6.4.3 Diseño geométrico en perfil

El diseño geométrico en perfil de un túnel vial de carretera contemplará parámetros o factores que incidan en el nivel de servicio concebido para el proyecto, como el drenaje, la emisión de gases, las curvas verticales y la definición de las pendientes máximas admisibles.

El drenaje tiene que ser capaz de evacuar los caudales, tanto de las aguas de infiltración del terreno como de aquellas que ingresen al túnel por otros motivos, de tal manera que no se disminuya el nivel de servicio esperado. Además, debe conectarse a un sistema de tratamiento de las aguas y cumplir los parámetros establecidos por las entidades ambientales que rigen la materia.

Es necesario adoptar pendientes adecuadas y no incluir curvas verticales cóncavas en el interior del túnel. Es importante tener en cuenta que la emisión de gases contaminantes aumenta progresivamente con la inclinación de la pendiente, y que se hace excesiva a partir del 3%. Aunque las pendientes descendentes máximas no conllevan las consecuencias mencionadas, hay que tener en cuenta el “efecto chimenea” que ellas inducen y sus consecuencias en caso de incendio.

La Tabla 6-3 presenta las pendientes máximas en túneles (ascendentes o descendentes) en Colombia, determinadas a partir de la experiencia adquirida en el país en el diseño y construcción de obras de infraestructura. El uso de pendientes superiores a estos valores, debe estar soportado por un estudio de riesgos y seguridad. La pendiente longitudinal mínima para túneles de carreteras es del 0,5% (importante que la pendiente máxima del túnel no supere el valor establecido en el Manual de Diseño Geométrico).

TIPO DE PENDIENTE	Longitud del túnel (m)					
	<250	250-500	500-750	750-1.000	1.000-3.000	>3.000
Pendiente ascendente (%)	6		5	4	3	
Pendiente descendente (%)	6			5	4	3

Tabla 6-3. Pendientes máximas para túneles viales de carretera en Colombia

Salvo que las condiciones del proyecto lo impidan, el túnel se diseñará de tal manera que el drenaje se logre por gravedad. Las curvas verticales para el empalme con los portales deben cumplir con los radios mínimos de la Tabla 6-4.

Velocidad (km/h)	60	70	80	90	100
Radio de curvatura (m)	3000	4000	5000	6500	8000

Tabla 6-4. Radios mínimos verticales [100]

6.4.4 Secciones transversales de servicio

Las secciones trasversales que se describen a continuación, serán definidas durante la etapa del diseño geométrico a partir de las consideraciones geomecánicas y el diseño final para cualquier caso deberá respetar las dimensiones mínimas establecidas en esta sección (ver numeral 6.4.4.1).

Las secciones de servicio constituyen el área libre del túnel y deben prever las áreas mínimas requeridas para el correcto funcionamiento de los sistemas electromecánicos. En el caso de los túneles que requieran un sistema de ventilación el diseño de la sección transversal deberá ajustarse a las especificaciones de dicho sistema.

6.4.4.1 Secciones del cuerpo del túnel

Con base en la Ley 105, Artículo 13 (Especificaciones de la red nacional de carreteras), esta define como ancho de carril una dimensión igual a 3,65 m adicionalmente un sobre ancho de 0,1 m por carril, que para efectos de este documento se adopta como de obligatorio cumplimiento.

El gálibo (G) vehicular mínimo para los túneles, definido como la altura mínima garantizada durante la vida útil del túnel medida desde la superficie de rodadura incluyendo las repavimentaciones esperadas de diseño, la zona superior de servicio libre, soterrados o deprimidos de carretera, será el mismo que está definido en el Código Colombiano para el Diseño de Puentes, el cual en su versión CCP-2014 (o norma vigente) estipula 5,0 m.

El andén para los túneles se define así: el ancho 1,0 m para todos túneles en ambos costados, así mismo el alto máximo es de 0,1 m.

No se permite, durante la operación del túnel, la circulación de peatones, carretas o carretillas, ciclistas, bicimotos, motocicletas con motores de cilindrada inferior a 50 cc,

animales y vehículos de tracción animal, vehículos o sillas para discapacitados por su interior (ver 7.5.1); los andenes peatonales son solo para propósitos de evacuación en caso de emergencia.

En la **Tabla 6-5** y en la Ilustración 6-2 se presentan las dimensiones para cada uno de los parámetros mencionados y se muestra la sección transversal de servicio definida para los túneles carreteros.

Carril (m)	Sobre ancho (m)	Andén (m)	Gálibo (m)	Ancho total (m)
[C]	[S]	[A]	[G]	[A_{tot}]= 2C+2S
3,65	0,1	1,0	5,0	7,5

Tabla 6-5 Sección transversal de los túneles de carretera en Colombia

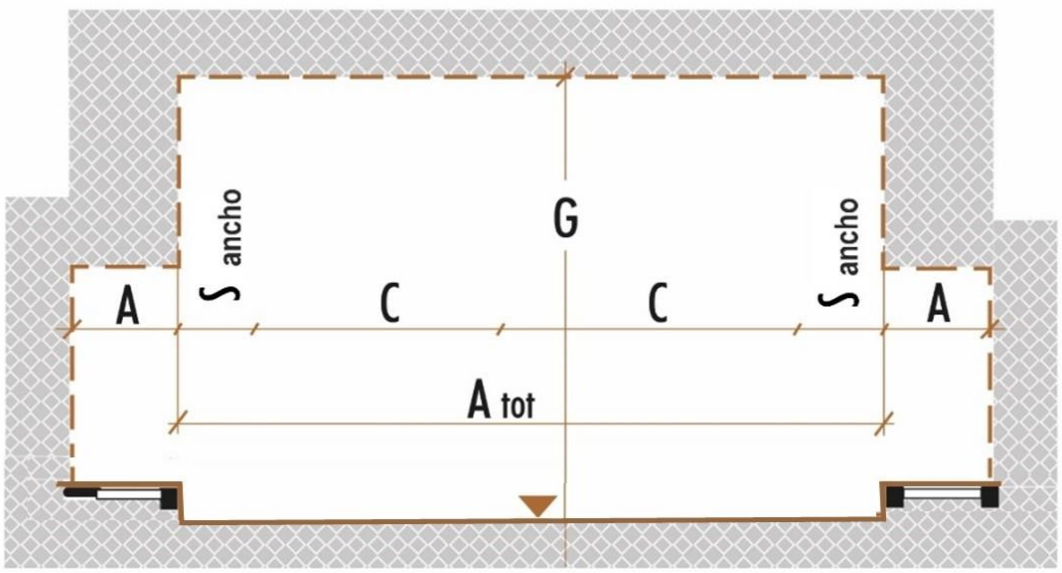


Ilustración 6-2. Sección transversal de servicio de túneles carreteros en Colombia

6.4.4.2 Bahías de parqueo (nichos)

La función de las bahías de parqueo, es permitir el estacionamiento temporal de vehículos de mantenimiento del túnel para su labor natural en esa área específica y/o vehículos que presenten averías dentro del mismo, sin que estos interrumpan la movilidad en un sentido vial de circulación y evitar que se invada carril contrario. Por seguridad, los vehículos averiados deben ser trasladados por el operador del túnel, preferiblemente hasta el exterior y no permanecer detenidos al interior, de hecho, no se deben efectuar reparaciones mecánicas dentro del túnel. La bahía de parqueo como tal, así como un vehículo parqueado, podrían generar condiciones de riesgo para todos los

usuarios, por lo tanto, la inclusión de los nichos debe ser definido primero dentro del análisis de riesgo respectivo.

A continuación, se presentan las distancias de referencia entre bahías de parqueo (para emergencia). Sin embargo, la adopción de distancias superiores o menores a las medidas de referencia aquí establecidas, debe estar soportada por un análisis de riesgos mediante una metodología avalada internacionalmente que incluya las condiciones particulares del túnel, el resultado debe ser aprobado por la interventoría o quien haga sus veces.

Sobre esto debe tenerse en cuenta lo siguiente:

- Los túneles con tráfico unidireccional podrían no requerir bahías de parqueo, debido a que allí se cuenta con un segundo carril para el sobrepaso vehicular con precaución (con la respectiva señalización de emergencia o Plan de Manejo de Tránsito PMT para el vehículo detenido y utilización de protección pasiva). Diseñar bahías de parqueo para túneles unidireccionales, dada su condición de riesgo, es una determinación que debe ser respaldada por un análisis de riesgos en el que, además, debe encontrarse un punto de equilibrio entre seguridad y costos (PIARC C3.3 cap. 4.8) [241].
- En túneles con tráfico bidireccional, las bahías se ubicarán intercaladamente con respecto al costado opuesto del túnel, en la Ilustración 6-3 se muestra el diseño para la localización de las bahías de parqueo, tomando como base las distancias de referencia de la Tabla 6-6 medidos en cada costado o sentido de circulación, su distribución dentro del túnel, en lo posible, debe buscar simetría desde los portales.

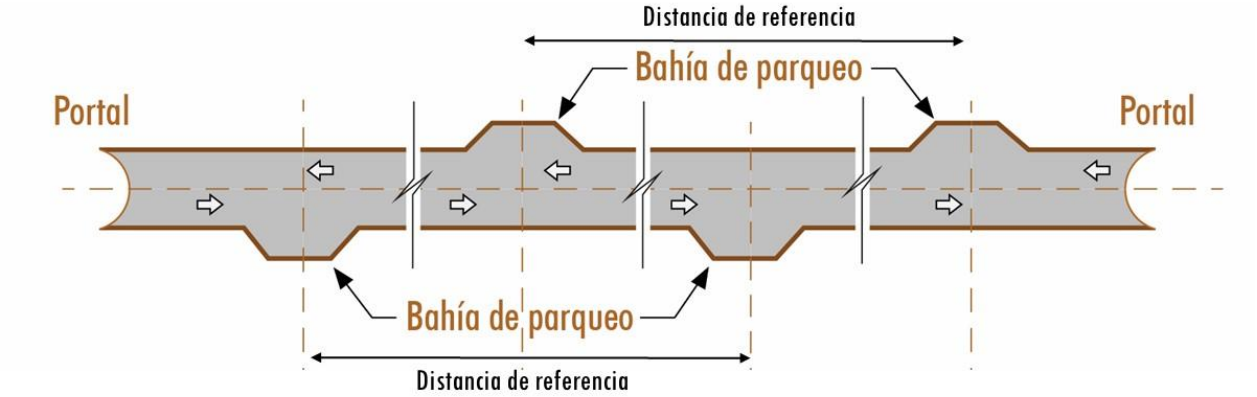


Ilustración 6-3. Localización de las bahías de parqueo en túneles bidireccionales con distancia de referencia CE54/2004 [240].

TÚNELES BIDIRECCIONALES CON LONGITUD			
≤ 1,5 km	> 1,5 km ≤ 3,0 km	> 3,0 km ≥ 4,5 km	> 4,5 km
No se requieren	Una bahía por sentido de circulación, sin que queden enfrentadas.	Dos bahías por sentido de circulación, alternadas en cada costado desde los portales sin que queden enfrentadas.	Bahías cada 1,5 km por sentido de circulación, alternadas en cada costado desde los portales sin que queden enfrentadas.

Tabla 6-6. Distancias de referencia para las Bahías de parqueo.

- En la Ilustración 6-4, se muestra la sección trasversal de servicio de las bahías de parqueo (para casos de emergencia).

La longitud mínima de las bahías de parqueo será de 40 m, sin contar el muro deflector de transición, cuya longitud es > 4 m en la entrada y > 8 m en la salida, como lo muestra la Ilustración 6-5.

Ahora bien, si se prevé que el túnel bidireccional funcione como unidireccional, debe preverse que ambos muros deflectores sean de 8,0 m.

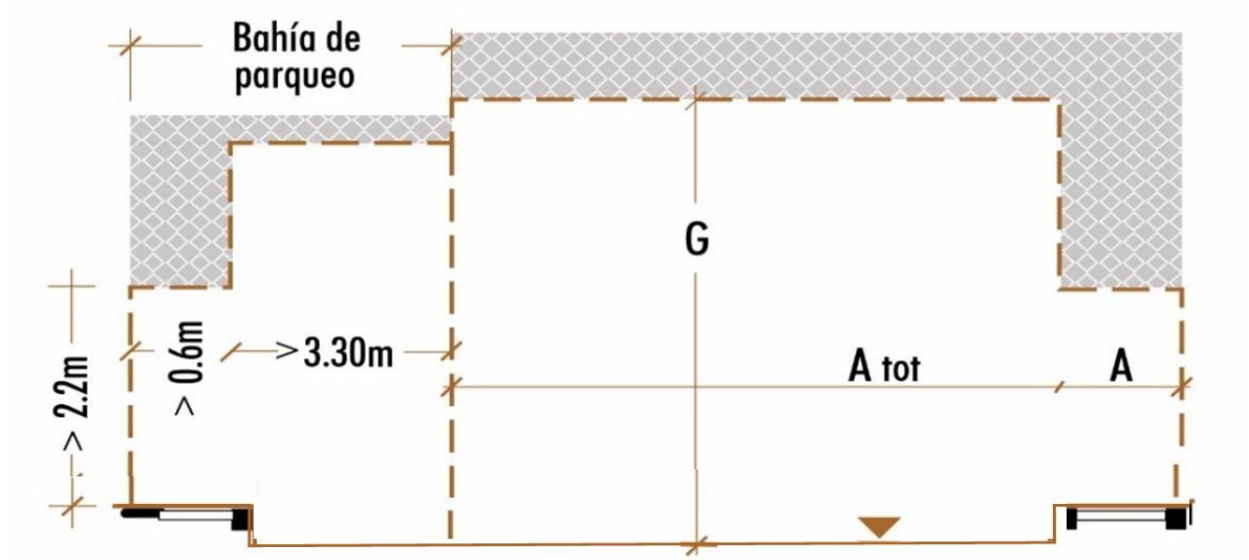


Ilustración 6-4. Sección transversal de servicio de las bahías de parqueo

El muro deflector o de transición, Ilustración 6-5 además de ser utilizado por los vehículos para facilitar la maniobra de ingreso o salida de la bahía (cuña de transición), en términos de seguridad ante una eventual colisión en este lugar, se diseña para que el ángulo que se forma a manera de cuña, mitigue el impacto de un vehículo que pueda chocar en esta zona.

Las bahías de parqueo (para emergencia), para los túneles con una longitud menor o igual a 1,5 km, en Colombia no serán obligatorias (CE54/2004) [240]; salvo justificación del diseñador y aprobación de la interventoría, determinación que debe ser respaldada por un análisis de riesgos en el que, además, debe encontrarse un punto de equilibrio entre seguridad y costos (PIARC C3.3 cap. 4.8) [241]

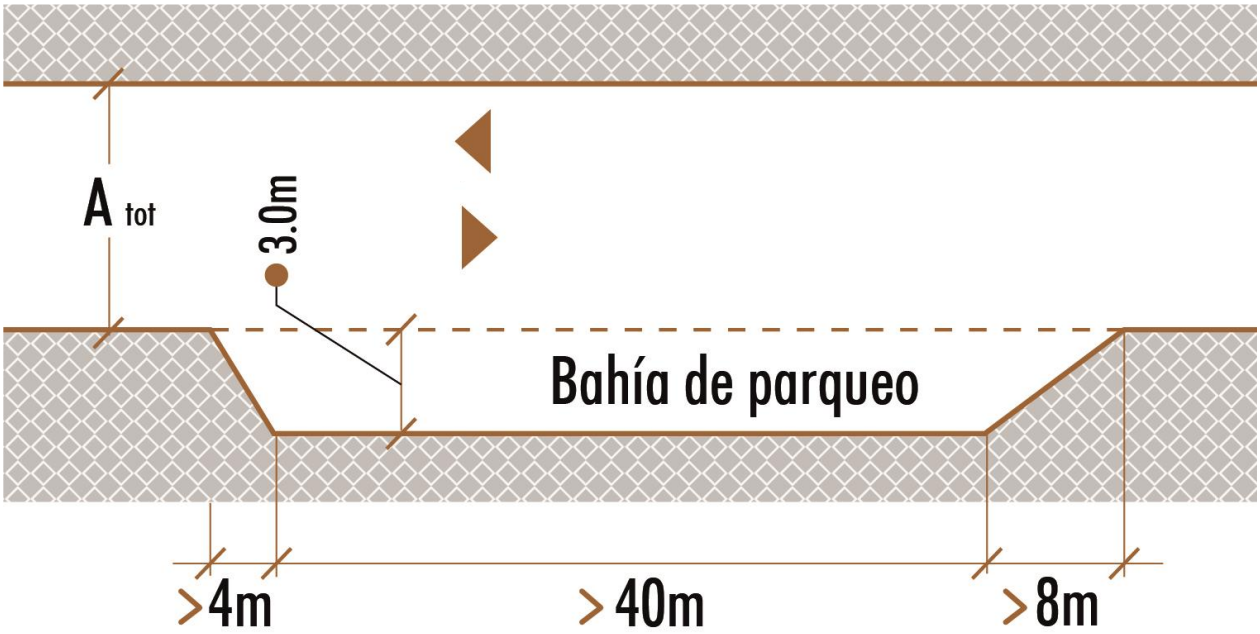


Ilustración 6-5. Bahía de parqueo túnel unidireccional (dimensiones en planta)

Las bahías de parqueo no deben quedar enfrentadas, su distribución dentro del túnel, en lo posible debe buscar simetría desde los portales, estar moduladas con las galerías de evacuación (6.4.4.3), guardar armonía con las Interdistancias de los postes SOS y puestos contra incendio (6.4.5), teniendo en cuenta para el diseño final, que las bahías de parqueo contengan poste SOS y puesto contra incendio.

6.4.4.3 Galerías de evacuación

A continuación, se presentan las distancias entre galerías de evacuación. La adopción de distancias superiores o inferiores, debe estar soportada por un análisis de riesgos mediante una metodología avalada internacionalmente que incluya las condiciones particulares del túnel, el resultado debe ser aprobado por interventoría o quien haga sus veces.

Estas galerías son utilizadas para la evacuación de los usuarios y prestación de servicios en casos de emergencia. Conectan el túnel principal, bien sea con un túnel paralelo o directamente con la superficie. Las galerías cumplirán las dos funciones, Galería Peatonal GP y Galería Vehicular Peatonal GVP. Sobre estas es preciso tener en cuenta lo siguiente:

- Los túneles de longitud superior a 1000 m, como condición general, contarán con galerías de evacuación a una distancia de referencia no mayor de 500 m.
- En los túneles con operación bidireccional, con base en un análisis de riesgo que así lo determine, se podrá definir una separación menor o mayor de 500 m, al contemplarse la operación mediante un sistema de ventilación longitudinal. No obstante, se recomienda que esta distancia no sea inferior a 300 m.
- La pendiente máxima permitida para las galerías de evacuación es de 10%. La Ilustración 6-6 presenta la sección transversal de servicio para GVP (Galería Vehicular Peatonal). Cuando en una galería se instale una subestación eléctrica se

deberá garantizar la sección transversal peatonal de la Ilustración 6-6. Igualmente, si el túnel tiene una operación unidireccional y se permite el transporte de sustancias o mercancías peligrosas, con base en el análisis de riesgos que así lo determine, la distancia entre galerías de evacuación deberá ser menor de 500 m.

- Se recomienda implementar puertas corta fuego, conforme NFPA 502.
- La distribución de las galerías de evacuación debe estar modulada con la distribución de las bahías de parqueo (cuando estas hayan sido diseñadas para el túnel) y guardar armonía con las Interdistancias de los postes SOS y puestos de control de incendio (6.4.5).

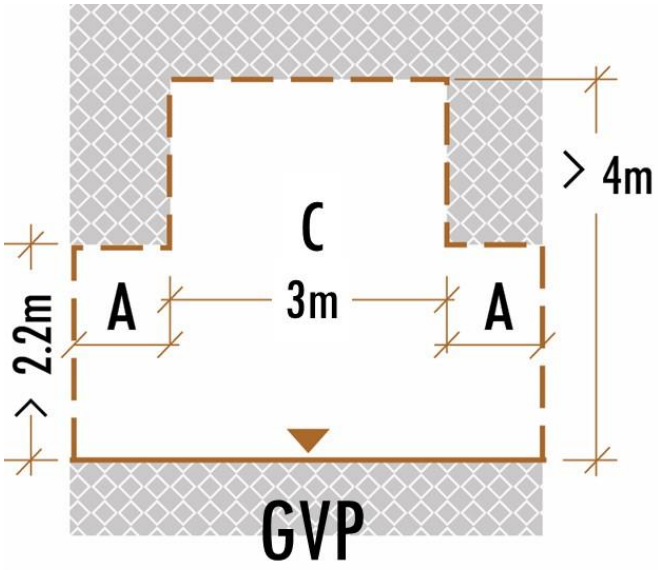


Ilustración 6-6. Sección transversal de servicio de las galerías de evacuación

Es importante tener en cuenta, desde la misma etapa de diseño de un túnel bidireccional, con base en el TPD, en la longitud del túnel, en la topografía donde va ser emplazado, en el hecho que el tráfico debe ser bidireccional, que el tráfico deba ser bidireccional y por eso se plantee ventilación semitransversal o transversal, y además de esto, que se requiera de galería de rescate paralela; en ese panorama, se debe hacer un análisis técnico-económico detallado, que incluya todos los aspectos de operación y mantenimiento del caso, para recomendar desde la etapa de diseño, la conveniencia de construir dos túneles unidireccionales, con el propósito de mejorar la seguridad vial durante la operación, optimizar costos al emplear ventilación longitudinal, mejorar eficiencia energética y optimizar recursos.

Se debe implementar, al interior de las galerías, la función de ventilación sanitaria de acuerdo con la configuración del sistema túnel-galería, es decir, puede existir salida al exterior o puede existir galerías de interconexión entre dos túneles, también puede existir túnel de escape paralelo al túnel principal configurándose en este caso vestíbulo presurizado y túnel de escape. Así mismo, se debe implementar sistema de

Iluminación, cámaras y cable radiante para comunicaciones por radio, de acuerdo con los criterios de ingeniería en cada caso.

6.4.5 Nichos

Es obligatorio tener en cuenta los nichos durante el diseño, estas estructuras necesitan un diseño particular, que cumpla con las dimensiones mínimas establecidas a continuación.

6.4.5.1 Nichos de emergencia SOS

Los sistemas de llamada en caso de emergencia son un equipamiento estándar de las carreteras, incluidos los túneles y los tramos de concentración de riesgo. Estos se deben construir con un nicho, junto con el equipamiento necesario para una comunicación de emergencia con el centro de control. Es preciso considerar lo siguiente respecto de los nichos:

- Las estaciones de emergencia (entendidas como SOS) se deben ubicar cada 150 m (medida de referencia) para túneles nuevos y no se debe exceder Inter distancias de 250 m para los túneles existentes (CE 54/2004 numeral 2.10). Cuando por aspectos técnicos no es posible la construcción del nicho de emergencia, se debe instalar la estación de emergencia o SOS con la debida señalización e Interdistancias establecidas, así mismo guardar una modulación con las distancias de las bahías de parqueo y galerías de evacuación (cuando apliquen en el diseño).
- Las dimensiones de referencia para los nichos de emergencia SOS se presentan en la Ilustración 6-7.
- En túneles con tráfico bidireccional, se ubicarán intercalados entre uno y otro costado del túnel, respetando una separación de referencia entre sí de 150 m para túneles nuevos e igualmente, no exceder 250 m para túneles existente en cada sentido.
- Cuando los nichos de emergencia coincidan con las bahías de parqueo (para emergencia), el nicho debe ubicarse de manera tal que se encuentre en el centro del campo visual del conductor, sin que estos sean ubicados al final de la bahía.
- Se debe suministrar al menos un sistema de llamada de emergencia SOS en cada galería de emergencia del túnel.

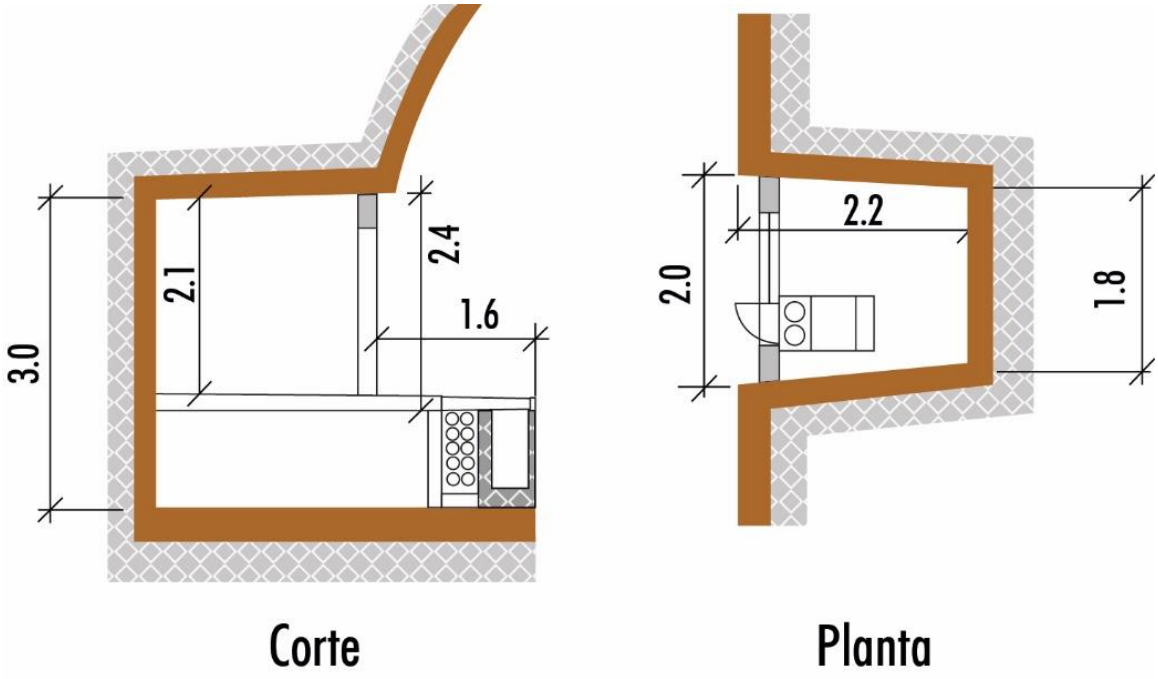


Ilustración 6-7. Dimensiones de referencia del nicho de emergencia

6.4.5.2 Teléfonos de emergencia, SOS

El sistema estará constituido por teléfonos de tipo SOS o postes SOS, y una consola principal ubicada en el centro de control para permitir una comunicación bidireccional con el operador. Los teléfonos tipo SOS deberán establecer una comunicación *full* dúplex y un modo de operación de tipo manos libres.

La consola principal deberá identificar el poste SOS que genera la llamada, además de contar con las capacidades de llamada en espera, supervisión del estado de los teléfonos, registro de hora y finalización de la llamada, identificación del operador que recibe la llamada, estado de la red y grabación de las conversaciones.

Los postes SOS se situarán a máximo 150 m de distancia entre sí en el interior del túnel, en los nichos habilitados para su instalación; y se ubicarán en las entradas y salidas del mismo, modulados con las bahías de parqueo y galerías (cuando aplique su diseño).

Los teléfonos SOS son instalados a un costado o sentido de circulación en túneles unidireccionales y en los dos costados (intercaladamente) si este es bidireccional; asimismo ubicados en andenes y en nichos. Deben cumplir con las siguientes características:

- Marcados por señales informativas “Teléfono de emergencia” con letras SOS.
- Con dispositivos a prueba de ruido.
- Equipados con sistemas de bocinas robustos para realizar llamadas de emergencias (con al menos dos botones: SOS y reporte de incendio).

- Dos extintores de fuego (remover los extintores de incendio activa un contacto monitoreado que enciende una alarma de incendio).
- Cada armario debe ser monitoreado con un contacto de puerta abierta que debe encender una alarma.
- Se debe instalar el mismo equipamiento en la entrada y salida del túnel.

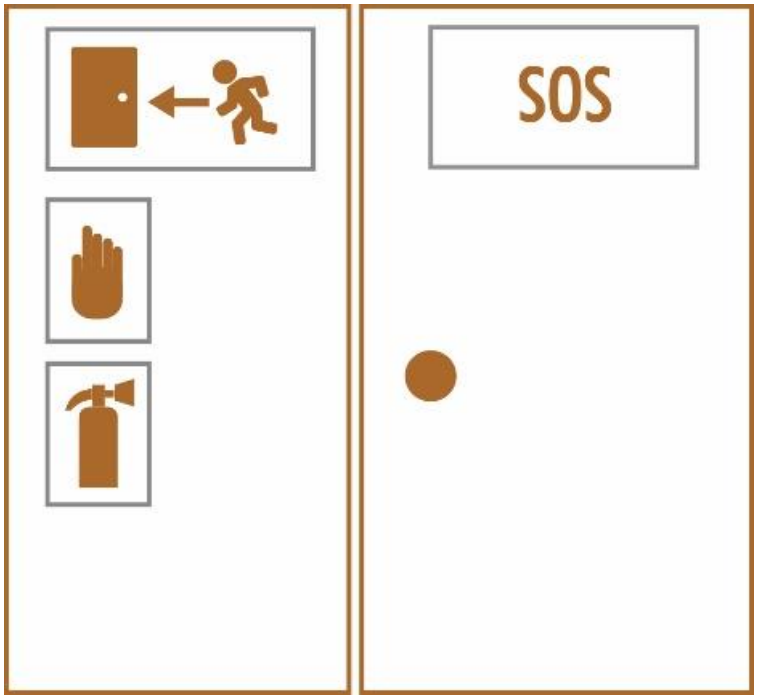


Ilustración 6-8. Ejemplos de armarios

6.4.5.3 Nichos y gabinetes de control de incendio

Las dimensiones de referencia para los nichos de control de incendio se presentan en la Ilustración 6-9 e Ilustración 6-10. Es necesario establecer lo siguiente:

- El nicho de control de incendio (Ilustración 6-9), podrá instalarse máximo cada 150 m (medida de referencia) en los túneles con longitudes superiores a 500 m (CE 54/2004), acompañados de los postes SOS y modulados con las bahías de parqueo y galerías (cuando aplique su diseño). Cualquier túnel con una longitud superior a 150 m debe contar, además, con hidrantes en las zonas de portales.
- El conjunto de gabinete + conexión de manguera no debe exceder 85 m de espaciamiento entre sí (NFPA 502), así mismo, el gabinete debe ser de un material resistente al nivel de corrosividad del ambiente que se verá expuesto y debe estar embebido en el hastial o instalado en un nicho.
- En todos los casos, el distanciamiento entre hidrantes y separación entre conexiones de manguera, obedecerá a un análisis de riesgos en el que se deberá tener en cuenta la norma NFPA 502.
- La decisión sobre la ubicación de los postes SOS (numeral 6.4.5.1) y las conexiones de manguera (6.4.5.3), coincidan o no, se debe tomar en función del hidrante o conexión de manguera y no en función del poste SOS, sin embargo,

los equipos SOS e iluminación, deben estar bajo el cumplimiento de la norma NFPA 502, equipos de emergencia para exteriores.

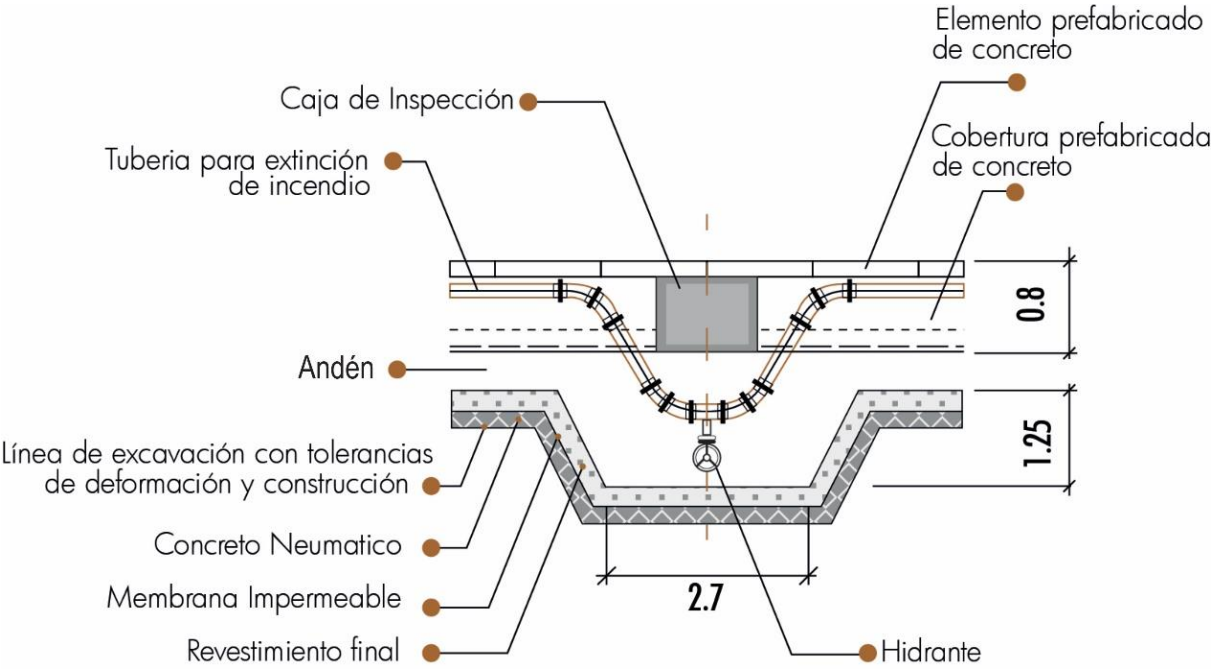


Ilustración 6-9. Dimensiones típicas de nicho de control de incendio (planta)

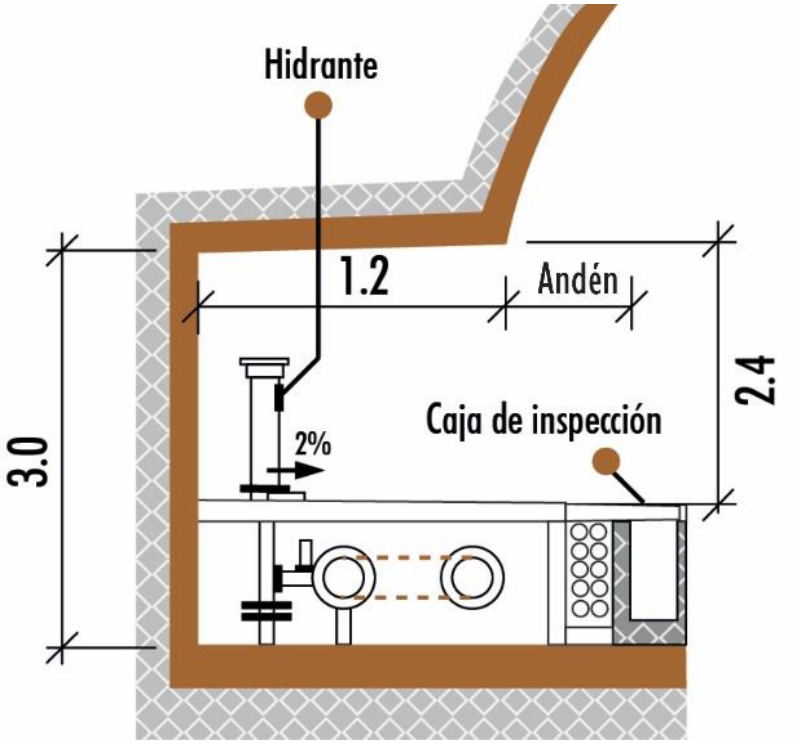


Ilustración 6-10. Dimensiones de referencia para el nicho de control de incendio (perfil)

6.4.5.4 Nichos de equipos eléctricos

Los nichos eléctricos hacen parte del sistema eléctrico del túnel y albergan las subestaciones eléctricas para el suministro de potencia del túnel. Se precisa recordar lo siguiente:

- Los túneles con longitudes menores o iguales a 500 m no deben contener nichos eléctricos. Las subestaciones se dispondrán en el área de portales, por fuera de dichos túneles.
- Es imperativo impedir la entrada de personas no autorizadas a los nichos eléctricos, por lo que todos sus accesos tienen que disponer de puertas.
- Deben contener una bahía de parqueo exclusiva para los vehículos de mantenimiento.
- En los túneles unidireccionales que no cuentan con galerías de escape, se recomienda la ubicación de los nichos eléctricos en el carril derecho o denominado carril lento.
- En túneles que están conectados entre sí (túneles paralelos), la ubicación de los nichos eléctricos se tomará en función del costado donde se encuentren las galerías que los unen, preferiblemente diseñados al interior de una galería en un nicho adecuado para tal fin.

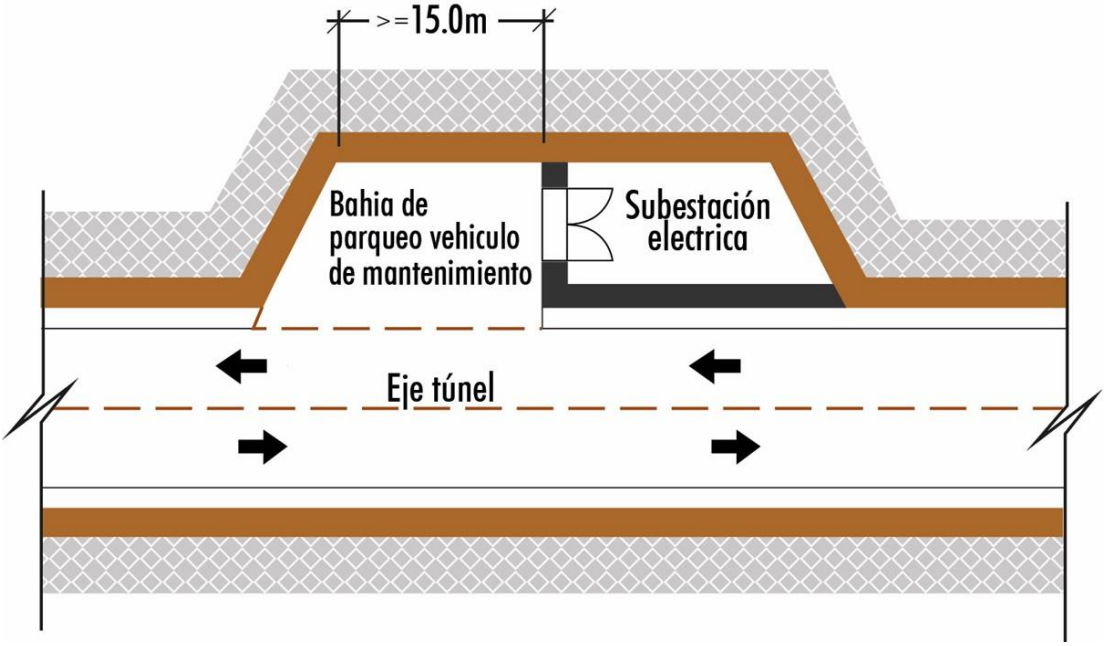


Ilustración 6-11. Configuración típica del nicho eléctrico

6.5 Diseño geomecánico

6.5.1 Generalidades

Este capítulo presenta un procedimiento específico y consistente para el diseño de túneles en Colombia basado en la referencia [101], modificado para ajustarse a las prácticas de diseño y los productos finales que se esperan de la etapa de diseño en el país. El procedimiento difiere de los esquemas de clasificación utilizados como base para la asignación de soporte y secuencias de excavación. Dichos esquemas acarrean problemas en el diseño y la construcción por haber sido desarrollados con base en experiencias bajo condiciones específicas del terreno y esfuerzos [102 - 104]. La consecución de un diseño, y la posterior construcción de manera económica, transparente y segura, solo es posible integrando los factores que representan: condiciones del terreno, requerimientos ambientales, condiciones de esfuerzos, etc., específicos de cada proyecto.

El diseño geomecánico de un túnel vial de carretera debe tener un objetivo fundamental: cumplir los requerimientos específicos del proyecto. Estos requerimientos hacen referencia al comportamiento del túnel durante la excavación y la operación.

Las fases de diseño tienen una relación directa y dependiente con las actividades de investigación y exploración, durante la cual se define el modelo del terreno y se determinan las propiedades relevantes de los diferentes tipos de terrenos incluidos dentro de este modelo. El nivel de detalle, tanto del modelo como de las propiedades, depende de la fase en la que se encuentre el proyecto. El procedimiento inicia con la determinación de los parámetros de entrada, basados en las propiedades relevantes de cada terreno y los factores que influencian la excavación, contenidos dentro del modelo del terreno. Luego, se continúa con la determinación del sistema apropiado, para dar cumplimiento a los requerimientos específicos del proyecto. Finalmente, se elabora el documento de reporte geotécnico del diseño, en el cual se reúnen todos los aspectos relevantes del mismo (capítulo 5).

La Ilustración 6-12 resume, en un diagrama de flujo, el procedimiento a seguir para el diseño geomecánico de túneles excavados de forma convencional.

6.5.2 Procedimiento para el diseño

El pilar fundamental del diseño es el modelo del terreno; antes de comenzar el diseño como tal, dicho modelo deberá contener los diferentes tipos de terreno y todas aquellas condiciones que afectan el comportamiento de la excavación (*p.e.* agua subterránea, estructuras geológicas importantes, condiciones de esfuerzos, estructuras civiles en el área de afectación del túnel, etc.).

La consecución del modelo del terreno apropiado para cada fase del proyecto, se describe con detalle en el capítulo 5 de este manual.

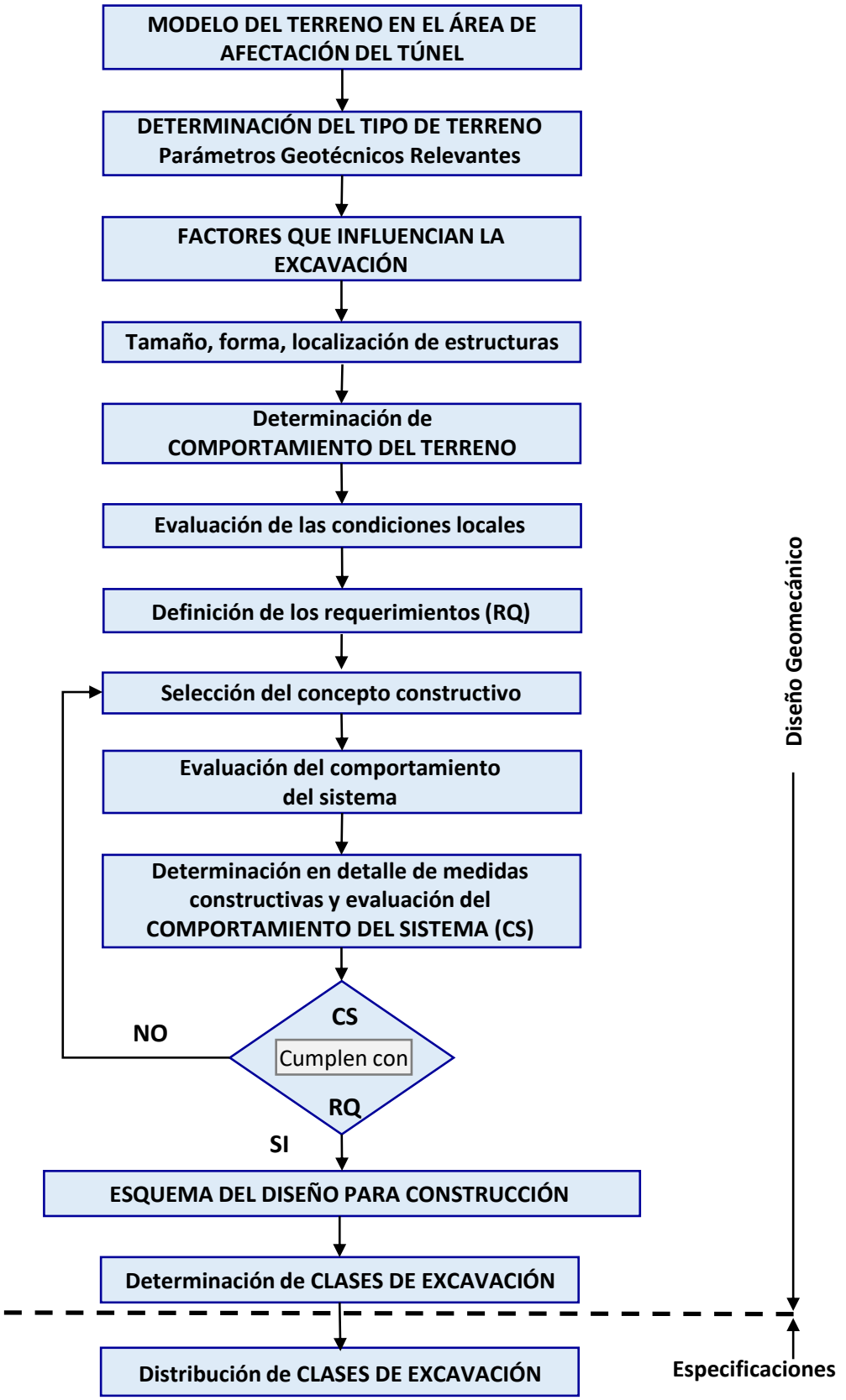


Ilustración 6-12. Diagrama de flujo para el diseño geomecánico de túneles [105]

Foto 6-2. Cruce Cordillera Central, Túnel de la Línea.

6.5.2.1 Propiedades del tipo de terreno (parámetros geotécnicos relevantes)

El diseñador está llamado a ser parte activa dentro de la consecución del modelo del terreno y, con base en los tipos de terreno encontrados, enfocar la investigación en las propiedades que dictan su comportamiento (parámetros geotécnicos relevantes) [73 - 74]. En la metodología de diseño presentada, esta persona incluirá el procedimiento para la determinación de los parámetros para el diseño geomecánico, así como el procedimiento para la obtención de las propiedades del terreno (*p.e.* en rocas se presenta la determinación de parámetros del macizo a partir de las propiedades de la roca intacta). La metodología tiene que presentar el procedimiento estadístico y/o probabilístico empleado para determinar las propiedades del terreno, en cada una de las fases.

6.5.2.2 Factores que influencian la excavación

Se establecen los factores que influyen de manera directa el comportamiento de la excavación, como la condición de esfuerzos dada por la morfología y las condiciones tectónicas (esfuerzos *ín-situ*), y por cualquier estructura adyacente que tenga algún impacto en la redistribución de esfuerzos (cimentaciones, edificaciones, muros, etc.). Adicionalmente, es preciso considerar la presencia de agua subterránea y la orientación relativa de las estructuras geológicas (discontinuidades, fallas, etc.) con respecto a la orientación del túnel.

6.5.2.3 Determinación del comportamiento del terreno

Los dos factores mencionados antes (características del material y factores que influencian la excavación), combinados con la geometría específica del túnel (*p.e.* área de excavación, forma y localización), establecen el comportamiento del terreno. Es importante resaltar que para la determinación de este comportamiento no se tienen en cuenta inicialmente secuencias de excavación ni medidas de soporte. Este comportamiento está relacionado con posibles modos de falla que, posteriormente, tienen que ser controlados mediante un adecuado diseño del sistema de soporte (elementos de soporte y secuencia de excavación).

Posterior a la determinación del comportamiento del terreno, el diseñador debe realizar la primera sectorización del túnel con base en comportamientos similares del terreno, con la información disponible en la fase del proyecto. La sectorización adoptada requiere ser documentada dentro de la metodología y criterios de diseño. Es importante resaltar que esta sectorización solo se refiere a los tipos de comportamiento; los sistemas de soporte a implementar en el túnel se determinan con posterioridad (numeral 6.5.2.6), teniendo en cuenta los requerimientos específicos a cumplir.

La sectorización presentada por el diseñador servirá para definir, de manera general, la variabilidad de los tipos de terreno a lo largo del alineamiento del túnel y el comportamiento o modo de falla esperado en los mismos. Esto será la base que permitirá formular el soporte y las secuencias de excavación, para los cuales, de manera preliminar, se pueden usar clasificaciones a partir de un sistema basado en los valores de los índices Q, RMR u otros similares. Sin embargo, la ITA [106] recomendó que la clasificación definitiva de soportes y las secuencias de excavación deban hacerse a partir de un sistema de clasificación desarrollado para las condiciones propias del proyecto, que permita tener en cuenta los diferentes escenarios de amenazas para las condiciones específicas del terreno del proyecto y no a partir de sistemas basados en valores de los índices Q, RMR, o similares, con los cuales no se pueden evaluar directamente estos escenarios.

Para la determinación del comportamiento del terreno se recomiendan los siguientes métodos de análisis:

- Análisis cinemático y/o análisis de proyecciones estereográficas: para la determinación de sobre excavaciones, caídas de cuñas y demás tipos de falla controlados por discontinuidades [107] [108].
- Grado de utilización del terreno: comparación entre la resistencia del terreno y las condiciones de esfuerzos a las que está siendo sometido [111-113].
- Mecanismo de falla: posibles mecanismos de falla tienen que describirse por lo menos de manera cualitativa (*p.e.* falla por cortante, falla por disgregación o desconfinamiento) ver Tabla 6-7.
- Métodos analíticos y numéricos: la selección del método analítico o numérico a utilizar debe hacerse con base en el mecanismo de falla esperado (*p.e.* una falla controlada por discontinuidades debe ser simulada por modelos numéricos que incluyan las discontinuidades, modelos numéricos discretos).
- Modelos a escala.

6.5.2.4 Evaluación de las condiciones locales

Las condiciones locales —que son particulares para cada proyecto— están constituidas por cualquiera de los elementos no relacionados con las características geotécnicas que influencian los procesos y métodos constructivos: esto es, las condiciones y prácticas constructivas de cada región y/o contratista que influencian la construcción del túnel; por ejemplo, condiciones climáticas particulares de una región que pueden dificultar el desarrollo de la resistencia de algunos materiales de construcción.

Otro caso, por ejemplo, es la experiencia de los contratistas: la falta de experiencia en el mejoramiento del terreno mediante congelamiento haría necesario tener en cuenta este aspecto. Las condiciones locales referidas al contratista son relevantes para proyectos en los cuales se conoce el contratista antes de desarrollar el diseño, situación en la que se involucran las prácticas constructivas en el mismo. Si no se conoce el contratista, como pasa en la mayoría de los casos, se asumirán condiciones promedio.

6.5.2.5 Definición de los requerimientos del proyecto (RQ)

Los requerimientos del proyecto pueden ser generales, es decir, aquellos que todo proyecto debe cumplir (*p.e.* evitar el sobreesfuerzo en los materiales de soporte, garantizar la estabilidad de la excavación, garantizar la seguridad del personal), o particulares (*p.e.* limitaciones de asentamientos, protección de acuíferos —no se permite la caída del nivel freático o piezométrico, restricciones con respecto a ruido, vibraciones). Generalmente, los límites de los requerimientos están contenidos dentro de códigos y regulaciones nacionales; pueden salir como exigencias para el licenciamiento ambiental o pueden ser asumidos y documentados dentro de la metodología de diseño.

6.5.2.6 Evaluación del comportamiento del sistema

Posterior a la evaluación del comportamiento del terreno y a la determinación de los requerimientos a cumplir, es necesario evaluar el comportamiento del sistema, definido por la excavación de la sección teniendo en cuenta las secuencias de excavación e implementación del soporte. El comportamiento del sistema tiene que ser evaluado para situaciones características. La evaluación debe incluir:

- Tipo de terreno
- Factores que influyen en la excavación
- Métodos de mejoramiento del terreno
- Sistemas de drenaje de agua subterránea
- Método de excavación
- Secuencia de excavación y soporte (delimitación de longitudes de avance)

6.5.2.7 Determinación detallada de medidas constructivas y del comportamiento del sistema

Se comparan el comportamiento del sistema (interacción entre terreno, soporte, medidas adicionales y secuencias de excavación) y los requerimientos previamente establecidos. Además de aquellos que influencian la excavación (numeral 6.5.2.2), los siguientes factores deben ser tenidos en cuenta durante este paso:

- Tiempo y posición de instalación del soporte, para de esta manera tener en cuenta las propiedades tiempo-dependientes de los materiales de construcción
- Propiedades tiempo-dependientes del terreno (si aplica)

Los métodos de análisis recomendados incluyen:

- Soluciones analíticas
- Métodos numéricos
- Experiencia de estructuras similares bajo condiciones comparables

El método seleccionado debe permitir la comparación del comportamiento y los requerimientos en cuanto a:

- La estabilidad de la excavación durante cada etapa del ciclo
- Cumplimiento de los requisitos ambientales (asentamientos superficiales, vibraciones, emisiones, alteración del agua subterránea, etc.).
- Los desplazamientos calculados dentro de los límites admisibles (desplazamientos admisibles, compatibilidad con los elementos de soporte, etc.).

Es preciso documentar cualquier análisis de forma apropiada y tener un formato que permita ser auditado.

Es usual que los factores que influyen la excavación, y las propiedades del terreno, no estén disponibles como un valor determinístico, sino como un intervalo o una distribución probabilística. Esta situación debe ser incluida en el diseño mediante la implementación de un estudio paramétrico (estadística paramétrica).

El diseño de los sistemas de soporte es un proceso cíclico, en cualquiera de las fases, en el cual se busca cumplir con todos los requerimientos establecidos, y con la obtención de un proceso constructivo económico y seguro. Como producto es necesario describir los diferentes comportamientos esperados del sistema, relacionados con unas condiciones características (*p.e.* condiciones del terreno, área de excavación, secuencia de excavación, sistema de soporte). La descripción, que deberá poder verificarse durante la etapa de construcción, incluye de forma típica lo siguiente:

- Características de los desplazamientos incluyendo: comportamiento “normal” del vector de desplazamiento (Magnitud y orientación) [114-116], desarrollo de desplazamientos con diagramas tiempo/distancia al frente de excavación para todas las etapas de excavación (sección superior, banca, solera, nichos, etc.).
- Solo es posible determinar la orientación de desplazamientos si se cuenta con un monitoreo de desplazamientos absoluto (3D); no es posible hacerlo por medio de medidas de convergencias (numeral 6.8.4.1).
- Soporte requerido en el frente de excavación.

- Límites de subsidencia para el caso de túneles con bajas coberturas.
- Comportamiento del soporte (grado de utilización del concreto neumático, deformación de pernos y elementos dúctiles, etc.).

Finalmente, este paso del diseño incluye el documento “Anteproyecto de diseño para construcción”, donde se describe el procedimiento para el diseño, se incluyen los parámetros relevantes usados, los criterios aplicados para la selección del soporte, métodos de excavación, etc. En el numeral 6.5.4.1 se profundiza en los alcances del anteproyecto.

6.5.2.8 Determinación y distribución de sistemas de soporte

En esta etapa del diseño, los sistemas de soporte están compuestos por los elementos de soporte y por las secuencias de excavación que cumplen con los requerimientos establecidos. Los diferentes sistemas se distribuyen a lo largo del alineamiento del túnel, en sectores que tienen exigencias similares en cuanto a excavación y soporte. Al final de esta etapa, es posible el cálculo de las cantidades de obra. Esta sectorización, a diferencia de la presentada en el numeral 6.5.2.3, incluye los requerimientos específicos del proyecto y los respectivos sistemas de soporte.

La distribución de sistemas de soporte está obligada a considerar tanto las condiciones geológicas-geotécnicas como la heterogeneidad del terreno. La distribución se realiza con la situación más probable de la variación, tanto de los parámetros del terreno como de los factores que influencian la excavación. En terrenos altamente heterogéneos, con múltiples cambios de sistemas de soporte, es usual homogenizar la distribución; si esto ocurre, se deben precisar las razones y consideraciones que conllevan la homogenización.

Considerando que los sistemas de soporte cumplen con los requerimientos específicos para cada sector, es usual que un mismo comportamiento del terreno conlleve diferentes medidas de soporte y/o secuencias de excavación.

6.5.3 Nomenclatura propuesta para los sistemas de soporte

La nomenclatura propuesta está compuesta por 3 elementos: a) La sigla “ST” en referencia al Soporte Tipo; b), número entero que representa el comportamiento del terreno; y c), número entero que representa el comportamiento del sistema. La Ilustración 6-13 muestra los 3 componentes.

Los tipos de comportamiento básicos del terreno (modos de falla) se presentan en la Tabla 6-7 [101].

El número que representa el comportamiento del sistema comienza con el valor:

$N._{\text{COMP. SISTEMA}} = 1$

Y, aumenta en intervalos definidos por:

$N._{\text{COMP. SISTEMA}} + 1$

Con el aumento de las medidas de soporte, para un comportamiento del terreno determinado.

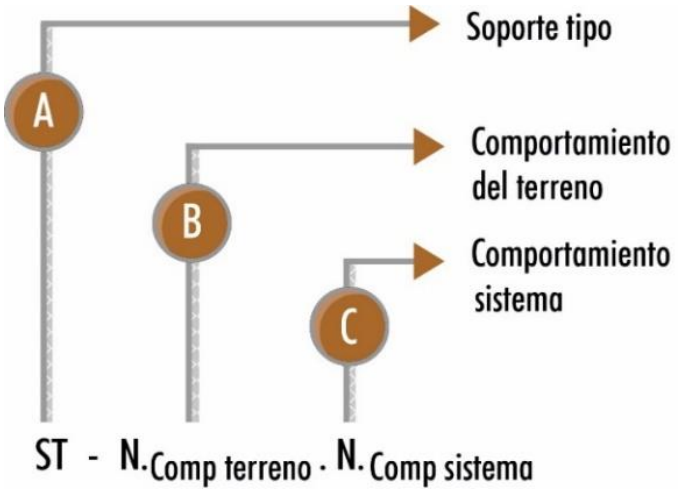


Ilustración 6-13. Nomenclatura propuesta para los sistemas de soporte

Ejemplo:

Para el ejemplo se tiene un túnel con baja cobertura, cuyo mecanismo de falla potencial a lo largo de todo el túnel está caracterizado por "falla por disgregación o desconfinamiento". El túnel atraviesa una longitud determinada donde no se permiten asentamientos ni abatimiento del nivel freático (requerimientos específicos). En este ejemplo, dentro del túnel se tienen, por lo menos, dos sistemas de soporte:

ST-8.1 y **ST-8.2**.

Para **ST-8.1**, se tiene la siguiente descripción:

ST = sigla de sistema de **S**oporte **T**ipo.

8 = representa el comportamiento del terreno (modo de falla); en este caso, falla por disgregación o desconfinamiento.

1 = representa el sistema de soporte que cumple con los requerimientos del área donde no hay restricciones de asentamientos y abatimiento del nivel freático.

Para **ST-8.2**, se tiene la siguiente descripción:

ST = sigla de **S**istema de **S**oporte **T**ipo

8 = representa el comportamiento del terreno (modo de falla) como falla por disgregación o desconfinamiento.

2 = representa el sistema de soporte que cumple con las restricciones de asentamientos y abatimiento del nivel freático (requerimientos específicos).

El sistema de soporte **ST-8.2** contiene elementos adicionales en comparación con el **ST-8.1,** debido a los requerimientos específicos en cuanto a asentamientos y abatimiento del nivel freático o descenso del nivel piezométrico.

Es posible que las condiciones específicas de un proyecto requieran tipos adicionales de comportamiento, no incluidos en la Tabla 6-7. Para esos casos, se incluirá una categoría adicional en conjunto con la descripción detallada del comportamiento.

Categorías básicas de tipos de comportamiento		Descripción del mecanismo potencial de falla (comportamiento del terreno)
1	Estable	Terreno estable con potenciales desprendimientos localizados, inducidos por gravedad.
2	Caída de bloques controlada por discontinuidades	Caída y deslizamiento de bloques inducidos por gravedad y controlados por discontinuidades. Incluye fallas localizadas en las discontinuidades por esfuerzo cortante.
3	Falla poco profunda inducida por esfuerzos	Falla poco profunda inducida por esfuerzos en combinación con fallas controladas por gravedad y por discontinuidades.
4	Falla profunda inducida por esfuerzos	Falla inducida por esfuerzos involucrando grandes volúmenes y grandes deformaciones.
5	Rotura frágil de la roca	Falla súbita y violenta del macizo causada por altos esfuerzos en rocas frágiles y la liberación súbita de energía acumulada.
6	Inestabilidad estructural	Pandeo o flexión de macizos enmarcados por discontinuidades con poca separación, asociado frecuentemente a fallas por esfuerzo cortante.
7	Falla en la clave	Desprendimientos de grandes volúmenes con falla progresiva inducida por cortante.
8	Falla por disgregación o des-confinamiento	Flujo con o sin presencia de agua de rocas, intensamente fracturado, o suelo con baja cohesión.
9	Flujo de material	Flujo de rocas intensamente fracturadas o suelos con alto contenido de agua.
10	Terrenos con materiales expansivos	Incremento del volumen del terreno, tiempo-dependiente, causado por una reacción fisicoquímica de la roca y el agua en combinación con relajación de esfuerzos que conllevan convergencias en el perímetro del túnel.
11	Terrenos con variaciones extremas en nivel de esfuerzos y deformaciones	Combinación de múltiples comportamientos, con variaciones extremas de deformaciones y esfuerzos en amplios sectores, causado por la heterogeneidad del terreno (p.*e.* en fallas geológicas heterogéneas, *BIMrocks* —bloque en matriz—, *mélanges* tectónicos).

Tabla 6-7. Categorías básicas de tipos de comportamiento del terreno [101]

6.5.4 Reporte geotécnico del diseño

Este reporte incluye la totalidad de las consideraciones realizadas durante el diseño y los métodos disponibles para la excavación y soporte, al igual que los límites y criterios para variaciones posibles o modificaciones durante la construcción. Tiene que incluir lo siguiente:

- Requerimientos del diseño en cuanto a excavación y soporte, con criterios para el monitoreo durante la construcción.

- Plan de monitoreo incluyendo aspectos técnicos y organizacionales que permitan una comparación continua entre las condiciones reales y las previstas.
- Planes de mitigación para afrontar desviaciones del comportamiento del sistema.
- El reporte geotécnico debe contener como mínimo:
- Resumen de la investigación geológica y geotécnica, incluyendo la interpretación de resultados.
- Descripción de los tipos de terreno y los parámetros relevantes asociados. Definición de las características del terreno (parámetros relevantes).
- Descripción de los tipos de comportamiento y factores asociados que influencian la excavación. Análisis realizados y modelos geotécnicos usados para determinar el comportamiento.
- Definición clara de los criterios para la asignación de la secuencia de excavación y del sistema de soporte a implementar.
- Descripción del comportamiento del sistema en todas las etapas de construcción.
- Planos y memorias de diseño para construcción (numeral 6.5.4.1).
- Plan de seguridad geotécnica para construcción (numeral 6.8).

6.5.4.1 Planos y memorias de diseño para construcción

Este anteproyecto se presenta dentro de un capítulo individual o como un documento adicional. En éste se incluyen los criterios aplicados para la selección del soporte y los métodos de excavación. Debe contener:

- Modelo del terreno, con la distribución de tipos de terreno en el perfil longitudinal.
- Procedimientos y métodos para la recolección de datos, evaluación e interpretación. Procedimiento a seguir en caso de que se excedan los valores límite.
- Distribución de sistemas de soporte a lo largo del trazado del túnel.
- Sistemas de soporte (longitud de avance, secuencia de excavación, sobre excavación permitida líneas de tolerancias, distancia de cierre de la sección solera, propiedades de los elementos de soporte, cantidad de soporte).
- Definición, en términos de factores físicos (p.e. desplazamientos, asentamientos), del comportamiento del sistema esperado y los factores asociados (p.e. cobertura, orientación relativa de discontinuidades, presencia de agua). A manera de referencia, se presentan la Tabla 6-16 y la Tabla 6-14.
- Resultados esperados del monitoreo geotécnico y desviaciones aceptables (valores máximos/mínimos, niveles de utilización de los materiales, niveles de implementación de medidas de mitigación, etc.). Se profundizará sobre los métodos de monitoreo en el numeral 6.8.4.
- Medidas de mitigación para aplicar en caso de desviaciones fuera de los límites definidos.
- Descripción del procedimiento para determinar las condiciones adelante del frente de excavación.
- Definición de responsabilidades y procedimientos para reportar eventualidades.

6.6 Diseño sísmico

6.6.1 Consideraciones generales

Los túneles están confinados dentro del terreno; por esta razón suelen comportarse mejor durante un sismo que las estructuras en la superficie, ya que no vibran de forma diferente al terreno ni experimentan amplificación debido a efectos inerciales [113] [115]. No obstante, están sujetos a demandas sísmicas que deben ser evaluadas, pues su desempeño puede ser vital, ya que los mayores efectos de los sismos sobre los túneles están asociados a desplazamientos grandes por fallas, deslizamientos y licuación. En general, se debe aplicar el análisis de la respuesta sísmica del túnel cuando se cumpla uno de los siguientes casos [115 -116]:

- El túnel está ubicado adyacente a un suelo licuable.
- El túnel está en una zona de falla activa.
- El túnel está en un área urbana densamente poblada.
- En las zonas de portales y zonas con coberturas menores a dos diámetros de la excavación.
- Las aceleraciones máximas en la superficie del terreno sean mayores a 0,20 g (la aceleración del sismo excepcional establecido a partir del Modelo de Amenaza sísmica de Colombia [237], para un periodo de retorno de 2475 años de las referencias [115 – 116 - 117]).
- En reforzamientos de túneles existentes.

6.6.2 Consideraciones para el análisis

El procedimiento de análisis y diseño sísmico para el cuerpo de los túneles debe estar basado en deformaciones, y enfocado en los niveles de desempeño aceptables en la estructura. Para el análisis y diseño de portales se acepta un diseño basado en fuerzas inerciales, tal como se presenta en el numeral 6.12.2.

Se recomienda verificar el desempeño del túnel (para el sismo excepcional) y operación inmediata (para sismos frecuentes). En el primer nivel de desempeño se debe verificar con el movimiento sísmico excepcional, de un período de retorno de 2.475 años, lo cual es equivalente a un movimiento sísmico con un 3% de probabilidad de ser excedido en 75 años. Por otro lado, para que el túnel se pueda poner a funcionar rápidamente después de un sismo con un daño mínimo (operación inmediata), se recomienda verificar su desempeño con el movimiento sísmico frecuente, de un período de retorno de 108 años, lo cual es equivalente a un movimiento sísmico con un 50% de probabilidad de ser excedido en 75 años

En ambas condiciones de diseño (sismos excepcional y frecuente), los objetivos de desempeño (*v. gr.* agrietamiento, descascaramiento, deformaciones grandes,

prevención del colapso, etc. para los distintos niveles de amenaza sísmica) deben ser establecidos por el diseñador, con base en el estado del conocimiento, la reglamentación sísmica pertinente o aplicable a túneles, paneles de expertos, etc. Este listado de los objetivos de desempeño del túnel tiene que especificarse a niveles estructural y de componentes no estructurales. Adicionalmente, se requiere proporcionar un resumen de los criterios de aceptación de desempeño, de modo tal que esto sirva para demostrar si se cumplen o no los objetivos de desempeño a niveles del sismo frecuente (o sismo de servicio) y sismo excepcional (o sismo máximo considerado).

La amenaza sísmica para el diseño en el sitio del túnel se tomará del Modelo Nacional de Amenaza Sísmica para Colombia del Servicio Geológico Colombiano [237], complementado con los estudios de respuesta sísmica local que sean necesarios. El procedimiento de evaluación de la respuesta sísmica del túnel se tomará cómo guía el Capítulo 13 de la referencia [113] [115].

6.7 Diseño del esquema de perforación y voladura

El manejo de los explosivos reviste una importancia tal, que la misma Constitución Nacional, desde su artículo 223 lo prevé como un tema primordial cuando dice que:

> …"*Sólo el Gobierno puede introducir y fabricar armas, municiones de guerra y explosivos. Nadie podrá poseerlos ni portarlos sin permiso de la autoridad competente*."

En adelante, la delegación está en manos del Ministerio de Defensa, quien, a través de la Industria Militar INDUMIL, es la encargada de fabricar, importar y comercializar las sustancias explosivas, nadie más sin su aprobación, orientación y supervisión.

En Colombia, la autorización para la adquisición y el control sobre los explosivos, está en manos del Comando General de las Fuerzas Militares, quien a través del Departamento Control Comercio de Armas, Municiones y Explosivos DCCAE y sus Seccionales en todo el País - SCCAE, concede los cupos o permisos, supervisa que se dé correcto uso de este material, con el apoyo decidido de las Unidades Militares según la jurisdicción donde se encuentre ubicado el material, son ellos los encargados de escoltar y asegurar el área, mientras que la seguridad física in situ es del usuario. Los trámites ante el DCCAE, INDUMIL y ante las Unidades Militares de cada Jurisdicción, así como el transporte, almacenamiento y manipulación, solo puede ser llevado a cabo por personas que hayan sido "capacitadas en el manejo de explosivos comerciales", así mismo cuenten con el "Certificado de idoneidad para el manejo de explosivos" vigente, expedido por la Unidad de Ingenieros Militares delegada por el Comando de Ingenieros del Ejército, es decir que de ellos las autoridades en todos los niveles en este sentido, tienen registro y control.

Los trámites ante el Departamento Control Comercio de Armas, Municiones y Explosivos - DCCAE, la Industria Militar – INDUMIL, ante las Brigadas del Ejército y los Batallones de Ingenieros Militares de cada Jurisdicción, así como el transporte, almacenamiento y manipulación, solo pueden ser llevados a cabo por personas que hayan sido "capacitadas en el manejo de explosivos comerciales", así mismo cuenten con el "Certificado de idoneidad para el manejo de explosivos" vigente, expedido por la Unidad de Ingenieros Militares delegada por el Comando de Ingenieros del Ejército,

debido que de ellos se tiene registro y control, por parte de las entidades y autoridades dentro del proceso de solicitud y compra de materiales explosivos.

Para acceder a los explosivos, primero se debe contar con un planeamiento, el cual se deriva del diseño del ESQUEMA DE PERFORACIÓN y del ESQUEMA DE VOLADURA, toda vez que de allí se desprenden las cantidades de explosivos a utilizar y los accesorios de voladura, todo esto según el sistema de iniciación, tipo de cebado de cargas y técnica de voladura (especial o de contorno).

Foto 6-3. Cruce cordillera central, labores de perforación y voladura Túnel de la Línea

6.7.1 Esquema de perforación

Como sistema convencional de excavación de túneles, tenemos el sistema de perforación y voladura, lo cual de hecho supone dos labores, una es la perforación, la cual tiene variables que pueden determinar el buen o mal resultado de la voladura, conforme se diseñe y se ejecute; la otra labor es la voladura, que tiene la ventaja de contar con la estabilidad del explosivo, conocer sus propiedades permite prever s eficiencia al momento de interactuar con la roca, es decir que, el explosivo, por sí solo, tiene alta probabilidad de éxito si se selecciona y planea correctamente [223].

Esto indica que el éxito en la voladura de roca bajo tierra o voladuras subterráneas, depende en gran medida, de un buen diseño de perforación en los barrenos del cuele,

contra cuele, destroza, contorno y piso; donde también se deben tener en cuenta los parámetros de la voladura (diámetro, burden, espaciamiento, longitud, columna explosiva, taco, secuencia y encendido) previo a un análisis y estudio detallado del macizo rocoso; de no hacerlo, se corre el riesgo que el explosivo no distribuya correctamente su energía y la voladura no ofrezca los resultados deseados de fragmentación.

Ahora bien, hay que tener claridad en el resultado que se desea con el esquema de perforación, tanto en el contorno del túnel, como en el cuidado de la estabilidad del terreno, control de vibraciones y otros, lo que indica la implementación de las diferentes técnicas de voladura de contorno, según sea el caso, donde se debe tener claro, que existen diferencias entre los resultados esperados en una voladura en un túnel vial, con una voladura bajo tierra para minería, pues allí la topografía, alineamiento con el eje de avance, contorno y demás características, son extremadamente determinantes en un túnel vial, toda vez que, un exceso en el corte, por fuera del diseño de la sección, no solo generará una pérdida de energía del explosivo (consumo exceso de explosivo), sino que también dará lugar un mayor consumo de materiales de recubrimiento para lograr el perfil deseado.

El esquema de perforación asegura la distribución del explosivo en el macizo rocoso buscando los efectos deseados; entre los factores a tener en cuenta al diseñar el esquema de perforación están la perforabilidad y la volabilidad de las rocas, el tipo y accesorios de explosivos, los efectos de la vibración y las exigencias de exactitud del frente a volar; esto quiere decir también que cada obra y cada diseño tendrá sus características particulares y los modelos de esquema deberán ser utilizados como guías para adaptarlos a las particularidades de cada caso.

6.7.1.1 Selección de equipos

Las labores de perforación, son las tareas que más demandan tiempo en la preparación de una voladura, es decir, que la ruta crítica de un proyecto de perforación y voladura, está en estas labores, lo que indica que la selección correcta de los diámetros de perforación, de los equipos de perforación y de la continua disponibilidad de los diferentes accesorios, permite al proyecto, acometer más frentes de trabajo, más ciclos de avance en menor tiempo y mayor eficiencia al momento de entregar los barrenos a los frentes de cargue y voladura.

6.7.1.2 Selección de diámetros

El diámetro de las varillas y sus accesorios, determinan el diámetro del barreno, que, a su vez, dan origen al burden, al espaciamiento y al tamaño de la roca fragmentada, pero no es en este orden en que se debe seleccionar el diámetro de perforación, es precisamente desde el tamaño deseado de la roca resultante de la voladura, desde donde se diseña la voladura, para finalmente seleccionar el diámetro más indicado de los barrenos, tanto de destroza, como del cuele.

Actualmente los diámetros de los barrenos con explosivo más utilizados en túneles viales se encuentran en el rango de 38 mm a 64 mm, siendo los más normales los que se encuentran entre 41 y 51 mm. En cuanto a los barrenos de alivio o vacíos y que hacen parte del cuele se recomiendan diámetros de 76 a 127 mm; no sin desconocer que el diseño de los barrenos de alivio debe ajustarse al área equivalente de los

barrenos de destroza actuantes; sin embargo, es potestad del diseñador de la operación de perforación y voladura de acuerdo con el varillaje y diámetro del explosivo disponible en el mercado.

Sin embargo, el principal elemento asociado al uso de explosivos en túneles, están relacionadas a la generación de áreas en las cuales es posible desarrollar el proceso de voladuras. Para tal elemento es posible realizar un estándar de división general, el cual permita nombrar las particularidades de las zonas en las cuales se desarrolla la voladura y parametrizarlas, las zonas asociadas al perfil o zonas de una sección típica de túnel se nombran genéricamente como se muestra a continuación, Ilustración 6-14:

- Barrenos de cuele: conjunto de perforaciones destinados a crear una cavidad inicial en el frente que tienen como principal objetivo servir de cara libre para la voladura.
- Barrenos de producción: conjunto de barrenos destinados a realizar el fracturamiento de la roca en las zonas hacia la cara libre generada por el cuele.
- Barrenos de pared o hastiales: cada uno de los barrenos de las superficies o planos rocosos que limitan el perfil en la sección vertical o sección de túnel con el borde de las rocas a fin de obtener una sección determinada.
- Barrenos de techo: cada uno de los barrenos de las superficies o planos rocosos que limitan la sección en la parte superior o sección de túnel con el borde de las rocas a fin de obtener una sección determinada.

Barrenos de piso: cada uno de los barrenos de las superficies o planos rocosos que limitan la sección en la parte inferior o sección de túnel con el borde de las rocas a fin de obtener una sección determinada.

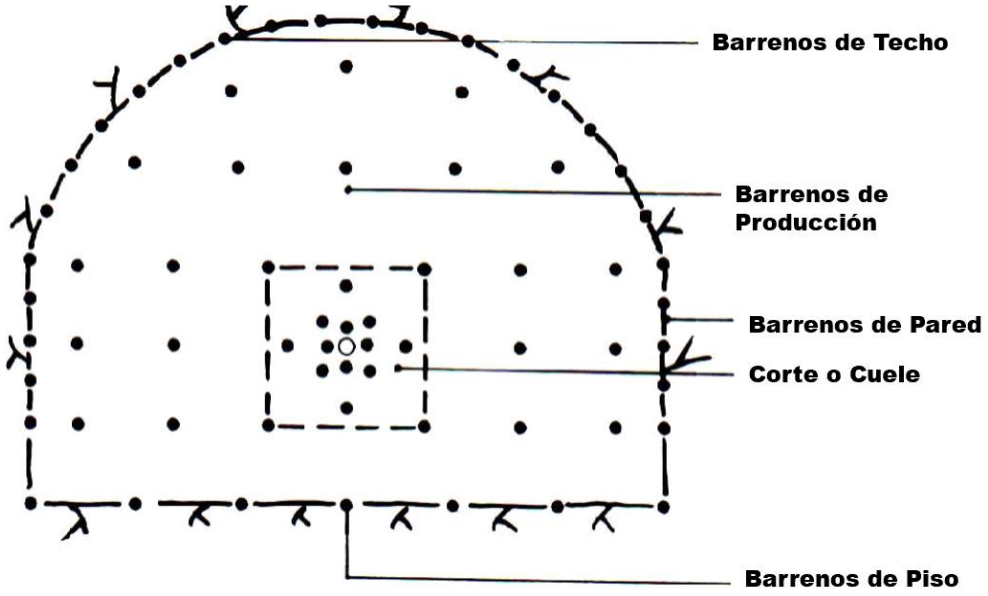


Ilustración 6-14. Configuración del Diseño general de perforación y voladura en un túnel.

La voladura de roca bajo tierra difiere de la voladura a cielo abierto, en que tiene una única orientación para la proyección de la roca fragmentada, cuenta con una sola cara libre debido a que la roca está mayormente confinada, razón por la cual, se hace necesario la creación de una segunda cara libre, hacia la cual la roca fragmentada puede encontrar espacio para proyectar su salida de manera secuencial, conforme el esquema y tiempos de retardo establecidos en el diseño [223].

La segunda cara libre es creada entonces mediante un corte en barrenos paralelos; para crear esta cara libre también llamada cuele. Para las características y adecuación del cuele se debe tener información acerca de las condiciones del macizo rocoso (RMR), en el cual las situaciones más favorables determinan la mejor zona donde se debe posicionar esta cara libre, como se observa en la Ilustración 6-15.

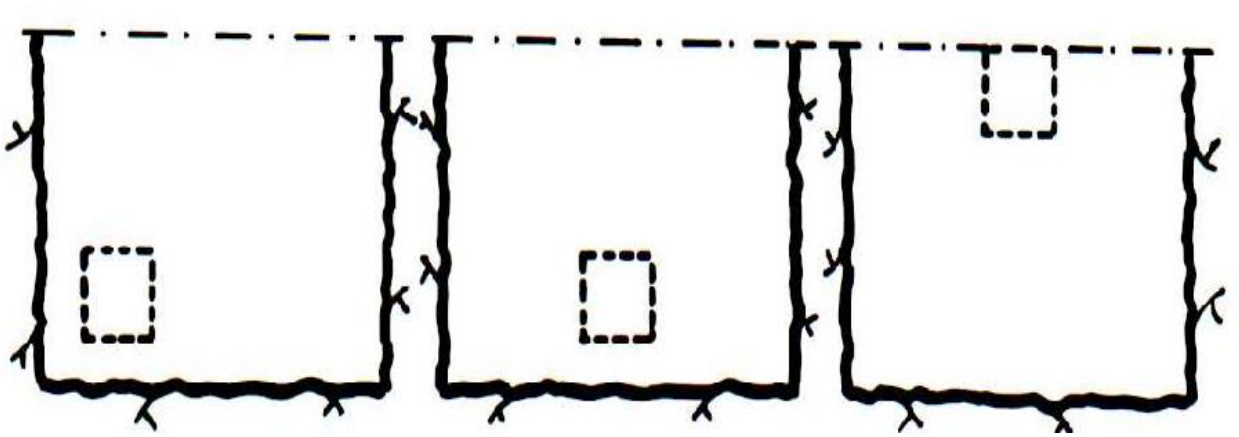


Ilustración 6-15. Posibles posiciones de los barrenos del cuele

Para tal efecto, la estructura de cálculo y distribución de las barrenaciones permite generar una relación entre la cara libre generada por el barreno escariado que puede variar entre los 76,2 mm y los 127 mm, el cual determina la base de cálculo para la distribución geométrica del cuele.

Así mismo, las condiciones del macizo rocoso determinan la elección para la geometría restante, ya que el volumen de material volado depende netamente de los coeficientes de esponjamiento y la características propias de cada clasificación geomecánica, siendo como principal cualidad el hecho que una roca clasificada como dura en los diferentes criterios de clasificación geomecánica, permite una sección de barreno equivalente mayor, permitiendo una apertura mayor en las condiciones de geometría de cuele. Como complemento una clasificación de roca menos dura determinará una sección de barreno equivalente menor y una sección de cuele por defecto en su geometría, menor (ver Foto 6-4).

Foto 6-4. Sistema convencional de excavación – perforación y voladura de roca

Para efectos genéricos de cálculos se tienen las siguientes convenciones:

Para el cálculo del cuele en el caso de utilizar más de 1 barreno de alivio, se hace necesario el cálculo de un diámetro equivalente:

D = d * (n)^0.5
D: diámetro equivalente
d: diámetro de barrenos de alivio
n: número de barrenos

Para el cálculo de burden del primer cuadro, se considera este diámetro calculado.

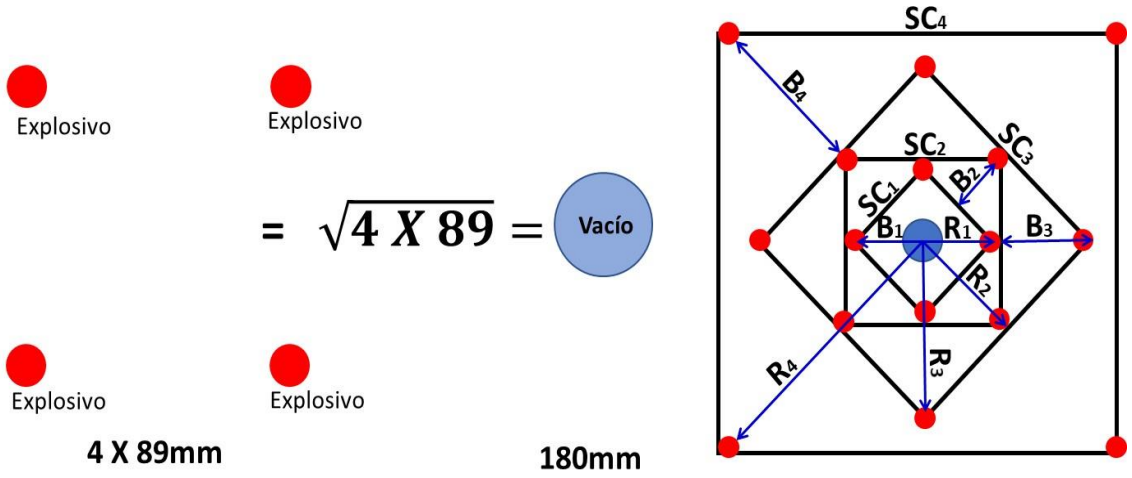


Ilustración 6-16. Esquema y distribución de cuele y contra cuele (ver Tabla 6-8)

Las medidas del burden (B), del radio (R), del espaciamiento (SC) y del taco (T), como variables del esquema de la voladura del cuele (Ilustración 6-22), permiten ser calculadas mediante la Tabla 6-8.

N°	BURDEN	RADIO	ESPACIAMIENTO	TACO
1	$B_1 = 1.5 \times D_h$	$R_1 = 1.5 \times D_h$	$SC_1 = 1.5 \times D_h$	$T_1 = 1.5 \times D_h$
2	$B_2 = 2.12 \times D_h$	$R_2 = 2.12 \times D_h$	$SC_2 = 2.12 \times D_h$	$T_2 = 2.12 \times D_h$
3	$B_3 = 4.50 \times D_h$	$R_3 = 4.50 \times D_h$	$SC_3 = 4.50 \times D_h$	$T_3 = 4.50 \times D_h$
4	$B_4 = 9.54 \times D_h$	$R_4 = 9.54 \times D_h$	$SC_4 = 9.54 \times D_h$	$T_4 = 9.54 \times D_h$

Tabla 6-8. Valores para cálculo de cuele y contra cuele (ver Ilustración 6-16)

Para el cálculo de los barrenos de producción en túneles viales, recomienda Calvin J. Konya utilizar el siguiente esquema de perforación y voladura, como lo muestra la Ilustración 6-17.

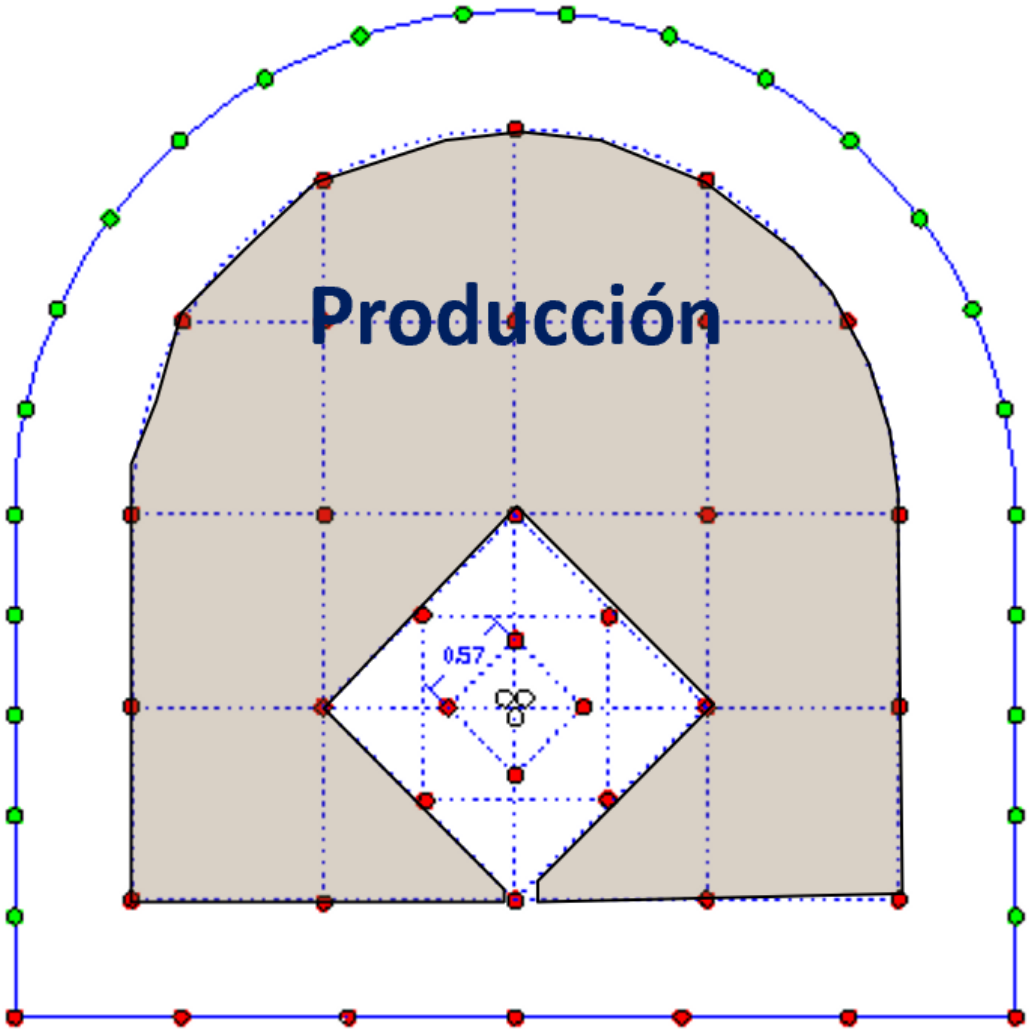


Ilustración 6-17. Esquema de diseño de una voladura con cuele central

Los retaques también serán función de la resistencia a la compresión de la roca y de la posición del barreno en la secuencia de encendido [224]:

Para barrenos de producción, T = 0.5B

Parra barrenos de piso, el retaque será, T = 0.2B

Para barrenos de contorno, el retaque será, T = B

El burden y el espaciamiento se relacionan de igual forma bajo los parámetros principales de velocidad de detonación y desacoplamiento de las cargas, pretendiendo afectar de menor manera, por condiciones de macizo rocoso y caracterización geomecánica. Así entonces, se tiene:

$$P = 1{,}69 \times 10^{-3} \times \delta \times V_d^{\,2} \left(R/_r \times \sqrt{C} \right)^{2.4} \qquad E = 2\,r \times \frac{(P + T)}{T}$$

E: Espaciamiento entre barrenos (pulg)
δ: Densidad del explosivo (g/cc)
r: Radio del barreno de perforación (pulg)
Vd: Velocidad de detonación del explosivo (pies/s)
P: Presión en el barreno (PSI)
R: Radio de la carga explosiva (in)
T: Resistencia a la tracción dinámica de la roca (PSI)
C: Porcentaje total de la columna explosiva

Es de tener en cuenta que las condiciones normales en el diseño de las voladuras deberán tener presente los parámetros geomecánicos y la construcción del respectivo diseño que está asociado a la condición inicial, lo cual debe ser evaluando constantemente con parámetros tales como liberación de energía, fragmentación y sobre excavación, entre otros.

6.7.2 Esquema de voladura

Una voladura es el resultado de la interacción mecánica entre la potencia de un explosivo y la resistencia a la carga dinámica de la roca, lo que obliga a conocer tanto las características del explosivo (particularmente su Poder de Detonación, PD) y la resistencia a la tracción dinámica de la roca [225].

Otro parámetro que debiera tenerse en cuenta es su tenacidad o área bajo la curva esfuerzo-deformación de la roca en condiciones estáticas teniendo el cuidado de llevar estos valores a condiciones dinámicas. Por tal motivo, primero se debe conocer la roca, para así seleccionar el explosivo a emplear.

Otro aspecto que se debe tener presente es el comportamiento del macizo rocoso a la luz de alguna de las clasificaciones geomecánicas de uso frecuente tal como el RMR en nuestro medio, pues ella tiene en cuenta otros parámetros inherentes al macizo tales

como su estado de diaclasamiento y demás parámetros asociados como materiales de relleno y presencia de agua [225].

El conocimiento del macizo rocoso permite decidir directamente en la selección de los parámetros de la voladura, a su vez, influye directamente en el número de barrenos que tendrá el esquema de voladura, en la velocidad de avance del túnel y en la estabilidad del macizo rocoso, todo esto en un contexto económico, afecta el proyecto, en la medida en que se tomen las decisiones correctas.

La siguiente expresión[3], permite, tomando en cuenta parámetros de la roca, del macizo rocoso y del explosivo, además de la sección del túnel y su profundidad, los parámetros más importantes para el diseño de una voladura subterránea.

$$B = \frac{K_A * K_{SRF} * K_{RMRb} * D}{1000} \sqrt{\frac{PD}{R_{tdm}}}$$

Donde:
B: Burden, m
D: Diámetro, mm
K_{SRF}: Factor dependiente del SRF
K_{RMRb}: Factor dependiente del RMRb
K_A: Factor dependiente de la sección del túnel
PD: Poder de Detonación del explosivo, MPa
R_{tdm}: Resistencia a la tracción dinámica del macizo rocoso, MPa

En la Tabla 6-9, se ilustran los valores del coeficiente para K_A como una constante por el área de perforación de la sección trasversal del túnel.

Descripción	Sección del túnel, m2	Coeficientes de A
Túneles de muy pequeña sección	< 20	0,6
Túneles de pequeña sección	20 - 40	0,7
Túneles de mediana sección	40 - 60	0,8
Túneles de gran sección	60 - 80	0,9
Túneles de muy grande sección	> 80	1

Tabla 6-9. Valores del coeficiente por el área de perforación de la sección

En la Tabla 6-10 se ilustran los valores correspondientes a K_{SRF} como constante que tiene relación con la profundidad del túnel con respecto a la cota más alta o también llamada cobertura.

[3] Expresión propuesta por Álvaro Correa Arroyave et al. como resultado de una investigación en curso, (Correa Arroyave Álvaro, Jorge Rueda Fonseca y Fabián Rodríguez Beltrán. "Expresión propuesta para el diseño de voladuras en túneles de carretera, caso colombiano", artículo en revisión para publicación en la revista Bistua editada por la Facultad de Ciencias Básicas de la Universidad de Pamplona)

Descripción	SRF	Prof., m	Coeficientes de Ksrf
Cerca de la superficie	----	0 - 300	1
Profundidad baja: niveles de esfuerzos bajos	2,5	300 - 600	0,95
Profundidad media: niveles de esfuerzos medios	1	600 - 900	0,9
Gran profundidad niveles de esfuerzo altos	0,5	> 900	0,85

Tabla 6-10. Valores de la profundidad del túnel o cobertura

En la Tabla 6-11, se ilustran los valores correspondientes a K_{RMRb} como constante a emplear, dependiendo del RMR base.

Descripción	RMRb		Coeficientes de KRMRb
Macizo rocoso muy bueno	80 - 100	I	1
Macizo rocoso bueno	60 - 80	II	1,1
Macizo rocoso regular	40 - 60	III	1,2
Macizo rocoso malo	20 - 40	IV	NA
Macizo rocoso muy malo	0 - 20	V	NA

Tabla 6-11. Valores correspondientes al RMR base

Una vez determinado el burden, los espaciamientos podrán determinarse de la siguiente forma dependiendo de la resistencia a la compresión de la roca y de la secuencia del retardo, pudiendo variar entre 1,2 (para rocas más resistentes y retardos más largos) y 1,5 (para rocas de menor resistencia y retardos más cortos).

En la Tabla 6-12, se ilustran los valores correspondientes a los coeficientes para espaciamiento y retaque, es decir, el valor que utiliza para multiplicar con el burden, para hallar el espaciamiento y el retaque.

RMRb	I	II	III	IV	V
β (Constante de espaciamiento)	1,1	1,15	1,2	-	-
ζ (Constante de retaque)	0,4	0,6	0,8	-	-

Tabla 6-12. Valores correspondientes a espaciamiento y retaque

En la Tabla 6-13, se ilustran los valores donde se recomiendan las longitudes de perforación en función del RMR (evaluación de la masa rocosa).

RMR	I	II	III	IV	V
Longitud de barreno, m	4,0 -5,0	3,0 - 4,0	2,0 - 3,0	-	-

Tabla 6-13. Valores de longitudes de perforación en función del RMR

A continuación, se presentan tres diseños de voladura para túneles en macizos rocosos de diferentes RMR, con empleo de explosivo Indugel Plus AP, RC 70, en una sección de un túnel vial de 88,4 m^2 y un diámetro de perforación de 45 mm, se puede ver en las Ilustraciones 6-24, 6-25 y 6-26; se deduce del ejercicio, la influencia del RMR sobre el número de barrenos, lo que conduce a voladuras más eficientes.

La primera corresponde a la voladura de un túnel vial, en roca RMR I, con 125 barrenos de precorte en una sección de 4 m. 5 m.; en la Ilustración 6-25, se observa un esquema de voladura para túnel vial, en roca RMR II, con 105 barrenos de precorte en una sección de 3 m. a 4 m. y en la Ilustración 6-26, se observa un esquema de voladura para túnel vial, en roca RMR III, con 91 barrenos de precorte en una sección de 2 m. a 3 m.

En cuanto a los diseños de voladura para túneles en macizo rocoso, se relacionan tres esquemas en el presente manual, el primero con empleo de explosivo Idugel Plus AP, RC 70, en una sección de 88,4 m^2 y un diámetro de perforación de 45 mm, se puede ver en la Ilustración 6-18, donde se observa un esquema de voladura para túnel vial, en roca RMR I, con 125 barrenos de precorte en una sección de 4 m. a 5 m.; en la Ilustración 6-19, se observa un esquema de voladura para túnel vial, en roca RMR II, con 105 barrenos de precorte en una sección de 3 m. a 4 m. y en la Ilustración 6-20, se observa un esquema de voladura para túnel vial, en roca RMR III, con 91 barrenos de precorte en una sección de 2 m. a 3 m.

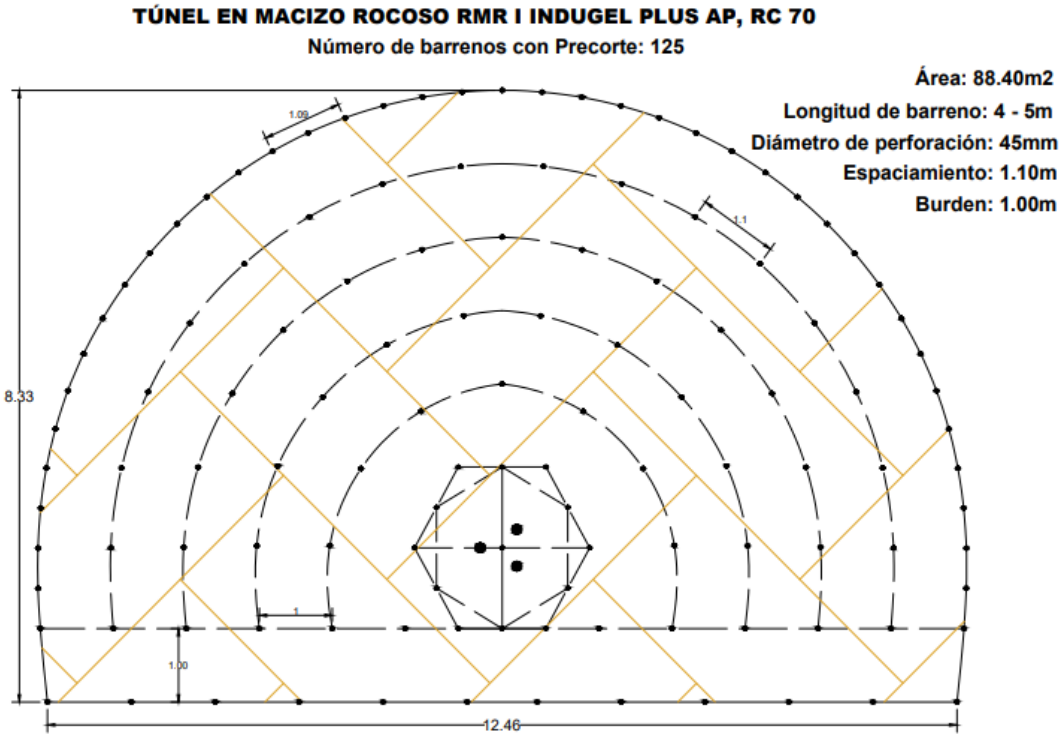


Ilustración 6-18. esquemas de voladura, en relación RMR I, 125 barrenos en precorte

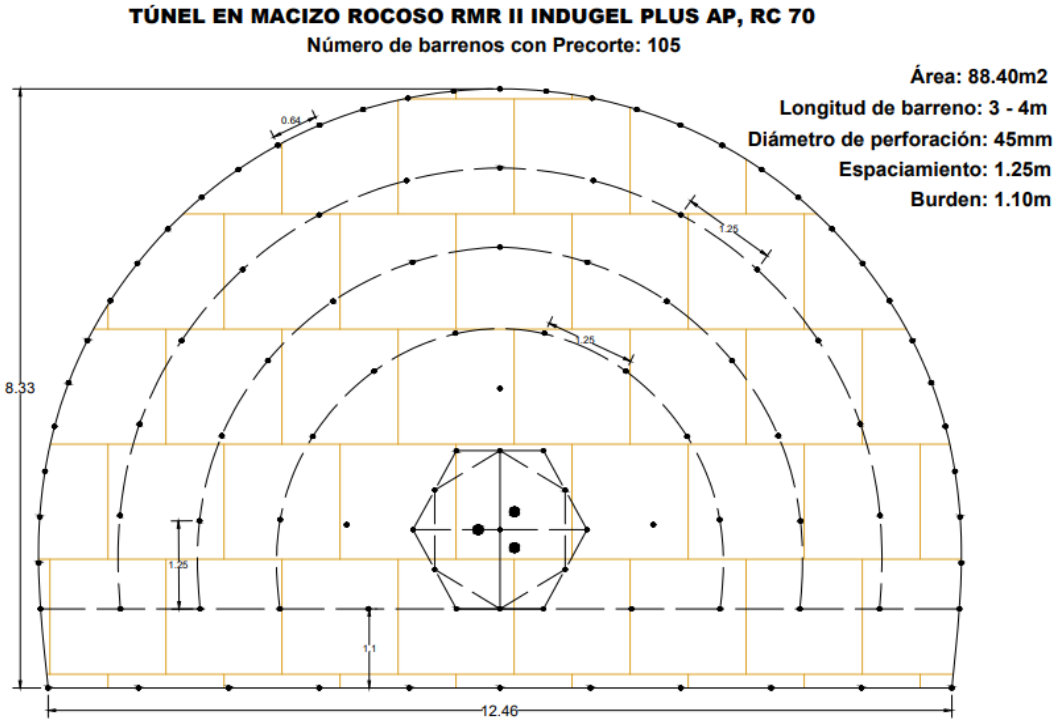


Ilustración 6-19. esquemas de voladura, en relación RMR II, 105 barrenos en precorte

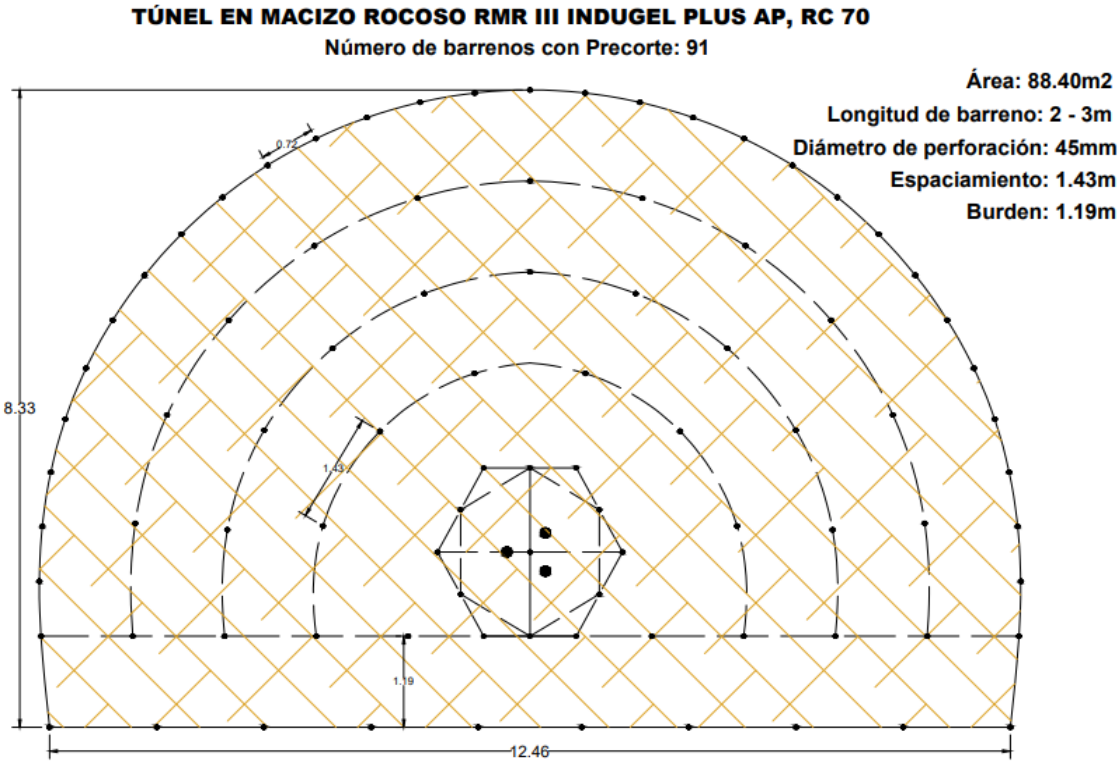


Ilustración 6-20. esquemas de voladura, en relación RMR III, 91 barrenos en precorte

Importante también tener presente la técnica del precorte como voladura de contorno, así como la voladura amortiguada para la línea adyacente a ésta.

En la Tabla 6-14 se muestran las recomendaciones a tener en cuenta para la utilización de esta técnica.

Valores de RMR						
Método de excavación	**I**	**II**	**III**	**IV**	**V**	**Especial**
Explosivo	Sí	Sí	Sí	N/A	N/A	N/A
Precorte	Sí	Sí	SÍ	N/A	N/A	N/A
Recorte	No	No	No	N/A	N/A	N/A
Voladura Amortiguada	Sí	Sí	Sí	N/A	N/A	N/A

Tabla 6-14. Valores de RMR (Clasificación geomecánica del Macizo Rocoso)

Para el cálculo de los contornos se tienen las siguientes características, para lo cual las condiciones del macizo rocoso determinan los parámetros en el aspecto de protección al macizo y mejores prácticas en el desarrollo de las actividades de voladuras, recomendando para un mejor y mayor desempeño de la voladura de contorno para hastiales y corona, desarrollar un precorte y la utilización de sistemas de iniciación electrónico, acompañador con el respectivo cálculo geométrico y de cargas.

Carga acoplada

$$PB = 228.10^{-6} . \rho_e . \frac{VOD^2}{1 + 0{,}8\,\rho_e}$$

Carga desacoplada

$$PBe = PB.\left[\frac{Ve}{Vb}\right]^{1,2} = PB\left[\sqrt{Cl}\,\frac{d}{D}\right]^{2,4}$$

Donde,
PB = Presión de barreno (MPa)
ρ_e = Densidad del explosivo (g/cm^3)
VD = Velocidad de detonación (m/s)
Ve = Volumen de explosivo
Vb = Volumen de barreno
d = Diámetro de la carga
D = Diámetro del barreno
Cl = Cociente de longitudes de carga y barreno

6.7.2.1 Caracterización de la roca a fragmentar

Es necesario realizar una caracterización de la roca intacta no solo desde el punto de vista físico-mecánico si no igualmente químico-mineralógico pues son muy variadas sus propiedades que se ven involucradas tanto en el proceso de perforación como en el de la voladura [231 - 232].

Algunos de los parámetros que debieran estudiarse son entonces: las resistencias a la compresión simple y triaxial, a la tracción y al corte, así como sus propiedades de deformabilidad y coeficiente de Poisson. Estas propiedades deben evaluarse no solo para las condiciones estáticas si no igualmente dinámicas, en el entendido que ambas son fundamentales para explica el comportamiento de la roca a estos dos tipos de condiciones de carga.

Otros parámetros serían el peso unitario, la abrasividad Cerchar el DRI, el CLI, el AVS, la velocidad sónica y los índices de carga puntual.

6.7.2.2 Selección del explosivo

El explosivo tiene al menos tres variables para tener en cuenta en el diseño de una voladura, según su composición química: Presión de detonación, volumen de gases y energía del explosivo, los cuales tienen diferente acción sobre la roca en cuanto a energía, fracturación, vibraciones y sísmica, esto permite hacer un debido cálculo para obtener el resultado deseado, sin afectar el macizo rocoso. En este sentido, el constructor del túnel debe tener plena seguridad del tipo de explosivo que va a utilizar, para así mismo determinar la energía que le va a proporcionar a la roca a vencer, no puede excederse en la energía, el uso de la energía debe ser racional. Sin embargo, y teniendo en cuenta los diferentes productos que ofrece la Industria Militar colombiana se recomienda para este tipo de trabajo en túneles utilizar el Indugel plus **Ap**. (en sus cuatro presentaciones) y el emulínd **E** o emulsión bombeable sensibilizada.

6.7.2.3 Selección de la Técnica de voladura

Las técnicas de perforación y voladura más indicadas, las determina la caracterización de la roca [231 - 232], la selección de los explosivos (con accesorios) y los equipos de perforación disponibles para el proyecto, teniendo en cuenta que, dadas la caracterización de la roca a cortar se van a requerir diferentes esquemas de voladura conforme el avance, así mismo de diferentes técnicas de voladura de contorno o voladura amortiguada según la necesidad de garantizar la estabilidad del terreno y un contorno uniforme, por lo tanto, no es un solo diseño para la longitud del túnel, son varios diseños los que se requieren, todos ellos soportados técnicamente por un profesional especializado en explosivos y voladuras, quien debe avalar dichos diseños.

6.7.2.4 Daños generados por la voladura

Los daños generados por la voladura pueden analizarse a la luz de la Metodología Australiana, la cual define el BDI -Blasting Damage Index- en función de la siguiente expresión:

$$BDI = \frac{VSp*Vmr*\rho r*10^{-6}}{Rtd*Fv}$$

Donde:
VSp: Vector suma de la velocidad pico de partícula, mm/s
Vmr: Velocidad sónica de la masa rocosa, m/s
ρr: Densidad de la roca, g/cm^3
Rtd: Resistencia a la tracción dinámica de la roca, MPa
Fv: Constante de la calidad de la roca definida con base en el RQD modificado.

La constante de la calidad de la roca se define mediante:

$$Fv = 1{,}96 - 0{,}27 \times \ln(RQD) \times JSF$$

Donde:
JSF: Factor de corrección por resistencia de las diaclasas, seleccionado a partir de:

Resistencia de las diaclasas	JSF
Alta	1,0
Media	0,9
Baja	0,8
Muy baja	0,7

Criterio de daño

BDI	Tipo de daño	Observaciones
≤ 0,125 No hay daño	Máximo para cavernas	Máximo para cavernas
0,25	Daños no considerables	Máximo tolerable para túneles viales
0,5	Menores efectos de excavación	Máximo valor tolerable para túneles en construcción
0,75	Moderado y daño discontinuo	Máximo tolerable para galerías temporales
1	Mayor sobre excavación	Rehabilitación intensa
1,5	Daño severo	Rehabilitación difícil o imposible
≥ 2,00	Excesiva sobre excavación	Abandono del sector

Tabla 6-15. Cálculo de daño

6.8 Plan de seguridad geotécnica para construcción

6.8.1 Generalidades

El objetivo principal del plan de seguridad geotécnica es definir los lineamientos a seguir para la estabilidad del sistema y su impacto sobre el ambiente, y plantear un esquema organizacional para lograr una construcción económica y segura del túnel.

El plan de seguridad geotécnica para construcción se desarrolla en la última etapa del diseño (**fase III**) para ser ejecutado durante la etapa de construcción, por parte del constructor, bajo la supervisión de la interventoría o quien haga sus veces. La evaluación e interpretación de los resultados es una labor de equipo, en la cual intervienen los representantes del contratista, la interventoría o quien haga sus veces y la entidad contratante (numeral 8.6.2).

El plan de seguridad geotécnica es particular de cada proyecto, dependiendo de los factores que influencian la excavación y los requerimientos específicos del proyecto [118]. A manera de ejemplo, el monitoreo geotécnico para un túnel urbano (baja cobertura) se enfoca en determinar el grado de utilización del soporte y la posible ocurrencia de una falla súbita, que conlleve consecuencias serias en la superficie del terreno. Por el contrario, para túneles con altas coberturas, el grado de utilización del soporte no pone en riesgo la estabilidad del sistema; en consecuencia, el monitoreo geotécnico se enfoca en el desarrollo de desplazamientos durante la excavación.

CONDICIONES	CAUSA	Variables para el monitoreo					
		Asentamientos superficiales	Angulo de inclinación	Desplazamiento, deformaciones, utilización, estado del soporte	Nivel freático / presión del agua	Estructura del terreno	Desplazamientos del terreno
Asentamientos superiores a los intervalos establecidos, daños en edificaciones y redes	Consolidación	■	-	■	■	-	■
	Falla del terreno por cortante	■	□	■	-	-	■
	Falla de la solera	-	-	■	-	-	-
	Daños o falla de los elementos de soporte	-	-	■	-	-	-
Desprendimiento de bloques controlado por discontinuidades	Orientación desfavorable de discontinuidades	-	-	□	-	■	-
Cierre de la sección y/o falla de los elementos de soporte	Deformación excesiva	-	-	■	-	-	■
	Falla por cortante a lo largo de una estructura geológica	-	-	■	-	■	■
	Terrenos expansibles	-	-	■	■	-	■
■ Relevante		□ Limitada			- No aplica		

Tabla 6-16. Comportamiento del sistema y correspondiente variable para monitoreo (modificada de [120])

La Tabla 6-16 sirve como referencia para la selección de la variable para el monitoreo. Esta tabla presenta diferentes condiciones del comportamiento del sistema en conexión con las variables para el monitoreo, de acuerdo con la relevancia de la información para cada situación específica. Como referencia, se incluye en la Tabla 6-17, el método a implementar en conexión con la variable para el monitoreo; en la tabla se observa la relevancia de la información obtenida por cada método.

	MÉTODO									
	Desplazamientos absolutos (3D)	Extensómetros	Celdas de carga para anclajes	Clinómetro y Niveles E.	Inclinómetros	Piezómetros	Extensómetros y deformímetros	Mapeo manual	Mapeo digital	Inspección visual
Asentamientos superficiales	■	■	–	□	■	–	–	–	–	–
Deformación en estructuras superficiales y redes	■	■	–	□	■	–	–	–	–	–
Desplazamiento en la capa de concreto (neumático/hidráulico)	■	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Deformaciones en la capa de concreto (neumático/hidráulico)	■	–	–	–	–	–	■	–	–	–
Carga en anclajes	–	–	■	–	–	–	–	–	–	–
Nivel del agua	–	–	–	–	–	■	–	–	–	–
Presión de poros	–	–	–	–	–	■	–	–	–	–
Estructura geológica del terreno	–	–	–	–	–	–	–	■	■	■
Desplazamientos en el terreno	■	■	–	–	■	–	–	–	–	–
Inspección cualitativa del concreto (neumático/hidráulico)	–	–	–	–	–	–	–	–	■	■
■ Relevante		□ Limitada			– No aplica					

Tabla 6-17. Variable para monitoreo y método de monitoreo a implementar, modificada de [120]

Las técnicas para la evaluación e interpretación se presentan en el numeral 8.7.

En la siguiente sección se indican los elementos que hacen parte del plan de seguridad geotécnica para la construcción y que deben ser presentados durante la etapa de diseño.

6.8.2 Contenidos del Plan de Seguridad Geotécnica para Construcción

Los siguientes aspectos y documentos tienen que ser incluidos en el plan de seguridad geotécnica para construcción [119].

- Anteproyecto de diseño para construcción: en este se presentan los intervalos esperados del monitoreo geotécnico y las desviaciones aceptables.
- Umbrales de alarma y acción: adicional a la información contenida dentro del anteproyecto de diseño para construcción, es obligatorio presentar una clara definición de niveles de alarma y acción para implementación de medidas de mitigación.
- Programa de monitoreo: de acuerdo con los requerimientos del proyecto, se especifica el proceso de medición o recolección de observaciones. Se debe entender que los métodos y medios para el monitoreo incluyen tanto este último (medición de parámetros físicos) como observaciones (recolección de información cuantitativa o cualitativa).
- Durante el diseño se propone la estructura de responsabilidades a seguir durante la construcción.
- Datos de contacto, tanto de las personas involucradas directamente dentro del plan de seguridad geotécnica como de entidades o entes que puedan ser afectadas por la construcción del túnel (*p.e.* edificios adyacentes, servicios públicos como gas, acueducto, fibra óptica).
- Durante la etapa de diseño se propone la ejecución de reuniones para discutir temas relacionados con el comportamiento del sistema. Antes de iniciar la etapa de construcción, se detallan la periodicidad, los temas a tratar y los participantes (numeral 8.6).

6.8.3 Programa de monitoreo

Establecer un programa de monitoreo, requiere conocer la geología del sitio, realizar una evaluación preliminar sobre posibles causas de deformaciones, desplazamientos, fracturas, remoción y límites del movimiento de tierra en cuanto a profundidad y extensión; una instrumentación geotécnica que se ajuste a las necesidades del proyecto, sujeto a esto se deben seguir unos criterios mínimos específicos:

- Establecer la ubicación y profundidad de instalación de la instrumentación.
- Definir la frecuencia de lecturas de las mediciones.

- Establecer valores límite que generen alarmas.
- Evaluar y definir qué tipo de medición que se requiere.
- Utilizar Instrumentación que mejor se adapte a la necesidad de la obra.
- Tomar decisiones sobre el manejo y presentación de los datos obtenidos.

Se debe proponer metodología para el desarrollo de dicho plan y en relación a guías, instrumentación geotécnica disponible y la frecuencia de información, condiciones del terreno, dimensiones del proyecto.

A manera de referencia para proponer metodología de Olalla (2007), menciona que la instrumentación de terrenos y obras, se puede realizar por dos métodos:

- Método Clásico
- Sistemas de Auscultación Automática

Método Clásico: Son técnicas tradicionales de control, que se realizan de manera conjunta a un buen reconocimiento litológico y geológico en el caso de terrenos, y definición del comportamiento mecánico en el caso de estructuras. Estos métodos se han venido utilizando con éxito y son todavía válidos en los sistemas de monitoreo actual.

De acuerdo a Olalla (2007), algunos técnicas y equipos que se aplican en el método clásico son:

- Inspección visual directa.
- TDR – (Threat Detection and Response)
- Medición manual de giros en superficie
- Controles meteorológicos, en particular temperatura, viento y precipitaciones
- Pares de estereofotos y su interpretación
- Inclinometría manual
- Equipos de Extensometría de control manual
- Piezometría manual
- Adquisición manual de topografía (DGPS)
- Sistemas de péndulo directo e inverso
- Deformímetros multipunto y magnéticos
- Equipos de extensometría de control manual
- Células de presión y carga
- Cintas de convergencia
- Aparatos para medir la evolución de fisuras como fisurómetros
- Mojones o hitos georeferenciados

Sistemas de auscultación automática: la combinación de instrumentos electrónicos y las técnicas de telecomunicación hacen hoy día posible la auscultación automática de terrenos y estructuras y el envío de la correspondiente información por medio de control remoto.

Los sistemas de auscultación automático, junto con los instrumentos de control, en superficie o profundidad, se pueden utilizar para controlar, conocer y hasta predecir un deslizamiento o falla de una estructura. De acuerdo a Olalla (2007), la transmisión automática y remota de datos, se puede hacer mediante:

- Software de monitoreo
- Sistemas de alarma que avisan deslizamientos
- Líneas telefónicas fijas
- Líneas telefónicas móviles
- Fibras ópticas
- Radio
- Satélites
- Radares
- Sistemas de control de ruido y vibraciones
- Monitorización de estructuras empleando software como sistema DEX, Strain-gauge, VW rebar, entre otros.

El programa incluye los detalles del proceso de medición u observaciones, incluyendo requisitos para la instalación de instrumentos de medición, cronograma para la toma de datos, ubicación y especificaciones de los instrumentos de medición, frecuencia de mediciones y requisitos generales. El tipo de instrumentación debe garantizar lo siguiente:

- Viabilidad para la instalación
- Durabilidad
- Protección contra daños durante construcción
- Precisión

6.8.3.1 Instrumentación geotécnica

Dentro del programa de monitoreo, la instrumentación geotécnica tiene como objetivo principal, monitorear el comportamiento del terreno a lo largo del tiempo, el uso de estos sistemas permite obtener información y medir algunas variables que controlan el mecanismo de falla.

Objetivos mínimos que se deben tener en cuenta para determinar y escoger la instrumentación geotécnica son:

- Evaluar técnicas de construcción, efectividad, seguridad, tiempo de ejecución.
- Precisar la profundidad y forma de la superficie de falla.
- Determinar posibles comportamientos del macizo rocoso y/o suelo.
- Establecer la velocidad de deslizamientos.
- Evaluar riesgos para saber cómo prevenirlos. (mitigación)

- Tomar decisiones en obra con monitoreo continuo
- Monitorear los niveles de agua subterránea.
- Establecer mecanismos de alarma.

La instrumentación geotécnica podría tener en cuenta (2) dos grupos de mediciones que delimitan y relacionan el comportamiento e interacción, las obras en el exterior y al interior del túnel:

Mediciones en el interior del túnel, galerías, nichos:

- Extensión
- Cargas
- Deformaciones
- Temperatura
- Agua (resistividad, conductividad, etc.)

Mediciones en superficie del túnel, portales, cubierta, edificaciones aledañas:

- Deformaciones
- Presión
- Esfuerzos
- Desplomes
- Inclinación

La instrumentación geotécnica generalmente usada para proyectos de túneles permite tener presentes las siguientes variables:

- Temperatura del aire, agua y hormigón
- Lluvias y condiciones meteorológicas
- Eventos sísmicos
- Esfuerzos y tensiones en estructuras
- Deformaciones locales
- Desplazamientos horizontales y verticales
- Rotación y movimiento de juntas y grietas
- Estabilidad de las laderas adyacentes
- Fallas / abultamientos
- Presiones de poro
- Caídas de roca y derrumbes

Entre los instrumentos geotécnicos más relevantes según la medición están:

- Piezómetros de cuerda vibrante
- Piezómetro abierto
- Extensómetro de varillas
- Hitos de nivelación
- Clavos de nivelación

- Sensores
- Arquetas de subsidencia
- Bases de nivelación
- Pernos de convergencia
- Inclinómetros
- Escala graduada con mira de nivelación
- Puntos de inserción
- Control topográfico
- Dianas
- Cinta extensométrica
- Células de presión
- Células de carga
- Softwares robotizados
- Sismógrafos - acelerómetros
- Software de monitoreo
- Sistemas de alarma
- Sistemas de control de ruido y vibraciones

6.8.3.2 Esquemas típicos para monitoreo de túneles

A continuación se presentan algunos ejemplos típicos [120], con su respectivo esquema para mediciones. Dependiendo de los factores y requerimientos específicos del proyecto, se hace necesaria la instalación e instrumentación de una o varias de las herramientas mostradas en los ejemplos.

Ejemplo 1: túnel urbano con baja cobertura

En el ejemplo, los riesgos principales están ligados a los asentamientos superficiales, consolidación por abatimiento del nivel freático, inestabilidad del frente de excavación y falla de los materiales de soporte. Por consiguiente, el programa de monitoreo se debe enfocar en:

- Deformaciones superficiales en edificios y en redes, mediante monitoreo de desplazamientos absolutos, nivelación, clinómetro, extensómetros e inclinómetros y monitoreo de vibraciones.
- Abatimiento del nivel freático, mediante piezómetros.
- Estabilidad del frente de excavación, mediante inspección visual.
- Integridad de los elementos de soporte, mediante monitoreo de desplazamientos absolutos, desplazamientos en el frente de excavación, celdas de carga y extensómetros.

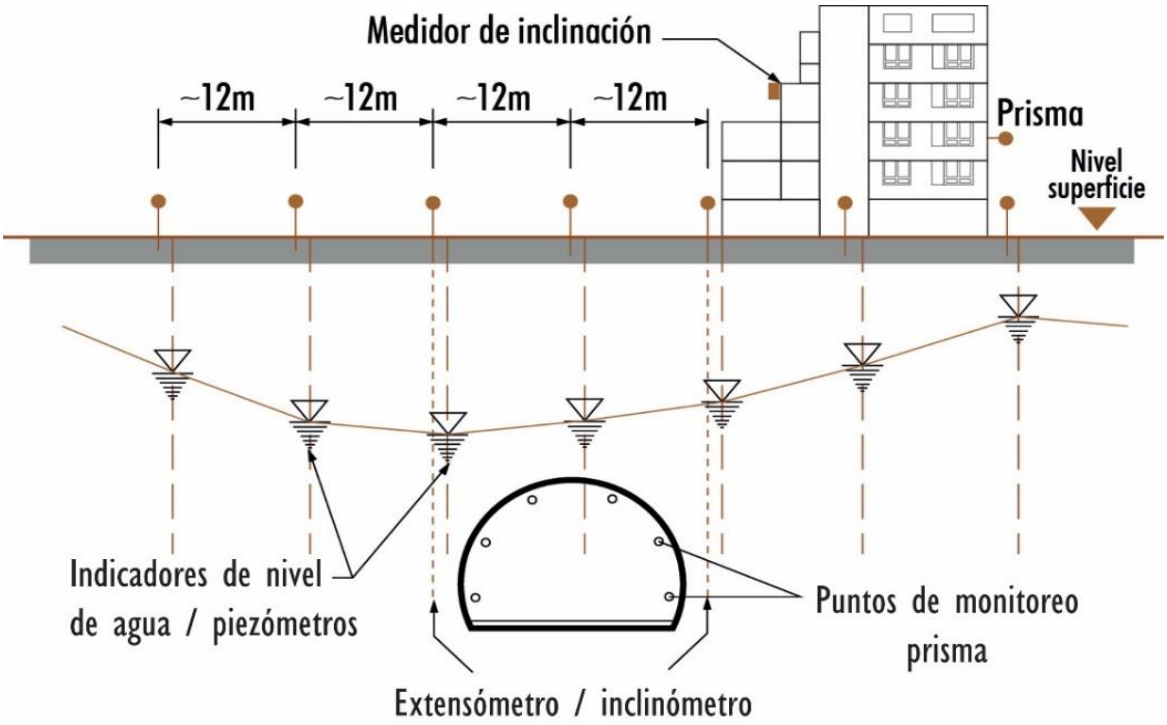


Ilustración 6-21. Esquema de monitoreo en superficie para túneles con baja cobertura (modificada de [120])

Ejemplo 2: túnel en roca (macizo rocoso con bloques)

Para este caso, el riesgo principal es el desprendimiento de bloques inducido por las discontinuidades. Considerando que es difícil anticipar este tipo de fallas por medio del monitoreo de desplazamientos, y que el modo de falla está controlado por las discontinuidades, el programa de monitoreo se debe enfocar en estructuras del macizo y ubicación/orientación de discontinuidades con respecto al eje del túnel, mediante mapeo geológico con brújula o mapeo geológico digital.

Ejemplo 3: túnel en macizo rocoso con planos de debilidad con alta/media cobertura

Los riesgos principales en este sistema son: cierre excesivo de la sección, falla de los elementos de soporte por esfuerzo cortante perpendicular al plano de debilidad (foliación, estratificación, espejos de falla, fallas) y altas deformaciones anisotrópicas. En este caso, el programa de monitoreo se debe enfocar en:

- Orientación del plano de debilidad, mediante mapeo geológico con brújula o mapeo geológico digital.
- Desplazamientos en el soporte primario, mediante monitoreo de desplazamientos absolutos y celdas de carga.
- Estructura del macizo, mediante extensómetros.

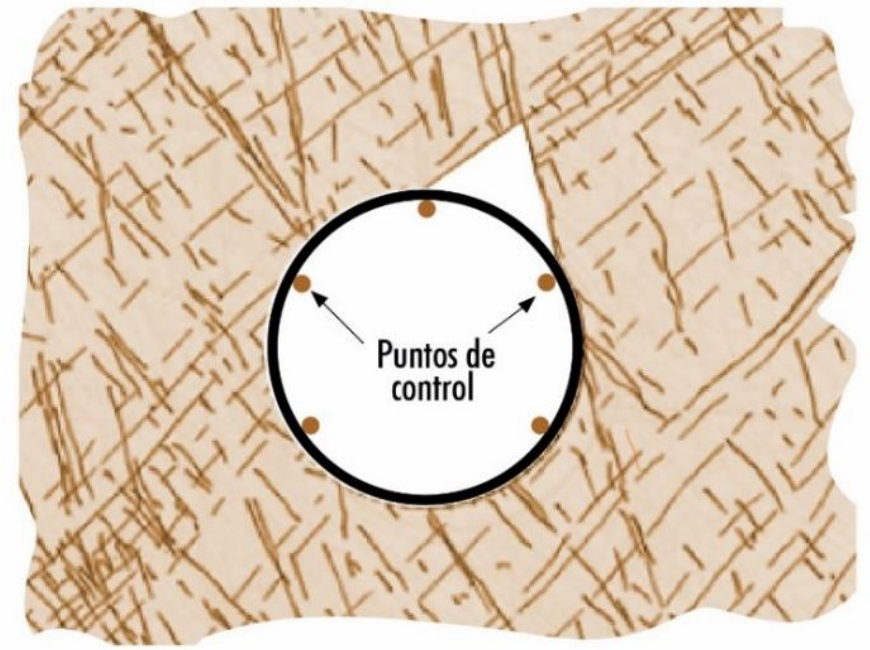


Ilustración 6-22. Macizo rocoso con bloques, potencial de sobre excavaciones

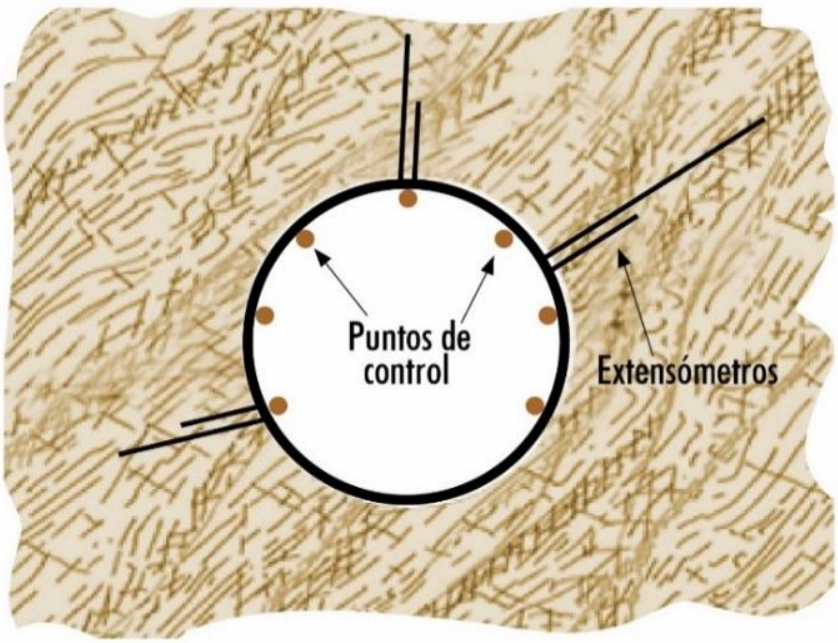


Ilustración 6-23. Macizo rocoso con planos de debilidad (foliación, estratificación)

Ejemplo 4: túnel en materiales expansivos

Los riesgos principales por la presencia de materiales expansivos son el cierre de la sección y fallas en la solera. En este caso, el programa de monitoreo se debe enfocar en:

- Presencia de agua, mediante inspección visual.
- Composición mineralógica, mediante pruebas de laboratorio.
- Condición de los materiales de soporte, mediante monitoreo de desplazamientos absolutos, celdas de carga y sensores de fibra óptica.
- Desplazamientos en el macizo, mediante extensómetros y monitoreo de desplazamientos absolutos.

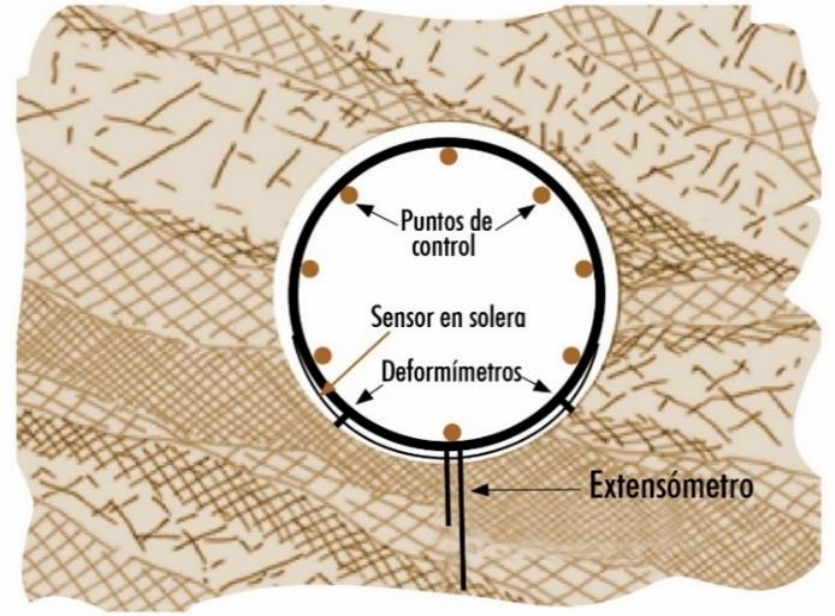


Ilustración 6-24. Macizo rocoso con potencial expansivo

6.8.3.3 Distancias típicas entre secciones de monitoreo

Se recomienda que la distancia entre secciones de monitoreo "D_{sm}" esté en el intervalo 5 m < D_{sm} < 20 m. Sin embargo, esta distancia depende de los factores que influyen la excavación y los requerimientos específicos del proyecto. La distancia debe ser ajustada durante la fase de construcción.

6.8.3.4 Frecuencia de lecturas

Se presentan las recomendaciones de frecuencias de lectura y monitoreo en el largo plazo, para el interior de túneles construidos mediante el método convencional, edificaciones y estructuras superficiales, y excavación de intersecciones y ampliaciones.

6.8.3.4.1 Túneles

La Tabla 6-18 muestra los intervalos (rangos) y frecuencias de monitoreo mínimos (ver convenciones en la Ilustración 6-25). La secuencia de excavación que se muestra se divide en sección superior, banca y solera.

Como el desarrollo de desplazamientos depende principalmente de la distancia entre la sección y el frente de excavación, se toma esta variable como referencia para la toma de lecturas [121].

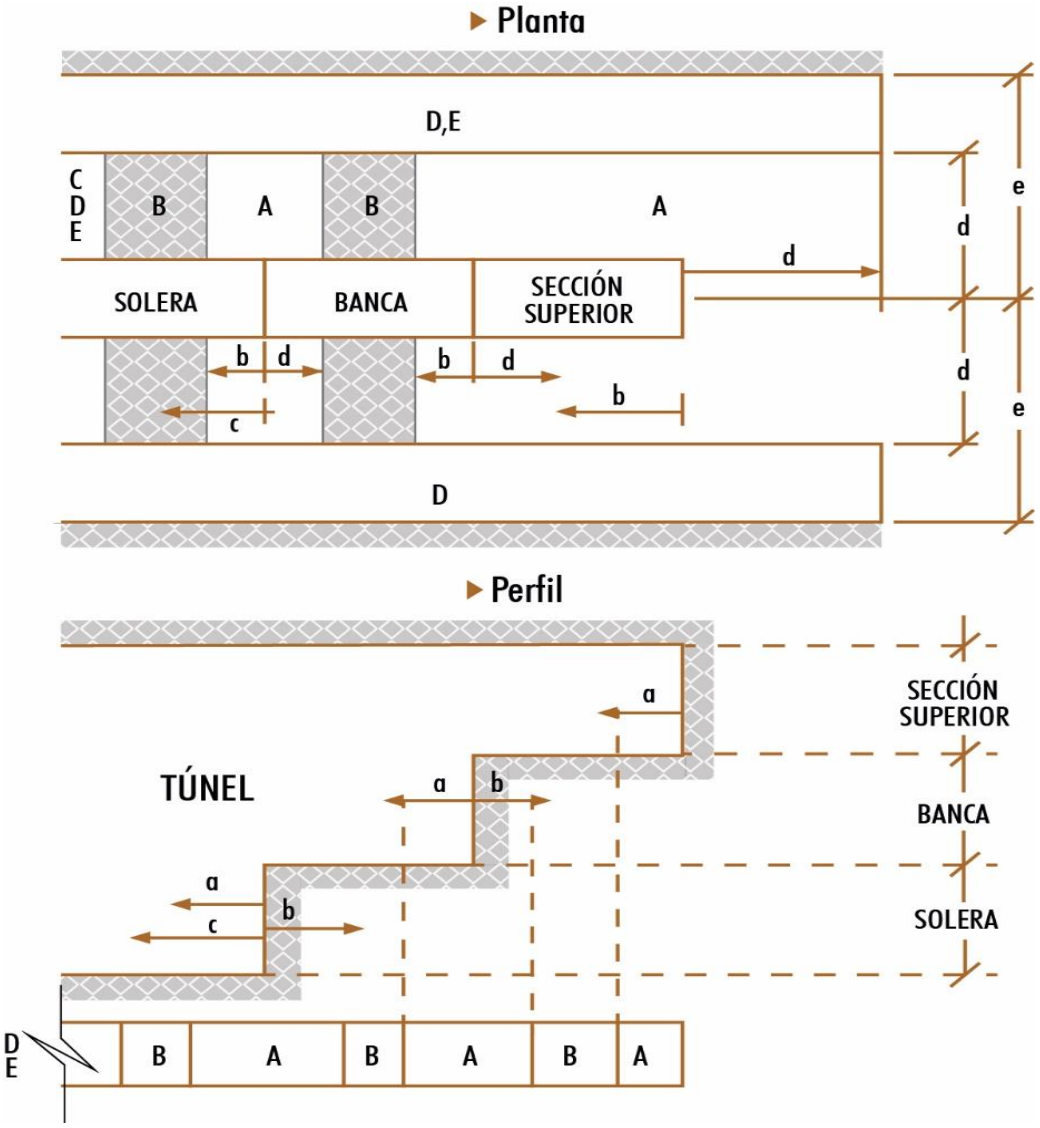


Ilustración 6-25. Esquema de zonas y distancias para monitoreo (modificada de la referencia [120])

Zona	Frecuencia	Distancia	Rango[3]
A	1 por día	a	3 x diámetro
B	2 por semana	b	2 x diámetro
C[1]	1 por semana	c	4 - 5 x diámetro
D	2 por mes	d	1 – 1,5 x diámetro + cob.
E[2]	Según se requiera	e	3 x diámetro + cob.
[1] La frecuencia en la zona "C" se conserva hasta la estabilización de la sección.			
[2] Frecuencia para terrenos variables a largo plazo			
[3] El rango varía con respecto al diámetro y la cobertura (cob.) del túnel.			

Tabla 6-18. Rango y frecuencia de monitoreo

Se debe considerar que para túneles que incluyan galerías laterales u otro tipo de secuencias de excavación, las exigencias mínimas deben ser ajustadas.

6.8.3.4.2 Túneles con baja cobertura

La parte superior de la Ilustración 6-25 (planta) muestra las zonas y rangos de monitoreo en superficie para túneles con baja cobertura. El monitoreo en edificios, redes y otro tipo de estructuras superficiales debe realizarse según la Tabla 6-18. En caso de que el túnel afecte edificaciones sensibles, es necesario considerar un aumento en la frecuencia de las lecturas.

6.8.3.4.3 Monitoreo durante otras actividades de excavación

El área donde se realiza la excavación de nichos, intersecciones u otras actividades adicionales de excavación se clasifica como zona “A”, independientemente de la distancia al frente de excavación. En consecuencia, las lecturas tienen que realizarse a diario hasta la estabilización de la sección.

6.8.3.4.4 Monitoreo a largo plazo

Cuando las condiciones del terreno varían en el tiempo (terrenos expansivos, fenómenos de reptación, consolidación, etc.), es necesario continuar con el monitoreo después de la finalización de la construcción. Para estos casos el diseñador debe definir la frecuencia de lectura en la zona “E” de la Tabla 6-18.

6.8.4 Métodos de monitoreo

Existen múltiples métodos y herramientas de monitoreo. Su selección se realiza con base en las condiciones y requerimientos específicos del proyecto (numeral 6.8.3.1). Se toman como referencia los métodos expuestos en la referencia [120], con un enfoque dirigido hacia los requerimientos sobre la instalación de instrumentos para la medición y al procedimiento para la toma de datos.

6.8.4.1 Monitoreo de desplazamientos absolutos en 3D

Desde principios de la década de 1990 inició la implementación del monitoreo de desplazamientos en tres dimensiones en los túneles. Debido a sus evidentes ventajas, este método ha remplazado gradualmente las técnicas antiguas de la toma de convergencias.

El método hace uso de una estación total y puntos y/o prismas reflectantes, para determinar la posición dentro de un sistema de coordenadas globales y/o coordenadas locales del proyecto. El desarrollo del vector de desplazamientos (magnitud y orientación) es capturado mediante la toma sistemática de lecturas. Se debe tener en cuenta que las mediciones no se realizan desde una localización fija; por tanto, el método requiere de puntos de referencia (“amarre”) fijos que permitan determinar los desplazamientos con respecto a un sistema de coordenadas. Para este fin, es preciso diferenciar entre los puntos que registren desplazamientos y aquellos tomados como

"puntos estables". El punto de referencia solo puede ser considerado como "punto estable" si presenta desplazamientos en el tiempo menores a 1 mm/mes.

6.8.4.1.1 Requerimientos generales

Se hace uso del método de "localización libre de la estación" (*free stationing*) con puntos de referencia comunes (Ilustración 6-27). La posición final de la estación total tiene que estar conectada o "amarrada" a puntos que presenten desplazamientos menores a 1 mm/mes.

Las coordenadas de los puntos de monitoreo deben ser determinadas con una precisión de +/- 1mm (desviación estándar) con relación a las secciones vecinas, durante el periodo de tiempo que dure el monitoreo. Para cumplir con esta precisión, es necesario tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Distancia entre la estación y el punto de referencia más cercano: 10-30 m.
- Mínima distancia hasta el punto más lejano de referencia: 90 m.
- Máxima distancia hasta el punto de monitoreo: 80 m.
- Máxima distancia entre posiciones de la estación total: 110 m.
- Se debe usar aproximadamente la misma posición para mediciones consecutivas.
- La estación debe ser armada sobre terreno estable.
- Distancia mínima hasta las paredes de la excavación: 1 m.
- La "localización libre de la estación" (*free stationing*) comienza desde los puntos de monitoreo más cercanos y termina en los puntos de monitoreo más lejanos.
- Las lecturas (mediciones) se inician desde los puntos de medición más lejanos.
- Las conexiones se realizan aproximadamente simétricas al eje del túnel. Se deben evitar las conexiones asimétricas (Ilustración 6-26).
- Ejecución de "lectura cero" inmediatamente después de la instalación del punto; en ningún caso después del siguiente avance de excavación.
- Las mediciones se deben realizar en la totalidad de los puntos de la sección (cuando se realice la lectura cero, en la sección de banca se realizan igualmente las lecturas de la sección superior).
- Se deben tener datos meteorológicos para eventuales correcciones.
- Se debe "aclimatar" la estación para evitar desviaciones causadas por cambios de temperatura.
- Evitar la toma de lecturas con presencia de polvo y/o altas vibraciones.
- Se debe evitar la toma de lecturas en presencia o cercanas a fuentes de calor, para evitar desviaciones por refracción.

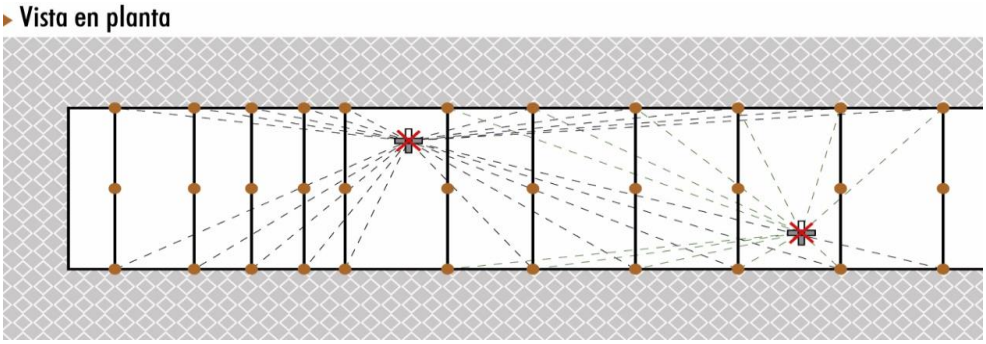


Ilustración 6-26. Interconexiones asimétricas a evitar

La Ilustración 6-27 muestra la interconexión entre puntos comunes y distancias máximas para el monitoreo de desplazamientos.

El encargado de las mediciones debe reportar después de cada campaña de monitoreo:

- Secuencia en que se realizó la campaña
- Puntos que no fueron medidos y su justificación
- Lectura cero
- Condiciones durante la campaña de monitoreo (calidad del agua, visibilidad, vibraciones, fuentes de calor, etc.)

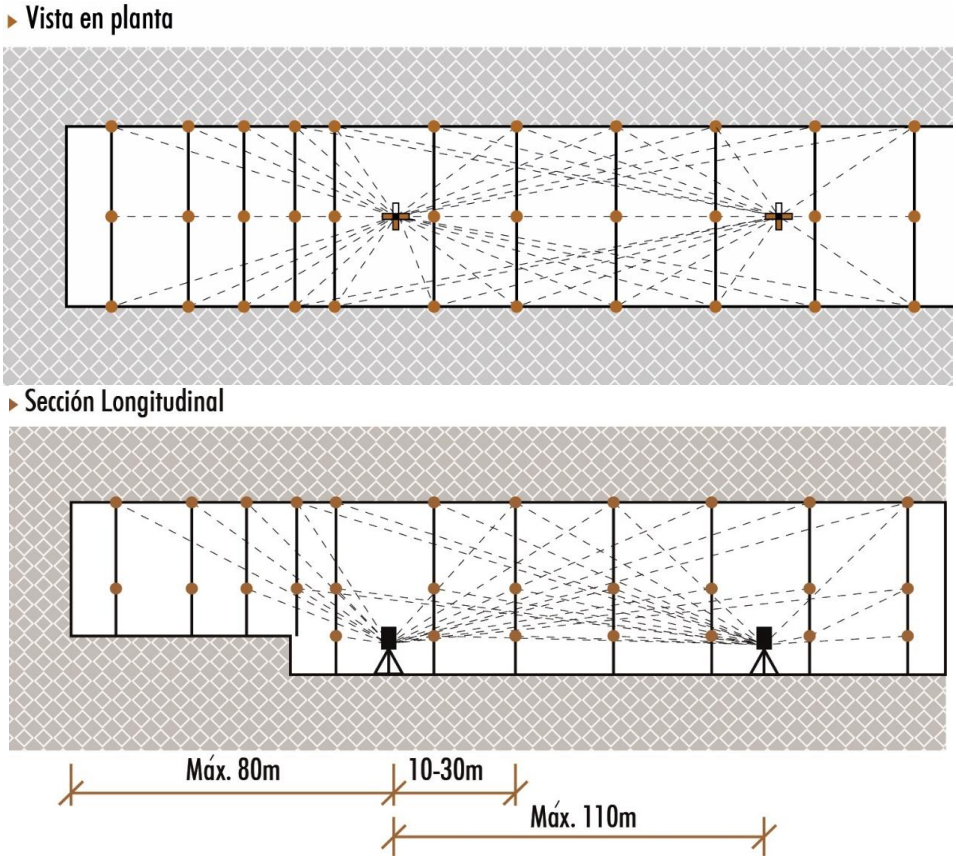


Ilustración 6-27. Esquema del sistema de interconexión para el método de "localización libre de la estación"

6.8.4.1.2 Requerimientos de la estación total

La estación total electrónica con toma de información automática debe cumplir las normas ISO 17123-3 respecto a la medición de ángulos, e ISO 12123-4 respecto a la medición de distancias. Además, debe tener, como mínimo, la siguiente precisión:

- Medida de ángulos horizontales: +/- 1” (0,3 mgon)
- Medida de ángulos verticales: +/- 1” (0,3 mgon)
- Medida de distancia: +/- (1 mm + 1,5 ppm)

6.8.4.1.3 Requerimientos de los prismas y puntos reflectantes

Los puntos reflectantes o prismas se disponen sobre pernos con un adaptador. La Ilustración 6-28 muestra los componentes: 1), punto reflectante (tipo Bi-reflex); 2), prisma; 3), perno; 4), capa protectora; 5), punto de rotura; 6 y 7), conexión; y 8), adaptador. Se resalta la importancia de tener un adaptador con punto de rotura para prevenir daños en el perno.

Requerimientos mínimos de precisión (de fábrica):

- Adaptador con punto de rotura: +/- 0,1 mm
- Prisma: +/- 0,1 mm
- Punto reflectante: +/- 0,3 mm

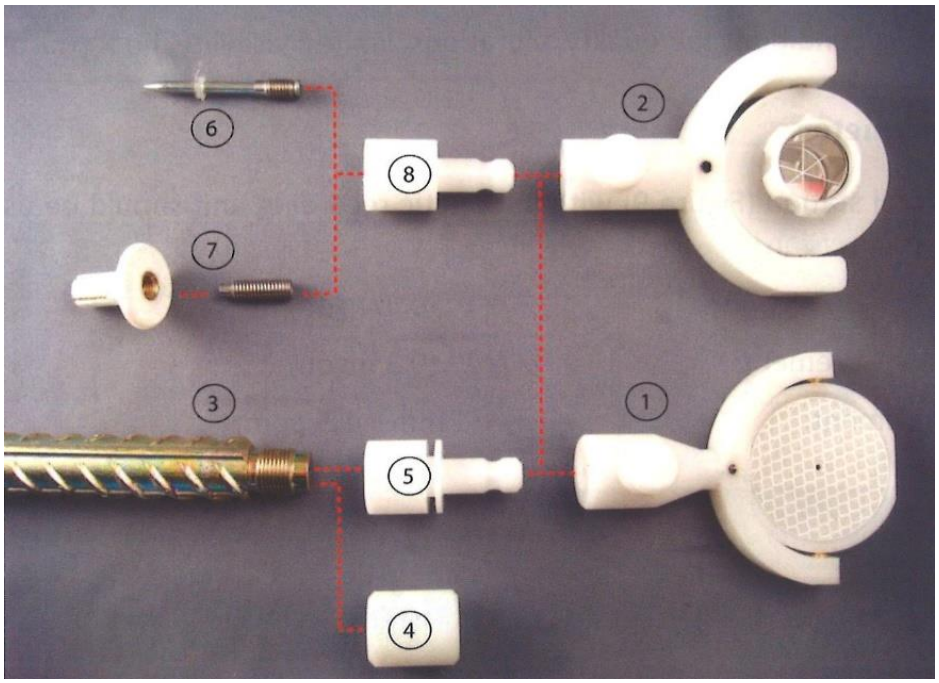


Ilustración 6-28. Componentes de los puntos de monitoreo de desplazamiento

6.8.4.1.4 Instalación y proceso de medición en el túnel

Se deben considerar los siguientes aspectos para los puntos de monitoreo:

- Es necesario tener en cuenta la localización de las instalaciones temporales (ventilación, bombeo, estaciones eléctricas, etc.)
- Es imperativo garantizar una adecuada unión entre el perno y el terreno.
- Los puntos de monitoreo deben estar protegidos contra daños durante la construcción.
- Se instalarán inmediatamente después del avance de la excavación, seguidos por la lectura cero. Se permite una diferencia no mayor a 1,0 m con respecto a la abscisa de la sección de monitoreo planeada.
- Para las diferentes fases de excavación (banca, solera, galerías laterales, etc.), deben instalarse en la misma posición (abscisa) de los puntos instalados en fases de excavación anteriores.
- Cuando sea posible, deben ser instalados en el interior del túnel acorde a las secciones de monitoreo superficiales.

La distancia al frente de excavación (de las diferentes fases de excavación) se debe registrar con una precisión de +/- 0,1 m, por lo que no es necesario el uso de puntos reflectantes o prismas. La distancia se tomará como el promedio de por lo menos 3 lecturas.

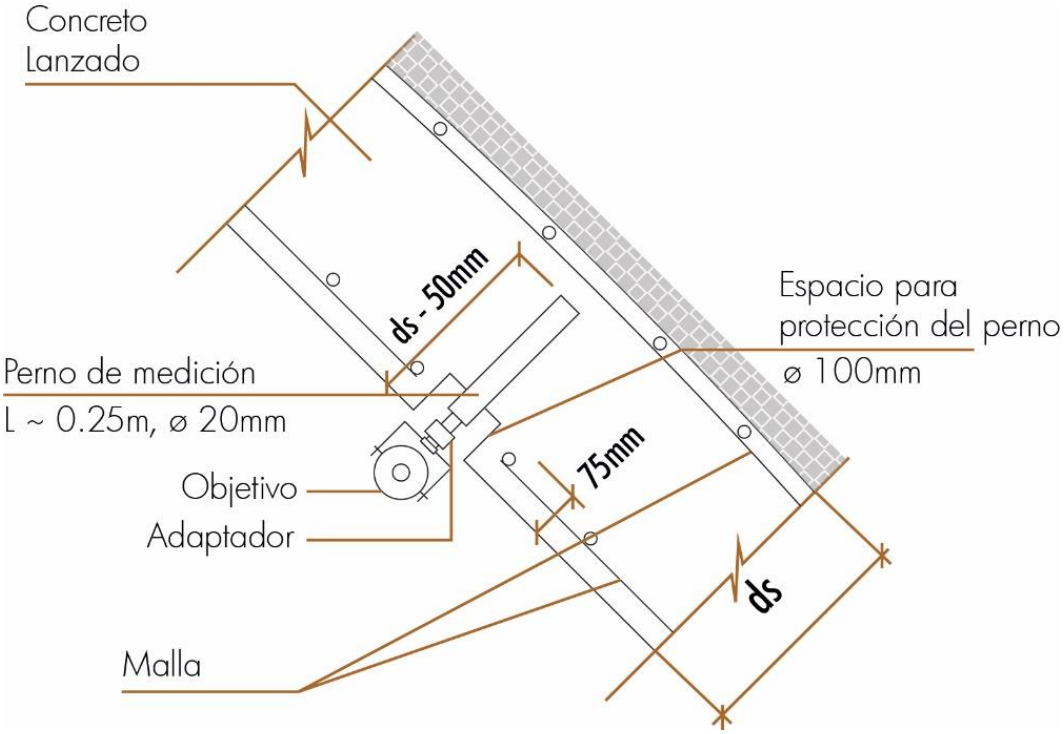


Ilustración 6-29. Esquema de instalación para puntos de monitoreo de desplazamiento

La Ilustración 6-29 muestra el esquema típico para la instalación de un punto de monitoreo. Durante el lanzado de concreto neumático se debe proteger (“tapar”) el perno. En caso de que el concreto neumático esté reforzado con fibras (sin malla electrosoldada), el perno se puede instalar en el terreno o puede realizarse la

perforación inmediatamente después de la campaña de lanzado. La Ilustración 6-30 muestra un ejemplo de un perno con su protección y la instalación final en el terreno.

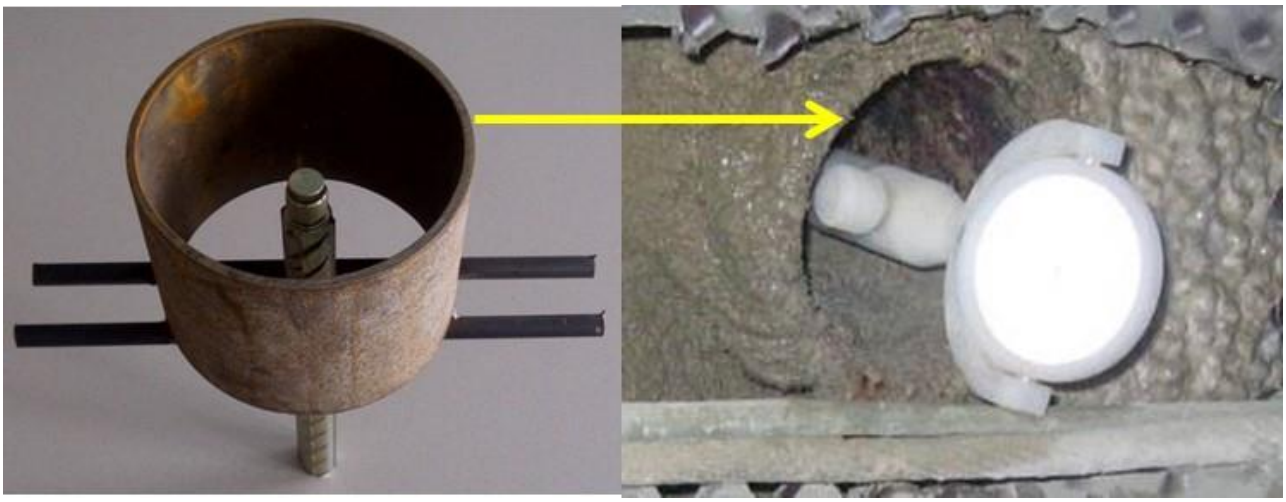


Ilustración 6-30. Perno con protección e instalación en el terreno

6.8.4.1.5 Ubicación de los puntos dentro de la sección de monitoreo

Las Ilustración 6-31 e Ilustración 6-32 muestran, a manera de ejemplo, la disposición típica de los puntos de monitoreo dentro de la sección. Estas figuras muestran los requerimientos mínimos, los cuales deben ajustarse dependiendo de las condiciones específicas del proyecto.

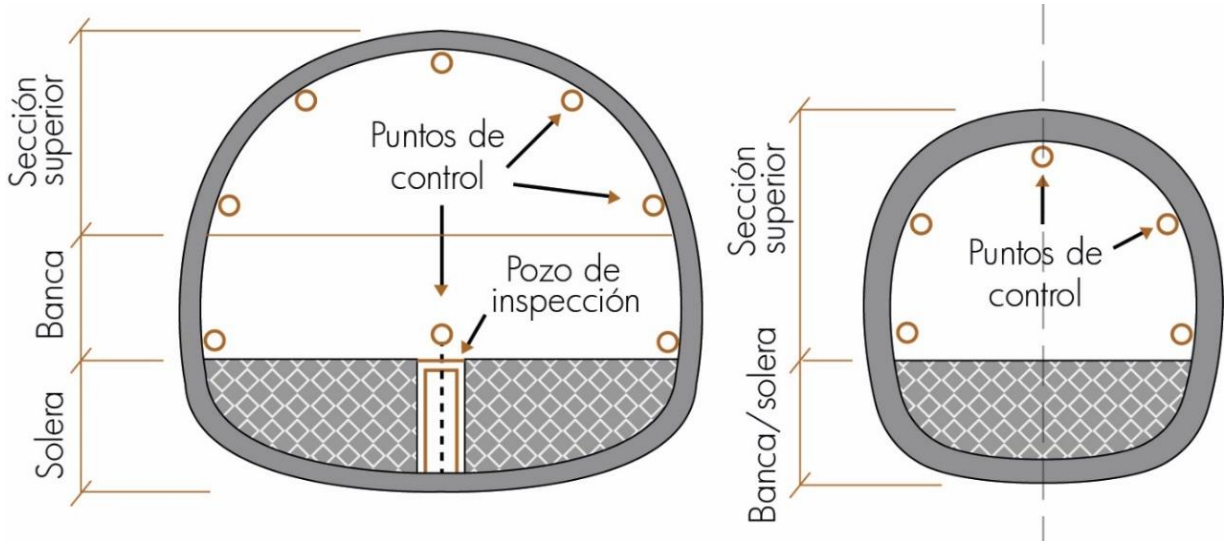


Ilustración 6-31. Esquema para el monitoreo de túneles con sección superior, banca y solera

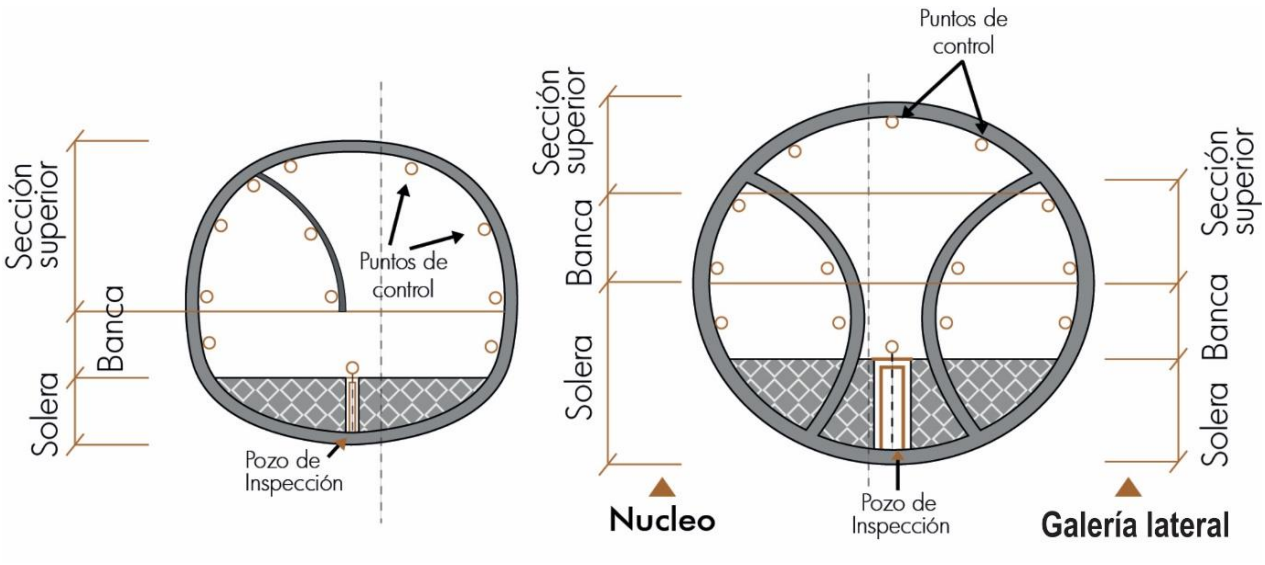


Ilustración 6-32. Esquema para el monitoreo de túneles con galerías laterales

6.8.4.1.6 Instalación y proceso de medición en superficie

Los puntos de monitoreo en superficie tienen que encontrarse a una altura mínima de 0,5 m sobre la superficie (evitar desviaciones por refracción). La instalación y toma de lectura cero se deben realizar antes del inicio de la excavación o abatimiento del nivel freático o piezométrico. En caso de que el punto de monitoreo se encuentre dentro de un área pública, es necesario construir una estructura para proteger el perno; de esa manera, se instala el punto reflectante o prisma solamente durante la medición.

6.8.4.2 Extensómetros

Los extensómetros se utilizan para medir los desplazamientos relativos (entre dos puntos), que permiten evaluar las deformaciones relativas (zonas plásticas) y la convergencia de movimientos en el terreno alrededor del túnel.

6.8.4.2.1 Instalación y requerimientos

Para la instalación es preciso tener en cuenta:

- Proteger la cabeza del instrumento mediante una tapa.
- Garantizar la unión entre los anclajes y el terreno.
- La resolución del instrumento debe ser de 0,01 mm.
- La instalación de un punto de monitoreo de desplazamiento (numeral 6.8.4.1) en la cabeza del instrumento, permite determinar la ubicación exacta y lectura cero del instrumento inmediatamente después de su instalación.

6.8.4.3 Extensómetros y deformímetros (*strain gauges*)

6.8.4.3.1 Deformímetros

Son utilizados para medir deformaciones en el concreto neumático (o hidráulico).

El rango mínimo de medición tiene que ser de 1% para compresión y 2% para tracción. Los instrumentos deben tener compensación por temperatura; la resolución de las lecturas debe ser +/- 0,01%; y el sistema debe tener una precisión mínima de +/- 1%.

6.8.4.3.2 Extensómetro de cuerda vibrante y de fibra óptica

Son utilizados para determinar cambios de longitud a lo largo de una línea de medición. La resolución de las lecturas debe ser de +/- 0,01% y se requiere que el sistema tenga una precisión mínima de +/- 1%.

6.8.4.3.3 Extensómetro de fibra óptica

Son utilizados para determinar cambios de longitud a lo largo de una línea de medición. Los extensómetros de este tipo son afectados por los cambios de temperatura, razón por la cual es necesario documentarla antes de cada lectura.

La precisión mínima de este tipo de instrumentos depende de su aplicación:

- Para el monitoreo de elementos estructurales (concreto hidráulico/neumático, pernos, etc.) se requiere una precisión mínima del sistema de 1 μm/m.
- Para el monitoreo de cambios en el terreno se requiere una precisión mínima del sistema de 1 mm/m.

6.8.4.3.4 Instalación

Es necesario que los extensómetros y los deformímetros estén embebidos totalmente dentro del concreto (hidráulico/neumático) o del terreno, y los cables externos deben estar protegidos contra daños —se debe registrar su localización—.

6.8.4.4 Medición de orientación y localización de discontinuidades

6.8.4.4.1 Mapeo manual y por medio de modelos digitales

El mapeo geológico permite identificar estructuras relevantes en el terreno. Este se puede hacer mediante el uso de brújulas geológicas (se recomienda la utilización de brújulas con el sistema Clar) o mediante el desarrollo de un modelo digital por fotogrametría digital o tecnología LiDAR. La implementación de modelos digitales presenta ventajas en cuanto a seguridad y mediciones en áreas inaccesibles.

6.8.4.4.2 Requerimientos

El instrumento (brújula) para el mapeo manual debe tener una precisión de 1º para la medición del rumbo/azimut de buzamiento ("*dip direction*") y de 2-3º para el buzamiento ("*dip*"). Es necesario evitar la presencia de elementos metálicos o con cargas magnéticas durante la medición.

Para el mapeo por medio de modelos digitales, la resolución depende del área que se requiere mapear. Como referencia en cuanto resolución, se toma un valor de 5

mm/pixel para un área de 60m^2, tanto para los modelos por fotogrametría digital como para los modelos LiDAR.

6.8.4.5 Piezómetros

La presión de poros se puede monitorear utilizando excavaciones de observación o piezómetros de tubo abierto, neumáticos o de cable vibratorio. Con base en su experiencia, el ingeniero geotecnista está obligado a justificar el uso de piezómetros dependiendo de las condiciones propias del sitio de construcción.

Piezómetro de tubo abierto: perforaciones abiertas donde se instala un tubo de PVC perforado en la base. Generalmente, la lámina de agua se puede medir por medio de sensores o de una sonda. Se requiere de una cubierta de protección que impida la entrada del agua lluvia, Ver Ilustración 6-33.

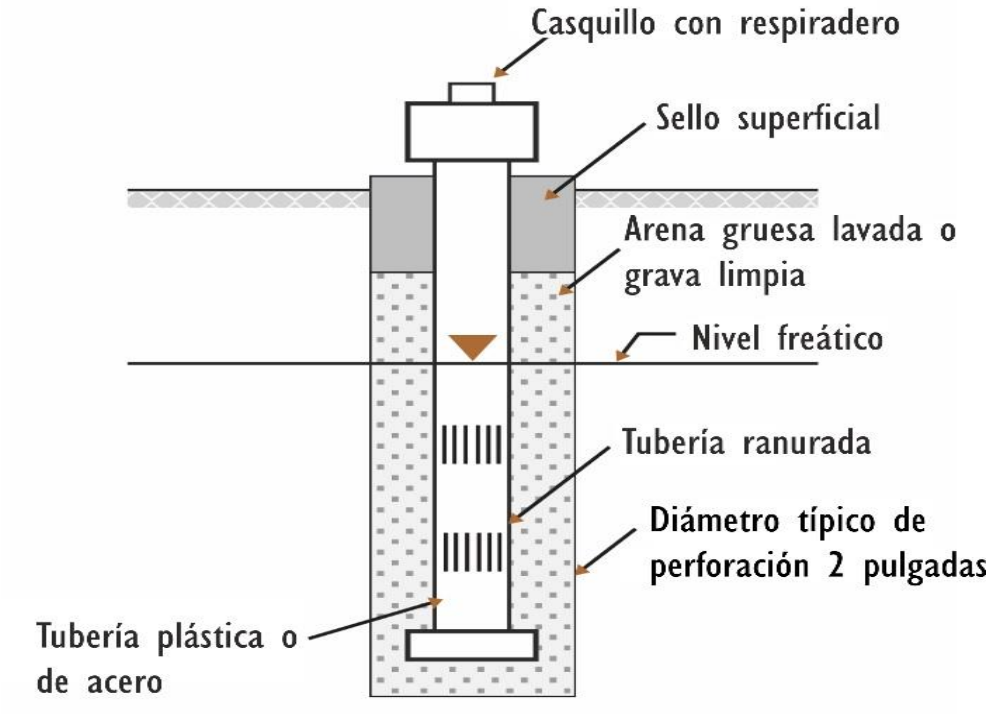


Ilustración 6-33. Esquema de instalación del piezómetro de tubo abierto

Piezómetro de cabeza abierta: por lo general, se diseñan con un material poroso de polietileno de alta densidad ensamblado en un tubo de PVC. Son útiles para unas lecturas a profundidades establecidas según los requerimientos del diseñador, Ver Ilustración 6-34.

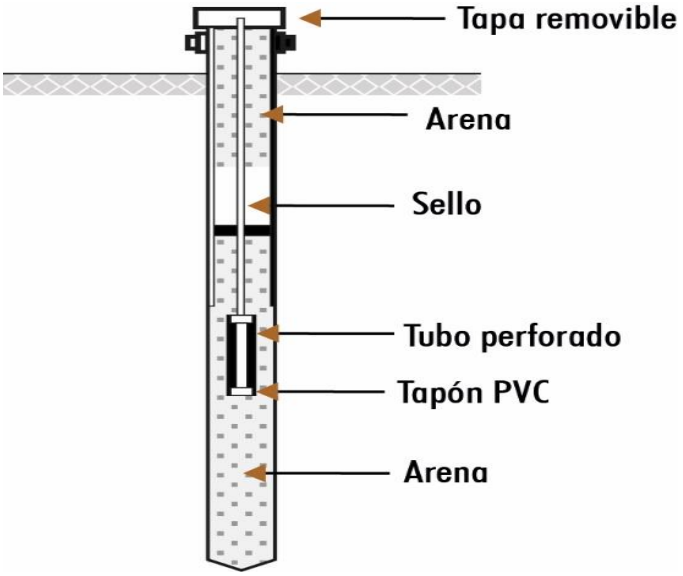


Ilustración 6-34. Esquema de instalación del piezómetro de cabeza abierta

Piezómetro neumático: incluye un transductor que convierte los cambios de presión en cambios en un manómetro. El transductor detecta el nivel de agua por el cambio de presión en el diafragma, Ver Ilustración 6-35.

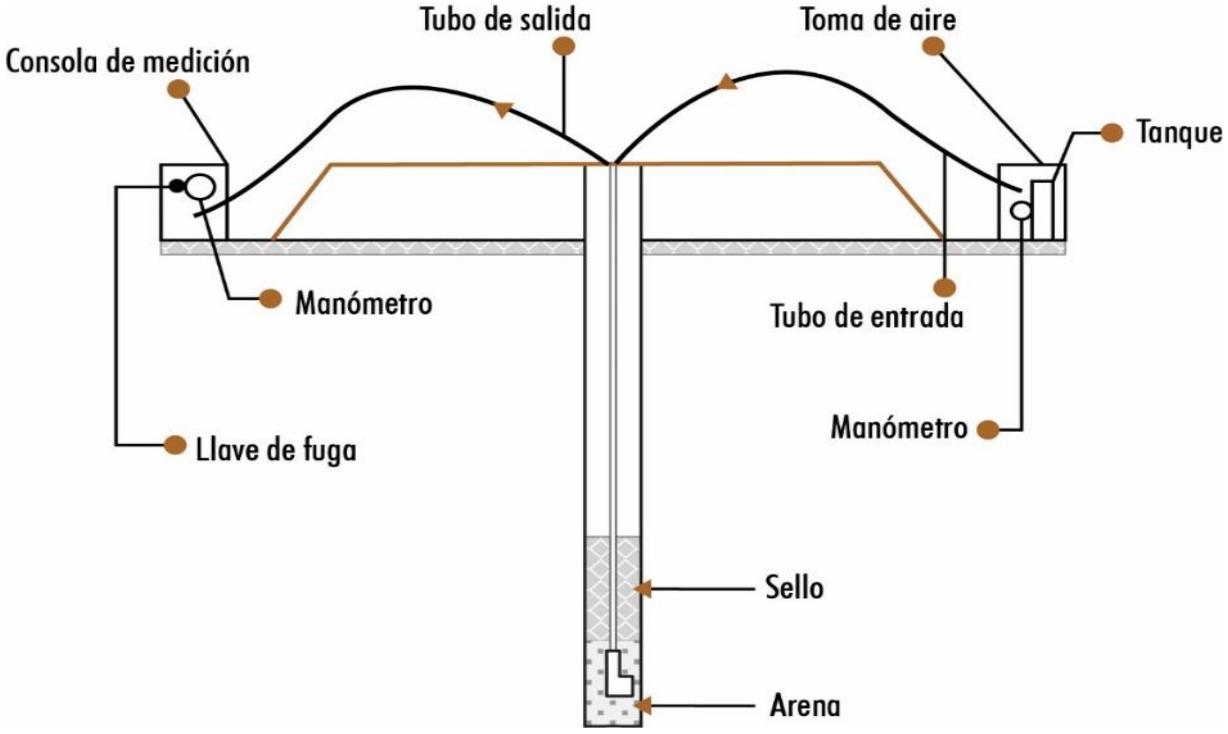


Ilustración 6-35. Esquema de instalación de piezómetro neumático

Piezómetro eléctrico o de hilo vibrátil: similar al piezómetro neumático, con la excepción de que el transductor convierte los cambios en el nivel de agua en señales eléctricas que son enviadas la superficie a través de un cable.

6.8.4.5.1 Instalación y requerimientos

- No se permite la instalación en el fondo del sondeo.
- Los piezómetros están provistos de un material filtrante. El fondo de pozo debe llenarse de un material filtrante y posteriormente se le instalará un sello impermeable (bentonita o polímeros expandibles) cuya longitud debe estar comprendida en un intervalo entre 0,30 m y 0,70 m. Es necesario que el extremo inferior esté ranurado o perforado en una longitud igual o mayor a 0,60 m. La totalidad (100%) del material filtrante tiene que pasar por el tamiz de 0,85 mm (No. 20), y quedar completamente retenido (100%) en el tamiz de 0,425 mm (N° 40).
- La longitud de la perforación se puede llenar con una mezcla de cemento y bentonita. El extremo superior del piezómetro debe estar provisto de una tapa protectora.
- Se debe evaluar la correcta función de los piezómetros instalados mediante ensayos de carga hidráulica variable.
- No se permite la instalación de más de un piezómetro por perforación, excepto para piezómetros de hilo vibrante.

6.8.4.6 Clinómetro y electro niveles

Este tipo de instrumentos permite medir cambios en la inclinación. Su uso es recomendado para el monitoreo de estructuras superficiales. La precisión debe estar entre 0,005 y 0,05 mrad, dependiendo del rango de medición.

6.8.4.7 Célula de carga para anclajes

Estas células se utilizan en anclajes con tensionamiento. La medición se realiza por medio de células hidráulicas o células eléctricas. La precisión para el sistema hidráulico debe estar en el rango +/- 1% de la capacidad de la celda, y para sistemas electrónicos, de +/- 0,5%.

6.8.4.8 Inclinómetros

Mediante la lectura de deflexiones angulares se determina el movimiento del terreno.

Para túneles con baja cobertura, se requiere que la perforación esté orientada de forma perpendicular o paralela a la excavación. La instalación del inclinómetro tiene que estar acompañada de un punto de monitoreo de desplazamiento (numeral 6.8.4.1).

La resolución de las lecturas debe ser de +/- 0,02 mm por cada 5 m de longitud, con un rango de medición de +/- 30º. La precisión del sistema debe ser mínimo de 1 mm por cada 10 m de longitud.

6.9 Medidas de soporte

El diseño de los sistemas de soporte se realiza evaluando el comportamiento del terreno a lo largo de los tramos de túnel; de esta manera se determinan los requerimientos constructivos que se anticipan durante la construcción. En líneas generales, los sistemas de soporte a utilizar se seleccionan buscando permitir la deformación controlada de la excavación para reducir los esfuerzos generados por el terreno, con una utilización eficiente del terreno circundante y los elementos de soporte. Para el dimensionamiento de los elementos de soporte se recomienda usar los siguientes factores de seguridad respecto a la resistencia de cada elemento.

Tipo de análisis	Permanente	Temporal
Estático	1,5	1,3
Seudoestático y/o dinámico**	1,05	1,00*
* Para el análisis temporal se asume el 50% del valor de la aceleración horizontal pico efectiva (Aa)		
** Cuando aplique (p.e. portales).		

Tabla 6-19. Factores de seguridad para elementos de soporte

A continuación, se describen brevemente algunos de los elementos de soporte y se dan lineamientos sobre los mismos;

6.9.1 Concreto lanzado

Para el diseño del concreto lanzado, a emplearse como elemento de soporte en un túnel u obra subterránea, es preciso tener en cuenta los aspectos y requerimientos relacionados en el numeral 6.5.2.5.

Como se dijo, el concreto lanzado es concebido como un elemento de soporte, y se coloca de manera tal que pueda adherirse con facilidad a la superficie del contorno de la excavación del túnel. La resistencia temprana, característica de este elemento, se alcanza por medio de acelerantes junto con otros aditivos y constituye uno de los elementos a tener en cuenta durante el diseño.

Se tiene que dar cumplimiento al desarrollo de la resistencia que se presenta en la Ilustración 6-36. Los concretos neumáticos con desarrollo característico de su resistencia entre las curvas “B” y “C” hacen parte de la categoría *concreto neumático para túneles 1* (CN_{Tun1}). Los concretos neumáticos por encima de la curva “C” son denominados *concreto neumático para túneles 2* (CN_{Tun2}). La curva “B” delimita los requerimientos mínimos para el concreto neumático en túneles. La utilización de CN_{Tun2} se recomienda para situaciones especiales (*p.e.* altos caudales de infiltración, requerimientos especiales de capacidad de carga).

Para el cálculo estructural del elemento se debe utilizar un factor de reducción de la resistencia de (flexión ϕ_c=0,90, tensión y cortante ϕ_c=0,75, compresión ϕ_c=0,75) [122].

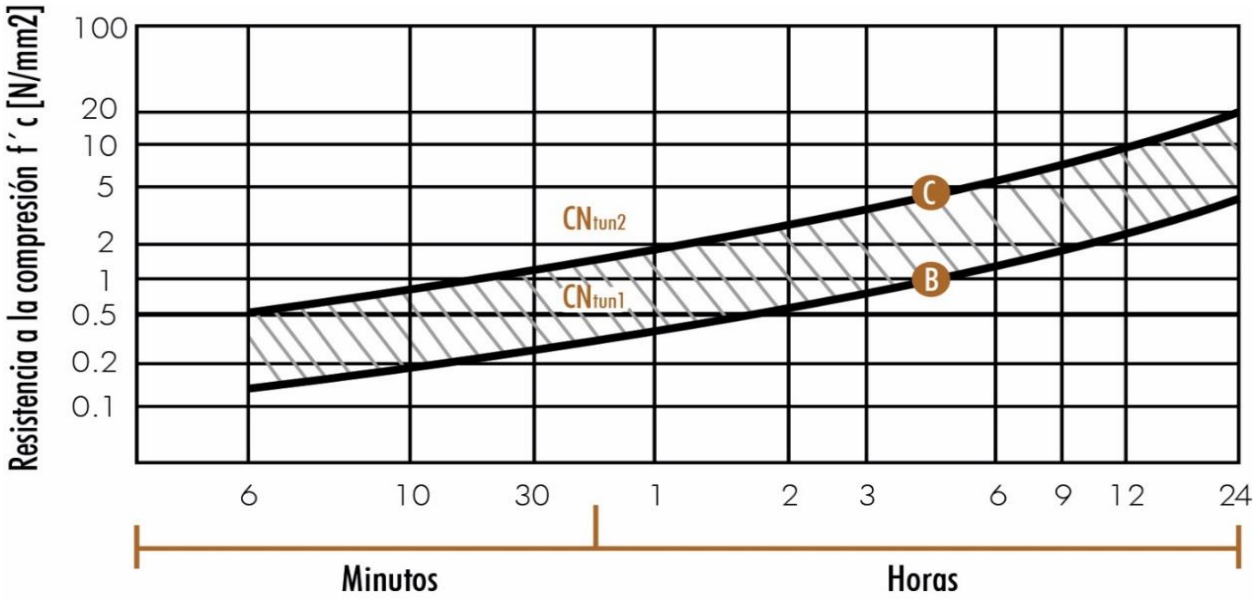


Ilustración 6-36. Desarrollo de la resistencia del concreto neumático para túneles

6.9.2 Pernos de anclaje

El diseño de este tipo de elementos, al igual que cualquier medida de soporte, debe estar encaminado a solucionar un problema de estabilidad específico (control de cuñas, homogenización del terreno, desplazamientos por corte a lo largo de discontinuidades, etc.).

Los pernos, en su forma más simple y ampliamente difundida en el país, son elementos de soporte que están compuestos esencialmente por: a), una varilla de acero corrugada, que se inserta en el hueco perforado para tal fin; b), un elemento de anclaje (mortero o resinas epóxicas) que permite integrar la varilla con el terreno; y c), una cabeza, compuesta por una platina y una tuerca, que integra el perno al sistema y permite el desarrollo de las propiedades mecánicas. Existe una amplia variedad de tipos de pernos (pernos autoperforantes, de fricción, *swellex*, etc.), con ventajas y desventajas, enfocados a funciones específicas dentro del sistema de soporte.

El diseñador es libre de seleccionar el tipo de perno que considere adecuado. El diseño debe incluir el tipo de perno (especificaciones), longitud y orientación de instalación. Principalmente, los pernos reducen los desplazamientos entre discontinuidades o fracturas, aumentan la resistencia del terreno y reducen el desarrollo de nuevas fracturas.

Para el cálculo estructural del elemento se utiliza un factor de reducción de resistencia [122]:

- Para pernos: ϕ_b = 0,95 en carga a tensión
- Para la lechada: ϕ_f = 0,85 en carga a flexión

6.9.3 Arcos metálicos o reticulados

Es necesario diseñar los arcos metálicos o reticulados con base en las condiciones del terreno, el efecto esperado, el método constructivo y la eficiencia económica.

Teniendo en cuenta que los arcos son elementos de soporte que se ajustan contra las superficies del túnel excavado, las especificaciones de construcción deben exigir que dicho elemento haga contacto con el terreno, para contribuir con la estabilización de la excavación hasta que la resistencia del concreto lanzado se desarrolle completamente. Cabe resaltar que este tipo de elementos proporciona resistencia inmediata en contraste con el concreto lanzado y los pernos, los cuales desarrollan su resistencia con el tiempo.

Teniendo en cuenta los aspectos mencionados, el diseño tiene que suministrar aspectos como dimensiones, materiales, forma y espaciamiento. Dado que por lo general los arcos/cerchas se usan en combinación con el concreto lanzado y los pernos, es obligatorio evaluar la compatibilidad de deformaciones de la combinación de estos elementos de soporte.

Para el cálculo estructural del elemento se debe utilizar un factor de reducción de la resistencia: flexión ϕ_c=0,90, tensión y cortante ϕ_c=0,75, compresión ϕ_c=0,75 [122].

6.9.4 Elementos dúctiles

Normalmente, los túneles en terrenos pocos competentes (*p.e.* fallas, rocas débiles) y con coberturas altas, normalmente presentan desplazamientos altos; bajo estas condiciones, la adopción de sistemas rígidos requiere una capacidad de carga muy elevada. Los elementos dúctiles se incorporan dentro del sistema de soporte, permitiendo el control de deformaciones y la disipación plástica de esfuerzos en la estructura de concreto neumático.

El diseño de estos sistemas tiene que prestar especial atención a la tasa de avance, e involucrarla con la curva de desarrollo de resistencia del concreto neumático [125].

6.9.5 Métodos auxiliares

A continuación se describen de forma sucinta los principales métodos auxiliares —mejoramiento y refuerzo del terreno, y abatimiento (desecación)— con referencia a la clasificación de la International Tunnelling Association (ITA) [124].

6.9.5.1 Mejoramiento del terreno

Con su aplicación, este método auxiliar busca mejorar las propiedades mecánicas e hidráulicas del terreno. Generalmente, las técnicas de mejoramiento del terreno se realizan de manera alternada con la excavación y, por lo tanto, generan interrupciones o actividades adicionales dentro de los ciclos de excavación.

Para casos especiales, la mejora del terreno puede desarrollarse de dos formas: desde la superficie, o a través de túneles piloto afuera de la sección transversal del futuro túnel. En algunos casos se realizan los trabajos de post-inyección de forma simultánea con las labores de excavación y soporte del túnel.

Foto 6-5. Impermeabilización para revestimiento definitivo, túnel Mulatos

6.9.5.1.1 Inyecciones

Las diferentes técnicas de inyección son de consolidación (para cierre de fisuras), a presión y, de compensación. En la excavación del túnel, la inyección puede realizarse hacia adelante del frente de excavación (preinyección), o como una inyección radial desde el túnel excavado (postinyección), o desde un túnel piloto. Aunque el cemento es el material más usado en esta labor, en algunos casos especiales se aplican también productos químicos como resinas o espumas, para tener en cuenta el cuidado del ambiente y las restricciones de seguridad existentes.

6.9.5.1.2 Inyección de consolidación mediante la utilización del método *jet grouting*

Generalmente, la inyección de consolidación mediante el método *jet grouting* es aplicada en forma horizontal, o con un ligero ángulo hacia arriba o hacia abajo, desde el frente de excavación. Es posible mejorar la clave construyendo columnas a partir de una o más capas de inyección, en etapas, de acuerdo con las operaciones de excavación.

Con base en su experiencia, el diseñador determina el método a implementar para cada caso particular, sustentándolo por medio de cálculos analíticos y/o numéricos. Se permite el uso de obturadores tipo *packer*/*packer* inflable y mecánico; y se recomienda que la presión de inyección sea menor que la de inflado del obturador para evitar la fuga de lechada.

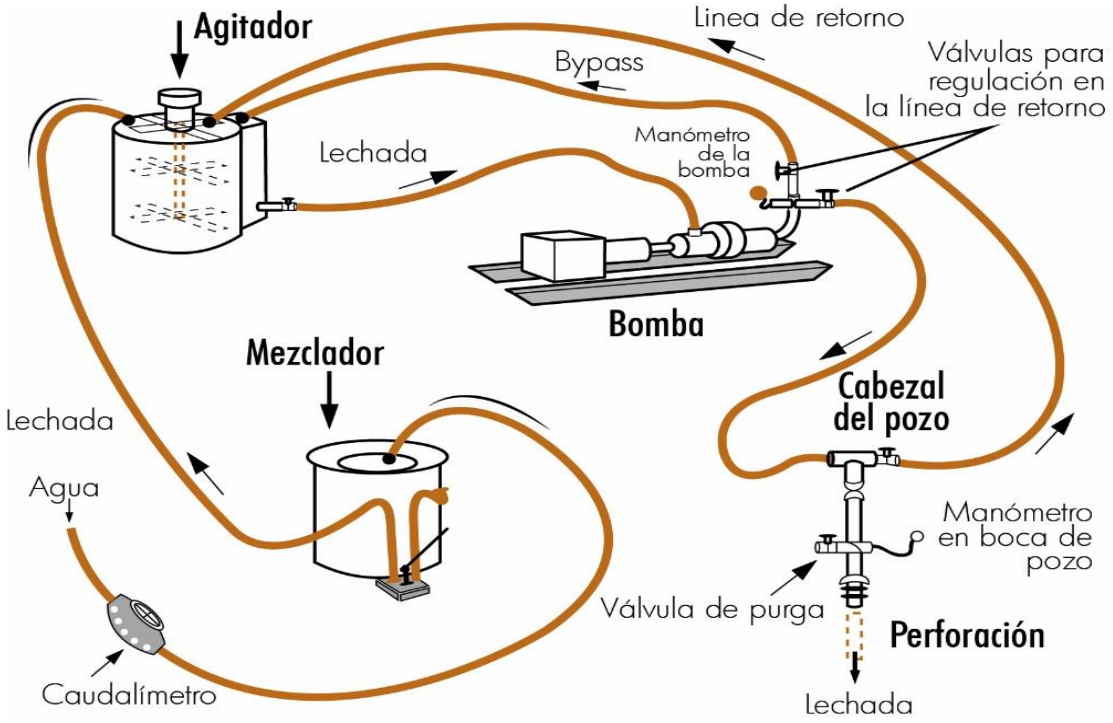


Ilustración 6-37. Sistema general de inyecciones

El método de diseño Grouting Intensity Number (GIN) [127-129] es recomendable, aunque es válido el uso de otros métodos analíticos o empíricos. Se requiere el análisis de los efectos de la inyección sobre el macizo rocoso y su validación a través de ensayos de laboratorio *o in situ.* Para evaluar este incremento, se recomienda realizar ensayos de compresión inconfinada. Posteriormente, se implementarán en modelos analíticos o numéricos, que permitan ajustar las estimaciones que se realizaron por el método GIN o cualquier otro método utilizado. Esto se adjuntará al reporte geotécnico del diseño como una memoria de cálculo.

Durante la construcción, se sugiere en principio efectuar los ensayos de inyección con lechadas muy cohesivas (espesas) y optimizar (bajar) la cohesión (fluidez) en cada ciclo de inyección, para evitar con ello el gasto excesivo de la lechada. Para simular un material con inyecciones se requiere utilizar un factor de reducción de la resistencia de ϕ_b=0,75, el cual se aplicará solo al incremento de resistencia generado por las inyecciones [122].

6.9.5.1.3 Congelamiento del terreno (*ground freezing*)

Las técnicas de congelamiento empleadas para la impermeabilización y la estabilización temporal del terreno se dividen en:

- *Técnica de congelamiento de secciones continuas*, que proporciona capacidad de carga en el largo plazo. Se aplica a lo largo de la sección superior y los límites laterales de la excavación. En algunos casos se aplica en la solera. Contempla la perforación de un sistema de tuberías que permite bombear líquido congelante.
- *Técnica de congelamiento local temporal* en áreas cercanas al frente de excavación, o en la periferia de túnel. Se realiza a través de inyecciones de fluido líquido que proporcionan congelamiento inmediato en las zonas locales.

Para la congelación por nitrógeno líquido, el refrigerante (gas comprimido en estado líquido que debe estar a -196 ºC) se libera a la atmósfera tras recorrer los conductos de congelación. En el caso de la congelación por salmuera, el refrigerante (salmuera de cloruro sódico) se bombea a través de los conductos de congelación a una temperatura de −30/−35 ºC. Se recomienda realizar un análisis comparativo de costos con otros métodos de mejoramiento de terreno.

6.9.5.2 Refuerzo del terreno

Los métodos aplicados en el refuerzo del terreno permiten insertar elementos estructurales con una dimensión predominante; por lo general, son instalados cuando la clave es inestable y tiende a colapsar al llevar a cabo el avance de la excavación. Los principales métodos para reforzar el terreno son paraguas de tubos, pernos en el frente de excavación y pernos radiales a partir de excavaciones piloto.

6.9.5.2.1 Paraguas de tubos (enfilajes)

Los paraguas de tubos se emplean para reforzar el área adelante del frente de excavación y para controlar la sobreexcavación, principalmente en la clave, y en algunos casos, en las paredes. Sirven para proteger hacia adelante la excavación y, de manera preventiva, el frente inmediatamente después de la misma. Se evita que el material alterado se desprenda.

El refuerzo se realiza por medio de tubos instalados y orientados en el sentido de la excavación, los cuales son instalados alternadamente por etapas con la excavación. Es necesario que el traslapo del tubo sea calculado (se recomienda traslapar por lo menos el 30 % de la longitud del tubo). En algunos casos se realizan inyecciones de consolidación y/o impermeabilización a través de los tubos, en lo general se deben utilizar tubos autoperforantes, con el fin de garantizar su instalación en toda su longitud, el espaciamiento radial entre los tubos y su inclinación la cual no debe ser superior a cinco grados.

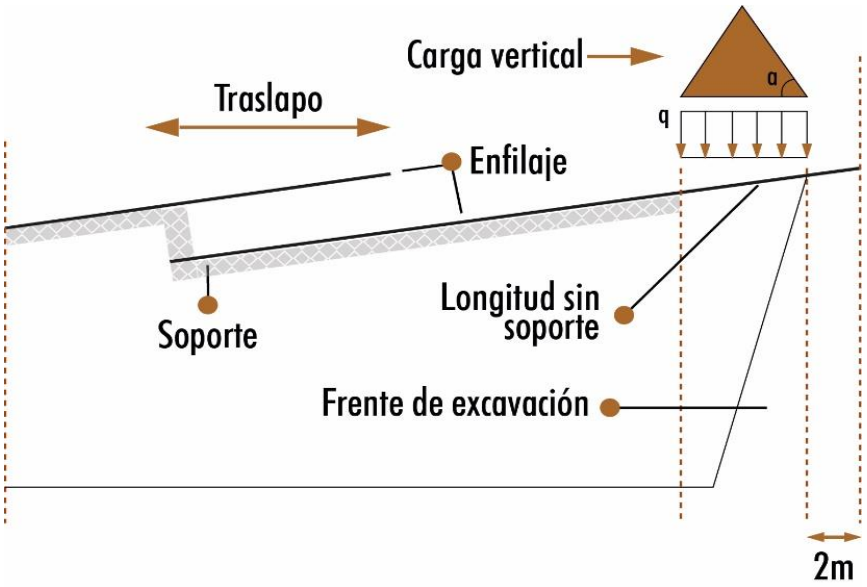


Ilustración 6-38. Cálculo de sistema de enfilaje como una viga simplemente apoyada

El diseño del sistema de enfilajes se podrá realizar de dos maneras: a), por medio de métodos numéricos en tres dimensiones [128]; o b), como viga simplemente apoyada, cuya longitud total será la suma de longitud de avance de excavación sin soporte y una extensión adicional de 2 m (Ilustración 6-38). La verificación, a su turno, está obligada a cumplir los factores establecidos por la NSR-10 para carga axial, fuerza cortante, momentos flectores y deformaciones. Además, en túneles con bajas coberturas, es preciso verificar la resistencia del enfilaje por el método del silo o chimenea (Ilustración 6-39). Para el cálculo estructural del elemento se recomienda utilizar un factor de reducción de la resistencia de $\phi b=0,95$ [122].

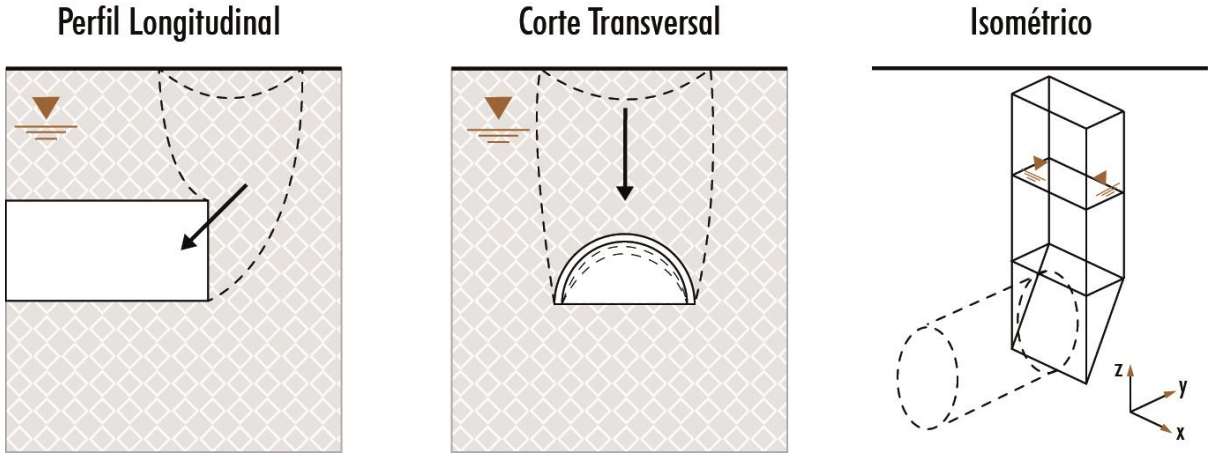


Ilustración 6-39. Visualización del análisis de silo o chimenea

6.9.5.3 Pernos (*spilling*) hacia adelante

También conocidos como “atices”, consisten en barras de acero que se instalan durante el ciclo de la excavación, en etapas predefinidas, en el sentido del eje del túnel; permanecen en el terreno proporcionando estabilidad temporalmente, tanto en la clave del túnel, como en el área próxima al frente de excavación. Los pernos perforados (lechados) permiten mejorar las condiciones del terreno. Con la inyección a través de ellos se alcanza una óptima adherencia al terreno.

Al instalar los pernos (*spilling*) sobre el primer arco de acero hacia adelante, su longitud tiene que ser 1,5 veces tan larga como la longitud del siguiente avance. Según el tipo de terreno, estos pernos pueden estar encamisados, hincados o instalados a través de perforaciones previamente ejecutadas. Se debe verificar la condición estructural similar a una viga simplemente apoyada, tal como se estableció en el numeral 6.9.5.2.1.

6.9.5.4 Instalación de pernos en el frente de excavación del túnel

Para la estabilización o refuerzo del frente, frecuentemente son necesarios los pernos en el frente de excavación. De acuerdo con la estabilidad, se debe definir en el diseño qué tipo de perno es pertinente y cuál debe ser su longitud. Aunque los pernos locales pueden ser suficientes para el control de caída de rocas, en terrenos como rocas/suelos sometidos a altos esfuerzos es posible que se necesite un número considerable de pernos —metálicos o en fibra de vidrio— de gran longitud, traslapados e instalados sistemáticamente. El diseño tiene que realizarse por medio de métodos analíticos o simulaciones numéricas en 3 dimensiones, y se requiere, como mínimo, la verificación por el método del silo.

Para garantizar la adecuada distribución del esfuerzo de los pernos en el frente del túnel es necesario usar platinas alargadas (que pueden ser recicladas de los perfiles usados como sostenimiento) (Ilustración 6-40).

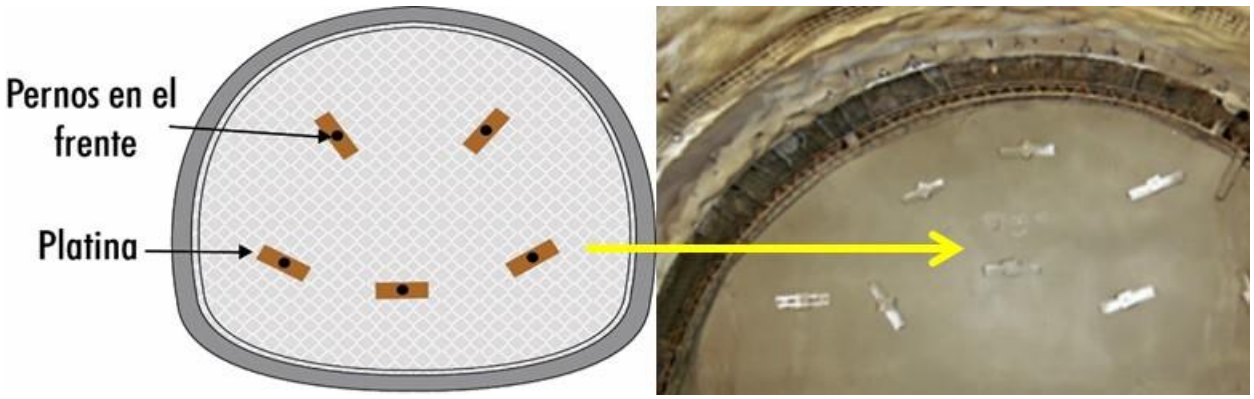


Ilustración 6-40. Distribución de pernos en el frente de excavación

6.9.5.5 Abatimiento y drenaje

En algunos casos, la construcción del túnel solo es posible con la aplicación de medidas especiales de abatimiento del agua presente. De acuerdo con las condiciones de terreno y las condiciones de frontera, pueden ser usados pozos convencionales, verticales u horizontales, o drenajes por vacío. En el diseño de las medidas de drenaje

deben tenerse en cuenta los requerimientos medioambientales, como los límites en el abatimiento de la tabla de agua, y las restricciones en cuanto a asentamientos.

Todos los caudales captados dentro del túnel tienen que ser conducidos hacia los filtros laterales de este. La definición de los puntos de captación se define en obra durante la excavación.

Las medidas de abatimiento demandan una evaluación especial de los siguientes aspectos, que forman parte del estudio hidrogeológico (numeral 5.3):

- Impactos ambientales al acuífero y el plan de manejo de los mismos.
- Implicaciones al recurso hídrico subterráneo de las obras de abatimiento y drenaje.
- Medidas de mitigación, prevención, corrección y compensación por el abatimiento del nivel freático.

Durante las campañas de abatimiento y drenaje se debe evaluar el fenómeno de subsidencia considerando:

- Condición de flujo de agua
- Línea del perfil estimado de abatimiento del nivel freático
- Área de influencia

El fenómeno se evalúa para tres escenarios: sin obra y etapas de construcción y operación.

6.9.5.5.1 Monitoreo continuo

Las campañas de abatimiento y drenaje tienen que estar acompañadas por un monitoreo de los niveles piezométricos, de la calidad y de la cantidad de agua subterránea infiltrada, que permita la evaluación de los impactos de la campaña y la calibración de los modelos hidrogeológicos en condiciones transitorias.

Cuando el proyecto incluya campañas de abatimiento, es obligatorio incluir el monitoreo continuo del abatimiento del nivel freático o piezométrico en el plan de seguridad geotécnica para construcción (numeral 6.6 y numeral 5.3). Este se basa en el modelo numérico hidrogeológico - MNH y debe incluir todos los requerimientos descritos dentro del numeral 6.6. El monitoreo debe iniciarse por lo menos 6 meses antes del inicio de la etapa de construcción y extenderse hasta la etapa de operación del proyecto. Los límites y medidas de contingencia deben estar claramente definidos en el plan señalado.

6.10 Revestimiento definitivo en túneles y galerías

6.10.1 Generalidades

La infraestructura de transporte que se construya en el país deberá atender a criterios y estándares de calidad, oportunidad, seguridad y visión de cero muertes en accidentes, conforme lo establece la Ley 1682 de 2013, por lo tanto, el diseño del revestimiento de túneles debe considerar todos aquellos aspectos estructurales y de seguridad, que orienten a preservar la vida de los usuarios de la vía.

El diseño del revestimiento se debe desarrollar bajo un solo lineamiento normativo, la seguridad, conservando la filosofía de la protección contra incendios, como condición esencial de seguridad física en espacios subterráneos, por tal motivo, el control contra incendio debe establecer todos aquellos factores de diseño que garanticen la operación segura del túnel, para esto, se deben considerar entre otros parámetros, las curvas de temperaturas que correspondan con la caracterización de riesgos, estableciendo las normas aplicables al entorno general del diseño, sin limitarse, a la norma NFPA 502, en todo caso, en ninguna circunstancia será admisible tomar requisitos parciales de una norma, por ejemplo, utilizar parcialmente componentes de diferentes orígenes de estándares (norma americana con norma europea), los estándares adoptados deberán ser contemplados íntegramente dentro del proceso de diseño.

El revestimiento definitivo se diseñará de tal manera que cumpla con el propósito de seguridad deseado cuando el túnel se esté construyendo y cuando esté operando, es decir, a corto, mediano y largo plazo, por ende, es importante que el diseño y construcción del revestimiento del túnel, cuente con los estudios y soportes técnicos suficientes, bajo ineludibles parámetros de sostenibilidad ambiental, durabilidad, seguridad, protección contra incendio, gestión del riesgo, eficiencia energética y economía a lo largo de la vida útil del túnel, que garantice al operador del túnel la inspección del contorno (permanente y programada) [236]; en términos generales, garantice a los usuarios de la vía, seguridad continua movilidad, comodidad y confort.

Los proyectos de infraestructura se deben diseñar y desarrollar con los más altos criterios de sostenibilidad ambiental, conforme lo indica la Ley 1682 de 2013, especialmente para la protección de los recursos naturales, como el agua; por ende, el Instituto Nacional de Vías INVIAS lo estipula en la política de sostenibilidad, desarrollando importantes propuestas de optimización del recurso hídrico en los proyectos de infraestructura de transporte, principalmente en túneles, de manera que los proyectos incluyan alternativas efectivas de recuperación de aquellas fuentes de agua, que por cuenta de la construcción se vean afectadas de alguna manera, por tal motivo, el revestimiento del túnel debe cumplir una labor fundamental en términos de sostenibilidad.

De igual manera, las especificaciones técnicas constructivas, los materiales, los procedimientos y los procesos seleccionados para el desarrollo de los proyectos, deben corresponder con los siguientes criterios:

- Productos y materiales normalizados y certificados, que ofrezcan protección y durabilidad.

- Procesos estandarizados y comprobados, según normas aplicables y desarrolladas para la protección contra incendios y la seguridad.
- Procesos y productos sostenibles.

Como se ha dicho en el manual, la inclusión de nuevas tecnologías es admisible, sin embargo, estas deben ser comprobadas y certificadas técnicamente, para que sea permitida como viable en los diseños (el revestimiento definitivo no admite pruebas, dada su connotación de seguridad).

En todo caso, los productos especificados deberán obedecer a normas reconocidas y la certificación deberá realizarse por un tercero independente, no es admisible la auto certificación dada la criticidad de estos productos para la seguridad de los túneles y, por ende, la de los usuarios de la vía.

Adicionalmente, es fundamental garantizar la coherencia de los diseños de revestimiento del túnel para que todos los componentes de protección contra incendios se puedan desarrollar bajo el marco normativo aplicable, garantizando altos estándares de seguridad para los usuarios. En ningún caso se podrá iniciar la construcción del revestimiento, hasta tanto las condiciones de protección contra incendios no se hayan definido por completo y diseñadas las previsiones para la instalación protegida de los componentes físicos necesarios (canalizaciones en hastiales, protección de cableado y redes, instalaciones y sistemas que deban ser embebidos en el revestimiento).

Los túneles deben ser durables, se insiste en el diseño y construcción de un revestimiento económicamente viable a lo largo de la vida útil del túnel, toda vez que la práctica ha enseñado que, solo reparar parcialmente el revestimiento de un túnel cuando está en servicio, es una operación compleja, costosa, dispendiosa e insegura, máxime si son reparaciones de mayor nivel, lo cual afecta de manera importante a los usuarios de la vía y la economía de la región [239], generando también sobrecostos significativos en la operación del túnel, los cuales deben ser cuantificados desde la fase de diseño y por ello, el revestimiento debe diseñarse para brindar durabilidad, evitando en lo posible, tener que realizar reparaciones, reemplazos y mantenimientos injustificados durante la vida útil del túnel (100 años).

6.10.2 Configuración para el revestimiento definitivo

Colombia está ubicada en una zona con alto riesgo de sismicidad, alto índice de pluviosidad y tres cordilleras que la atraviesan (con páramos y ecosistemas variados), lo cual dificulta grandemente la movilidad entre los principales centros de producción y consumo, por tal motivo, se requieren túneles que garanticen la seguridad de los usuarios de la vía, en óptimo nivel de servicio, túneles con elevada vida útil y que sean proyectos ambientalmente sostenibles.

Se ha considerado que los túneles excavados en roca competente no requieren de revestimiento, sin embargo, la roca a la vista sin soporte primario, sumado a la presencia de agua por afloramientos, deteriora prematuramente la estructura del túnel, generando en el tiempo, condiciones de riesgo que afectan la seguridad de las

personas y el nivel de servicio de las vías, por lo tanto, se recomienda que los túneles sean revestidos por seguridad y vida útil.

El revestimiento busca garantizar la estabilidad estructural del contorno del túnel, la impermeabilización y la seguridad desde la construcción y durante la operación, en condiciones de ventilación, iluminación, visibilidad, transitabilidad, estanqueidad, señalización y sostenibilidad ambiental.

En Colombia se pueden evidenciar túneles sin revestimiento y túneles con diferentes tipos de revestimiento [239], los cuales se pueden agrupar de la siguiente manera (ver también Ilustración 6-41):

- Revestimiento de capa sencilla (RCS): esta configuración no emplea un sistema de impermeabilización (capa impermeable). Está compuesto por una o varias capas de concreto neumático y su aplicación se limita para túneles con bajas infiltraciones y con longitudes inferiores a 700 m.
- Revestimiento de capa compuesta (RCC): consiste en la implementación de una capa de material impermeabilizante a la vista. instalada sobre la(s) capa(s) de concreto neumático.
- Revestimiento de capa doble (RCD): consiste en la implementación de una capa de material impermeabilizante intermedia entre el concreto neumático de del soporte primario y la estructura de revestimiento definitivo en concreto hidráulico fundido in-situ.

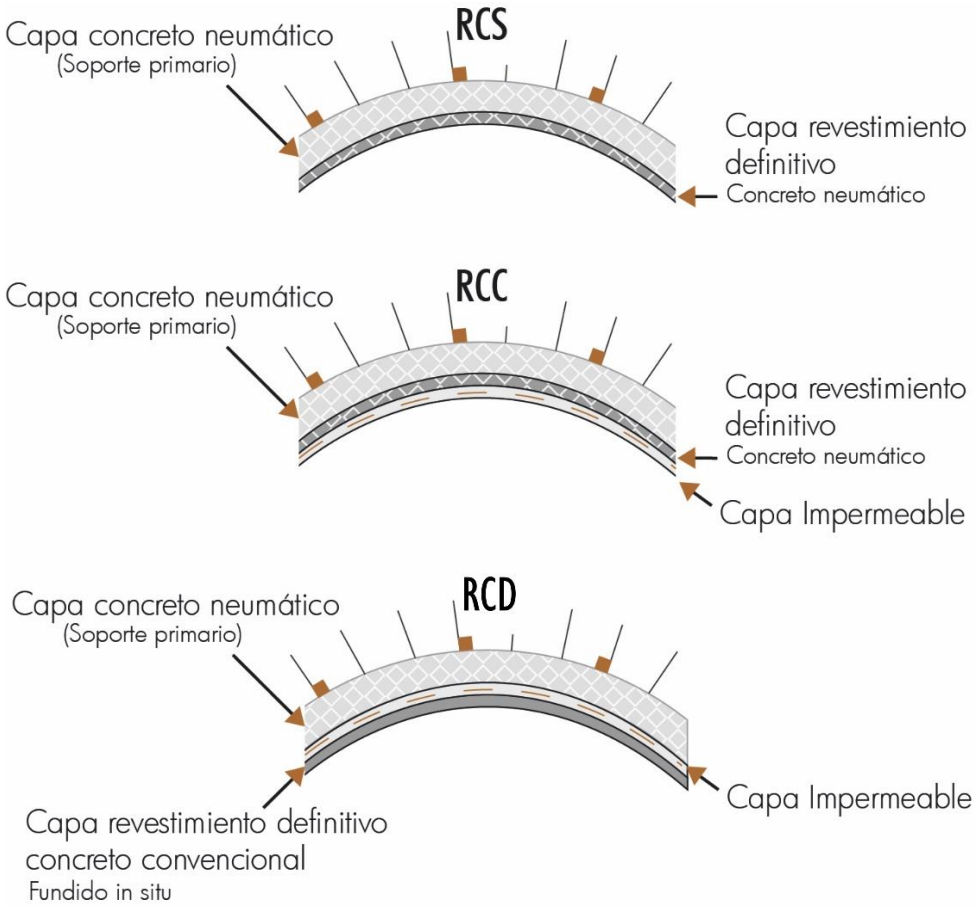


Ilustración 6-41. Configuración de revestimiento definitivo

El diseño y construcción de Revestimiento de Capa Doble RCD en los túneles de Colombia, es el más habitual y dónde se ha obtenido la mejor experiencia, aunque se conocen diferentes sistemas con el uso de concreto lanzado con buenos resultados a corto plazo, a mediano y largo plazo presentan dificultades de seguridad física, no alcanzan a garantizar la resistencia al fuego, cuando se agrieta la clave y las paredes, se presentan desprendimientos de concreto con evidentes consecuencias para los usuarios de la vía, agravado cuando se impide la visibilidad e inspección del contorno del túnel para anticipar los esperados desprendimientos de roca.

6.10.3 Fundamentos de diseño del revestimiento definitivo

En Colombia, se deben diseñar y construir los túneles mediante el sistema de Revestimiento definitivo de Capa Doble (RCD) para túneles nuevos, independiente del tipo de túnel o de las condiciones geológicas del proyecto y para túneles antiguos que presenten problemas estructurales; el cual consiste en la implementación de una capa de material impermeabilizante, intermedia entre el concreto neumático del soporte primario, y la estructura de revestimiento definitivo en concreto hidráulico fundido *in situ* (Ilustración 6-41).

Desde el punto de vista estructural, las medidas de soporte (soporte primario), empleadas en el túnel han sido suficientes para estabilizar la totalidad de la obra; y por lo tanto, no existen esfuerzos adicionales sobre el revestimiento definitivo durante la vida útil [239]; sin embargo, el revestimiento definitivo deberá proporcionar la capacidad estructural necesaria para resistir cargas adicionales que pudieran producirse a largo plazo y deberá ser tal que garantice su estabilidad y adherencia durante la ocurrencia de un incendio de 100 MW de potencia.

Entiéndase como soporte primario, el soporte fundamental que se coloca durante la excavación, el cual debe garantizar la estabilidad y seguridad, con este propósito en algunos casos se requiere de soporte secundario (adicional-refuerzo), para que la excavación logre su estabilización y un factor de seguridad adecuado, previo a la colocación del revestimiento en concreto hidráulico.

Cuando el túnel no incluya concreto neumático como soporte primario, el sistema de impermeabilización puede ser instalado directamente sobre el terreno siguiendo los lineamientos descritos en el numeral 6.11; las comprobaciones y restricciones descritas allí aplican igualmente para este tipo de configuración.

La forma del revestimiento se determinará de manera tal que se obtenga la sección interna necesaria para transmitir de forma confiable la fuerza axial y se minimice el momento flector. El espesor del revestimiento se diseñará teniendo en cuenta el comportamiento del terreno, la capacidad estructural del mismo, el método de construcción y la vida útil esperada del proyecto, para el caso del revestimiento definitivo de capa doble (RCD) numeral 6.10.2, no deberá ser menor de 30 cm y tendrá acero de refuerzo y microfibras, ideal para la seguridad contra incendio, exceptuando el diseño del revestimiento en galerías de rescate o conexión del numeral 6.11.3.

El diseño y construcción del revestimiento definitivo del túnel, debe cumplir al menos con los siguientes aspectos:

- Que brinde óptimo factor de seguridad al túnel durante su vida útil, por ende, mantenga el nivel de servicio.
- Que permita la instalación de sistemas de impermeabilización y drenaje, donde la adherencia entre capas quede también absolutamente asegurada, de tal manera que se garantice la estanqueidad del túnel durante su operación y lleve a recuperar el cauce de afluentes involucradas por el proyecto [239].
- Que mejore el aspecto estético del acabado y la luminosidad, repercutiendo en la sensación de seguridad y confort para los usuarios de la vía.
- Que la superficie del revestimiento, favorezca la circulación de aire a lo largo del túnel, disminuyendo el coeficiente de rozamiento del flujo de aire con las paredes del túnel minimizando el consumo energético y el ruido.
- Que disminuya los costos de operación y mantenimiento a mediano y largo plazo [239].
- Que permita la adecuada y segura instalación de iluminación, control contra incendios, señalización, telefonía y demás equipos electromecánicos, así como el alojamiento seguro de sus redes de conexión y cajas de inspección para que las proteja, incluso durante un incendio.
- Que garantice la seguridad de la estructura contra factores como heterogeneidad geológica, perdida de resistencia de los materiales de soporte y terreno, factores químicos y térmicos a largo plazo [129].
- Que permita la inspección visual del contorno, auscultación permanente y programada del estado del revestimiento durante la vida útil del túnel, advirtiendo al operador de fallas para tomar oportuna acción correctiva [236].

6.10.4 Determinación de la susceptibilidad del terreno y los materiales de construcción a cambios a largo plazo

Teniendo en cuenta lo mencionado en el numeral anterior, se debe analizar y determinar la susceptibilidad a cambios en el comportamiento del terreno y la pérdida de características estructurales de estos cambios del terreno y los materiales de construcción, producidos por reacciones fisicoquímicas. Esto es particular de cada túnel, ya que depende de las condiciones específicas en cuanto a propiedades del terreno, condiciones climáticas, nivel de esfuerzos, caudales, tectónica y calidad del agua subterránea, entre otros.

6.10.4.1 Susceptibilidad del terreno

La susceptibilidad del terreno se evalúa dentro de la etapa de estudios y diseños. Dentro del modelo del terreno se deben resaltar aquellos terrenos susceptibles al cambio en el largo plazo [130 - 131. Cuando se detecte la presencia de este tipo de materiales se ejecutan:

- Estudio de la composición mineralógica del material (*p.e.* análisis petrográficos mediante láminas delgadas).
- Identificación y cuantificación de la fluencia del material: se realizan comprobaciones empíricas para determinar el potencial de fluencia y semi empíricas para la cuantificación de los desplazamientos adicionales debido a este fenómeno [132].
- Identificación de materiales expansivos: con el tiempo, estos causan liberación de esfuerzos importantes que deben ser considerados dentro del diseño del revestimiento definitivo (y del soporte primario). Dentro del análisis mineralógico se puede determinar la presencia de minerales expansivos (*p.e.* anhidrita, esmectita, montmorillonita, corrensita). Las pruebas de expansión en laboratorio, permiten cuantificar esfuerzo por expansión axial y deformación axial-radial libre para estos materiales [133].
- Evaluación de cambios por variación de la humedad: el efecto principal en el concreto se debe a los ciclos de humedecimiento y secado, provocados por las aguas de infiltración durante las temporadas de lluvia y tiempo seco o por cambios bruscos en la humedad relativa. Por ejemplo, el comportamiento geomecánico de rocas lodosas en Colombia, asociado a ciclos de humedecimiento-secado y de carga-descarga, provocan que el efecto de la humedad intensifique el deterioro del concreto instalado en el túnel.

6.10.4.2 Susceptibilidad de los materiales de construcción.

La degradación de los materiales de soporte se origina principalmente por la presencia de sustancias agresivas en el terreno y en el agua subterránea, que tienen efecto en el concreto neumático y en los elementos metálicos; y por reacciones químicas de gases y fluidos dentro del túnel que pueden degradar las capas externas del revestimiento definitivo [134]. El agua subterránea afecta directamente el concreto neumático [135] en la configuración presentada en el numeral 6.10.2. El concreto hidráulico no entra en contacto directo con el agua subterránea (ver configuración RCD en la Ilustración 6-41), al existir una separación física por medio del sistema de impermeabilización.

La identificación de la afectación del concreto neumático se realiza cuantificando la presencia de, por lo menos, las siguientes sustancias en el agua subterránea, según los lineamientos de las normativas estándares vigentes [136 - 137]:

- Dióxido de carbono disuelto: ataque caracterizado por ablandamiento y disolución de la matriz de cemento por remoción de óxido de calcio.
- Sulfatos: la reacción del sulfato con el calcio hidratado genera la producción de sulfoaluminato de calcio. Esta reacción involucra un cambio de volumen, produciendo daños y fisuras en el concreto debidas a las tensiones internas generadas durante el aumento de volumen.

A continuación se presentan los valores límite [137]:

Parámetro	Grado de afectación		
	Bajo - medio	Medio - alto	Alto - muy alto
Dióxido de Carbono disuelto (CO_2) mg/l	15 a 30	>30 a 60	> 600
Sulfatos (So_4^{-2}) mg/l	200 a 600	>600 a 3.000	> 3.000

Tabla 6-20. Valores límite de contenido de sustancias nocivas en el agua subterránea – afectación del concreto lanzado

Aunque no es muy común la presencia de sustancias agresivas en el agua subterránea, las sustancias anteriores se presentan esporádicamente, en especial en presencia de minerales como calcita, yeso, pirita y anhidrita, entre otros (estudios de composición mineralógica).

Es necesario garantizar la integridad de los elementos de acero (arcos/cerchas, pernos, refuerzo, etc.) del sistema de soporte, con una apropiada instalación y protección mediante concreto neumático para arcos/cerchas, y mediante lechadas o soluciones epóxicas para pernos. Sin embargo, la degradación del concreto neumático y el cemento es posible en presencia de sustancias agresivas haciendo vulnerable el acero a fenómenos de corrosión y degradación. Si se confirma la presencia de las sustancias presentadas en la Tabla 6-20 es obligatorio extender los ensayos y determinar la presencia de los elementos de la Tabla 6-21, así como el grado de afectación que esto generará en el concreto lanzado y en el acero. Se presentan enseguida los valores límites de diferentes sustancias que afectan tanto el concreto como el acero:

Parámetro	Valores límite (mg/l)	
	Concreto	Acero
Sulfatos (SO4)	<200	<300
Dióxido de Carbono (CO2)	<15	
Cloruro (Cl)	-	<100
Oxígeno (O)	-	<4
Óxido de magnesio (MgO)	<100	-

Tabla 6-21. Valores límite para el agua subterránea – Elementos que afectan el concreto lanzado y el acero

El fenómeno de meteorización del concreto depende, en gran medida, de los cambios en temperatura, humedad y presión (viento) del ambiente. Otro factor a considerar, el cual es controlado por el sistema de ventilación, es la polución continua en el ambiente al interior del túnel. En el diseño es preciso hacer referencia a la inspección durante la operación y mantenimiento de:

- Pérdida de pasta superficial y exposición de agregados en la búsqueda de evidencias de lixiviación por disolución y transporte de los compuestos hidratados de la pasta de cemento.
- Evidencias de meteorización:

  - Eflorescencias de carbonatación, retención de polvo
  - Proliferación de colonias de hongos y bacterias.
  - Reducción del pH del estrato acuoso de los poros superficiales.
- Presencia de gases en valores > a 5 mg/l de CO2, emitido por la combustión de los vehículos en el túnel.
- pH del agua en búsqueda de evidencias de “carbonatación” del cemento contenido en el concreto.

6.10.5 Aspectos generales para el diseño.

El revestimiento definitivo para los túneles, para el caso del revestimiento definitivo de capa doble (RCD) numeral 6.10.2, será en concreto hidráulico, logrando garantizar la estabilidad, para desplazamientos y esfuerzos adicionales que puedan presentarse en el largo plazo (vida útil del túnel), los cuales están directamente relacionados con la susceptibilidad a cambios en el tiempo, del terreno y los materiales de construcción.

De esta manera, los esfuerzos y desplazamientos adicionales son asumidos por el conjunto de capas (capa de soporte primario + capa de revestimiento definitivo). Las limitaciones de los métodos analíticos [138] no permiten una adecuada simulación de componentes básicos para este análisis (*p.e*, determinación del estado de esfuerzos en la capa de soporte primario, simulación de la geometría real del revestimiento, distribución de esfuerzos, heterogeneidad del terreno), por lo que se requiere un análisis numérico que tenga en cuenta los factores mencionados. La cuantificación de los desplazamientos adicionales se realiza siguiendo el procedimiento descrito en el siguiente numeral, y la comprobación de su efectividad se debe realizar siguiendo los lineamientos de diseño expuestos en el numeral 6.5.2.7 (comportamiento vs. requerimientos).

6.10.5.1 Deterioro del terreno

El cálculo estructural de la capa de revestimiento definitivo debe tener como datos de entrada: a), los desplazamientos adicionales, en el caso de la fluencia del material; y b), los esfuerzos adicionales en el tiempo ocasionados por materiales expansivos (numeral 6.10.4.1). Se recomienda la integración de modelos constitutivos que integren el tiempo en sus variables (viscoelásticos – viscoplásticos).

Para las rocas (macizo rocoso) con altas fluencias, se acepta la estimación de un valor de GSI a largo plazo, con base en el deterioro de la roca causado por la fluencia y el aumento progresivo del área deteriorada causada por este fenómeno [139].

6.10.5.2 Deterioro de los materiales de construcción

El deterioro se refleja en la disminución de la resistencia y la elasticidad de los materiales. Para el diseño del revestimiento, se debe tener en cuenta que, se disminuye el módulo de elasticidad de los materiales, como soporte primario, según la Tabla 6-22

[140]. La disminución del módulo de elasticidad representa un aumento en términos de desplazamientos, que será asumido por la capa adicional de revestimiento definitivo.

Sustancia	Bajo	Medio	Alto	Severo
Valor de PH	6,5 -5.5	5,5-4,5	4,5-4,0	<4,0
Sales (%)	1,0 – 4,3	4,3-7,5	7,5-12,5	> 12,5
Dióxido de carbono CO_2 (mg/l)	15-30	30-60	60-100	> 100
Nitratos NO_3 y Amonio NH_4 (mg/l)	15-30	31-60	60-100	> 100
Oxido de magnesio MgO (mgl/l)	100-300	300-1.500	1.500-3.000	> 3.000
Cloruro (Cl) (mgl/l)	100-300	300-1.500	1.500-3.000	> 3.000
Sulfatos SO_4 (mg/l)	200-600	600-3.000	3.000-6.000	> 6.000
% de reducción de la resistencia	10%	20%	35%	50%

Tabla 6-22. Disminución de la resistencia de los materiales de soporte por la presencia de sustancias agresivas

6.10.6 Aspectos generales para el revestimiento

A continuación, se presentan las recomendaciones de diseño del revestimiento y elementos complementarios para su configuración (numeral 6.10.2). Ésta requiere de una capa adicional de concreto hidráulico para el caso del revestimiento definitivo de capa doble (RCD) numeral 6.10.2, la cual se denomina *capa de revestimiento definitivo*, que debe implementarse una vez se tenga la estabilización total de la sección (numeral 8.3) y no puede ser remplazada o sustituida por el concreto instalado como soporte primario. El revestimiento de capa doble (RCD) es ampliamente diseñado en el país y dada la experiencia adquirida, funciona en cualquier túnel, sin importar su longitud, tráfico o condiciones geológicas. Para este caso, el sistema de impermeabilización se instala entre la capa de concreto neumático primario y el concreto hidráulico fundido *in situ* que conforma la capa de revestimiento definitivo, cuyo espesor puede provenir del análisis estructural (casos especiales), pero este deberá ser de mínimo 30 cm con acero de refuerzo contra retracción y fraguado, con microfibras sintéticas, conforme los fundamentos dados en el numeral 6.10.1 y numeral 6.10.3.

La capa de revestimiento en concreto hidráulico y su forma de instalación para el caso de la configuración RCD, demanda una superficie uniforme del soporte primario, haciendo la función de limite exterior del encofrado. Las tolerancias para esta configuración, en cuanto a la geometría de la sección, tienen que incluirse en el reporte del diseño y especificaciones para la construcción.

Foto 6-6. Revestimiento de capa doble RCD, Túnel Mulatos y Túnel de La Línea

6.11 Impermeabilización y drenaje

6.11.1 Generalidades

Es necesario diseñar sistemas de impermeabilización y drenaje adecuados que, en lo posible, garanticen el mantenimiento del túnel y prevengan el deterioro del revestimiento y otras instalaciones.

Para ello, se consideran los siguientes tipos de túneles:

Aplicación 1: "túnel excavado con agua de infiltración sin presión"

Aplicación en que la membrana de PVC se usa como única barrera frente a las infiltraciones sin presión (humedades). La Ilustración 6-42 muestra una sección transversal típica. En este tipo de túnel, el drenaje permanente del agua mantiene el nivel freático bajo la plataforma. El revestimiento no se encuentra bajo presión de agua.

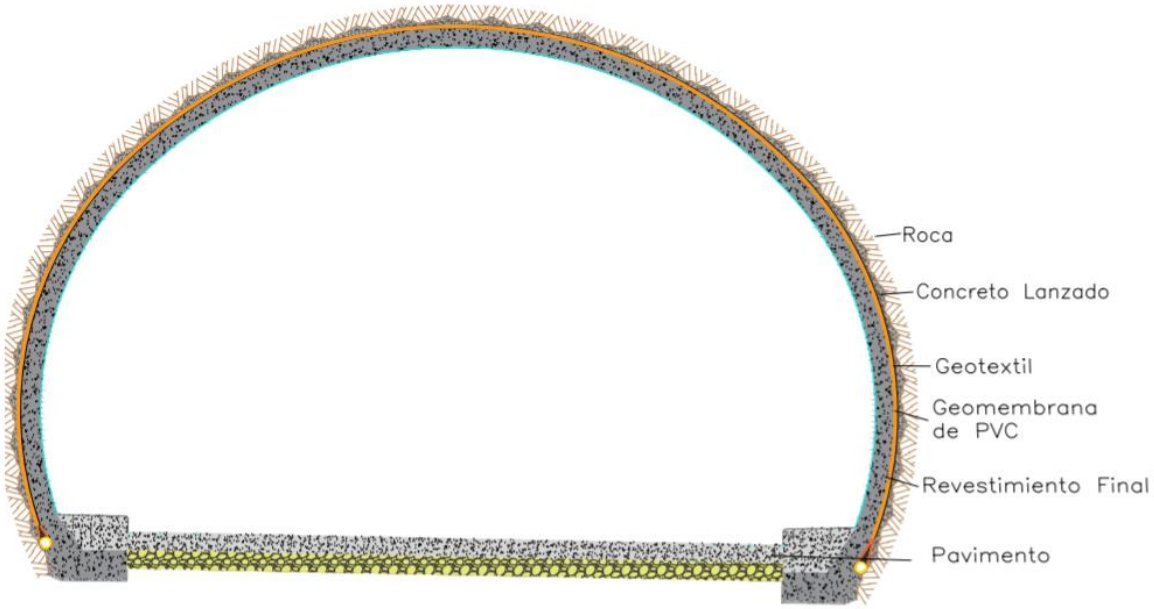


Ilustración 6-42. Membrana de PVC en un túnel excavado con agua de infiltración sin presión

Aplicación 2: "túnel excavado con agua de infiltración a presión"

Aplicación en que la membrana de PVC se utiliza como barrera frente al agua a presión. La Ilustración 6-43 muestra una sección transversal típica. Todo el túnel se encuentra bajo presión de agua a plena carga, por lo que debe considerarse en el diseño estructural, en algunos casos la sección puede llegar hacer circular. Dependiendo de la tecnología de impermeabilización, se puede establecer un sistema de control e inyección incorporado para tener un doble sistema de impermeabilización

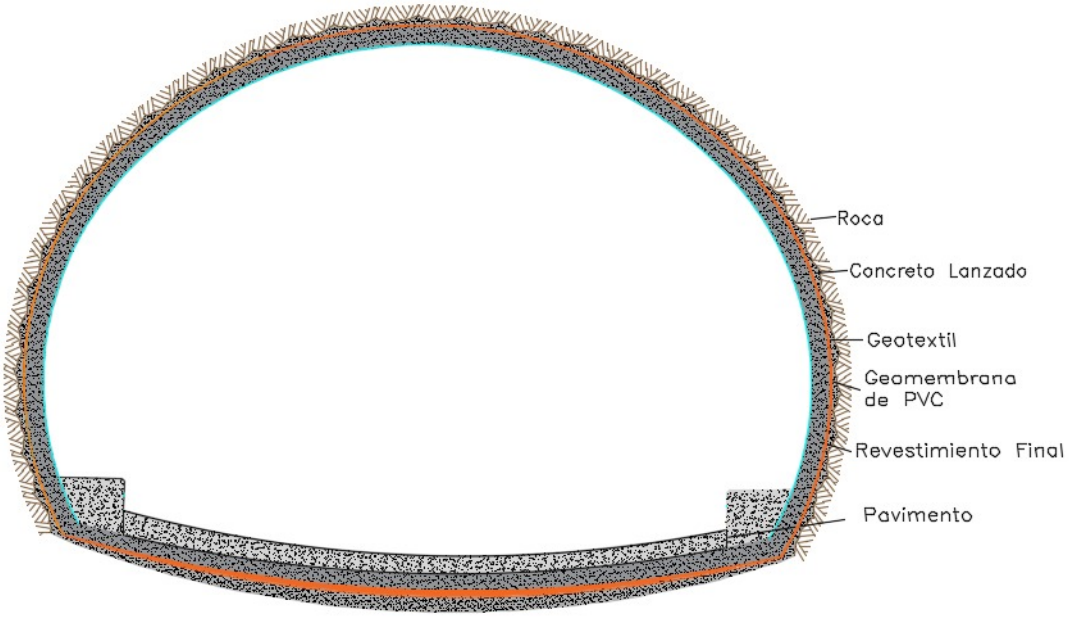


Ilustración 6-43. Membrana de PVC en un túnel excavado con agua de infiltración a presión

6.11.2 Impermeabilización

Es preciso diseñar sistemas de impermeabilización basados en la condición del terreno y la longitud del túnel. Los materiales utilizados deben ser durables, fáciles de construir y resistentes a romperse durante la construcción. En muchos casos, el agua deteriora la durabilidad del revestimiento y tiene efectos adversos sobre las instalaciones dentro del túnel.

Como sistema se emplean membranas impermeabilizantes, debido a que estas pueden formar una capa impermeable, confiable y de calidad uniforme. Los materiales de impermeabilización deben presentar suficiente expansibilidad y resistencia para soportar los impactos mecánicos durante la construcción del sistema, la colocación del concreto de revestimiento y la presión del concreto fresco y del agua.

La impermeabilización debe cumplir los siguientes requisitos:

- Proteger y envolver la superficie de la obra a tratar, de manera durable contra el agua de filtración.
- Adaptarse sin problemas a las irregularidades del soporte, preparado según los requisitos anteriores, (normalmente de concreto lanzado), y ser capaz de deformarse para puentear las irregularidades. Su resistencia y elongación deben ser suficientes para que no se perfore o se punzone.
- Ser suficientemente resistente para continuar siendo estanca después de las solicitaciones mecánicas resultantes del proceso de hormigonado posterior.
- El geotextil debe garantizar la protección del sistema de impermeabilización y en segundo término la evacuación del agua de filtración (ver norma ASTM).

- Resistir las cargas del revestimiento y el empuje del macizo rocoso sobre la bóveda interior definitiva. De hecho, el empleo de concreto bombeable y las velocidades de ascensión elevadas que se presentan en la construcción de túneles someterán el sistema de impermeabilización a presiones de hasta 200 kN/m^2.
- Resistir los movimientos de retracción, fluencia, y las deformaciones por temperatura del soporte y del revestimiento, así como las vibraciones, sin que el efecto impermeable disminuya.
- La membrana impermeabilizante, debe ser soldable y sus uniones deben poder ser verificadas mediante un control de soldadura.
- Por concepto técnico que identifique alta presencia de humedad, unido a un análisis económico de costo beneficio, se recomienda crear un sistema de compartimentos posterior a la instalación del sistema de membranas, con el fin de localizar y corregir posibles filtraciones de manera efectiva, en tal caso, remitirse al numeral 6.11.4.

6.11.2.1 Superficie de soporte o fijación de la membrana impermeable

La superficie del soporte tiene que ser lo más plana posible; el agregado utilizado no puede ser superior a 16 mm. Es necesario seguir la geometría de la superficie (Ba ≥ 5a, Ilustración 6-44) para evitar pliegues en la membrana impermeabilizante después del vertimiento del concreto hidráulico. En los túneles donde hay presión del agua, los pliegues pueden llevar a fallos de la membrana.

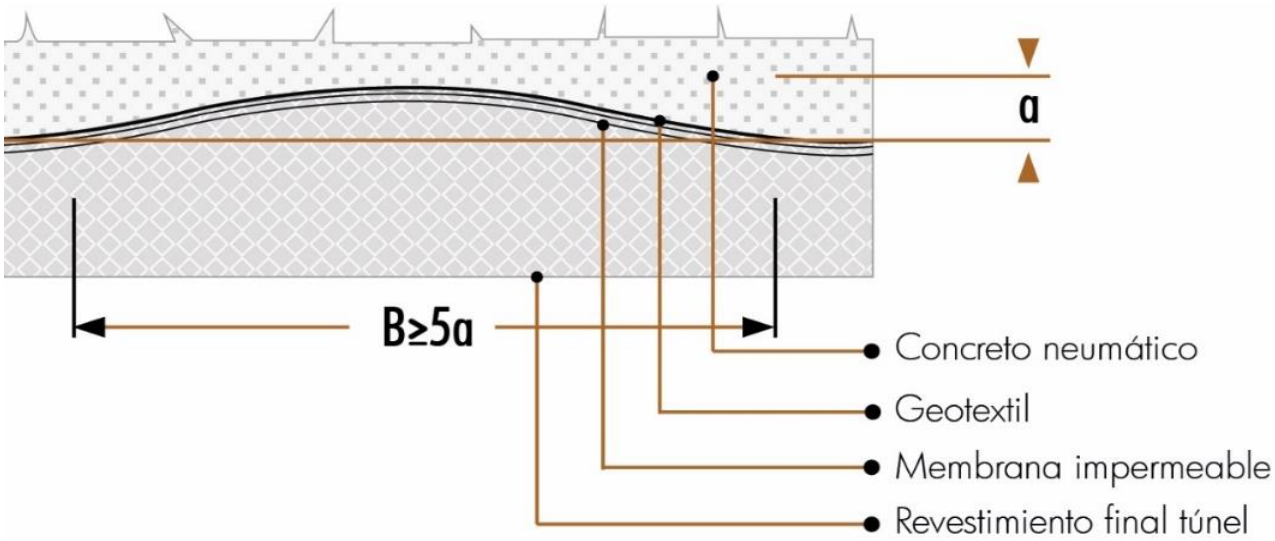


Ilustración 6-44. Tolerancia máxima de rugosidad para la instalación de la membrana impermeabilizante

La superficie para la instalación del sistema de impermeabilización debe cumplir con los siguientes requerimientos:

- Nivelación de las irregularidades.

- Recubrimiento de pernos o corete de estos, teniendo en cuenta la longitud que sobresale. Si al regularizar se encuentran pernos con longitud libre superior a 0,10 m, se deben cortar y, posteriormente, rellenar con concreto, con un radio de cobertura máximo de 0,20 m. (Ilustración 6-45).
- Barras de acero protuberantes, alambres, espaciadores y cualquier otro tipo de perturbaciones tienen que ser cortadas o recubiertas con concreto neumático adicional.

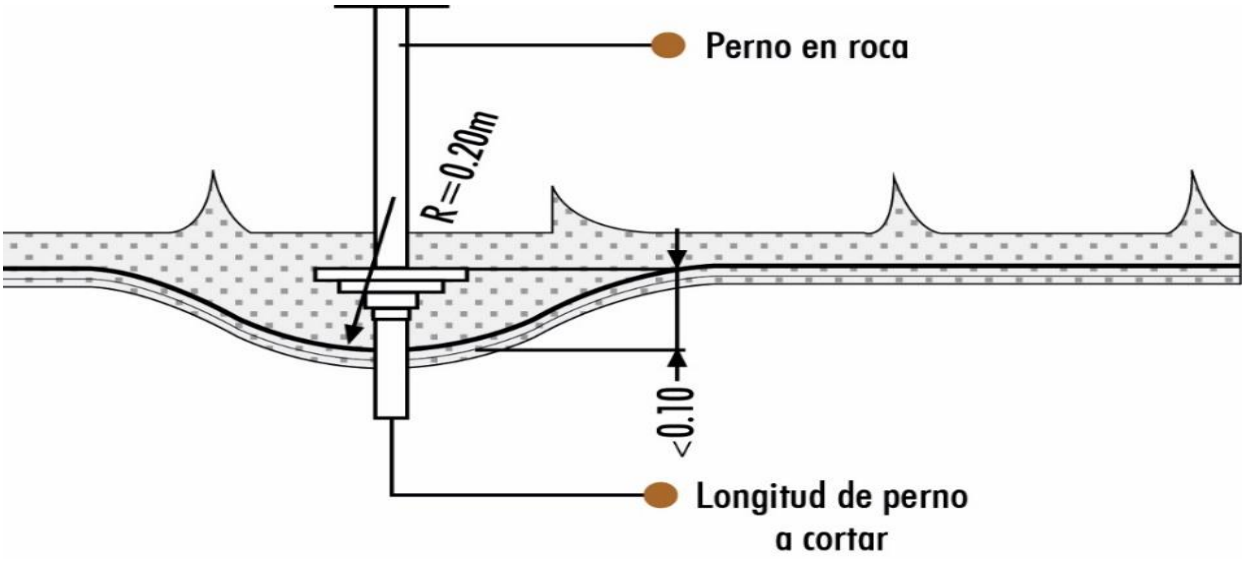


Ilustración 6-45. Corte y relleno de vástago y la placa de un perno

6.11.2.2 Geotextil no tejido de protección

Para la protección de la membrana impermeabilizante en contacto con materiales térreos o con el concreto, es necesario utilizar un geotextil de protección.

El geotextil de protección tiene que ser un geotextil no tejido cuyas fibras sean 100 % de polipropileno virgen, unidas mecánicamente mediante punzonado de agujas, estabilizado UV (AASHTO M288-17).

El geotextil debe presentar características de permeabilidad y resistencia mecánica adecuadas, espesor uniforme y superficie de textura continua. Su función principal es la protección y como función secundaria el drenaje:

Protección: el geotextil evita la perforación de la lámina o membrana en las aristas o puntos salientes.

Drenaje: el geotextil evacua el agua en su plano hacia el drenaje longitudinal, para evitar formación de sub-presión sobre el anillo de revestimiento.

El geotextil de protección debe cumplir con las especificaciones de la Tabla 6-23.

CARACTERISTICAS TÉCNICAS	
Masa por unidad de Área (EN ISO 9864) [g/m^2]	500
Espesor bajo 2 kPa 20 kPa 200 kPa (EN ISO 9863-1) [mm]	 4 3 1,9
Resistencia a la Tensión a la Rotura (L y T) (EN ISO 10319) [kN/m]	≥15
Elongación a la Rotura (L y T) (EN ISO 10319) [%]	≥ 50
Resistencia al Punzonamiento Estático CBR (EN ISO 12236) [KN]	≥ 2.5
Cap. Flujo (20 kPa i = 1) (EN ISO 12958) [m^2/s]	10^{-6}
Nota: Si se requiere la aplicación de ensayos y/o normas diferentes a las establecidas en esta tabla, ya sea por defecto en la aplicación de una norma aquí establecida, desactualización o nuevo ensayo acreditado; el nuevo ensayo y/o norma será propuesto por el contratista con el respectivo soporte técnico y la viabilidad para su implementación estará a cargo de la interventoría o quien haga sus veces. Lo anterior aplica, cuando el argumento de la propuesta del nuevo ensayo o norma, favorezca el control que requiere el material para garantizar la calidad del trabajo, seguridad, sostenibilidad y durabilidad del túnel.	

Tabla 6-23. Especificaciones del Geotextil no tejido de protección

6.11.2.3 Accesorios de fijación

Se recomienda el uso de fijadores con rondelas/discos/tiras de PVC acompañadas de anclajes o clavos, de tal forma que se permita una fusión térmica posterior con la membrana de PVC. El tamaño de la rondela es definido por el peso de membrana que deba soportarse, así como por la capacidad de fusión o compatibilidad del PVC con el que fueron elaboradas. En particular, es imperativo usar clavos de fijación de acero de 1½" y arandelas de 13/16" con cargas de pólvora para su fijación. Las rondelas/discos/tiras se instalan con una densidad adecuada por metro cuadrado que garantice el sostenimiento de la membrana y dependerá de la regularidad del sustrato, cómo mínimo: 4 un/m^2

6.11.2.4 Membrana impermeabilizante

Se recomienda la utilización de membranas de impermeabilización en policloruro de vinilo flexible (PVC-P), sin refuerzo, resina 100% virgen (sin contenido de plomo y cadmio, libre de plastificante DOP (DI 2 ETHILEXILFTALATO), para lograr una mayor flexibilidad y adaptabilidad a la superficie irregular de la excavación, y por su facilidad de fijación y soldadura. Las membranas de PVC-P deberán tener las siguientes características: resistencias mecánicas, resistencia a la presión permanente, resistencia a la penetración de raíces, flexibilidad a bajas temperaturas, resistencia a los

macroorganismos, resistencia a los impactos causados por voladuras, resistencia al envejecimiento, auto extinguible, resistencia al ataque de microorganismos y aguas agresivas (aguas alcalinas y ácidas) que puedan provenir del terreno. Se aconsejan anchos de lámina que permitan realizar el mínimo de soldaduras en el interior del túnel y que la longitud de los rollos sea acorde con el perímetro de este.

El espesor de la membrana debe ser mayor o igual a 2.0 mm y la soldadura se tiene que realizar térmicamente con solape (traslapo) de 10 cm, como mínimo. Además, debe cumplir con los parámetros especificados en la Tabla 6-24

Las propiedades evaluadas deberán ser conforme a la norma: UNE EN 13491 “Barreras geosintéticas - Requisitos para su uso como una barrera de fluido en la construcción de túneles y estructuras subterráneas", en su versión más actualizada, siendo esta la norma actual vigente para la Comunidad Europea.

Se aconsejan anchos de lámina que permitan realizar el mínimo de soldaduras en el interior del túnel y que la longitud de los rollos sea acorde con el perímetro de este.

Característica	Norma	Unidades	Especificaciones
Espesor nominal	UNE-EN 1849-2	mm	≥ 2
Resistencia a la tracción	UNE-EN ISO 527-1 y UNE-EN ISO 527-3	N/mm^2	L ≥ 15 T ≥ 15
Alargamiento a la rotura	UNE-EN ISO 527-1 y UNE-EN ISO 527-3	%	L ≥ 250 T ≥ 250
Resistencia al desgarro	UNE-ISO 34-1	kN/m	≥ 40
Estabilidad dimensional tras envejecimiento acelerado (6 h y 80 ºC)	UNE-EN ISO 1107-2	%	≤ 2
Resistencia Punzonado Estático (CBR)	UNE-EN ISO 12236		≥ 2,2
Resistencia perforación a raíces	UNE-CEN/TS 14416 EX		Conforme
Resistencia a la oxidación	UNE-EN 14575		Conforme
Comportamiento al fuego. Inflamabilidad ante llama única.	UNE-EN ISO 11925-2		Clase E
Color	Con capa de señalización		
Nota: Si se requiere la aplicación de ensayos y/o normas diferentes a las establecidas en esta tabla, ya sea por defecto en la aplicación de una norma aquí establecida, desactualización o nuevo ensayo acreditado; el nuevo ensayo y/o norma será propuesto por el contratista con el respectivo soporte técnico y la viabilidad para su implementación estará a cargo de la interventoría o quien haga sus veces. Lo anterior aplica, cuando el argumento de la propuesta del nuevo ensayo o norma, favorezca el control que requiere el material para garantizar la calidad del trabajo, seguridad, sostenibilidad y durabilidad del túnel.			

Tabla 6-24. Especificaciones de la membrana de impermeabilización

6.11.3 Revestimiento en galerías de rescate o de conexión

El revestimiento de las galerías se podrá realizar con cualquiera de las siguientes configuraciones:

6.11.3.1 Lámina a la vista

El revestimiento de las galerías de rescate o de conexión, cuando se presenten infiltraciones iguales o menores a un goteo rápido, se podrá realizar con lámina impermeable a la vista, lanzando previamente a la instalación de esta, el espesor de concreto neumático diseñado como revestimiento, será como mínimo de 15 cm.

La lámina impermeable debe cumplir con los parámetros especificados, ver Tabla 6-25.

PROPIEDADES	ENSAYO	UNIDAD	VALOR
Espesor	EN-1849-2	mm	6
Peso superficial	EN-1849-2	g/m2	450
Resistencia a la tracción (L/T)	EN ISO 527-2	MPa	3,5/4,1
Elongación a la rotura (L/T)	EN ISO 527-2	%	30/16
Resistencia al punzonamiento estático CBR	EN ISO 12236	KN	2.9
Resistencia al desgarro (L/T)	UNE 40529	N	81/32
Resistencia a la oxidación (90d,85ºC)	EN ISO 13438	%	91/99
Resistencia a la oxidación (90d,85ºC)	EN ISO 13438		Sin cambios
Permeabilidad los líquidos	UNE14150	m^3/m^2/día	$< 10^{-6}$
Reacción al fuego de los productos de construcción	EN ISO 13501		BS1d0
Nota: Si se requiere la aplicación de ensayos y/o normas diferentes a las establecidas en esta tabla, ya sea por defecto en la aplicación de una norma aquí establecida, desactualización o nuevo ensayo acreditado; el nuevo ensayo y/o norma será propuesto por el contratista con el respectivo soporte técnico y la viabilidad para su implementación estará a cargo de la interventoría o quien haga sus veces. Lo anterior aplica, cuando el argumento de la propuesta del nuevo ensayo o norma, favorezca el control que requiere el material para garantizar la calidad del trabajo, seguridad, sostenibilidad y durabilidad del túnel.			

Tabla 6-25. Especificaciones de la lámina impermeable

6.11.3.2 Membrana de PVC

Concreto hidráulico instalando previamente una membrana impermeable que cumpla las especificaciones de la Tabla 6-24 y requerimientos indicados en el numeral 6.11.2.

6.11.3.3 Sistema con Anclajes

Concreto lanzado sobre una membrana previamente instalada, la membrana debe ser impermeable con geotextil adherido en una de sus caras y su correspondiente geotextil no tejido de protección en la otra, pernos de fijación de la membrana, las denominadas

arañas/anclajes de fijación de una malla de 15 x 15 de 6 mm de grosor y posteriormente lanzar una capa de concreto lanzado de 10 cm a 15 cm. Conforme la Ilustración 6-46.

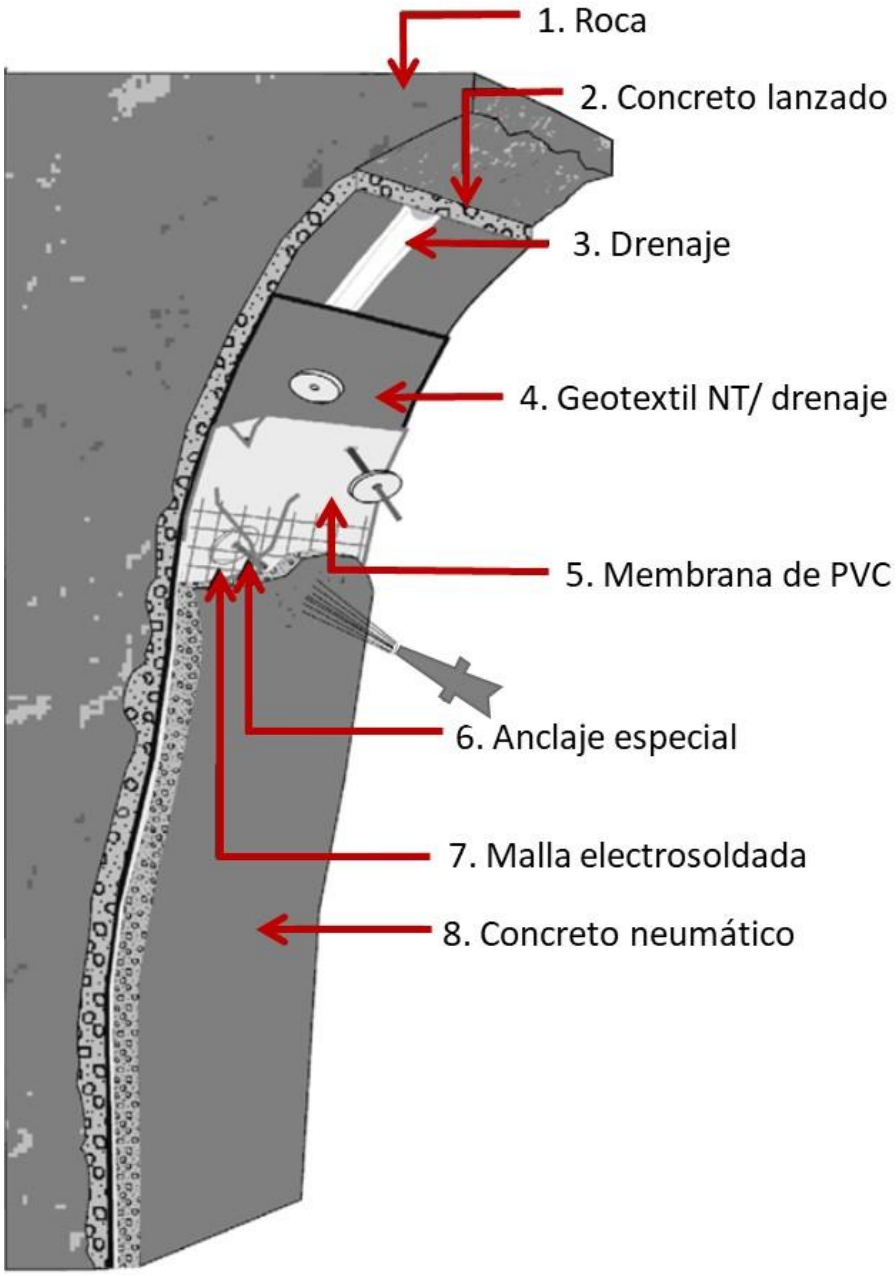


Ilustración 6-46. Impermeabilización con membrana de PVC + Geotextil adherido y anclajes

6.11.4 Sistema compartimentado

Posterior a la instalación del sistema de membranas de PVC, se debe crear un sistema de compartimientos que tienen la finalidad de localizar y corregir de manera efectiva las

posibles filtraciones de agua en el sistema durante su construcción o vida útil que afecten el revestimiento final.

Los compartimientos se crean mediante el uso de barreras o cintas fabricadas en PVC con mínimo 150 mm de ancho de manera que pueda realizarse su unión al sistema por el sistema de soldadura con aire caliente y sea compatible con las membranas de impermeabilización.

El sistema de compartimientos se complementa mediante la instalación de mangueras y válvulas de inyección por medio de las cuales se realizan las reparaciones localizadas a que haya lugar en el sistema. Los compartimentos no deben exceder los 200 m^2 para tener una adecuada distribución de las resinas.

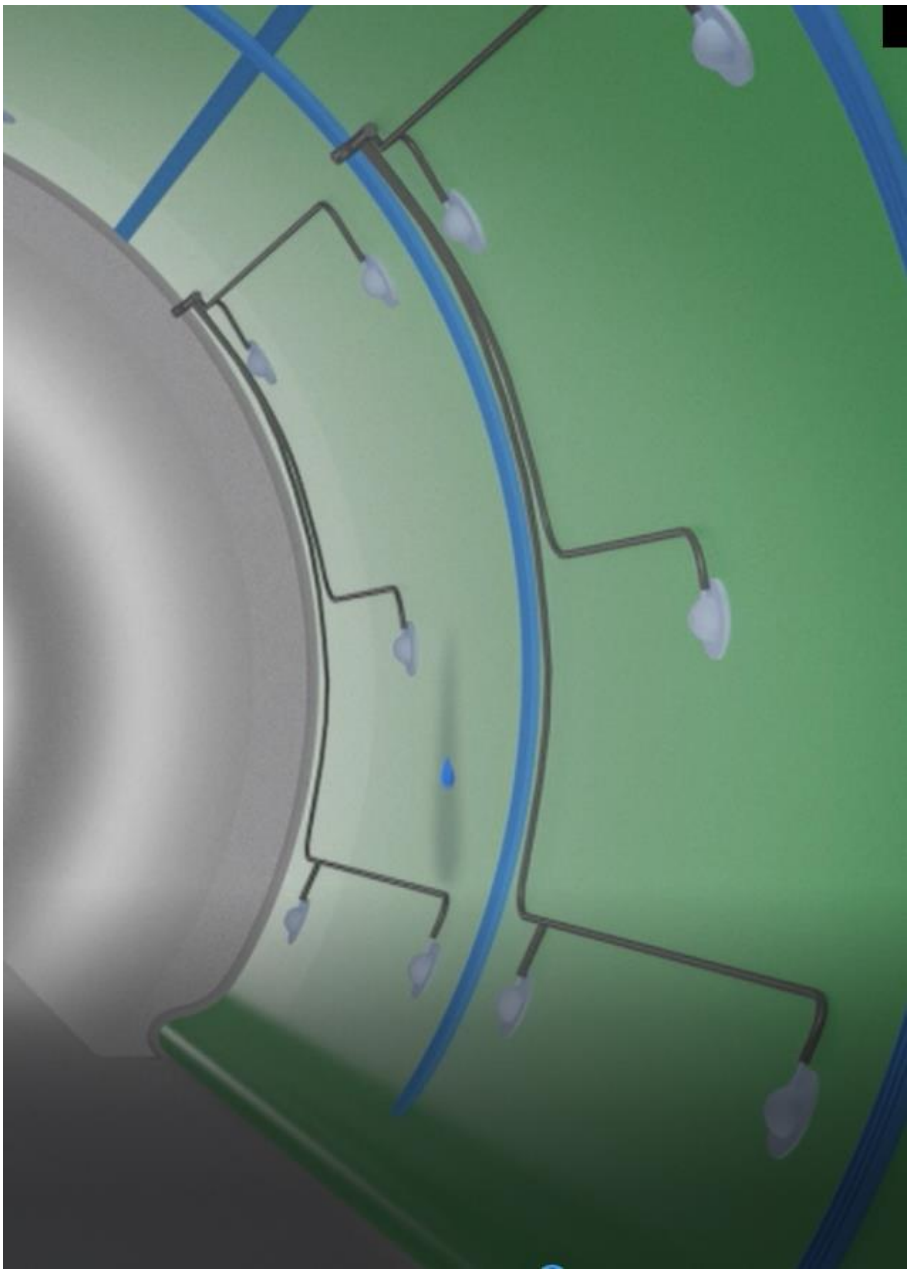


Ilustración 6-47. Sistema de compartimientos y válvulas de inyección para reparación de una impermeabilización con membrana de PVC

Se debe disponer y/o instalar durante la construcción del revestimiento cajas de inspección para poder realizar inyecciones de resinas de reparación del (los) compartimiento(s) afectados por las filtraciones. Ver Ilustración 6-47 y Foto 6-7.

Foto 6-7. Caja de inspección para inyección de resinas en un sistema de compartimentación

6.11.5 Instalación

6.11.5.1 Generalidades

La aplicación de la impermeabilización debe ser efectuada por personal especializado en cada una de las etapas

6.11.5.2 Geotextil No Tejido

La colocación se realiza fijando el geotextil al soporte por medio de tacos, clavos con arandelas, discos o tiras del mismo material que la membrana, en número suficiente para adaptarlo a la geometría del túnel (véase la Ilustración 6-48)

Los distintos paños de geotextil serán colocados de manera transversal al eje del túnel. Tras la aplicación del primer paño el siguiente quedará traslapado sobre el anterior un mínimo de 20 cm, con el fin de que toda la superficie quede cubierta y la membrana

protegida. En los casos en que el traslapo sea termo fijado (soldado por calor) podrá ser de un mínimo de 10 cm.

El geotextil debe envolver el tubo de drenaje para asegurar la correcta evacuación del agua.

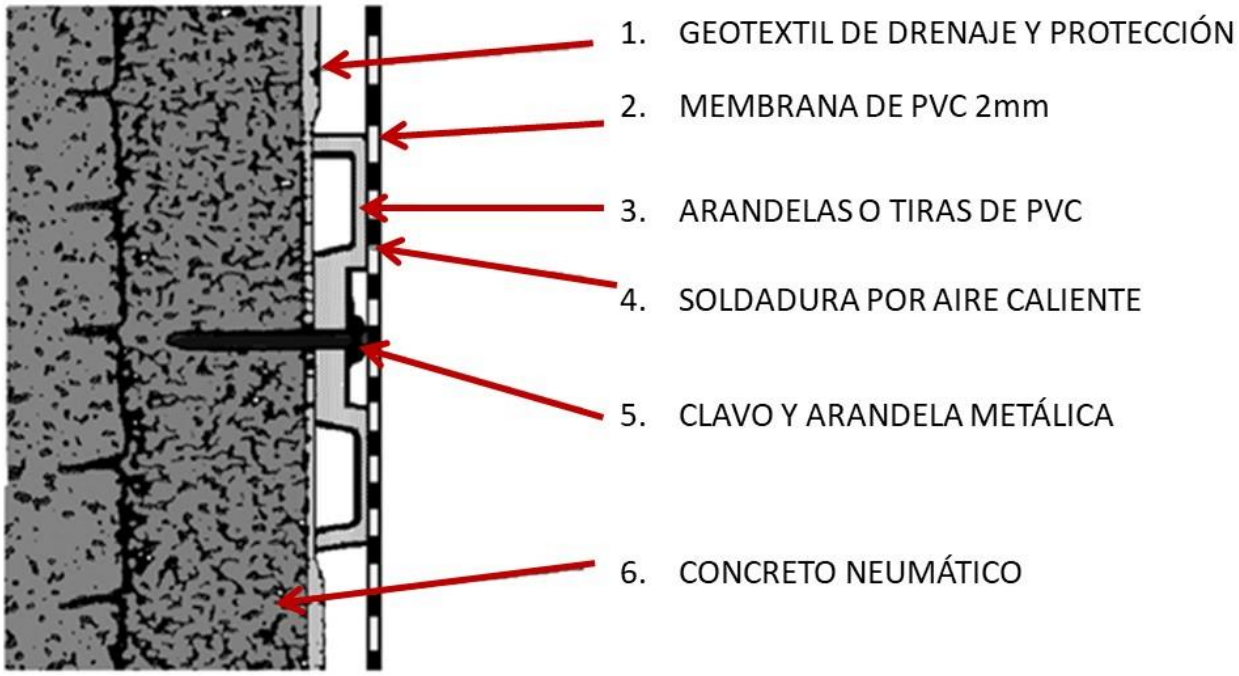


Ilustración 6-48. Anclaje del geotextil y soldadura de la membrana

6.11.5.3 Membrana impermeabilizante

Previo a la colocación de la membrana de PVC, se colocarán sobre el geotextil los discos de fijación o tiras de PVC utilizados para la fijación de esta, al soporte. Estos discos/tiras son fijados mecánicamente (uso de clavos o, perforación y taco).

Los discos o tiras deben estar fabricadas con el mismo material que la membrana de PVC, para que su soldadura sea compatible, pero poseer menor resistencia a rotura que ella, a fin de evitar la rotura de la membrana en el caso de generarse tensiones durante el concreto de revestimiento.

Deben presentar una superficie de entre 50 cm^2 a 60 cm^2 (de 8 cm a 9 cm de diámetro en caso de discos circulares), para el caso de las tiras de PVC, tendrán una dimensión mínima de 40 cm x 12 cm por cada metro lineal de PVC.

La cantidad de discos/tiras de PVC a aplicar estará determinada por la geometría de la sección procurando cubrir todas las oquedades.

Estas fijaciones están diseñadas por un lado para resistir el propio peso del sistema de impermeabilización, así como el peso de bolsas de agua que eventualmente puedan quedar retenidas; por otro lado, para que se rompan y suelten en caso de puesta en carga total de la membrana durante la fundición del concreto del revestimiento, y que la membrana pueda desplazarse solidariamente con las irregularidades del soporte. No

debe olvidarse que la fijación definitiva del sistema de impermeabilización la lleva a cabo el propio anillo de revestimiento.

La instalación de la membrana se efectuará colocando los paños en sentido transversalmente al eje del túnel, sujetándolos a los discos/tiras colocadas previamente por soldadura o termofusión con aire caliente y sometiendo a presión. Debe dejarse una superficie mínima de contacto en la soldadura con la membrana así: si se emplean discos de al menos 40 cm^2, si se emplean tiras de al menos 100 cm^2.

La membrana de impermeabilización debe quedar sin tensión, de manera que le permita soportar mejor las tensiones durante el hormigonado del revestimiento.

La aplicación de los sucesivos paños se realiza de manera similar, garantizando un traslapo entre ellos mínimo de 10 cm con el fin de asegurar una buena ejecución de la soldadura posterior, traslapo que puede aumentar en función de la irregularidad del soporte.

Su colocación se puede efectuar manualmente, con andamios apropiados o bien mecánicamente, con andamios pórtico motrices automáticos.

En las zonas de contra bóveda o puntos singulares, la membrana impermeabilizante se protege con un geotextil o una membrana de protección, normalmente del mismo tipo utilizado en el resto del túnel. Contra la perforación y como protección mecánica, en soleras se aplica además un mortero lanzado de 5 cm de espesor antes de vaciar el concreto estructural.

La técnica empleada para llevar a cabo las soldaduras de los traslapos es conocida como soldadura doble por termofusión con canal central para pruebas, mediante cuña o aire caliente (con temperatura superior a 300 ºC) y con presión mediante rodillos para la obtención de junta estanca. En las zonas particulares de remates, detalles, o puntos singulares donde técnicamente no es posible realizar soldadura doble, se utilizará soldadura manual en banda (sencilla) con un ancho mínimo de 4 cm.

6.11.5.4 Drenaje de la impermeabilización

El sistema de drenaje consistirá en un tubo perforado instalado dentro de una bota elaborada con la misma membrana de PVC, lleno de grava (material filtrante) y de la tubería de drenaje, que se pueda conectar fácilmente mediante una soldadura hermética en caliente con la membrana impermeabilizante que proviene de la corona

Es posible cambiar el material filtrante por un geocompuesto de drenaje, siempre y cuando se diseñe en función del caudal de agua a desaguar: La función principal del geocompuesto es el drenaje de los aportes de agua al túnel. Se deben utilizar en los casos en que el caudal del agua a desaguar sea tal que el geotextil por sí sólo sea incapaz de realizar dicha función. El parámetro principal que se debe utilizar para su dimensionamiento es la capacidad de drenaje en el plano bajo carga para un gradiente hidráulico determinado. Con el fin de simplificar, se puede utilizar como gradientes hidráulicos 1 y 0,1.

En cada caso, es necesario conocer:

- caudal de líquido a evacuar;
- carga a la que estará sometida el geocompuesto drenante.

Con estos datos se debe elegir un producto tal que sea capaz de evacuar el volumen necesario bajo la carga establecida, es decir, cuya capacidad de drenaje en su plano bajo carga sea la requerida.

Las principales propiedades de los geocompuestos de drenaje son las características generales, físico-mecánicas, hidráulicas y de durabilidad. Estas propiedades son función de los polímeros empleados y del proceso de fabricación. Los geocompuestos de drenaje que se utilizarán a estos efectos deben estar formados por un núcleo de drenaje revestido por una o dos caras de un geotextil filtro. Es recomendable la utilización de geocompuestos formados por núcleos de drenaje de polipropileno y/o polietileno debido a la gran durabilidad de estos polímeros u otro material que asegure la durabilidad de 25 años. Aun así, conviene asegurarse que en el caso que el geocompuesto de drenaje estuviese en contacto con concreto todos sus componentes sean químicamente resistentes.

Mediante la Norma UNE-EN ISO 12958 o ASTM D 4716. se obtiene la capacidad de flujo en el plano en el laboratorio. Existen tres factores básicos que quedan reflejados en el ensayo:

- Gradiente hidráulico.
- Presión normal al plano del geocompuesto de drenaje expresada en kN/m^2 o kPa.
- Superficie de contacto de las probetas.

El gradiente hidráulico se define como la pérdida de altura piezométrica dividido por la longitud recorrida por el fluido. En el caso que el geocompuesto de drenaje no entre en carga, el gradiente hidráulico se puede estimar con la siguiente fórmula:

Gradiente hidráulico (i) = sen β, donde β es el ángulo que forma el geocompuesto de drenaje con la horizontal.

Cuando se diseña un geocompuesto de drenaje hay que tener en cuenta que su capacidad de flujo en el plano a largo plazo es menor que la que se obtiene en el ensayo según la Norma UNE-EN ISO 12958. Los principales motivos son los siguientes:

- Fluencia del geocompuesto de drenaje, es decir, reducción del espesor con el tiempo bajo carga constante. En este sentido, conviene utilizar polímeros de alta densidad para evitar excesivas pérdidas de espesor por fluencia.
- Fluencia de los geotextiles filtro, es decir, intrusión de los geotextiles en el interior del núcleo de drenaje con el tiempo.
- Colmatación química y/o precipitación de agentes químicos en el espacio ocupado por el núcleo del geocompuesto de drenaje.
- Colmatación biológica en el espacio ocupado por el núcleo del geocompuesto de drenaje.

Además de la capacidad de flujo en el plano, las propiedades mecánicas tienen una importancia primordial cuando el geocompuesto de drenaje sea sometido a esfuerzos y, en cualquier caso, para sobrevivir a la puesta en obra.

CARACTERÍSTICAS	UNIDAD	NORMA	Túnel	
			Hastial	Clave
Capacidad de flujo en el plano (geocompuesto) – σ ≤ 200 kPa; i = 0,1; (R/F) – σ ≤ 200 kPa; i = 1; (R/F)	m/s^2 m/s^2	UNE-EN ISO 12958 UNE-EN ISO 12958	 > 0,7	> 0,2
Resistencia a la tracción (geocompuesto)	kN/m	UNE-EN ISO 10319	≥ 8	≥ 8
Resistencia a compresión	kPa	UNE-EN ISO 604	≥ 400	≥ 400
Durabilidad (geocompuesto)	años	UNE-EN 13256 (anexo B) / UNE-EN 12224	25 años	25 años

Tabla 6-26. Definición de las propiedades mecánicas e hidráulicas mínimas del geocompuesto

Dado que el geocompuesto de drenaje lleva incorporados geotextiles no tejidos como filtro, la abertura característica del geotextil fija el diámetro de partículas de suelo que pueden ser retenidas por el geotextil, y por tanto su eficacia como filtro.

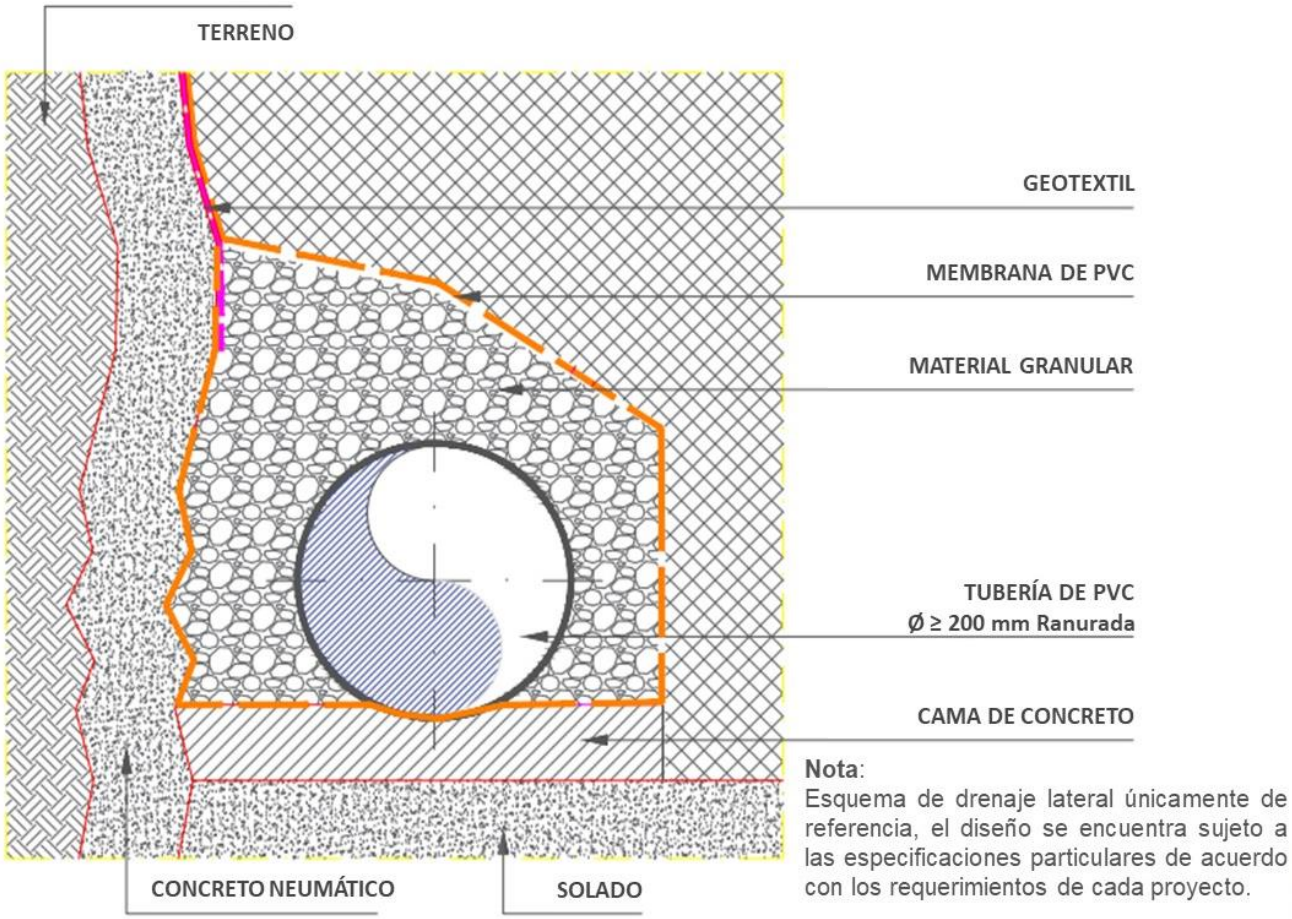


Ilustración 6-49. Detalle del drenaje en túneles convencionales

Es recomendable la utilización de un geocompuesto formado por un núcleo drenante y uno o dos geotextiles filtro no tejidos cuyas fibras deben ser de 100% polipropileno virgen. No se permite el uso de geotextiles que no sean resistentes a soluciones de alta alcalinidad.

Los valores mínimos para exigir al geocompuesto drenante, cuando se desconozca el caudal de líquido a evacuar, deben ser los de la Tabla 6-26 válida para valores mínimos recomendados para túneles hasta 10 m de altura de tierras. Para superiores condiciones de carga se recomienda el cálculo de la presión a la que estará sometido el producto.

El sistema de impermeabilización comprenderá, tanto los encuentros con las boquillas, los finales parciales de la impermeabilización, así como el remate en cunetas o drenajes longitudinales, para ello se tienen en cuenta la disposición de capas y las dimensiones mínimas del drenaje y el revestimiento, como se muestra en la Ilustración 6-49

6.11.5.5 Mediciones

Las mediciones para la instalación de elementos de impermeabilización, se deben realizar según se detalla en la Tabla 6-27.

Unidad de obra	Unidad de medición	Forma de medición
Drenaje	m	Longitud total terminada
Geotextil	m²	En desarrollo*
Geomembrana	m²	En desarrollo*
Remates perimetrales	m	Longitud total terminada
* La medición en el perímetro del túnel incluye el sistema de impermeabilización completo y el desarrollo corresponde a la línea de abono de excavación y a la envoltura de los tubos de drenaje.		

Tabla 6-27. Forma y unidades de medición

6.11.6 Control de calidad

El control de calidad debe cumplir el principio de independencia.

6.11.6.1 Control de calidad previo a la impermeabilización

6.11.6.1.1 Soporte de la impermeabilización

El control de calidad debe supervisar que la superficie de soporte de los geosintéticos, cumple con los requisitos definidos en esta norma.

6.11.6.1.2 Para el geotextil de protección:

Los ensayos recogidos en la Tabla 6-23 de este Manual.

6.11.6.1.3 Para la geomembrana de PVC-P (e = 2 mm):

Los ensayos recogidos en la Tabla 6-24 de este Manual.

6.11.6.2 Control de calidad durante la impermeabilización

Para el control de calidad se debe realizar un croquis de despiece y la trazabilidad de la geomembrana, donde se registren la ubicación de los diferentes paños y/o su relación con los números de rollo y lote del fabricante y las diferentes soldaduras, parches, refuerzos y reparaciones que tengan lugar durante la fase de instalación. Se deben realizar los siguientes ensayos:

6.11.6.2.1 Soldaduras de termofusión con canal central de comprobación

Las soldaduras se deben someter a Ensayo de estanquidad de las uniones entre membranas impermeabilizantes mediante el método de aire a presión en el canal de prueba según la Norma UNE 104481-3-2 (Ilustración 6-51, Ilustración 6-50 e Ilustración 6-52).

Procedimiento: En un extremo de la soldadura se cierra herméticamente el canal, mediante soldadura o pinzas especiales, para evitar la salida del aire de comprobación.

En el otro extremo, se introduce la aguja del equipo de aire comprimido por el canal central de la soldadura (canal de prueba). La aguja debe estar conectada a un medidor de presión (manómetro).

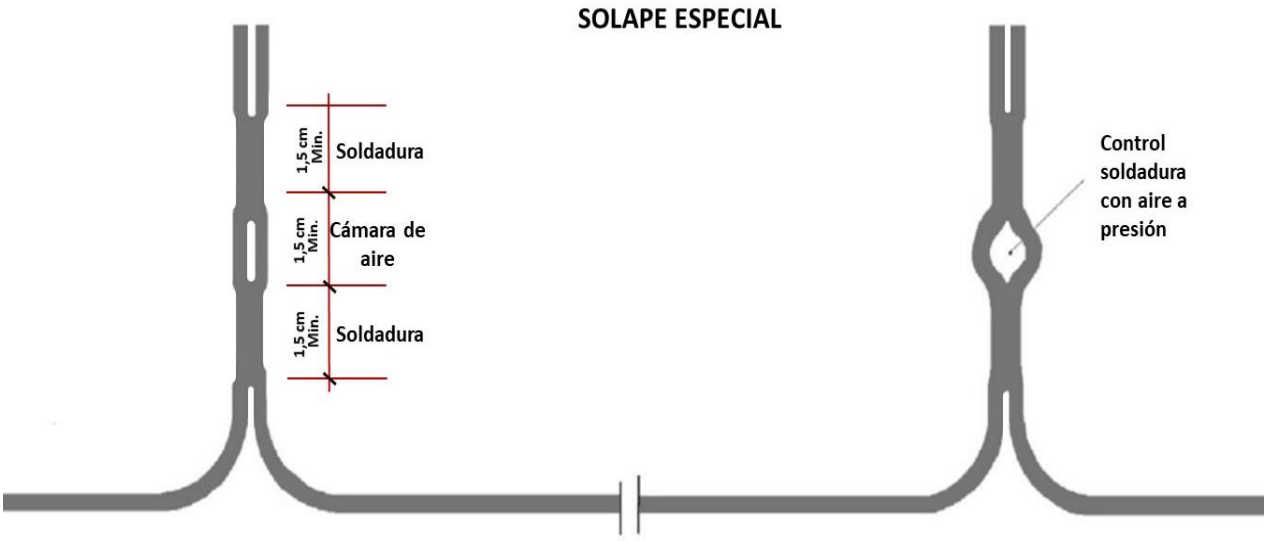


Ilustración 6-50. Traslapo especial con canal central

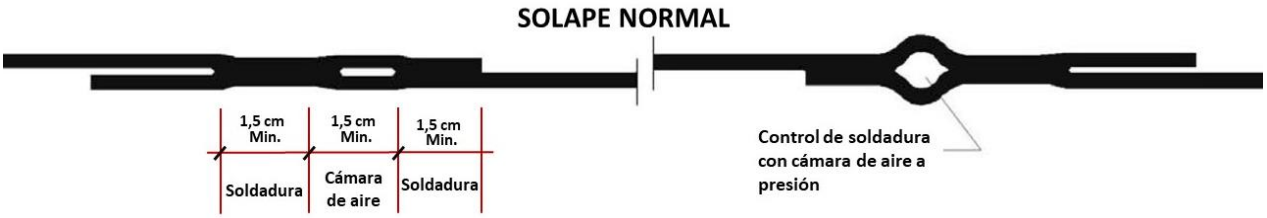


Ilustración 6-51. Traslapo con canal central

Se aplica la presión de 200 kPa durante 1 min. Una vez que se ha estabilizado la presión dentro del canal, se cierra la entrada de aire y se registra la presión (200 kPa ± 10 kPa). Pasados 5 min se registra la presión que indica el manómetro.

Se abre el canal de prueba en el extremo opuesto a la dirección de la prueba. El aire debe escapar de golpe, de no ser así, deben comprobarse las soldaduras por partes.

La soldadura se considera estanca si la presión del canal de comprobación no disminuye más del 10% del valor inicial. Se deben ensayar el 100% de las soldaduras.

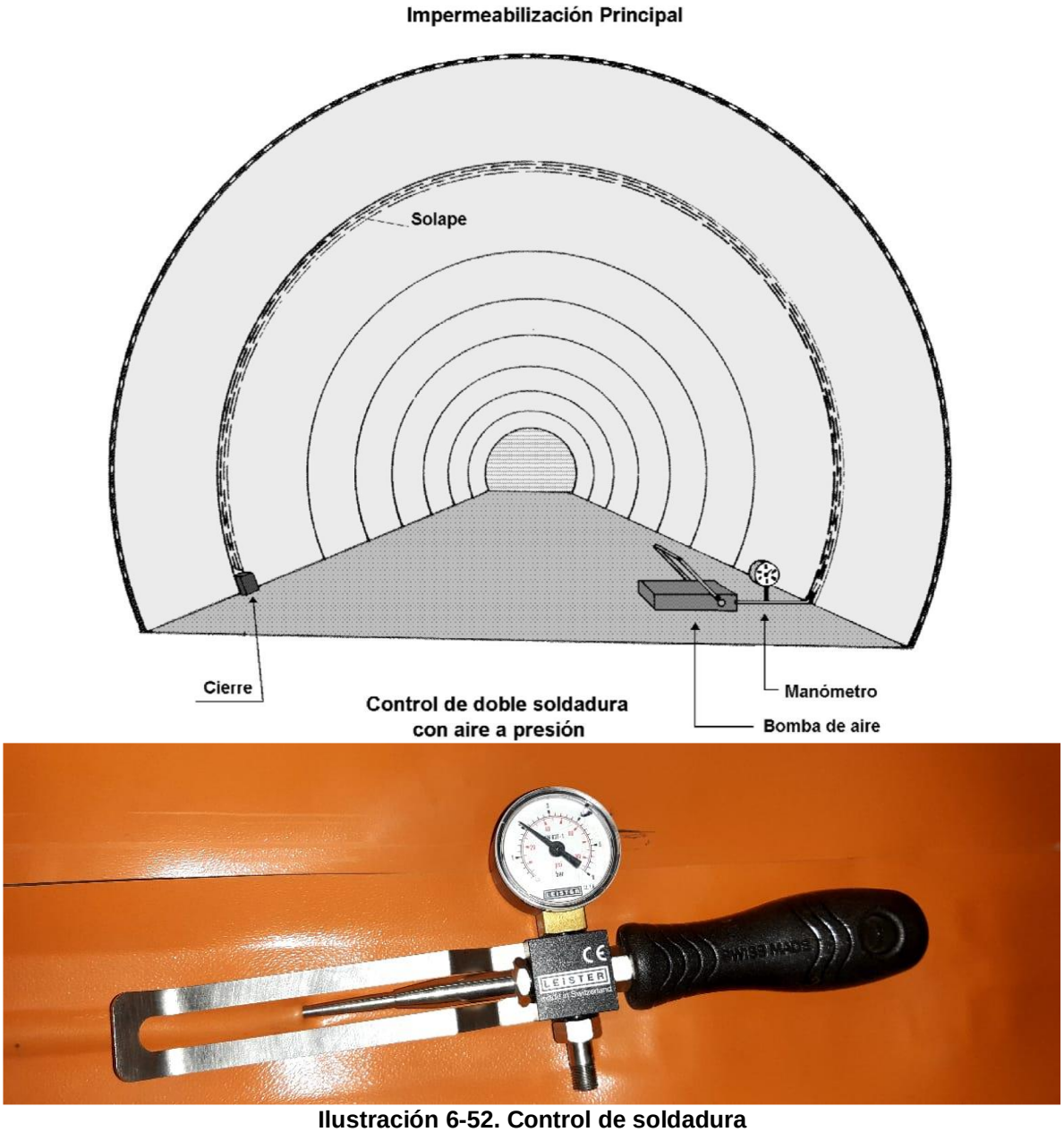


Ilustración 6-52. Control de soldadura

En los casos de uniones ortogonales con encuentros de varias membranas, y donde no sea posible un control con aire comprimido, se llevará a cabo una inspección visual de la soldadura haciendo una comprobación mecánica mediante el empleo de un punzón de punta roma, que se irá pasando a lo largo de toda la soldadura a fin de identificar la presencia de posibles puntos débiles o de insuficiente adherencia.

6.11.6.3 Informe del control de calidad

Los ensayos indicados anteriormente se deben recoger en un informe final que incluya como mínimo:

a) Los resultados e incertidumbres de todos los ensayos realizados (obra y laboratorio) así como sus metodologías mediante el sistema de calidad propio de los laboratorios de ensayo.
b) Croquis de despiece.
c) Trazabilidad de la geomembrana.
d) Dossier fotográfico.

6.11.7 Drenaje

El sistema de drenaje debe conducir el agua sin dificultad y drenar el agua que ingrese al túnel desde el terreno. El diseño de este tipo de sistemas incluye su ubicación, geometría y cálculo estructural; este último incluye la evaluación de elementos como localización de los flujos, caudales esperados, y gradientes longitudinales y transversales del túnel. En general, el sistema de drenaje debe tener la misma pendiente de la calzada, pero el diseño hidráulico puede definir lo que se estime más conveniente en cada caso.

En túneles viales de carretera, es necesario diseñar una pendiente adecuada para drenar el agua empleada en las actividades de mantenimiento, como el lavado de las paredes del túnel, el agua empleada en el sistema contra incendio y los líquidos peligrosos vertidos por los vehículos al interior del túnel (como los combustibles que son transportados por este). De igual manera, el diseño de los sistemas de drenaje debe realizarse con base en los estudios e investigaciones hidrogeológicas descritas en el capítulo 5 de Exploración e Investigación y verificarse durante la construcción con base en el adecuado monitoreo de las aguas de infiltraciones presentes en el túnel.

Durante la etapa de construcción, el personal en obra tiene que mapear los sitios que presenten rasgos de humedad o salidas de agua, e implementar drenajes profundos en tubería, captar las aguas a la salida y dirigir los caudales hacia los drenajes de la parte inferior.

6.11.7.1 Drenaje recolector de aguas de infiltración.

El drenaje recolector de aguas de infiltración consiste en una tubería perforada, envuelta en un material filtrante. Dependiendo de los minerales contenidos en el agua, se determinará si debe usarse un geotextil, elemento que debe ser resistente a los ataques químicos. Es preciso disponer entradas para que sea posible realizar el mantenimiento a las tuberías (numeral 6.11.7.5).

6.11.7.2 Drenaje de aguas de derrame y lavado

El caudal de este ítem consta, a su vez, de tres caudales diferentes: de escorrentía (que ingresa por los portales del túnel) (Q_P); de derrame (Q_D); y de lavado (Q_L).

Caudal de escorrentía de los portales (Q_P): el caudal de derrame debe calcularse teniendo en cuenta que el túnel debe evacuar un flujo proveniente del ingreso de agua de lluvia por cada uno de los portales, y drena hacia el portal contrario.

El caudal de entrada de agua lluvia corresponde a:

$$Q_p = C \cdot I \cdot A_t$$

Donde **Q_P:** Caudal de escorrentía en cada área de portal (m³/s)
C: Coeficiente de escorrentía
I: Intensidad de precipitación en mm/h
A_t: Área de la sección libre de túnel

Es posible usar otro método equivalente de cálculo de escorrentía si está debidamente soportado.

Caudal de derrame (Q_D): este es causado por líquidos vertidos por los vehículos que recorren el túnel. Se recomienda la siguiente formula empírica para el cálculo del caudal de derrame (m^3/s):

$$Q_p = \frac{TPD}{500}$$

Donde ***TPD*:** tráfico por día para el periodo de diseño del túnel (vehículos/día).

Caudal de lavado (Q_L): corresponde al funcionamiento de dos conexiones de manguera o gabinetes con manguera, cada uno de ellos con un caudal de 0,5 m³/min (8 L/s):

$$Q_L = 2 * 0{,}008\ m^3/s$$

El canal o cárcamo de drenaje de aguas de derrame y lavado tiene que diseñarse con la suma de los tres caudales anteriores. Así mismo, es necesario verificar que la tubería de drenaje tenga un diámetro interno igual o mayor a 250 mm.

6.11.7.3 Tampa de grasa

Para el caudal que proviene del canal o cárcamo de las aguas de derrame y lavado, es obligatorio disponer un tratamiento mínimo con una trampa de grasa a la salida del canal. En caso de que el estudio de impacto ambiental exija algún tipo de tratamiento adicional, este se debe conectar con la trampa de grasas.

6.11.7.4 Tanque de almacenamiento de sustancias peligrosas

En caso de permitir el paso de sustancias peligrosas, en túneles de longitudes mayores a 1.000 m, es imperativo instalar un tanque de almacenamiento de al menos 10.000 galones (40 m^3); adicionalmente, y conforme un análisis de riesgos, se podrá aumentar el tamaño hasta 13.000 galones (50 m3).

6.11.7.5 Pozos de inspección

Es necesario diseñar cámaras de inspección y limpieza del sistema de drenaje cada 50 m. Las dimensiones de estas cámaras deben proyectarse de tal manera que permitan el ingreso de un operario y el manejo de las herramientas de limpieza en su interior.

6.12 Portales para túneles

Los portales tienen que diseñarse de manera tal que se cause la menor perturbación posible al entorno y el ambiente, protegiendo los taludes y, en general, análisis de deslizamientos, no estar en zonas de posibles remociones en masa, considerando las condiciones topográficas, geológicas, geotécnicas, hidrogeológicas, meteorológicas, paisajísticas y ambientales del terreno, así como la sección transversal del túnel y el método constructivo a emplear.

La localización y forma del portal se seleccionan tomando en cuenta aspectos tales como la topografía y la geología local, la capacidad de autosoporte del terreno, la estabilidad del talud, las estructuras vecinas y el método de construcción. Además, es necesario que se adecúe a los requerimientos del diseño geométrico del túnel y las vías de acceso al mismo. En general, es preciso tener en cuenta que el diseño del portal debe considerar la protección de las zonas aledañas ante deslizamientos, caída de rocas y avalanchas que provengan de la superficie del talud, mediante la implementación de un túnel falso en la longitud que resulte del diseño el cual puede construirse en concreto o en lámina estructural.

6.12.1 Elementos de un portal

Boca del túnel: constituye la entrada al túnel. Durante la etapa de inicio de excavación se la llama el frontón del túnel, y avanza con la excavación del mismo.

Talud frontal: generalmente es perpendicular al eje del túnel. Se forma por la intersección con la geometría del terreno natural, de acuerdo con las condiciones de la vía nueva y el tamaño del túnel.

Taludes laterales: se forman por la intersección de la geometría del terreno natural y las condiciones de la vía. Según la topografía de la zona y del planteamiento geométrico de la vía se pueden generar cortes laterales a un solo lado, a ambos costados de la vía, o no generarse.

Túnel falso: ampliación de la longitud del túnel con una estructura usualmente de concreto que tiene la forma del mismo. Es usado para la protección de la entrada al túnel contra caída de bloques y deslizamientos, o para contención de los taludes que forman el portal.

Vía a superficie: se forma por la interacción de los taludes laterales y la rasante de la vía proyectada.

6.12.2 Métodos de diseño para análisis de taludes y portales

El portal tiene que ser seguro, económico y compatible con todas las restricciones aplicadas al proyecto. El análisis debe estar soportado por criterios de ingeniería, guiados por teorías y conceptos, como la estabilidad o el análisis de deformación.

En la Tabla **8-1** se presenta un resumen de los métodos que suelen emplearse para el análisis de estabilidad de taludes y portales. El método de equilibrio límite es el más usado, dado que únicamente requiere información sobre el peso y la resistencia del material; empero, no involucra el análisis del comportamiento esfuerzo-deformación. Este método se basa en que las fuerzas y/o los momentos actuantes y resistentes se equilibran en un mecanismo o superficie de falla; la relación entre las acciones resistentes y las actuantes determina el valor del factor de seguridad. El análisis se puede realizar estudiando la totalidad del bloque fallado o puede dividirse la masa deslizada en tajadas o dovelas. Se requiere que el diseñador determine el modo de falla esperado y seleccione el método de análisis adecuado.

$$F.S. = \frac{Resistencia\ al\ corte}{Esfuerzo\ cortante}$$

$$F.S. = \frac{Fuerzas\ resistentes}{Fuerzas\ desestabilizantes}$$

El factor de seguridad se usa para conocer qué tan cerca está el talud de fallar bajo las condiciones de diseño. Fellenius [15] presentó el factor de seguridad como la relación entre la resistencia al corte del material en el talud y los esfuerzos de corte actuantes

que tratan de producir la falla, condición que se alcanza cuando FS=1.0. El factor de seguridad se define así:

6.12.3 Factores de seguridad

Los siguientes factores de seguridad (Tabla 6-28) están basados en valores de Factores de seguridad básicos mínimos, como recomendaciones de Hoek [7].

Método	Superficies de Falla	Equilibrio	Características
Bishop simplificado [19]	Circulares	De momentos	Asume una fuerza cortante nula entre dovelas
Janbú corregido [20]	Cualquier superficie de falla	De fuerzas	Asume que no hay esfuerzos cortantes entre dovelas. La solución no satisface completamente las condiciones de equilibrio; el factor "Fo" considera este posible error.
Sueco modificado [21]	Cualquier superficie de falla	De fuerzas	Supone que las fuerzas tienen la misma dirección que la superficie del terreno.
Spencer [22]	Cualquier superficie de falla	Momentos y fuerzas	Asume que la inclinación de las fuerzas laterales son las mismas para cada dovela. Rigurosamente satisface el equilibrio estático asumiendo que la fuerza resultante entre tajadas tiene una inclinación constante.
Mongenstern y Price [23]	Cualquier superficie de falla	Momentos y fuerzas	Las fuerzas laterales siguen un sistema predeterminado. Se asume que la inclinación de la resultante de las fuerzas entre dovelas varía de acuerdo a una función arbitraria.
Espiral logarítmica	Espiral logarítmica	Momentos y fuerzas	Existen diferentes métodos con diversas condiciones de equilibrio.
Elementos finitos	Cualquier superficie de falla	Analiza esfuerzos y deformaciones	Satisface todas las condiciones de esfuerzo. Se obtienen esfuerzos y deformaciones en los nodos de los elementos; y se puede obtener un valor de factor de seguridad a través del método de reducción de la resistencia (SRF).
Diferencias finitas	Cualquier superficie de falla	Analiza esfuerzos y deformaciones	Satisface todas las condiciones de esfuerzo. Se obtienen esfuerzos y deformaciones en los nodos de los elementos, y diferentes condiciones de falla aportando diferentes factores de seguridad.
Otros	(-)	(-)	Cualquier otro método analítico o numérico, con el debido fundamento teórico.

Tabla 6-28. Métodos de análisis de taludes (modificada de [7])

Condición		Factor de seguridad			
		Efectivo		No drenado	
		Diseño	Construcción	Diseño	Construcción
Portales y taludes	Estático	1,5	1,25	1,8	1,4
	Sismo (1)	1,05	1	No se permite	No se permite
Falla planar o en cuña: taludes	Estático	1,5	1,3	No se permite	No se permite
	Sismo (1)	1,05	1	No se permite	No se permite
Falla planar o en cuña: túnel	Estático	2	1,5	No se permite	No se permite
	Sismo (1)	1,1	1,05	No se permite	No se permite
Falla por volcamiento	Estático	1,5	1,25	No se permite	No se permite
	Sismo (1)	1,05	1	No se permite	No se permite
(1) Correspondiente a análisis seudoestáticos y dinámicos.					

Tabla 6-29. Factores de seguridad

Foto 6-8. Construcción y adecuación portal Túnel de La Línea

6.12.4 Determinación del coeficiente de aceleración para análisis seudoestáticos

En el estudio geotécnico se define el riesgo sísmico del área en estudio, por tal motivo, se establecen los parámetros con la elaboración de un estudio sísmico especial local. Según la región sísmica, están definidos los coeficientes de aceleración pico efectiva en la roca PGA_{roca} expresados como una fracción de la aceleración de la gravedad (9,81 m/s^2). Para el análisis se debe obtener la aceleración máxima del terreno, $PGA_{superficie}$ lo cual puede hacerse a partir de un análisis de amplificación de onda unidimensional o bidimensional, con los acelerogramas de sismos definidos en la norma colombiana

sismo resistente vigente.

La aceleración máxima del terreno también puede obtenerse del espectro de aceleraciones, con un valor del periodo igual a cero.

Con base en el valor de la aceleración pico efectiva en roca PGA_{roca}, correspondiente a la zona de amenaza sísmica del problema en estudio [237], se tiene:

$$PGA_{superficie} = PGA_{roca} * F_a$$

Donde:

PGA_{roca} = aceleración pico efectiva en roca

F_a = coeficiente de amplificación de la aceleración, para periodo T=0, y con base en el perfil de sitio definido en la investigación geotécnica (Capítulo 5). El coeficiente sísmico de diseño para análisis seudoestático (K_{ST}) se obtiene como el producto:

$$K_{ST} = \left(\frac{K_{ST}}{PGA_{superficie}}\ \text{Mínimo}\right) * PGA_{superficie}$$

Donde:

$\left(\frac{K_{ST}}{PGA_{superficie}}\ \text{Mínimo}\right)$ = valor mínimo de K_{ST} respecto a la aceleración máxima, obtenido de la Tabla 6-30, valor del coeficiente sísmico de diseño para análisis seudo estático.

Material	K_{ST} / $PGA_{superficie}$ (mínimo)	Análisis de ampliación
Suelos, enrocados y macizos rocososo muy (RQD<50%)	0,8	Ninguno
Macizos rocosos	1	Ninguno
Todos los materiales térreos	0,67	Amplificación de onda unidimensional en dos columnas y promediar
Todos los materiales térreos	0,5	Amplificación de onda bidimensional

Tabla 6-30. Valor del coeficiente sísmico de diseño para análisis seudo estático

6.13 Documentos y actividades, fase de estudios y diseños

Con fundamento en el marco normativo y regulatorio presentado en el capítulo 1 (Ley 1682 de 2013) y definiciones de las tres fases presentadas en el capítulo 2 (Estudios y diseños) y lo dispuesto en el capítulo 5 (exploración e investigación) del presente manual; se resume a continuación la estructura del informe a presentar para cada una de las fases de estudios y diseños [31], [32], [33]. En todo caso, el contenido de los informes de estudios y diseños en cada una de las fases, deberá incorporar todos los lineamientos establecidos en el presente manual, guardando relación, coherencia y consistencia con el nivel de detalle requerido para cada fase del proyecto. De igual manera, se deberán tener en cuenta los lineamientos particulares que sean exigidos por la Entidad, así como el cumplimiento de la normatividad vigente al momento de realizar el proyecto.

6.13.1 Estructura del Informe

A continuación, se relaciona el contenido mínimo del informe, no obstante, a criterio del diseñador, se podrá adicionar a esta estructura, la información necesaria de los temas técnicos que así lo requieran:

DESARROLLO:

- **Introducción**

  En este capítulo se presenta de manera adecuada un resumen de los principales aspectos que se tratarán en el volumen, describiendo aquellos procedimientos empleados en la elaboración de cada uno, si procede. Como complemento a lo anterior, el consultor deberá presentar un resumen de los principales antecedentes que sirvieron de base para la elaboración de los estudios y diseños del túnel.

- **Alcance del informe**

  En este capítulo se describe de manera clara y concisa cuál es el objeto y alcance del estudio.

- **Descripción general del proyecto**

  En este capítulo se presentan los aspectos generales de la vía dentro de la cual se enmarca el túnel, incluyendo además las características principales del mismo.

  También se incluyen los informes previamente elaborados como insumo para la realización de los estudios y diseños.

- **Criterios básicos del diseño**

  Contiene los criterios y los lineamientos para la elaboración de los estudios y de los diseños de las obras civiles y electromecánicas del túnel entre los cuales se incluyen los parámetros a tener en cuenta, la justificación técnica de los mismos, y, la fuente de su procedencia.

- **Estudio de topografía y diseño geométrico**

  En esta sección se describe la zona por donde atravesará el proyecto y los puntos geográficos que se van a vincular. Se definen los parámetros de diseño y luego se materializa la localización definitiva de las zonas de portales, con todas las características geométricas planta-perfil. Igualmente, se determinan las características de las secciones transversales tipo de acuerdo con la geología y la geotecnia, los anchos de calzada, andenes, gálibo mínimo, nichos para parqueo de emergencia, galerías, nichos SOS, etc., de acuerdo con los lineamientos descritos en este manual.

  Este estudio deberá contener los lineamientos establecidos en el Capítulo 5 del presente manual, así como, los demás requerimientos técnicos que disponga el Instituto Nacional de Vías para las fases de estudios y diseños, y normatividad vigente aplicable.

- **Estudio de tránsito para túneles**

  El estudio de tránsito para túneles debe considerar investigaciones y análisis adicionales a las del estudio definido para la carretera, con el objetivo principal de obtener los parámetros para el estudio de ventilación que correspondan al análisis de los diferentes tipos de carga, particularmente transportes especiales y materiales peligrosos, elementos necesarios para desarrollar el análisis de riesgos del túnel.

  Además, en el estudio de tránsito se incluye un numeral dedicado al análisis de los riesgos en el servicio de transporte, el cual contendrá los aspectos de seguridad vial que deben tenerse en cuenta en el diseño del túnel, incluyendo la descripción del sistema requerido para control del servicio de tráfico (sistema de transporte inteligente, ITS), que son necesarios para el diseño del sistema de control del túnel (véase el capítulo 7).

  Este estudio deberá contener los requerimientos técnicos que disponga el Instituto Nacional de Vías para las fases de estudios y diseños, y normatividad vigente aplicable.

- **Estudio de Geología**

  Este estudio deberá contener los lineamientos establecidos en el Capítulo 5 del presente manual, así como, los demás requerimientos técnicos que disponga el Instituto Nacional de Vías para las fases de estudios y diseños, y normatividad vigente aplicable.

- **Estudio de Geotecnia**

  Este estudio deberá contener los lineamientos establecidos en el Capítulo 5 del presente manual, así como, los demás requerimientos técnicos que disponga el Instituto Nacional de Vías para las fases de estudios y diseños, y normatividad vigente aplicable.

Así mismo, este estudio debe incluir el reporte geotécnico del diseño, el cual deberá contener las consideraciones realizadas durante el diseño y los métodos disponibles para la excavación y soporte, al igual que los límites y criterios para variaciones posibles o modificaciones durante la construcción (ver numeral 6.5.4).

- **Estudio de pavimento en túneles**

  El pavimento de los túneles se diseñará con una vida útil mínima de 30 años y es necesario indicar, junto a la memoria de cálculo del diseño del pavimento, lo siguiente: la modulación de las losas a lo largo del túnel; las recomendaciones para el drenaje superficial y subterráneo, y el programa de mantenimiento para el pavimento.

  El uso de pavimento flexible está permitido en los túneles inferiores a 1.000 m; en ningún caso se acepta la utilización de mezclas abiertas [151]. Para túneles de mayor longitud (>1.000 m), solo se permite la utilización de pavimento rígido.

  Este estudio deberá contener los requerimientos técnicos que disponga el Instituto Nacional de Vías para las fases de estudios y diseños, y normatividad vigente aplicable.

- **Estudio hidrológico, hidrogeológico e hidráulico**

  De acuerdo con los análisis que se hayan realizado, es necesario presentar los aspectos relacionados con la presencia de aguas subterráneas en el macizo, así como los aspectos climáticos y aquellos que desde el punto de vista de riesgos puedan afectar el régimen hidrogeológico del túnel; igualmente, es preciso mostrar la circulación del agua en el macizo, capacidad de almacenamiento, permeabilidad y transmisividad, además de la posible modificación al inicio y durante las obras, y el tipo de acuíferos. Adicionalmente, se requiere estimar el valor de agua infiltrada, todo lo anterior, conforme el numeral 5.3, (antes y después de la excavación del túnel).

  Según los análisis de hidrogeología e hidrología y sus interacciones se deben diseñar las estructuras necesarias para la captación, conducción, tratamiento y disposición de las aguas subterráneas y de escorrentía.

  Este estudio deberá contener los lineamientos establecidos en el Capítulo 5 del presente manual, así como, los demás requerimientos técnicos que disponga el Instituto Nacional de Vías para las fases de estudios y diseños, y normatividad vigente aplicable.

- **Impermeabilización, revestimiento y drenaje**

  En este capítulo se presentan los criterios y análisis para el dimensionamiento de los sistemas de impermeabilización, revestimiento y drenaje, entre los cuales se incluyen los rendimientos esperados, especificaciones y materiales a emplear; de acuerdo con los lineamientos descritos en este manual.

- **Estudios de estructuras**

  Este estudio deberá contener los requerimientos técnicos que disponga el Instituto Nacional de Vías para las fases de estudios y diseños, y normatividad vigente aplicable.

- **Estudios ambientales y sociales del túnel**

  En este estudio se presentarán los principales aspectos ambientales, sociales y económicos que puedan ser susceptibles de alteración debido a la construcción del túnel, tales como la presencia de áreas protegidas, reservas forestales, figuras de ordenamiento territorial, comunidades étnicas, la existencia de títulos mineros, la posible vulnerabilidad de las edificaciones circundantes, los efectos del ruido, las vibraciones, el polvo, los efectos sobre la cobertura vegetal, la flora y la fauna, así como aquellos sobre los corredores de conectividad, etc. De igual forma se debe incluir la evaluación de los impactos potenciales (directos, indirectos, sinérgicos y/o acumulativos) ocasionados por el proyecto. Los aspectos presentados en este estudio tienen que enmarcarse en los estudios y análisis que se realicen para la totalidad del corredor vial (ver capítulo 4). Al respecto de los alcances y forma de presentación de los estudios ambientales, se debe cumplir con la Resolución 1402 de 2018, así como la Resolución 1503 de agosto de 2010 del Ministerio de Ambiente, o las que las sustituyan, y términos de referencia vigentes para la elaboración del Diagnóstico ambiental de alternativas y estudio de impacto ambiental.

  Este estudio deberá contener los requerimientos socio-ambientales que disponga el Instituto Nacional de Vías para las fases de estudios y diseños, y normatividad vigente aplicable.

- **Estudio de requerimientos de ventilación, iluminación, energía y bombeo durante la construcción**

  De incluir el diseño de requerimientos de ventilación, iluminación, energía y bombeo durante la construcción del túnel, con base en la estimación de la producción de gases contaminantes y polvo generados por la construcción y la presencia de gases en el terreno. En esta sección se analizan y definen los requerimientos de potencial eléctrico necesario para abastecer el sistema de ventilación, iluminación y demás elementos eléctricos requeridos para la construcción de los túneles; conforme los lineamientos descritos en este manual.

- **Equipos electromecánicos (ventilación, iluminación, suministro de energía y señalización luminosa) y aspectos de seguridad durante la operación**

  Debe incluir el diseño de los principales sistemas electromecánicos y de seguridad requeridos para la adecuada operación del túnel (capítulo 9). El detalle del diseño está sujeto a la etapa de estudios y diseños del proyecto (**fases II** y **fase III**), e incluye como mínimo, un listado de los equipos requeridos (Tabla 7-1) y un presupuesto de los mismos. Se deberá presentar, mínimo, los sistemas de:

  - Iluminación
  - Detección y extinción de incendios
  - Ventilación
  - Suministro de energía
  - Auxilio SOS

- Control de tráfico
- Circuito cerrado de televisión
- Comunicaciones
- Avisos alfanuméricos.
- Control, supervisión y adquisición de datos
- Otros que sean pertinentes

- **Estudio de riesgos**

  Este estudio deberá contener los lineamientos establecidos en el Capítulo 3 del presente manual, así como, los demás requerimientos técnicos que disponga el Instituto Nacional de Vías para las fases de estudios y diseños, y normatividad vigente aplicable.

- **Estimación de costo y cronograma de construcción**

  Debe contener el programa de construcción y su presupuesto asociado, con base en los rendimientos presentados en los numerales anteriores y el análisis de costos.

  Este estudio deberá contener los requerimientos técnicos que disponga el Instituto Nacional de Vías para las fases de estudios y diseños, y normatividad vigente aplicable.

- **Conclusiones**

  Esta sección presenta, de manera concisa, los aspectos más relevantes de cada uno de los capítulos que hacen parte del volumen, con énfasis especial en las actividades, estudios y diseños complementarios que se requieran para fases posteriores.

- **Bibliografía**

  Se listarán en esta sección las referencias bibliográficas empleadas para la realización del documento; deberán presentarse de manera adecuada, según los lineamientos que procedan para este fin.

- **Informe ejecutivo**

  En este apartado se presentan, de manera clara y precisa, los aspectos más relevantes que fueron tenidos en cuenta durante la elaboración de la etapa de estudios y diseños, con especial atención en aquellos aspectos que determinan la continuidad del proyecto para la siguiente etapa.

Si un proyecto vial de carreteras presenta varios túneles dentro de su trazado, para la **Fase I** es necesario elaborar un informe de alternativas por cada túnel, y para los diseños a nivel de las **Fases II** y **Fase III** se deben presentar los informes con las memorias técnicas por separado y por cada túnel 6.13.1. Túneles paralelos de longitud similar se podrán presentar en un solo informe. Si se proyecta un túnel paralelo (bi-tubo) a otro existente, se puede emplear la información durante construcción (as-build), con las debidas verificaciones mediante la campaña de exploración e investigación que se deberá adelantar para la estructura subterránea nueva.

6.13.2 Fase I

Durante esta fase se realiza el análisis con información secundaria (numeral 5.2.2), visitas técnicas, cartografía existente o elaboración de planos topográficos con base en imágenes satelitales recientes y levantamientos geológicos-geotécnicos. Se presentarán la localización del proyecto y sus características geométricas más relevantes, y las diferentes alternativas de túnel estudiadas, a la vez que se comentarán brevemente los criterios de selección y análisis, y el cumplimiento del objetivo en la selección del mejor corredor.

Los trabajos del estudio **Fase I** se realizan tanto en oficina como en campo, dicho estudio debe incluir como mínimo:

- Documentos disponibles de otros proyectos que se encuentren en la zona donde se ubica el estudio del túnel vial.
- Antecedentes y mapas geológicos.
- Análisis e interpretación geológica de fotos aéreas e imágenes satelitales.
- Planos de restitución del sector en las escalas indicadas en el presente manual, numeral 2.2.2.1.
- Revisión de la información general de tráfico (TPD, composición de vehicular, características de la carga y pasajeros del corredor).
- Evaluación estadística y probabilística de la información básica recopilada.
- Información topográfica a la escala definida en el presente manual, numeral 2.2.2.1.
- Información geológica y geotécnica en la escala definida en el presente manual, numeral 2.2.2.1. Se acepta la utilización de información existente, complementada con reconocimiento en campo.
- Adquisición de información hidrológica, meteorológica e hidrogeológica.

De las actividades de campo se deben prever:

- Reconocimiento general del terreno.
- Reconocimiento de cada uno de los trazados analizados, y en especial, análisis de alternativas de ubicación de portales.
- Reconocimiento geológico y geotécnico de cada una de las alternativas evaluadas en el que se indiquen sus principales accidentes; esto incluye la identificación y ubicación de estructuras geológicas relevantes (*p.e.* fallas, contactos).
- Estudio de afloramientos para caracterizar, en términos generales, los tipos básicos de los macizos rocosos, estimación de propiedades geomecánicas, etc.

- Mapeo de las áreas geológicas y geomorfológicas de la zona de influencia de cada una de las alternativas.
- Evaluación de las condiciones ambientales, sociales y prediales. Dependiendo de la condición técnica del proyecto y antes del análisis con las autoridades ambientales, es necesario elaborar el diagnóstico ambiental de alternativas DAA de acuerdo con el Decreto 2041 de 2014, y Decreto único 1076 de 2015 o la norma que lo complemente o sustituya.
- Evaluación de la información hidrológica, hidrogeológica e hidráulica para el área del túnel.

La estructura del informe es la misma presentada en el numeral 6.13.1; contempla, como mínimo, los análisis, cálculos, documentos, anteproyectos y planos que se presentan a continuación:

- Alcance de la **Fase I**.
- Verificación de los criterios de diseño (en todos los aspectos incluidos dentro la fase: geométricos, geomecánicos, revestimiento definitivo, eléctricos, ventilación, etc.).
- Análisis general de las condiciones de tráfico.
- Resumen de las diferentes alternativas de alineamiento estudiadas y selección de un alineamiento con respecto a los diferentes aspectos de prefactibilidad, que incluya una descripción de las características principales en planta y perfil de cada alternativa de trazado, así como los criterios para la selección de la sección transversal.
- Características principales en planta y perfil de cada una de las alternativas de trazado.
- Planos de planta y perfil con las diferentes alternativas analizadas (se debe presentar un plano comparativo en planta y perfil).
- Criterios para la selección de sección transversal, pendiente, planta y tipología (un túnel bidireccional, dos túneles unidireccionales).
- Estimación de las características geométricas principales de las obras subterráneas (sección principal, portales, nichos, galerías, postes SOS, cavernas, pozos, etc.).
- Estimación preliminar de los riesgos geológicos y geotécnicos.
- Evaluación geotécnica y comparación de los corredores.
- Evaluación de la estructura geológica de los corredores.
- Análisis de los posibles métodos de construcción incluyendo los planos conceptuales de cada método de excavación contemplados.
- Sectorización geotécnica preliminar, basada en la información secundaria geológica e hidrogeológica disponible (numeral 5.2.2) y en los recorridos de campo, se debe presentar los planos de sectorización para cada una de las alternativas.

- Sectorización preliminar de los sistemas de soporte para cada una de las alternativas. Para esta fase de diseño se permite el uso de sistemas de clasificación empíricos.
- Evaluación preliminar de las condiciones de aguas subterráneas y posibles infiltraciones durante la construcción y operación del túnel; y mapa conceptual del movimiento de agua subterránea y la posible afectación por cada túnel.
- Evaluación geotécnica del material de excavación (numeral 4.2) y Materiales de Excavación de Reutilización Industrial MERI [233].
- Análisis de los aspectos ambientales principales.
- Análisis preliminar de riesgos y de los requerimientos mínimos de seguridad del túnel como Iluminación y control de iluminación, control general, supervisión y señalización.
- Análisis preliminar de la ubicación y características principales de los portales.
- Estudio preliminar de riesgos
- Recomendaciones generales de operación y mantenimiento del túnel.
- Concepto del sistema de ventilación.
- Estimación preliminar de costos de construcción.
- Programa preliminar de tiempo de construcción.

6.13.3 Fase II

Los requisitos de estudios y diseños de carreteras a nivel de **Fase II,** debe contener las memorias de cálculo y planos, como mínimo, los siguientes aspectos:

- Levantamiento topográfico del área del túnel ubicando el posible eje con base en la cartografía definida por imágenes satelitales o fotografías aéreas y toma de topografía terrestre en los portales.
- Topografía de detalle en los portales y zonas de las galerías de escape que se presenten teniendo en cuenta la longitud del túnel.
- Topografía para los ZODMES y fuentes de materiales.
- Adelantar ensayos que permitan establecer la permeabilidad, resistencia, deformabilidad, dirección preferencial de fractura y tipos de falla del macizo rocoso, conforme lo establecido en el capítulo 5 del presente manual. (numerales 5.4.8 y 5.4.9).
- Inventario predial preliminar del área del túnel.
- Adelantar todos los trabajos que requiere la autoridad ambiental en caso de que se realice el EIA; en caso contrario, se realizan los inventarios, análisis y demás actividades que defina el Instituto, y que permitan adelantar una caracterización ambiental - social de la zona de localización del túnel.
- Diseño detallado de áreas de portales (numeral 6.12).

La estructura del informe es la misma presentada en el numeral 6.13.1. Dentro de los respectivos capítulos se presentan, como mínimo, los análisis, cálculos, documentos, anteproyectos y planos que se presentan a continuación:

- Estudio de tránsito para túneles.
- Estudio de topografía y diseño geométrico.
  - Ubicación geográfica del proyecto.
  - Resumen del proyecto, que se presentará a escala de trabajo.
  - Planta-perfil de construcción a escala de trabajo con el alineamiento horizontal y vertical del túnel, los elementos de curvatura, ancho de calzada, andenes, nichos, localización de obras de drenaje y otros.
  - Localización en planta-perfil con las respectivas carteras de localización y estudio del diseño geométrico del túnel y obras requeridas para la conexión.
- Descripción de los objetivos, localización y duración de la exploración en campo.
- Elaboración del Plan de Exploración que se deberá entregar antes del comienzo de la campaña para su aprobación.
- Plaño geológico con información geológica, litológica, descripción del macizo rocoso, orientación de discontinuidades y tipos de falla. Plano en planta y perfil del compendio de todas las exploraciones.
- Evaluación de la amenaza sísmica general para el sitio y la zona [237].
- Evaluación de la exploración de campo y resultados de laboratorio. Se deben presentar como anexo todas las perforaciones con registro fotográfico, además de los ensayos ejecutados. Se recomienda realizar un análisis estadístico para el análisis de resultados de laboratorio.
- Definición e identificación de las características y propiedades del terreno, y tipos de comportamiento.
- Determinación de secciones típicas con base en los requerimientos geotécnicos. Es necesario presentar al menos un plano por cada sistema de soporte utilizado en el proyecto, incluyendo las cantidades por metro de túnel.
- Selección de métodos de excavación y soporte; se presentan planos de secuencia de excavación, diseños de perforación y voladura (numeral 6.7) o TBM anexo “A” del numeral 10.1 y planos de secuencia para cada tipo de soporte.
- Sectorización del túnel.
  - Sectorización geológica.
  - Sectorización geotécnica.
  - Sectorización de los sistemas de soporte.
  - Presentar los planos de sectorización a escala de trabajo
- Concepto para el drenaje e impermeabilización del túnel, planos de drenaje de aguas de infiltración y derrame provenientes del túnel, manejo de aguas en la zona de portales, su disposición y tratamiento final.
- Estudio hidrogeológico, hidrológico e hidráulico preliminar; se entregan planos identificando los tipos de acuífero y unidades hidrogeológicas, estableciendo las direcciones y las áreas de influencia directa e indirecta. Además, se requiere el

plano de inventario de puntos de agua y evaluación de la vulnerabilidad de contaminación del agua.

- Integración de sistemas de operación para dar cumplimiento a las normativas de seguridad y gestión del riesgo (p.e. salidas de emergencia, ventilación, sistemas de incendio, iluminación, telecomunicaciones y demás para la operación del túnel), dejando las previsiones para incluir los espacios necesarios en el diseño de revestimiento, andenes, galerías, nichos, etc.
- Definición del concepto constructivo (p.e. suministro de agua y energía, vías de acceso, ubicación y manejo de depósitos para material excavado, numeral 4.1.1.1 y 4.2) e impacto ambiental con respecto a aspectos hidrogeológicos, contaminación sonora, calidad del aire, vibraciones y otros impactos ambientales presentes durante la etapa de construcción y operación.
- Evaluación y análisis de la vulnerabilidad y las amenaza, para definir el riesgo (ley 1523 de 2012).
- Ubicación y caracterización de ZODMES
- Caracterización del material excavado (numeral 4.2), para su disposición en ZODMES o posible reutilización industrial de Materiales de Excavación de Reutilización Industrial MERI [233].
- Documentación referente a la adquisición de predios.
- El prediseño de portales (numeral 6.12) se debe presentar con el plano en planta, perfil, por lo menos una sección trasversal y el sistema de manejo de aguas.
- Prediseño del estudio de pozos de ventilación, nichos o bahías y galerías, para los cuales rigen los mismos requisitos de presentación de la información de túnel principal (numeral 6.4.5).
- Prediseño de impermeabilización, revestimiento y drenaje; se deben presentar planos para cada uno de los ítems de este capítulo del informe.
- Prediseño de las instalaciones electromecánicas, de los centros de control y edificios auxiliares. Es necesario presentar los planos preliminares de todos los sistemas junto con un cuadro de cantidades por túnel.
- Prediseño del pavimento de los túneles; se presentan los detalles de las juntas y planos de modulación de losas para cada túnel.
- Prediseño de los elementos estructurales a nivel de geometrías y cuantías de acero.
- Estudio de riesgos
- Cronograma de construcción.
- Estimación del costo del proyecto.

Foto 6-9. Geometría, equipamiento y estado final del Túnel – Cruce cordillera central

6.13.4 Fase III

Los requisitos de estudios y diseños de carreteras a nivel de **Fase III,** debe contener las memorias de cálculo y planos, dicho estudio debe incluir como mínimo:

- Estudio de topografía y diseño geométrico:
  - Descripción de la zona por donde atravesará el proyecto y los puntos geográficos que se van a vincular.
  - Definición de los parámetros de diseño.
  - Ubicación geográfica del proyecto.
  - Resumen del proyecto. Se presentará a escala de trabajo con curvas de nivel cada 1,0 m. El levantamiento topográfico será de una franja de 300 m de ancho y de la longitud total del túnel proyectado.
  - En portales, levantamiento topográfico a escala de trabajo con curvas de nivel cada 0,50 m.
  - Planta-perfil de construcción a escalas de trabajo con el alineamiento horizontal y vertical del túnel, los elementos de curvatura, ancho de calzada, andenes, nichos, galerías, sus interdistancias moduladas (numeral 6.4), localización de obras de drenaje y otros.
  - Localización en planta-perfil con las respectivas carteras de localización y el informe que debe contener el diseño geométrico detallado del túnel o túneles y sus obras requeridas para la conexión.
  - El levantamiento topográfico incluye todos los detalles y localización de las actividades ejecutadas durante la campaña de exploración (*p.e.* mapeos geológicos, líneas sísmicas, apiques, perforaciones, entre otros).
  - Topografía de detalle para los ZODMES y fuentes de materiales.

  - Se fijarán mojones de referencia amarrados al sistema de coordenadas y cotas del Instituto Geográfico Agustín Codazzi.
- Durante el diseño en la **fase III** se requiere presentar los lineamientos a seguir para el manejo topográfico durante la construcción. Desde el punto de vista geodésico-topográfico, las múltiples variables (longitud de los túneles, método de excavación, número de entradas, etc.) hacen prácticamente imposible diseñar una metodología única para la construcción de túneles. No obstante, existen unas consideraciones básicas desde el punto de vista geodésico-topográfico, en función de la instrumentación (ver numeral 8.5).
- Estudio de tránsito para túneles: es necesario entregar parámetros adicionales para el estudio de ventilación, para lo cual se requiere analizar los diferentes tipos de carga, particularmente, transportes especiales y materiales peligrosos que debe estar contenido en el análisis de riesgos del túnel (capítulo 3).
- Elaboración y ejecución del plan de exploración, geológica – geotécnica, para el levantamiento y consolidación a detalle, de los datos geotécnicos del lineamiento geotécnico.
- Análisis de los registros e instrumentación geotécnica, obtenidos con información proveniente de túneles o galerías en la misma área del proyecto.
- Resultados de ensayos de laboratorio e *in situ*.
- Marco geológico regional y local
- Estudio de amenaza sísmica particular y específica para el túnel [237].
- Geomorfología.
- Estratigrafía.
- Hidrogeología.
- Geología estructural.
- Condiciones geológicas esperadas en la excavación del túnel.
- Geología de los portales.
- Geología de los pozos de ventilación.
- Levantamientos geológicos de los portales y levantamiento de información estructural complementaria.
- Propiedades geomecánicas de las rocas en el área de estudio.
- Estimación de los parámetros geomecánicos del macizo rocoso.
- Diseño para los sistemas de soporte.
  - Principios básicos.
  - Tipos de comportamiento del macizo rocoso.
  - Caracterización del macizo rocoso.
  - Definición de tipos de terreno.
  - Requisitos y definición de tipos de soporte.
  - Diseño de soporte para cada uno de los tipos de terreno.

- Sectorización del túnel. (geológica, geotécnica, por soporte)
- Diseño del estudio de pozos de ventilación, nichos y galerías, conforme los lineamientos establecidos en el manual.
- Diseño del pavimento de los túneles.
- Diseño estructural de todos los componentes: incluye las memorias de diseño estructural y los planos de construcción acordes a la normatividad técnica aplicable para cada uno.
- Estudio hidrológico, hidrogeológico e hidráulico.
- Se deberá elaborar el Estudio de impacto ambiental, en el caso de que este no haya sido elaborado en la **Fase II**. Una vez aprobado el estudio de impacto ambiental, deben quedar plenamente definidas las actividades a realizar en el plan de manejo ambiental, así como los respectivos monitoreos, seguimientos y controles ambientales, y los requerimientos y compensaciones en ese sentido.
- Impermeabilización, revestimiento y drenaje: este apartado comprende las obras de captación, conducción, desagüe y tratamiento, y establece las instalaciones sanitarias requeridas para el tratamiento del agua de infiltración durante el periodo de construcción y operación. Además, incluye los sistemas que proveerán al túnel de una adecuada impermeabilización, para lo cual, y de acuerdo con el concepto adoptado, se diseñará la fase(s) de la impermeabilización. Adicionalmente, para el diseño del revestimiento de Capa Doble (RCD), por ser estructural (ver numeral 6.10.3), el estudio debe contener los cálculos estructurales y de materiales para el diseño del revestimiento:
  - Planos de los sistemas para la impermeabilización y revestimiento en todas sus fases.
  - Planos del sistema de drenaje y tratamiento para aguas de infiltración y para las aguas de escorrentía provenientes del mantenimiento del túnel o de derrames en superficie.
- Estudio de requerimientos de ventilación, iluminación, energía y bombeo durante la construcción. Para la energía e iluminación, se deben analizar y definir a nivel de diseño definitivo los requerimientos de potencial eléctrico necesarios para abastecer los sistemas de ventilación, iluminación y demás elementos eléctricos durante construcción.
- Equipos electromecánicos (ventilación, iluminación, suministro de energía y señalización luminosa) y aspectos de seguridad durante la operación. Se debe realizar, como mínimo, el diseño definitivo de los sistemas de:
  - Iluminación.
  - Detección y extinción de incendios.
  - Ventilación.
  - Suministro de energía.
  - Auxilio SOS.
  - Control de tráfico.
  - Circuito cerrado de televisión.
  - Comunicaciones.
  - Avisos alfanuméricos.
  - Control, supervisión y adquisición de datos.

- Estudio de riesgos
- Estimación de costos y cronograma de construcción.
- Preparación de documentos contractuales, entre los que se incluyen:
  - Instrucciones para los proponentes.
  - Descripción del proyecto.
  - Información de condiciones geotécnicas, monitoreo y evaluación de resultados, etc.
  - Planos.
  - Especificaciones técnicas para materiales y calidad de la obra.
  - Cronograma de construcción, plazo, duración y etapas del proyecto.
  - Condiciones contractuales.
  - Cantidades de obra, forma de medición y pago.
  - Diseños detallados
  - Estudio predial detallado.
  - Estudio socioambiental.
  - Estudio de patrimonios históricos o culturales.

6.13.5 Etapa de construcción

Durante la etapa de construcción los diseños se materializan de conformidad con las condiciones reales del terreno encontradas durante la excavación. Este aspecto se abordará con más detalle en el capítulo 8 del manual.

7 Capítulo - EQUIPAMIENTO Y SISTEMAS ELECTROMECÁNICOS

7.1 Glosario

Acceso: es el modo de operación de un puerto de un equipo activo de red de comunicaciones asociado a la entrega a equipo terminal de un servicio propagado por una vía específica.

Apilamiento: en un contexto de redes de equipos activos de comunicaciones está asociado a la facultad o prestación operativa que presenta un conmutador de red de comunicaciones de conectarse con otro(s) similar(es) de manera tal que operen a nivel lógico como un solo equipo, aunque físicamente sean dos o más. Esta capacidad, facultad y/o prestación operativa es limitada y está dada normalmente por el fabricante dentro de las especificaciones técnicas del producto y tiene como fin primordialmente aprovechar y optimizar los recursos de interconexión de las redes de comunicaciones, que dependiendo de su topología operativa y naturales pueden ser enlaces troncales tipo estrella, anillo o de topología mixta.

Centro de Control Operativo: es el espacio físico donde se integran todas las variables de los diferentes sistemas existentes en el túnel; se visualizan de forma gráfica en una interfaz de usuario para administrar, controlar, registrar y supervisar todas las señales digitales que permitirán tomar acciones para el funcionamiento adecuado del túnel, y garantizar control de tráfico, seguridad y protección de las vidas.

Circuito cerrado de televisión (CCTV) (*Closed Circuit Television*): sistema de cámaras de vigilancia conectadas a monitores de video o televisores, acompañadas de un sistema que almacena las imágenes capturadas por las mismas.

Controlador Lógico Programable (PLC) (*Programmable Logic Controller):* computador utilizado para automatizar procesos electromecánicos.

Core (Núcleo): estructura operativa dentro de una topología de red de comunicaciones asociada al procesamiento central de tráfico de dicha red. Denominada estructura de Núcleo.

DHCP (*Dynamic Host Configuration Protocol*): en español, protocolo de configuración dinámica de anfitrión, es decir, asignación dinámica de direccionamiento IP.

Edge (*Borde*): estructura operativa dentro de una topología de red de comunicaciones asociada al enlace de estaciones terminales y entrega de servicios a usuarios finales de dicha red. Denominada estructura de Borde.

Encriptación: cifrado o codificación de información para protegerla de terceros.

Fibra óptica: medio físico de transmisión de información, usual en redes de datos y telecomunicaciones, que consiste en un filamento delgado de vidrio o de plástico, a

través del cual viajan pulsos de luz láser o led, en la cual se contienen los datos a transmitir.

Gestión de red: proceso de administración de los recursos activos de una red de comunicaciones, normalmente a través de aplicativos de software dedicados para tal fin. Incluye estado, alarmas y direccionamiento IP.

HMI (*Human-Machine Interface*): interface hombre-máquina, entorno que presenta los datos a un operador (humano) y a través del cual este controla el proceso.

Hostname (*Identificador del Anfitrión*): asignación textual de nombre o ID de un equipo activo de red de comunicaciones.

IGMP (*Internet Group Management Protocol*): protocolo de administración de grupos de Internet, se utiliza para intercambiar información acerca del estado de pertenencia entre enrutadores IP que admiten la multidifusión y miembros de grupos de multidifusión.

IP (*Internet Protocol*): definido en el RFC 791, es el protocolo encargado de la comunicación de datos a través de una red de paquetes conmutados, como es Internet o cualquier Intranet. Permite enviar información a cualquier tipo de red. Su función principal es la de encaminamiento.

LACP (*Link Aggregation Control Protocol*): protocolo de control de agregación de enlaces, se utiliza para unir puertos físicos de la red de comunicaciones en un único enlace de tráfico de gran ancho de banda. Si falla un enlace, la carga se redistribuye en los enlaces restantes, garantizando funcionamiento continuo.

LAN (*Local Area Network*): red de área local, es una red de periféricos que emplean protocolos de comunicaciones que abarca un área reducida.

LED (*Light-Emitting Diode*): Diodo emisor de luz.

LLDP (*Link Layer Discovery Protocol*): protocolo de descubrimiento de vecinos, se utiliza para recibir/transmitir información de los equipos que se encuentran conectados.

Mantenimiento: conjunto de acciones que tienen como objetivo mantener un sistema o restaurarlo a un estado en el cual pueda desplegar la función para la que fue concebido.

Modbus: protocolo de comunicación serial basado en el modelo maestro/esclavo; estándar de facto, es público, muy seguro, no requiere licencias y su implementación es relativamente fácil en dispositivos electrónicos.

Multicast (*Multidifusión)*: es el envío de la información en múltiples redes a múltiples destinos simultáneamente.

Nivel de servicio: condiciones operativas del tránsito vehicular en relación con variables como velocidad, tiempo de recorrido, libertad de maniobra, comodidad, deseos del usuario y seguridad vial.

Norma Técnica Colombiana (**NTC):** normas de calidad para empresas y actividades profesionales emitidas por el organismo nacional de normalización de Colombia —el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (Icontec)—.

NTP (*Network Time Protocol*): protocolo de tiempo de red, es un protocolo de Internet para sincronizar los relojes de los sistemas informáticos a través del enrutamiento de

paquetes en redes con latencia variable. Utiliza UDP como su capa de transporte, usando el puerto 123. Está diseñado para resistir los efectos de la latencia variable.

PIM (*Protocol Independent Multicast*): protocolo de multidifusión independiente, es un Protocolo de encaminamiento que crea una estructura de árbol de distribución entre los clientes multicast formando dominios.

PIM tiene diferentes formatos, los más usados son:

- PIM Sparse Mode (PIM-SM): es un protocolo para ruteo eficiente a grupos de multicast, es eficiente y construye un esquema tipo árbol de cada emisor a receptor en el grupo de multicast.
- PIM Dense Mode (PIM-DM): es un protocolo adecuado donde muchos nodos se suscribirán para recibir paquetes multicast. Básicamente crea árboles inundando de tráfico multicast todo el dominio y luego podando las ramas que no hay receptores presentes. El primer protocolo de ruteo multicast DVMRP usaba PIM denso.

PoE (*Power over Ethernet*): alimentación eléctrica a través de Ethernet, es una tecnología que incorpora alimentación eléctrica a una infraestructura LAN estándar.

Protección Activa: Sistemas manuales o automáticos de protección contra incendio que actúan con medios de extinción para apagar o detener un incendio.

Protección Pasiva: Sistemas o mecanismos de protección contra incendio que ayudan a prevenir o contener la propagación del fuego o su resistencia inicial ante una ignición.

Protocolo de control de transmisión/protocolo de Internet (TCP/IP) (*Transmission Control Protocol/Internet Protocol*): sistema de protocolos que hacen posibles servicios como Telnet, FTP y correo electrónico entre computadores que no pertenecen a la misma red.

Retie: Reglamento técnico de instalaciones eléctricas.

Sistema de alimentación ininterrumpida (UPS) (*Uninterruptible Power Supply*): sistema de baterías y otros elementos almacenadores de energía eléctrica que puede proporcionarla por un tiempo limitado, durante un “apagón”.

Sistema de detección automática de incidentes (DAI): sistema que detecta la ocurrencia de actividades peligrosas o accidentes al interior del túnel.

Sistema de iluminación: Conjunto de dispositivos con la función de iluminar de manera segura para los usuarios del túnel de manera eficiente. Comprende el sistema de control de iluminación, las luminarias y sistema de conexionado.

Sistema contra incendios: Conjunto de sistemas de protección pasiva y activa para la mitigación y extinción de incendios como gabinetes, rociadores, detectores de humo, alarmas y otros equipos de protección que funcionan en conjunto para proteger principalmente a los ocupantes y las instalaciones ante potenciales incendios.

Sistema de megafonía: conjunto de micrófonos, altavoces y otros aparatos que, debidamente coordinados, aumentan el volumen del sonido en un lugar de gran concurrencia.

Sistema de ventilación: en condiciones normales, garantiza una calidad suficiente del aire en el túnel mediante la disolución de los contaminantes. En una situación de incendio, debe conseguir que el entorno sea lo más seguro posible para los usuarios y los servicios de rescate mediante el control apropiado del flujo de humo.

SNMP (*Simple Network Management Protocol*): protocolo simple de administración de red, es un protocolo de la capa de aplicación que facilita el intercambio de información de administración entre dispositivos de red.

STP (*Spanning Tree Protocol*): protocolo de árbol de expansión, es un protocolo de capa 2 que se ejecuta en bridges y switches. La especificación para STP es IEEE 802.1D. El propósito principal de STP es garantizar que no se creen loops o bucles cuando se presenten trayectorias redundantes en la red.

Supervisión, Control y Adquisición de Datos (Scada) (*Supervisory Control and Data Acquisition*): plataforma de *software* que permite controlar y supervisar automáticamente procesos industriales a distancia a través de sensores y actuadores.

Switch (*Conmutador de red de comunicaciones*): es un equipo activo que se encarga de establecer las relaciones operativas de interconectividad de servicios y equipos dentro de una red de comunicaciones mediante la conmutación de los mismos.

Topología: Esquema operativo funcional, el cual, en un contexto de comunicaciones, seguridad, control o automatización, es básicamente la expresión gráfica de la metodología bajo la cual se interconectan los equipos de una solución.

VLAN (*Virtual Local Area Network*): red de área local virtual, es un método para crear redes lógicas independientes dentro de una misma red física. Varias VLAN pueden coexistir en un único conmutador físico o en una única red física.

7.2 Alcance

Los requisitos de los equipos que se describen en el presente manual varían según la longitud, la ubicación, la velocidad y el volumen de tráfico del túnel. Las medidas aquí descritas se orientan, principalmente, a garantizar el enrutamiento del tráfico de forma segura para evitar eventos críticos y proteger tanto a los usuarios de los túneles como al ambiente (favoreciendo el entorno de operación al garantizar condiciones ambientales idóneas mediante sistemas automáticos basados en lógicas de control e instrumentación de campo que constantemente detectan y ajustan dichas condiciones ambientales, sumado a garantizar una operación eficiente a nivel energético, sostenible y aplicando tecnología de punta), así como para apoyar los servicios de emergencia en caso de incendios, accidentes y averías.

Este *Manual* pretende mostrar un equipamiento para túneles diseñado de acuerdo con los principios y criterios estandarizados, que permita una operación segura y una alta calidad adaptada a las respectivas condiciones de tráfico local, bajo la consideración de efectividad en los costos. Adicionalmente, se hace referencia a una selección de

normas, publicaciones actuales y documentos de investigación que servirán de ayuda a los diseñadores y operadores.

Foto 7-1. Naranjal - Túnel Renacer, vía Bogotá Villavicencio

Los diseños, en especial de los sistemas de protección contra incendios, deberán ser realizados por empresas experimentadas y con el soporte de profesionales altamente calificados en esta materia. La norma fundamental a tener en cuenta en la seguridad y protección contra incendios en túneles es la NFPA 502 edición 2020 y aquellas otras normas NFPA que se referencien en dicha norma y en el presente documento. El proyecto debe contar con una interventoría, a través de una empresa especializada en estos temas, para la supervisión del proyecto en las etapas de diseño, instalación y pruebas de aceptación ante las autoridades competentes.

Siempre existirá un elemento de riesgo que, por lo general, no puede ser descartado o eliminado, incluso si se escoge un equipamiento excelente o se realiza un seguimiento de la mejor manera posible. El *Manual* no pretende reemplazar el diseño técnico especializado ni describir la planificación para cada caso particular, sino establecer los parámetros mínimos que han de tenerse en cuenta en el desarrollo de un proyecto de este tipo.

7.3 Concepto de seguridad

Es necesario tener en cuenta los diversos requisitos que resultan de la calidad del tráfico, la seguridad, la efectividad en los costos y las condiciones ambientales, e incluirlos en un concepto global de seguridad.

El área disponible para el tráfico en los túneles es menor que en un tramo libre de la carretera. En muchos casos, un túnel es considerado como un cuarto cerrado con las siguientes características:

- Escasez de iluminación
- Carriles estrechos
- Suministro limitado de energía
- Reducción sustancial de aire fresco
- Rutas de evacuación limitadas

Lo anterior es muestra de que los túneles son componentes particularmente críticos de la red vial, por lo tanto, el equipamiento instalado tiene que ser de ayuda para los conductores y usuarios del mismo. Por otra parte, las situaciones potencialmente peligrosas, tales como incendios, accidentes, trancones o atascos y las altas concentraciones de humo, gases tóxicos, etc., requieren medidas de seguridad especiales, tales como rescate en áreas confinadas ente otros.

Los túneles son sistemas notoriamente complejos, que dependen de muchas variables. Los siguientes parámetros influyen en su seguridad:

- Longitud
- Número de tubos
- Número de carriles
- Ancho de cada carril
- Geometría de la sección transversal
- Accesos y salidas subterráneas
- Trazado de la carretera
- Pendiente
- Tipo de construcción
- Volumen del tráfico
- Sentido del tráfico (unidireccional o bidireccional)
- Riesgo de atascos o trancones en el tráfico
- Tiempos de acceso de los servicios de emergencia
- Características de las vías de acceso
- Aspectos relacionados con la velocidad
- Condiciones geográficas y meteorológicas
- Altitud

En razón de lo anterior, tendrá que llevarse a cabo un análisis del riesgo para establecer las medidas de seguridad, y de equipamiento para garantizar un nivel elevado de seguridad en el túnel. Dicho análisis tomará en consideración los posibles accidentes que afecten la seguridad de los usuarios durante la fase de funcionamiento, así como la naturaleza y magnitud de sus consecuencias [153].

7.4 Seguridad y Cualificación del riesgo

El aspecto de la seguridad en los túneles, cubre una amplia gama de temas; este manual ofrece una orientación sobre algunos de los más importantes y comunes que se consideran en el capítulo 3, sin embargo, a continuación, se trata el tema del manejo de seguridad y emergencia, para referirse a los equipos electromecánicos.

En general, dos situaciones influyen en la planificación en casos de emergencia:

- Un incidente o avería del vehículo, que causa un grado de bloqueo de los carriles o incluso el cierre temporal del túnel.
- Una colisión y la posibilidad de incendio o explosión, que son los incidentes potencialmente más peligrosos para los usuarios del túnel y requieren una respuesta rápida de los servicios de emergencia.

La seguridad del túnel es el resultado de la integración de medidas de infraestructura, la operación del túnel y comportamiento humano, así como la preparación y gestión ante incidentes.

El análisis de riesgo de incendio en los túneles es un tema complejo que implica un amplio conocimiento multidisciplinario, la aplicación de diferentes modelos físicos para explorar las causas y desarrollo de los incendios, y la evaluación de medidas para prevenir y reducir sus consecuencias.

Para el análisis de riesgo de incendio se deberán tener en cuenta los factores como la resistencia al fuego de la estructura, protecciones pasivas, sistemas de suministro de aire y extracción de humos, materiales y recubrimientos resistentes al fuego, sistemas de detección y alarma, sistemas manuales y automáticos de extinción de incendio, muros y puertas corta fuego, entre otros.

Se deberá tomar como guía las normas y criterios aplicables de NFPA para evaluar la idoneidad y la ejecución de una evaluación de riesgo de incendio para cada problema de seguridad contra incendios en el túnel y sus construcciones complementarias. Todos los túneles de 90m y superiores, deberán estar protegidos con sistemas de protección contra incendio de acuerdo con lo indicado en el numeral 6.13, Sistemas contra incendio del presente manual y con los análisis de riesgos específicos de cada proyecto.

El análisis de riesgo para la operación de un túnel vehicular de carreteras se realiza desde varios frentes o escenarios que determinarán los lineamientos básicos para el cálculo mecánico, la selección de ventiladores y la composición de los tableros eléctricos.

Un análisis de riesgos deberá considerar como mínimo , las siguientes situaciones: [154].

- Incidentes relacionados con los vehículos:
  - Fuego dentro del túnel
  - Fallas mecánicas de los vehículos – aspecto primario
  - Choques o colisiones – aspecto primario
  - Eventual incendio de un vehículo – aspecto primario
  - Escombros en el túnel – aspecto secundario
  - Altura de los vehículos – aspecto secundario
- Incidentes no relacionados con los vehículos:
  - Fallas en iluminación – aspecto secundario

- Fallas en el sistema de ventilación – aspecto secundario
- Fallas en los drenajes, bombeo – aspecto secundario
- Fallas en el sistema de telefonía - aspecto secundario
- Salida de peatones dentro del túnel – aspecto secundario
- Vandalismo – aspecto secundario
- Terrorismo – aspecto secundario

- Incidente de Incendio:
  - Tamaño esperado de incendio (carga combustible en escenario crítico)
  - Tasa de liberación de calor
  - Crecimiento del fuego
  - Generación de humo
  - Temperaturas máximas esperadas
  - Resistencia al fuego de la estructura y recubrimientos
  - Duración del fuego
  - Tiempo de respuesta de los bomberos
- Tráfico:
  - Colas de tráfico, tráfico bloqueado – aspecto primario
  - Volumen de tráfico – aspecto primario
  - Congestión – aspecto primario
- Tipo de carga:
  - Carga peligrosa – aspecto primario
  - Carga deslizante – aspecto primario
  - Carga ancha – aspecto primario
- Riesgos del clima:
  - Presencia de niebla – riesgo secundario
  - Presencia de condensación o vapor – riesgo secundario
  - Fuertes vientos - riesgo secundario
  - Mantenimiento planeado:
  - Cierre de carriles
  - Cierre total
  - Operación de contraflujo vehicular
  - Señalización temporal

A partir de la evaluación y análisis de estos riesgos[4] se definen las condiciones críticas sobre las cuales se evalúa el comportamiento de los sistemas para los túneles. El concepto de seguridad elaborado después de la evaluación, al igual que el análisis de los puntos anteriormente expuestos, se basan en un concepto simple. Este concepto, que se complementa con las herramientas necesarias para la mejora a largo plazo, consta de cuatro pasos:

- Detección: detección rápida y precisa de las variables ambientales, los datos de tráfico e incidentes.

[4] Para evaluar el riesgo se requieren datos de frecuencias de incidentes relacionados con cada uno de los aspectos mencionados e información sobre sus consecuencias, obtenida en los ámbitos nacional y regional. Mientras en Colombia no exista una base de datos suficiente, es preferible hacer la selección de los sistemas con base en guías y manuales, los cuales han sido concebidos a partir de evaluaciones previas del riesgo (v. gr. tipo de ventilación en función de longitud del túnel, volumen de tránsito, tipo de operación direccional o bidireccional, etc.).

- Validación inmediata: validación automática de los datos adquiridos.
- Activación y alerta: activación automática y confiable de planes de acción predefinidos con mínima interacción y ajuste del operador.
- Registro y análisis: registro a largo plazo de datos y herramientas para análisis.

A partir de las consideraciones para los diferentes escenarios, se debe tener claro cuáles son los equipos y sistemas necesarios y su respectiva interacción. Igualmente, es preciso identificar los niveles de intercambio de flujo de información requerido entre las partes involucradas. Los análisis del riesgo serán llevados a cabo por un organismo independiente del gestor del túnel y se incluirán en la documentación de seguridad que se entregue a la autoridad administrativa.

Como se menciona en la referencia [155], está disponible una amplia gama de métodos cualitativos y cuantitativos para los dos elementos de un análisis de riesgos, a saber: la evaluación de riesgos y la planificación de medidas de seguridad. Todos los métodos presentan ventajas e inconvenientes, y la investigación ha demostrado que en la práctica se utiliza una combinación de varios de ellos. De ahí que la elección de los métodos se debe hacer teniendo en cuenta las ventajas y desventajas respectivas en el contexto de una situación específica.

Una vez que el equipo y los sistemas involucrados han sido determinados puede llevarse a cabo la especificación técnica. Asimismo, la infraestructura de comunicación necesaria se puede determinar y especificar una vez entendidas las necesidades de equipos y sistemas.

Cabe señalar que es necesario evaluar los riesgos y tomar las medidas de seguridad en las vías a cielo abierto en los accesos de los túneles, en aras de minimizar el riesgo de cualquier caída de rocas, deslizamientos, etc., que ponga en peligro la seguridad de los usuarios y de los transeúntes.

7.5 Geometría del túnel

7.5.1 Restricciones de uso del túnel

La circulación de peatones, carretas o carretillas, ciclistas, bicimotos, motocicletas con motores de cilindrada inferior a 50 cc, animales y vehículos de tracción animal, vehículos o sillas para discapacitados no deberá permitirse en túneles de carreteras bajo ningún escenario, el control estará a cargo del operador del túnel (ver 6.4.4.1). Se deberán considerar las restricciones legales y reglamentarias para el transporte de material peligroso y su correspondiente control.

7.5.2 Medidas estructurales pertinentes para la seguridad

La infraestructura de transporte que se construya en el país deberá atender a criterios y estándares de calidad, oportunidad, seguridad y visión de cero muertes en accidentes,

conforme lo establece la Ley 1682 de 2013, por lo tanto, las siguientes son medidas estructurales que se deben cumplir:

A) Salidas directas del túnel al exterior

En el caso de tubos dobles, por requerimientos de ventilación, se requiere que los portales estén separados por lo menos a 50 m (entre ejes de la vía), para evitar la recirculación de los gases en operación normal o del humo en caso de incendio.

B) Pasos de emergencia y de conexión

Esto incluye conexiones cruzadas y transversales entre tubos o a un tubo de escape paralelo, como refugios donde el público puede permanecer de forma segura durante una emergencia, y las galerías construidas a lo largo de los tubos de tráfico, o tal vez bajo la calzada, que conducen a la superficie. La consideración de estos elementos está estrictamente relacionada con el impacto de los costos de construcción del túnel. En general, la distancia entre las salidas de emergencia (GVP) se detalla en el numeral 6.4.4.3. Este tipo de paso ha de ser iluminado y señalizado.

C) Tubo de escape paralelo

Este es un tubo separado para la evacuación de los usuarios, por lo general ubicado adyacente al tubo principal. El tubo de escape requiere una inversión considerable, por lo cual se recomienda tener en cuenta varios factores que puedan influir en la seguridad del túnel y el nivel de riesgo asociado.

D) Áreas de giro

Las áreas de giro hacen posible que el tráfico de un tubo sea redirigido al otro en caso de emergencia. Es imperativo que estas áreas se planifiquen también fuera del túnel, donde la morfología del proyecto permita su construcción.

E) Refugios con vía de evacuación separada del tubo del túnel

Como resultado del análisis de riesgos y la consideración de los parámetros que influyen en la seguridad del túnel (véanse los numerales 7.3 y 7.4), se debe considerar un túnel piloto adyacente al túnel principal, que puede ser utilizado como túnel de exploración en la etapa de construcción del principal y facilita las labores de mantenimiento y operación.

7.5.3 Espacio para el equipamiento

Es preciso tener cuidado para identificar las posiciones óptimas del equipamiento eléctrico y mecánico localizado en el túnel, ya que la facilidad de acceso puede tener un efecto significativo en los costos de mantenimiento y el número de carriles que requieran ser cerrados.

Las tuberías que suben por el hastial, para conectar y alimentar cámaras, iluminación, semáforos, ventilación y otros, deben quedar embebidas en el concreto, siempre y cuando el tipo de recubrimiento lo permita.

Si el tipo de recubrimiento no lo permite, igualmente se debe proteger la tubería adoptando medidas especiales que garanticen su seguridad.

En cuanto al cableado implementado en el túnel, cuando estén expuestos, deben ser no propagadores de llama, no propagadores de incendio y libres de halógeno; y

adicionalmente, para salvaguardar la vida de las personas en la evacuación, el cableado debe cumplir con lo estipulado en la norma NFPA 502 capítulo 12 y la norma /2004.

Por lo tanto, el Revestimiento de Capa Doble – RCD (numeral 6.10.2), el andén (numeral 6.4.4) y nichos (numeral 6.4.5); permiten el diseño e instalación de los ductos, cárcamos y demás previsiones para que las diferentes redes de conexión queden embebidas en la estructura del túnel y no expuestas. En ningún caso se podrá iniciar la construcción del revestimiento y andenes, hasta tanto las condiciones de equipos de protección y seguridad, no se hayan definido por completo, teniendo en cuenta los requerimientos de espacio para:

- ✓ Ventilación
- ✓ Iluminación
- ✓ Suministro Eléctrico
- ✓ Sistemas Contra Incendio
- ✓ Señales
- ✓ Cableado y ductos de servicio
- ✓ Cuartos Técnicos
- ✓ Armarios SOS
- ✓ Nichos
- ✓ Entre otros

Foto 7-2. Aspecto final, Túnel 6 vía Bogotá Villavicencio

EQUIPOS ELECTROMECÁNICOS						
CATEGORÍA	**TIPO**	**A**	**B**	**C**	**D**	**E**
ILUMINACIÓN	Permanente	●	●	●	●	●
	De seguridad	●	●	●	O	O
	Para evacuación	●	●	●	◐	O
VENTILACIÓN	Mecánica	●	●	◐	O	O
	Anemómetros	●	●	◐	O	O
	Sensores de visibilidad	●	●	◐	O	O
	Detectores CO	●	●	◐	O	O
	Detectores NOX	O	O	O	O	O
COMUNICACIÓN	Altavoces y Megafonía	●	●	●	◐	O
	Radio	●	●	◐	◐	O
	Emisora	●	O	O	O	O
	Estaciones metereológicas	●	◐	O	O	O
	Teléfonos de emergencia SOS	●	●	●	O	O
CONTROL DE TRÁFICO	Barreras exteriores	●	●	●	◐	◐
	Semáforos exteriores	●	●	◐	O	O
	Semáforos interiores	●	O	O	O	O
	Sistema de control de gálibo	●	●	●	●	●
	CCTV (Circuito Cerrado de TV)	●	●	◐	O	O
	Centro de Control	●	●	O	O	O
	Sistema de detección de vehículos (aforadores)	●	●	●	O	O
AUTOMATIZACIÓN	SCADA	●	●	◐	O	O
	MC redundante	●	●	●	O	O
	Red de conectividad	●	●	◐	O	O
DETECCIÓN DE INCIDENTES	Detección automática de incidentes	●	●	◐	O	O
	Detección de incendios	●	●	●	O	O
	Alarma manual	●	●	O	O	O
	Alarma automática	●	●	●	O	O
ENERGÍA ELÉCTRICA - RESPALDO	Plantas eléctricas	●	●	●	◐	O
	Doble circuito eléctrico	●	◐	O	O	O
	UPS	●	●	●	O	O
ESTRUCTURA DE EMERGENCIA	Salidas de emergencia peatonal	●	●	◐	◐	O
	Andenes	●	●	●	●	●
	Nichos SOS o centros remotos de emergencia	●	●	●	◐	◐
	Galería de evacuación vehicular (acceso emergencia)	●	●	O	O	O
DETECCIÓN DE INCIDENTES	Detección automática de Incidentes	●	●	●	●	◐
	Detección de Incendios	●	●	●	●	◐
	Alarma Manual	●	●	●	●	◐
	Alarma Automática	●	●	●	●	◐
CONTROL DE INCENDIOS	Conexiones de manguera Clase I (NFPA14)	●	●	●	●	◐
	Extintores Portátiles	●	●	●	●	◐
	Teléfonos de Emergencia SOS	●	●	●	●	◐
	Red Hidráulica de Extinción de Incendios.	●	●	●	●	◐
	Sistemas Fijos de Extinción de Incendios.	●	●	●	◐	◐
● Obligatori	◐ Recomendado	O Opcional				

Tabla 7-1. Requisitos mínimos según la clase de túnel

7.6 Componentes electromecánicos en túneles de carreteras

De acuerdo con la clasificación de los túneles de carretera en Colombia, definida como referencia en el capítulo 2 numeral 2.3, para los diferentes aspectos de diseño de este manual (Ilustración 7-1); en la anterior Tabla 7-1 se determinan los requisitos mínimos los equipos electromecánicos conforme sea obligatorio, recomendado u opcional para el túnel según longitud y TPD.

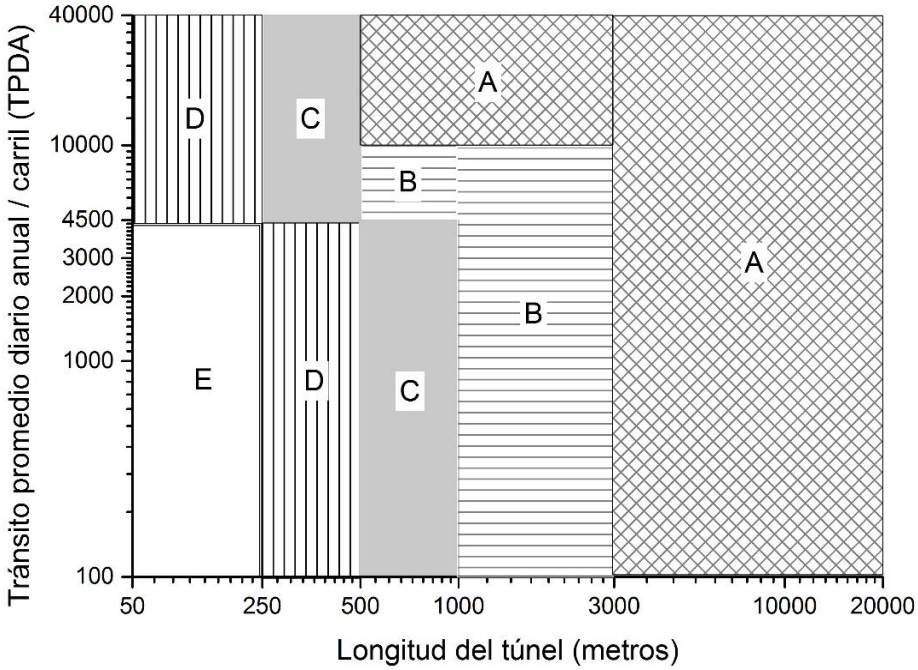


Ilustración 7-1. Clasificación de los túneles viales para Colombia

7.7 Definición de los sistemas electromecánicos

7.7.1 Arquitectura general

Un túnel es un sistema muy complejo y se compone de varios subsistemas, los cuales se describen con más detalle en los siguientes numerales.

Toda la información recopilada de los sensores y los equipos es de poco valor si no se integra como un conjunto. Los datos requieren un procesamiento sofisticado y deben ser mostrados en una forma tal que ayude al operador. Esto le permitirá a este último reaccionar rápidamente a situaciones cambiantes. Una forma de clasificar los niveles de procesamiento de la información es el modelo de tres capas (véase Ilustración 7-2).

- Nivel I: operación y control.
- Nivel II: automatización.
- Nivel III: equipamiento en campo.

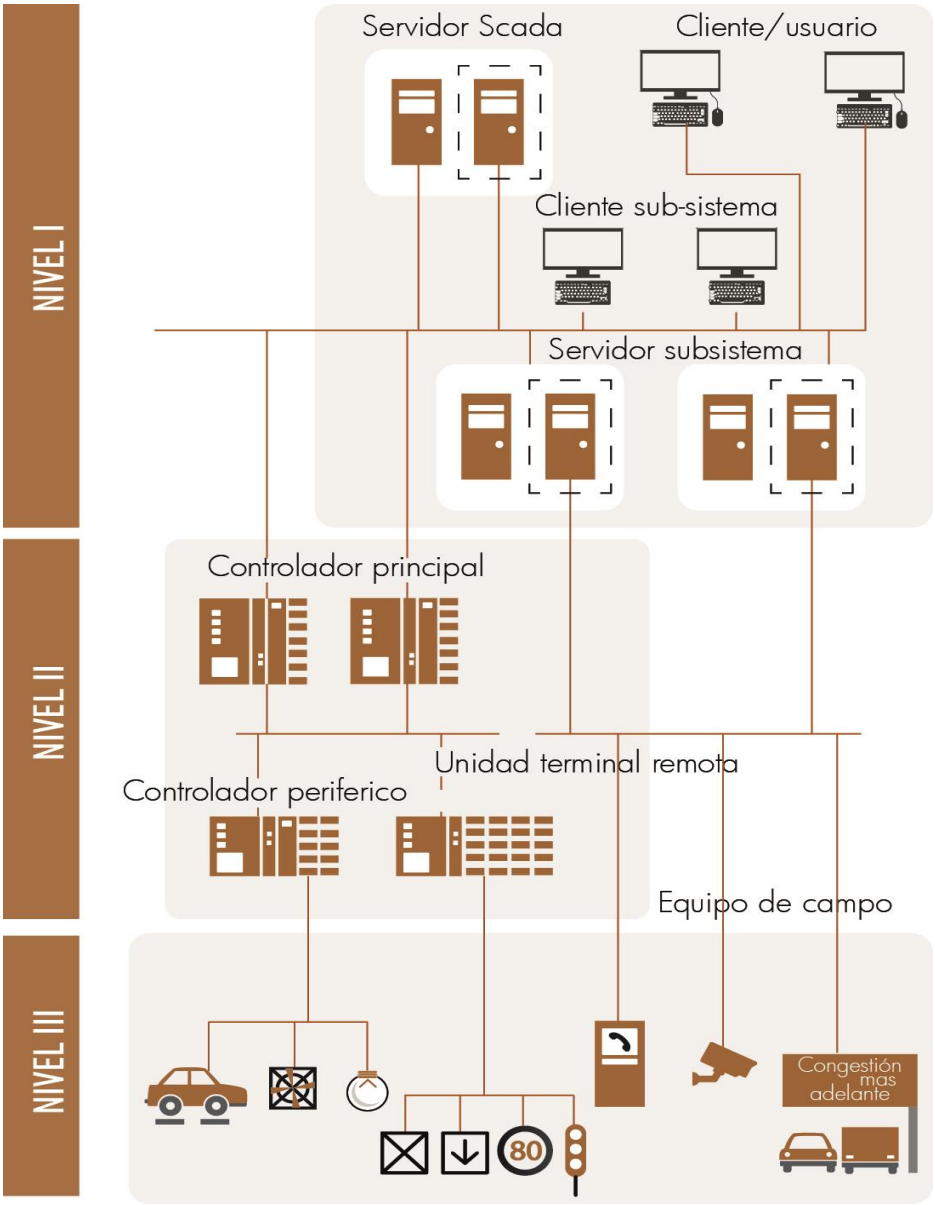


Ilustración 7-2. Sistemas electromecánicos, modelo de tres capas

7.7.1.1 Nivel I (operación y control)

Los siguientes aspectos son necesarios para la operación y control de un túnel:

- Soluciones integradas donde todos los subsistemas deben ser gestionados con una interfaz única.
- Garantizar la integridad de la estructura y la seguridad de las estaciones de trabajo usuarios-cliente que recogen todos los datos, el rendimiento, el riesgo y los efectos de desastres potenciales.
- Extender la vida de envejecimiento de los túneles.
- Una arquitectura común donde la información puede ser intercambiada y el resultado es susceptible de mejorarse.

- Evaluación inmediata y automática de la seguridad del túnel después de un evento mayor.
- Soluciones de operación eficiente de bajo consumo de energía, con materiales amigables con el ambiente, sostenibles y con tecnología de punta certificada y escalable.
- Sistemas escalables e interoperables.

Cuando varios túneles en una zona se encuentran equipados de acuerdo con las normas, la solución más económica es un centro de control central que sirva para todos; esto reduce el mantenimiento y los esfuerzos de entrenamiento. Por esta razón, debe existir una norma de trabajo común que reduzca las diferencias en los distintos proyectos.

El centro de control operativo es el espacio físico donde se integran todas las variables de los diferentes sistemas existentes en el túnel; se visualizan de forma gráfica en una interfaz de usuario para administrar, controlar, registrar y supervisar todas las señales digitales que permitirán tomar acciones para el funcionamiento adecuado del túnel, y garantizar control de tráfico, seguridad y protección de las vidas.

En el centro de control operativo se supervisan y administran los parámetros correspondientes a los sistemas de:

-Automatización
-Eléctrico
-Ventilación
-Sensores ambientales
-Iluminación
-Detección de incendio
-Extinción de incendio
-Control de tráfico
-CCTV y DAI con el sistema de grabación
-Telefonía SOS e IP (*Internet Protocol*)
-Megafonía
-Comunicaciones y red de conectividad
-Comunicación por radio

Para la supervisión y el control del entorno del túnel, un sistema típico debería constar de los siguientes elementos —ubicados en el centro de control operativo—:

- Servidor Scada: sistema capaz de monitorear y controlar los procesos de información recibidos a partir de los instrumentos colocados en el túnel o cerca de este, y determinar el modo óptimo de funcionamiento.
- Usuario-cliente: estación de trabajo donde el operador solo tiene una interfaz gráfica de usuario (GUI por sus iniciales en inglés) o interface hombre-máquina (HMI por sus siglas en inglés) en la que se representan todos los subsistemas y sus dispositivos.

- Subsistema de servidores: es responsable de supervisar el subsistema y la recolección de la información que debe ser enviada al Scada. Durante la mayor parte de tiempo no todos los subsistemas necesitan un servidor; los equipos son integrados a través del nivel de automatización. Se debe considerar que la fusión de este subsistema de servidores y el servidor SCADA junto con la GUI o HMI constituyen el Subsistema de Estaciones Maestras, acorde a los conceptos y arquitecturas de una solución tipo SCADA.
- Subsistema cliente: es responsable de la configuración del sistema servidor.

7.7.1.2 Nivel II (automatización)

Muchos de los eventos que ocurren con frecuencia dan lugar a la misma acción en todas las ocasiones; cuando los acontecimientos y su respuesta están automatizados, se denominan con el nivel que da título a este apartado. Este sistema ayuda a que los operadores estén aliviados de muchas tareas repetitivas y dispongan de más tiempo para atender todos los asuntos del túnel.

Los PLC deben permitir la integración de variables digitales y analógicas provenientes de diferentes dispositivos periféricos. Su finalidad será supervisar estas variables y ejercer acción de control, de acuerdo con las rutinas de programación establecidas para los diferentes parámetros. Estos dispositivos podrán ser de operación autónoma (aislados), o integrados a un sistema central Scada, si la clasificación del túnel determina que debe tener este componente.

Para la automatización de los túneles, un sistema típico debe consistir de los siguientes elementos:

- Controlador principal: es un PLC responsable de la lógica del túnel y de obtener la información de los diferentes subsistemas y decidir la operación correcta que se debe realizar.
- Controlador de periféricos: es una unidad remota con capacidad de realizar pequeñas operaciones y tiene la responsabilidad de reunir información de diferentes dispositivos y enviarlos al PLC principal.
- Controlador remoto: unidad remota pasiva responsable de reunir información de diferentes dispositivos y enviarla al PCL principal.

7.7.1.3 Nivel III (equipamiento en campo):

Los equipos tales como detectores de lazo (sensores de flujo vehicular), paneles de mensaje variable y ventiladores poseen varios niveles de información de inteligencia de pre-proceso y automonitoreo. Es necesario que estos dispositivos puedan encenderse y apagarse desde el nivel II; esto se logra a través de los controladores libres de mantenimiento que se encuentran ubicados en pequeños recintos en carretera, en lo que se denomina nivel III (campo).

Los sistemas de detección de incendios, dispositivos de campo y equipos complementarios o de interface, deberán ser diseñados, instalados y probados de acuerdo con los requerimientos de la norma NFPA 72 en su versión más reciente.

7.8 Sistemas de automatización

7.8.1 General

Este sistema permite integrar todos los subsistemas electromecánicos en una sola plataforma que administra, supervisa y controla las diferentes variables que existen en el túnel, las cuales hacen parte de un sistema centralizado que coordina la operación y los procedimientos en las rutinas de operación normal y por incidentes. Todas las rutinas forman parte de una programación orientada a la toma de decisiones automáticas por medio de procesos de software, o por intervención humana.

La filosofía de operación de los sistemas de detección y extinción de incendio, y su integración con los sistemas de ventilación, señalización, CCTV, evacuación y otros, obedecerá a los criterios de diseño los cuales se fundamentarán en el análisis de riesgo para cada túnel, así como en las indicaciones de la norma NFPA 502 edición 2020 y demás normas NFPA allí referenciadas.

La ingeniería del proyecto determinará las especificaciones técnicas más convenientes para el tipo de sensores y materiales que mejor se ajusten a las condiciones ambientales de operación y durabilidad de cada sistema.

Hay una consideración general que debe tenerse en cuenta en la normativa de seguridad: el sistema de automatización del túnel está obligado a garantizar que este trabaje en ausencia total de la intervención del operador. Es decir, ante una situación en la que se dañe la comunicación entre el centro de control y los dispositivos de campo, el túnel deberá ser capaz de reaccionar y aplicar el plan predefinido relacionado con la situación específica.

7.8.2 Arquitectura

El sistema de automatización debería integrar los siguientes subsistemas:

- Sistemas de adquisición de señales de entradas y salidas
- Señalización de tráfico
  - Señal aspa-flecha
  - Señal variable de límite de velocidad
  - Panel de mensajes variables
- Control de accesos
  - Detección de exceso de altura (gálibo)
  - Barreras
- Ventilación
- Adquisición de señales equipos en campo sensores (CO, NOx, opacidad, anemómetros, luminancímetros)
- Iluminación

- Sistemas de control de energía
- Control de subestaciones (interruptores, protecciones, transferencia automática, armario SOS, UPS, generador eléctrico, interruptores, contactores, selectores manual-automático)
- Dispositivos de detección de incendios (panel de control de incendios, detectores, estaciones manuales de alarma, alarmas audiovisuales, detectores lineales de calor, dispositivos de supervisión y cableado)
- Sistemas de extinción de incendios (tanque de almacenamiento, bombas y tablero controlador, supervisión de válvulas, activación de válvulas de diluvio y pre-acción, etc.)
- Sistema de drenaje (aguas lluvias, agua del sistema contra incendio y posibles derrames)

El concepto tiene una arquitectura piramidal compuesta por un controlador principal (MC), ubicado en la subestación o en la sala de equipos cerca del túnel; el dispositivo debe estar conectado a un controlador de periféricos (PC) o a una unidad terminal remota (RTU), ubicados en armarios o en el chasis situado en el nicho (Ilustración 7-3).

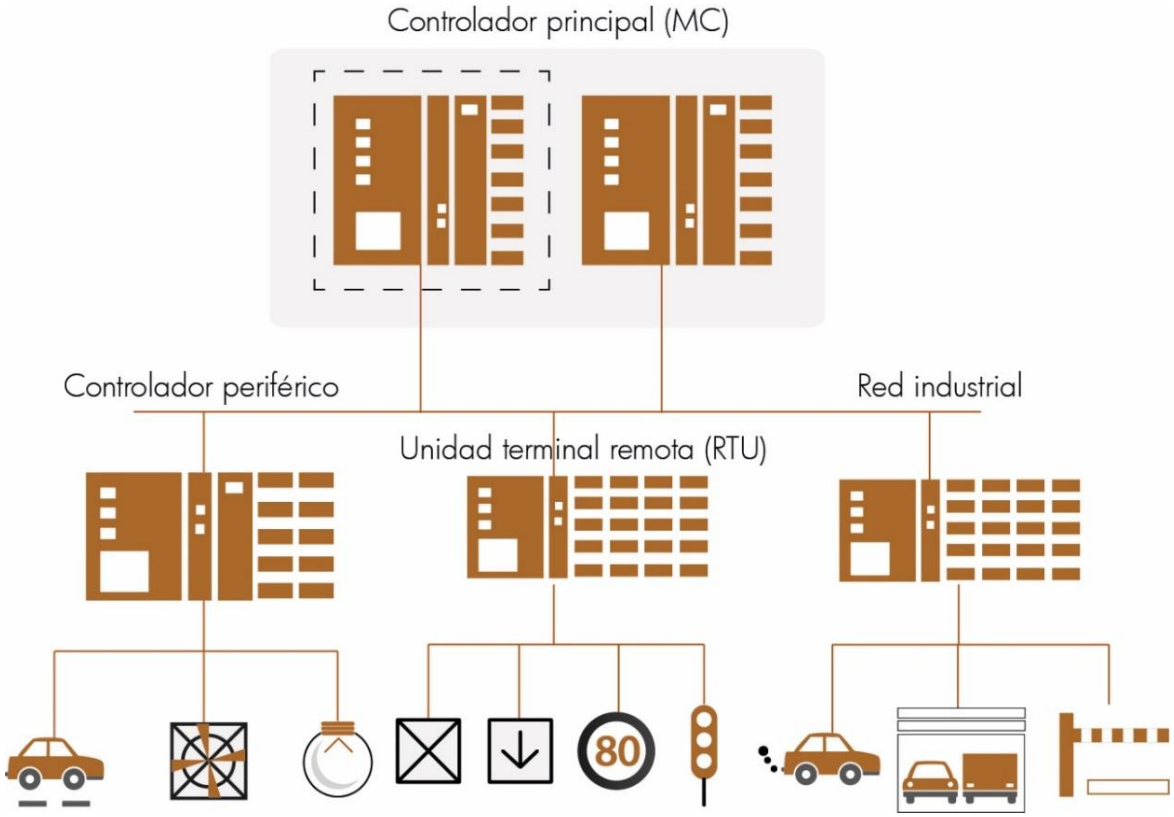


Ilustración 7-3. Sistema de automatización

La diferencia entre el PC y la RTU es la necesidad de procesar o no la información procedente de los dispositivos. Esta diferencia se introduce con el fin de dejar en el MC solo la lógica general para gestionar el túnel y evitar una pérdida de funcionalidad en caso de un problema de comunicación. La dimensión de los PLC debe ser congruente con el número de señales y la complejidad de la lógica del algoritmo (Ilustración 7-4).

El controlador principal debe ser redundante para los túneles de clasificación A, B y C. El protocolo de comunicación entre los dispositivos que forman parte del sistema debe

basarse en protocolos industriales como Modbus/Modbus TCP/IP O Profibus/Profinet. Cada red tiene que estar conformada como un anillo que usará fibra óptica como medio físico; cada túnel tiene un anillo dedicado para la comunicación; y los diferentes túneles en el mismo proyecto deben estar conectados en el anillo principal.

La conexión entre los dispositivos de automatización y los equipos de campo puede ser digital bidireccional. La transmisión de señales de control debe efectuarse obligatoriamente por medio físico, sea por los cables de alimentación eléctrica utilizando la tecnología *Power Line Communication* probada, o por medio de cables de comunicación de señales de control específicos. No está permitida la comunicación de señales de control que utilicen el espacio libre por medio de tecnologías inalámbricas.

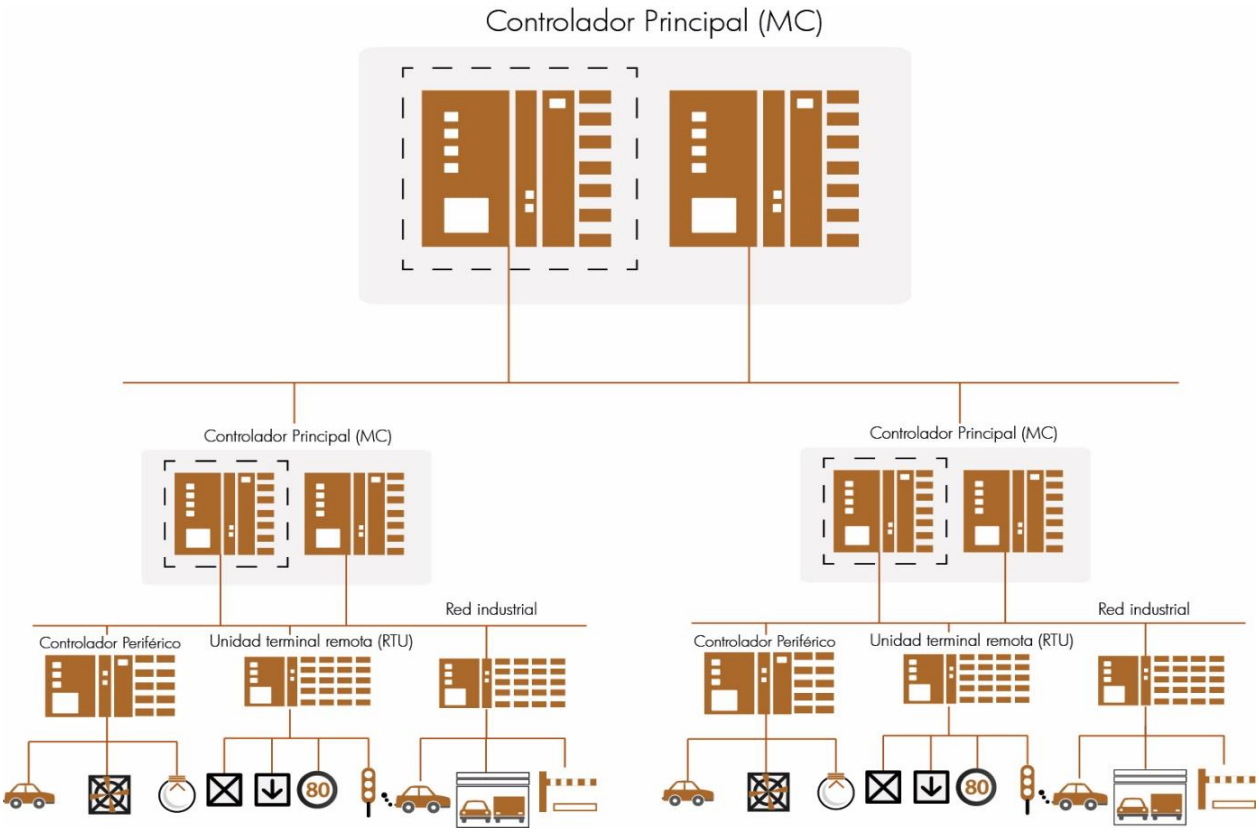


Ilustración 7-4. Arquitectura de sistema de automatización

La lógica utilizada para gestionar un túnel que hace parte de un proyecto con varios túneles divididos por tramos de carretera tiene que extenderse también a los demás; y en la parte superior del proyecto debe existir un controlador principal capaz de gestionar la interacción entre los diferentes túneles. Si dos túneles están muy cerca uno del otro y se clasifican como C o D, pueden ser manejados por un MC en una configuración redundante.

Los PLC tendrán que ubicarse en armarios propios que deberán tener todos los accesorios necesarios.

7.8.3 Controladores lógicos programables (PLC)

Las funciones clave de los PLC son:

- Control de equipos o subsistemas
- Monitoreo de equipos o subsistemas
- Almacenamiento de parámetros específicos de los subsistemas

Deberá suministrarse una UPS para los PLC. Cada uno de estos últimos deberá estar provisto de una interfaz para un terminal portátil, a efectos de usarse durante la puesta en servicio, pruebas, mantenimiento, cambio y edición de programas [154]. Los requisitos de seguridad y protección - protección de contraseña deberán ser provistos para todas las instrucciones del operador no rutinarias [154].

Foto 7-3. Galibo, Sistema de Túneles, cruce de la Cordillera central

Para mayor coordinación y optimización de recursos, el nivel de redundancia se deja a criterio del diseñador y del dueño de proyecto, sin llegar a comprometer la seguridad; así mismo, es válido integrar el sistema o Hardware del túnel, con el sistema o Hardware de la carretera adyacente o sistema de túneles pequeños.

7.8.4 Sistema Scada

El sistema Scada estará constituido por un conjunto de rutinas, aplicaciones e interfaces que permitan incorporar a los PLC subsistemas y componentes

electromecánicos, a fin de realizar las funciones de monitoreo, control, visualización de alarmas, rutinas preprogramadas, procedimientos automáticos y semiautomáticos que garantizan la operación del túnel en condiciones normales y las acciones a tomar ante un evento de incidentes.

El sistema Scada es un software multiprotocolo que permite realizar labores de supervisión, control y adquisición de datos; tiene interfaz gráfica de usuario, jerarquía de operadores, programación específica para cada dispositivo en monitoreo y control, administración detallada de los PLC, y capacidad de conexionado en backup y de generación de acciones debido a los cambios en las variables de entrada.

El Scada posee una capacidad de integración total de las diferentes variables encaminadas a la continuidad de la operación y a la seguridad de los usuarios. Este integra las variables generadas por los PLC, incorporando las señales generadas por los sistemas de detección de incendio, detección automática de incidentes, señalización y galibo, entre otros.

Los PLC y el Scada se recomiendan para los túneles tipo C y son obligatorios para los de tipo A o B. Sin embargo, los PLC o sus equivalentes específicos para el control de iluminación son obligatorios para los túneles A, B, C, D y E por razones de cumplimiento del Retilap [143], seguridad, economía de energía, disminución de gastos de operación y reducción de la impronta carbono de los túneles (sostenibilidad).

Las características generales del sistema Scada deben ser:

- Arquitectura general basada en nivel cliente-servidor el cual provee al operador la GUI requerido para la operación del túnel; y un nivel de control PLC que maneja la lógica ejecutada en el túnel y controla sus actividades. En el evento de una falla del Scada o del PLC, este control se trasfiere automáticamente al sistema de *backup* para que un simple punto de falla no interrumpa la operación del túnel.
- Operación de cada subsistema integrado completamente en la interfaz de usuario en el Scada, sin necesidad de que esta cambie para la operación de ninguno de ellos.
- Escalabilidad: posibilidad de estar conectado a varios proyectos bajo la misma plataforma.
- Disponibilidad: posibilidad de contar con una configuración redundante con un cambio entre los dos sistemas, sin pérdida de datos.
  - Redundancia hot standby con computadores duales de sistemas.
  - En un sistema redundante, cada interfaz de usuario se enlaza con el sistema activo y pasivo; la redundancia hace el cambio de sistema sin producir ningún daño.
- Distribución geográfica del sistema.
  - El servidor Scada deberá comunicarse bajo el estándar TCP/IP con otro servidor que estará localizado geográficamente en otra ubicación.
- Base de datos.

  - Puede usarse cualquier número de archivos paralelos.
  - La duración del almacenamiento, el tamaño del archivo, la estrategia de backup, etc. pueden configurarse para cada archivo de forma individual.
  - Fácil configuración de archivos, definición de archivos con valores comprimidos (archivos por hora, diariamente, mensualmente, etc.).
  - Definición de archivos con valores (archivos por hora, diariamente, mensualmente, etc.).
  - Corrección de valores hereditaria de niveles de compresión.
  - Parametrización de backups fuera de línea para archivos cerrados.
  - Apertura.
  - Permitir el uso de diferentes plataformas en una aplicación. Estas plataformas se comunican una con otra vía TCP/IP.
  - Soportar diferentes plataformas y sistemas operativos.
- Tendencia.
  - Los datos archivados y activos son agrupados en juntos y visualizados en la pantalla de tendencias.
  - Ilimitado número de curvas de tendencia para la visualización en la pantalla de tendencias.
  - Visualización de tendencias con desfases de tiempo permitiendo comparaciones en diferentes periodos.
  - Suma de tendencias, barra de tendencias, tendencias XY con visualización con y sin referencia de tiempo.
- Reportes.
  - Alto desempeño en el acceso a todos los datos de procesos archivados.
  - Creación individual de cualquier número de formatos de reporte.
  - Soporte para los datos archivados de forma comprimida.
- Webserver.
- Interfaz.
  - TCP/IP
  - Modbus
  - Ethernet/IP
  - SNMP Manager & Agent
  - Bacnet
  - Interfaz para comunicación con los PLCs
  - OPC: OPC Client & Server (DA, A&E)
  - IEC 60870-5-101,-104, IEC 61850

7.8.5 Programación

El sistema de automatización debe ser programado con una plataforma industrial.

El algoritmo para gestionar los subsistemas principales, de iluminación y de ventilación, así como el tráfico, necesita tener una lógica que se encuentre implementada en el PLC. Esta función es obligatoria en caso de pérdida de comunicación con el centro de control. Los PLC monitorearán continuamente su propio funcionamiento y reportarán

fallas al operador. Todos los elementos afectados por una condición de falla tendrán que ser controlados para pasar a un estado seguro [154].

7.8.6 Comunicación con el centro de control

La comunicación entre el nivel de automatización y el centro de control debe ser bidireccional, de capa 2, 3 y 4, con propagación de protocolos y administración y gestión de servicios acorde a los requerimientos específicos de cada subsistema a integra y capaz de manejar una comunicación con múltiples centros de control. Para que el operador pueda estar al tanto de cualquier falla de los equipos y determinar el alcance de los problemas, es obligatorio controlar de forma continua el estado, el consumo y el rendimiento de los elementos. Las señales de alarma son generadas por ciertos eventos; en caso de falla en los elementos individuales de los sistemas, se clasificará el evento de acuerdo con la urgencia de la respuesta requerida.

El monitoreo del rendimiento, la condición de los equipos y el consumo de energía permiten al operador predecir el mantenimiento y los costos futuros de operación [154].

7.9 Sistema eléctrico

El sistema eléctrico deberá suministrar una alimentación segura, confiable y suficiente para el correcto funcionamiento de acuerdo con las normas IEC 60364 [156] o NTC 2050 [157], las cuales se tienen en cuenta en el reglamento técnico de instalaciones eléctricas (Retie) [158] para diseñar el sistema eléctrico de equipos y sistemas del túnel.

La energía eléctrica que se suministra está directamente relacionada con el consumo eléctrico de la totalidad de los equipos considerados en el diseño para los sistemas electromecánicos, eléctricos, hidráulicos, electrónicos, control y automatización en media y baja tensión, según la especificación de cada equipo definido para cada uno de los sistemas.

Para la definición de los diferentes equipos eléctricos será tenido en cuenta el artículo 20.23 “Tableros eléctricos y celdas” del Retie.

El sistema eléctrico contemplado para los túneles se considera de misión crítica y ha de ser seguro, minimizando los riesgos de este tipo de instalaciones.

Las UPS tendrán que cumplir la clasificación dada por la norma IEC 62040-3 y deberá anexarse el cuadro de normatividad.

7.9.1 Sistema eléctrico de media tensión

Este sistema está compuesto por cuatro etapas básicas: generación, transmisión, distribución y comercialización a 60 Hz de operación.

En Colombia, los sistemas de distribución, como todo lo relacionado con los sistemas de potencia, están regulados por la Comisión de Energía y Gas (CREG).

En resolución CREG 70 del 28 de mayo de 1998 se establecen los siguientes niveles de tensión, en los cuales se realizan las instalaciones de distribución y transmisión:

-I: tensiones inferiores a 1 KV.
-II: tensiones comprendidas entre 1 y 30 KV.
-III: tensiones comprendidas entre 30 KV y 62 KV.
-IV: tensiones superiores a 62 KV.

Según la resolución CREG 097 de 2008 [159], se redefinen los siguientes niveles de tensión, modificando los anteriores así:

-I: tensiones inferiores a 1 KV.
-II: tensiones comprendidas entre 1 y 30 KV.
-III: tensiones comprendidas entre 30 KV y 57,5 KV.
-IV: tensiones de valor mayor a 57,5 KV.

Las redes de media tensión se pueden clasificar en aéreas y subterráneas. Los circuitos primarios de distribución de redes de media tensión son trifásicos trifilares con neutro sólidamente puesto a tierra para la subcentral, con una tensión nominal para las ciudades de 11,4 KV a 60 Hz. Para las zonas urbanas, las redes de media tensión poseen una tensión nominal de 13,2 KV a 60 Hz. Los equipos que conforman los sistemas de media tensión deben cumplir las normas IEC 62271 [160], 61641 [161] y 60529 [162].

Los túneles que de acuerdo con su clasificación tengan cuarto de control deberán tener un puerto de comunicaciones en los dispositivos de protección de sobretensiones y descargas eléctricas con los siguientes protocolos, o similares:

-Modbus
-Modbus TCP/IP
-Profibus
-Profinet

Adicionalmente, la instalación de interruptores extraíbles dependerá del criterio del diseñador del sistema.

7.9.2 Sistema eléctrico de baja tensión

El sistema de baja tensión está compuesto por cuatro etapas básicas:

-Generación
-Transmisión
-Distribución
-Comercialización

La normatividad técnica colombiana de electricidad clasifica la baja tensión como la comprendida entre 25 V y 1 KV.

Las redes de distribución en baja tensión serán trifásicas tetra filares y las redes de baja tensión en zonas rurales serán radiales trifásicas o monofásicas. Adicionalmente, el sistema tendrá un puerto de comunicaciones en los dispositivos de protección de sobretensiones y descargas eléctricas con los siguientes protocolos, o similares:

- Modbus
- Modbus TCP/IP
- Profibus
- Profinet

Igualmente, debe tener interruptores extraíbles de acuerdo con el proceso.

Los equipos que conforman los sistemas de baja tensión tienen que cumplir las normas IEC 61439 [163] y 60947 [164]. Para aplicar la norma IEC 61641 [161], se deberá realizar un análisis de riesgo para determinar su aplicación de acuerdo con la condición crítica del túnel y su tráfico vehicular.

7.9.3 Transformadores de distribución y potencia

Las relaciones de transformación y las potencias de los transformadores dependerán de los consumos requeridos por el túnel. Lo normal en túneles cortos es tener un solo transformador en la acometida, con uno primario en alguno de los valores de las tensiones indicadas anteriormente y uno secundario con la tensión de la Tabla 7-2 acorde con la norma IEC 61439-1 [165].

NIVEL DE TENSIÓN	BIL
480 V	8 kV
208/120 V	4 kV

Tabla 7-2. Nivel de tensión de transformadores

En túneles largos donde, según los cálculos de regulación de tensión, se requieran calibres de cables muy grandes en baja tensión, será necesario disponer de una subestación principal desde donde se distribuya en uno de los niveles de la Tabla 7-2 al interior del túnel; en este se instalarán una o varias subestaciones según los requerimientos y distancias del mismo.

Los transformadores pueden ser con aislamiento en aceite o de tipo seco. En todos los casos, es preciso considerar los requerimientos indicados en el Retie para transformadores y subestaciones, así como las indicaciones de la NTC 2050 en lo que respecta a las bóvedas, puertas y distancias de seguridad.

Para el caso de las subestaciones, al interior de los túneles se requiere seleccionar transformadores clase F encapsulados en resina colada, acordes con la potencia requerida según las cargas a alimentar. En ningún caso se deben usar transformadores aislados en aceite o de menores características térmicas. Para el cálculo de las potencias es preciso tener en cuenta las características de la carga y evaluar el factor K requerido.

En todos los casos, los transformadores deberán contar con su cubierta protectora contra contacto directo y elementos de protección tales como Buchholz, nivel de aceite, sobrepresión, imagen térmica, temperatura de ambos devanados, temperatura aceite en los aislados en aceite, temperatura devanados en los secos y elementos de

indicación remota como posición de *taps*, temperatura de devanados, aceite en los aislados en aceite y temperatura devanados en los secos.

Todas las alarmas, disparos e indicaciones deberán cablearse a las celdas de la alimentación en la subestación, del lado primario o secundario del transformador, para ser enviados al sistema de control central por alguno de los dispositivos electrónicos inteligentes (IED, *Intelligent Electronic Devices*) en la subestación. De no haber las suficientes entradas disponibles, tendrá que preverse una unidad para este fin.

7.9.4 Celdas de media tensión

Los niveles de tensión de las celdas de media tensión se determinarán según los valores indicados anteriormente. Las celdas deberán cumplir con lo establecido en el RETIE para la certificación de producto, al igual que los requerimientos específicos para subestaciones de distribución y de uso final de la energía eléctrica. Igualmente, tendrán que satisfacer los criterios de diseño y pruebas de las normas IEC 62271-200 [166] o ANSI C37.20.2 [167]. En el caso de la norma ANSI, adicionalmente deberá cumplir con la C37.20.7 [168] de arco interno. A pesar de que la certificación de producto de RETIE acepta las simulaciones de las pruebas de corto circuito y arco interno, las normas internacionales aún no aceptan estás simulaciones, por lo cual para las celdas requeridas en los túneles tendrán que pasar por pruebas tipo de arco interno, cortocircuito e incremento de temperatura realizadas en laboratorios físicamente sobre prototipos de las celdas.

Las celdas tendrán la clasificación A FLR según IEC 62271-200 [166] o 2 B según la ANSI C37.20.7 [168]. La clasificación para pérdida de continuidad de servicio será LSC 2B para celdas aisladas en aire y LSC 2 para celdas aisladas en SF6, según la IEC 62271-200 [166]. En el caso de la norma ANSI, aplicará lo indicado en la categoría *metal clad* según la ANSI C37.20.2 [167].

Las barras de las celdas serán de cobre electrolítico, aisladas con fundas termo encogibles y en compartimientos separados entre cada celda; y las celdas aisladas en aire contarán con un sistema de detección de arco interno, el cual deberá actuar antes de 100 ms en un sistema totalmente selectivo, limitando la salida de solo la zona afectada.

Las cajas de baja tensión de las celdas al interior de los túneles deberán contar con un sistema de detección de humo que deberá reportar al sistema central vía los IED en las celdas. Debido a que en caso de conflagración el SF6 por sus características se convierte en un gas tóxico, no se permitirá ningún equipo al interior del túnel que utilice este tipo de tecnología para el corte del arco o como aislamiento; esto aplica a celdas e interruptores.

Al interior de los túneles solo deben instalarse celdas con aislamiento en aire e interruptores con corte en vacío.

Para la selección de las celdas se tendrá en cuenta el estudio de cortocircuito que se debe desarrollar con la información del OR de corriente de corto circuito monofásica y trifásica. Este valor se tomará a 1 s, tanto para el valor de corto en la barra como para la corriente de arco interno.

Todos los cables al interior de las subestaciones en el túnel tienen que estar libres de halógenos y compuestos clorados, de baja emisión de humos y retardantes a la llama. Los relés de protección en las celdas deben ser del tipo multifuncional y su uso corresponderá a como lo indica el IED. En los actuales sistemas de control, con este último se ejecutan los comandos de apertura y cierre del interruptor, y se indica la posición del interruptor y equipos de maniobra en su pantalla frontal. Teniendo incluido el selector de control local – remoto, llevará al sistema de control central las posiciones de los equipos y demás elementos que requieran ser monitoreados a través de las entradas binarias en él. Para ello, deberá contar como mínimo con 15 entradas, y adicionalmente contará con las funciones de protección que sean requeridas según la topología y diseños de la solución.

Para la comunicación con el centro de control se emplearán protocolos del tipo serial sobre TCP/IP. Para lograr un análisis de las fallas con una estampa de tiempo los protocolos serán:

- DNP 3.0 sobre TCP/IP
- IEC 61850
- Profinet

Según lo establecido por la IEC 62271-200 [166] como por la C 37.20.2 [167] los calibres de los cables de control al interior de las cajas de baja tensión de las celdas de media tensión serán:

- 16 AWG para cableados de control
- 14 AWG para cableado de señales de tensión de los transformadores de potencial
- 12 AWG para cableado de señales de corriente de los transformadores de corriente

En los casos específicos como el de cableado de señales de control a PLC, y señales de corriente en unidades de protección diferencial de barras que usen transformadores de suma con manejo de corriente en el orden de mA, se podrán usar calibres menores de acuerdo con los manuales del fabricante.

Los transformadores de corriente se determinarán según el consumo de la carga que se alimente. La potencia de los núcleos de medida será tal que se mantenga la precisión del 0,5% con la carga del medidor a usar y su cableado; y la potencia de los núcleos de protección será tal que no se llegue a la saturación del núcleo en caso de corrientes altas de cortocircuito y con una clase de 5P20.

Los transformadores de potencial serán de clase 0.5. Se usará un mismo núcleo para alimentar los equipos de medida y protección. La potencia se determinará según las cargas a alimentar. Estos podrán ser fijos o extraíbles y tener o no protección en el lado primario con fusibles.

En los casos de sistemas de medida para el OR se deberá cumplir con la modificación al código de redes, indicado en la resolución 038 de 2014 de la CREG.

Las borneras para los transformadores de corriente deberán ser del tipo seccionable y *cortocircuitables*, con accesorios para cortocircuitar las tres fases de los transformadores con un solo puente. La construcción física de la bornera deberá permitir que el elemento seccionable pueda ser movido solo cuando el puente cortocircuitable esté completamente cerrado. Las borneras para los transformadores de potencial serán del tipo seccionable.

La marcación de los cables de control en cada extremo al interior de las cajas de baja tensión será conforme a lo indicado en la norma IEC 62491 [169] como origen – destino.

7.10 Sistemas de ventilación

7.10.1 Generalidades

El sistema de ventilación mecánica cumple dos funciones importantes: primero, garantizar la cantidad suficiente de oxígeno en el aire y la limpieza del mismo mediante la disolución de los contaminantes en la normal operación del túnel; y segundo, en el evento de un conato de incendio, asegurar el control de los flujos de aire dentro del túnel.

El sistema de ventilación en los túneles viales, debe atender los resultados del análisis del riesgo realizado previamente y contener un plan de respuesta frente al riesgo analizado de posible incendio, por tal motivo, el sistema de ventilación deberá estar integrado con el sistema contra incendio y los demás sistemas requeridos por los criterios de diseño.

Todos los túneles que requieran de un sistema de ventilación mecánica, de acuerdo con su clasificación y al estudio de análisis de riesgos, deberán incluir los dispositivos de automatización y control correspondientes para este sistema.

Los parámetros que determinarán el cálculo mecánico y la selección del mejor sistema de ventilación son los siguientes:

- Tipo de tráfico:
  - Tráfico unidireccional o bidireccional
  - Periodicidad de tráfico bidireccional
  - Máximo flujo de tráfico
- Condiciones estructurales (longitud, gradiente, sección transversal y rutas de escape)
- La situación en los alrededores
- Control de contaminantes emitidos por los vehículos

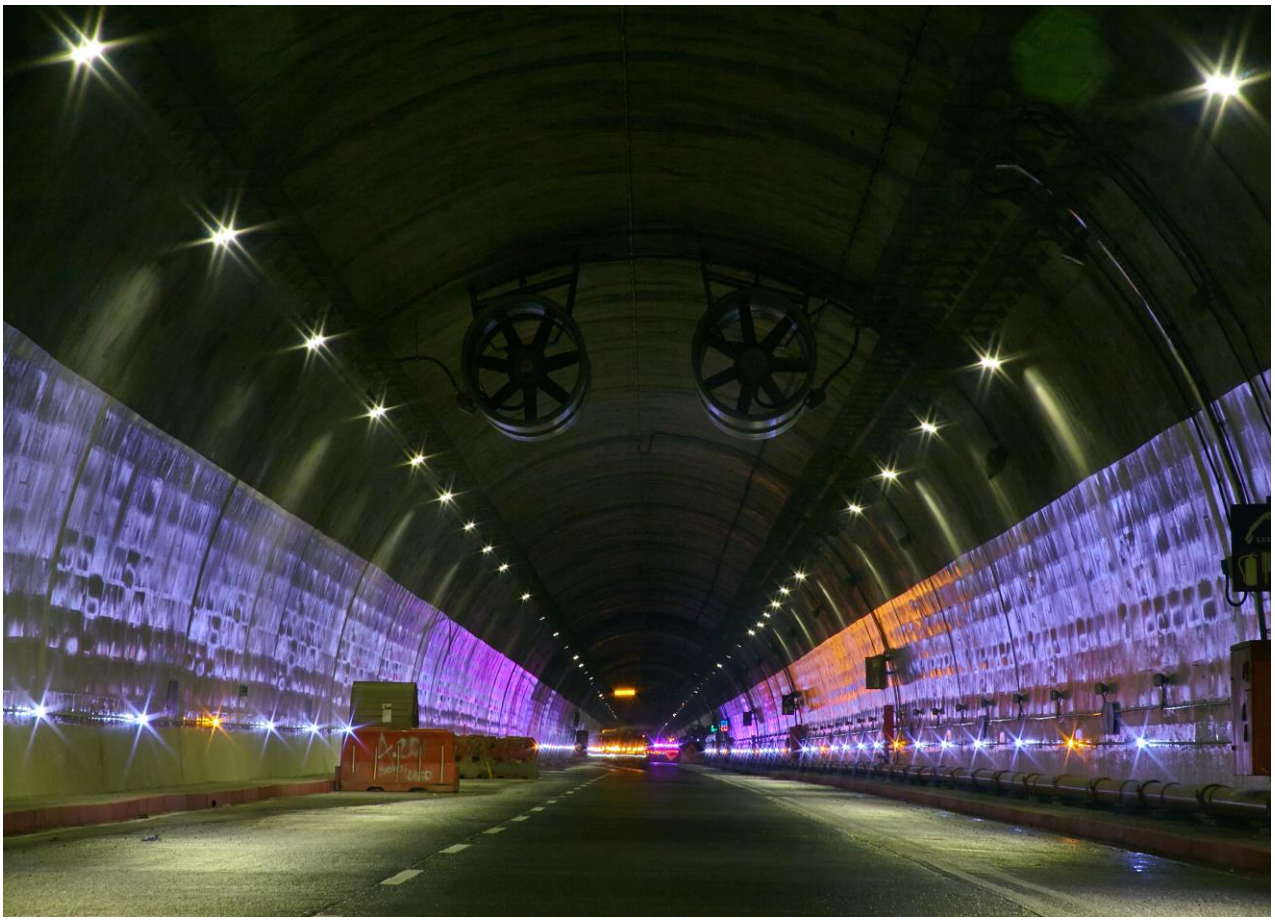


Foto 7-4. Sistema de ventilación, Túnel de La Línea

La función principal del sistema de ventilación es proporcionar un suministro suficiente de aire fresco para contrarrestar el equilibrio de los gases (*exhaust*) de escape en el túnel y evitar la acumulación de gases producto del tráfico vehicular. En caso de emergencia, como un incendio, el sistema de ventilación expulsará el humo y los gases tóxicos, hará posible que los usuarios salgan del túnel y permitirá a los servicios de emergencia hacer su trabajo con seguridad.

La ventilación de los túneles de carreteras se evalúa bajo dos condiciones:

1. Ventilación durante el periodo de operación normal: encaminada a reducir las concentraciones de CO y otros contaminantes, así como a mantener la visibilidad dentro de los rangos mínimos establecidos.
2. Ventilación en caso de emergencia: principalmente orientada a evacuar gases residuales de combustión, mantener la visibilidad mínima para evacuación de conductores, pasajeros y operarios del túnel, y reducir la concentración del calor debido a una conflagración o fuego.

Hay varios tipos de sistemas de ventilación natural y mecánicos que han demostrado ser eficaces, así como existen muchos factores que influyen en la elección de un sistema de ventilación mecánica y es necesario tenerlos en cuenta en función de su importancia relativa a un esquema particular. Teniendo en cuenta el estado del arte para el sistema de ventilación, hay muchas diferencias entre las diversas normativas para túneles; pero lo común es definir los siguientes objetivos para este sistema:

- Operación normal: se debe garantizar una suficiente calidad del aire en el túnel.
- Operación de emergencia en caso de incendio: se busca minimizar el riesgo para los usuarios haciendo el espacio tan seguro como sea posible.

A continuación, se describen los tipos de ventilación.

7.10.2 Ventilación natural

La ventilación natural no requiere dispositivos eléctricos o electrónicos; se produce por medio del viento debido a las diferencias de presión entre los portales; a los efectos de convección tipo chimenea cuando los portales se encuentran en elevaciones diferentes; y al efecto pistón de los vehículos (Ilustración 7-5).

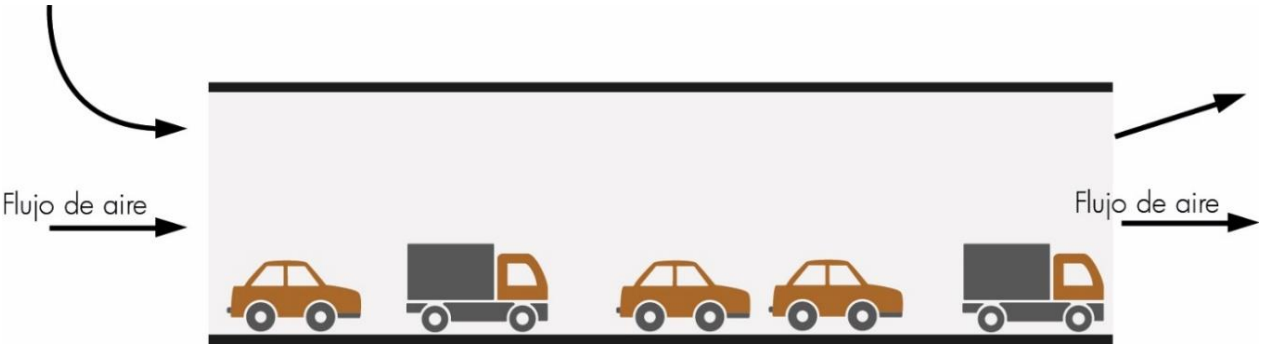


Ilustración 7-5. Ventilación natural

Los túneles con longitudes de hasta 1.000 m no requieren ventilación mecánica para su operación normal, pero esto depende realmente de los sentidos del tráfico (unidireccional-bidireccional) y los niveles de congestión; además, es preciso considerar la operación en caso de incendios. En general, los túneles de clase E pueden funcionar con seguridad con una ventilación natural, sin necesidad de rutas de escape. Los túneles de clase D son demasiado cortos para instalar suficientes ventiladores (*jet fans*) y controladores de velocidad para los casos de incendio; es preferible tener ventilación natural y rutas de escape cada 250 m como máximo, o usar un sistema de ventilación semi transversal. Los túneles de Clase C, a su turno, con operación de tráfico unidireccional y fluido, no tienen problemas con una ventilación natural en la operación normal; sin embargo, para la operación en los casos de incendio es necesario que haya rutas de escape cada 250 m.

7.10.3 Ventilación mecánica o forzada

La ventilación forzada es aquella que requiere de dispositivos especiales para que se presente la circulación de aire. Es necesario seleccionar el procedimiento de cálculo de ventilación de acuerdo con los siguientes modelos para obtener el caudal de ventilación:

- La ubicación del túnel con especial atención a las posibles repercusiones en el ambiente
- Diseño con respecto al pronóstico de los niveles de tráfico anual y su composición
- Condiciones de seguridad contra incendios

El resultado final para el sistema de ventilación mecánica será un sistema de sonido aerodinámico que proporcione condiciones ambientales satisfactorias en el interior del túnel y sus alrededores, y controles de humo en caso de incendio, con costos de capital y funcionamiento aceptables, satisfaciendo la operación en términos de control, mantenimiento y limpieza.

7.10.3.1 Ventilación longitudinal

La ventilación longitudinal resulta de la generación de un flujo de aire a lo largo del túnel. Para producir el flujo de aire se superponen el efecto pistón de los vehículos, las diferencias de presión en los portales, la presión del viento y el efecto de los ventiladores o *jet fans*. En funcionamiento normal de operación, se utiliza para diluir los gases de escape del vehículo. En el caso de un incendio es usado para conducir el humo hacia el exterior del túnel (Ilustración 7-6).

No existe un límite muy claro sobre la aplicación de un sistema de ventilación longitudinal, aunque las normas ponen límites que dependen de los análisis de riesgos. En Colombia, este sistema está recomendado para túneles de clase C; sin embargo, la selección de un sistema de ventilación longitudinal debe estar basada en un análisis técnico de las variables de funcionamiento del sistema y, especialmente en túneles con tránsito bidireccional, en un análisis de riesgos que considere las condiciones de operación normal y de emergencia.

Es preciso analizar factores como rutas de escape, tránsito de mercancías peligrosas, volumen y composición del tránsito, geometría del túnel y riesgos aceptables, entre otros. Cuando se utilice la ventilación longitudinal en túneles con tráfico bidireccional, se recomienda contar además con sistemas de medición de la velocidad y dirección del aire, detección automática de fuego y CCTV.

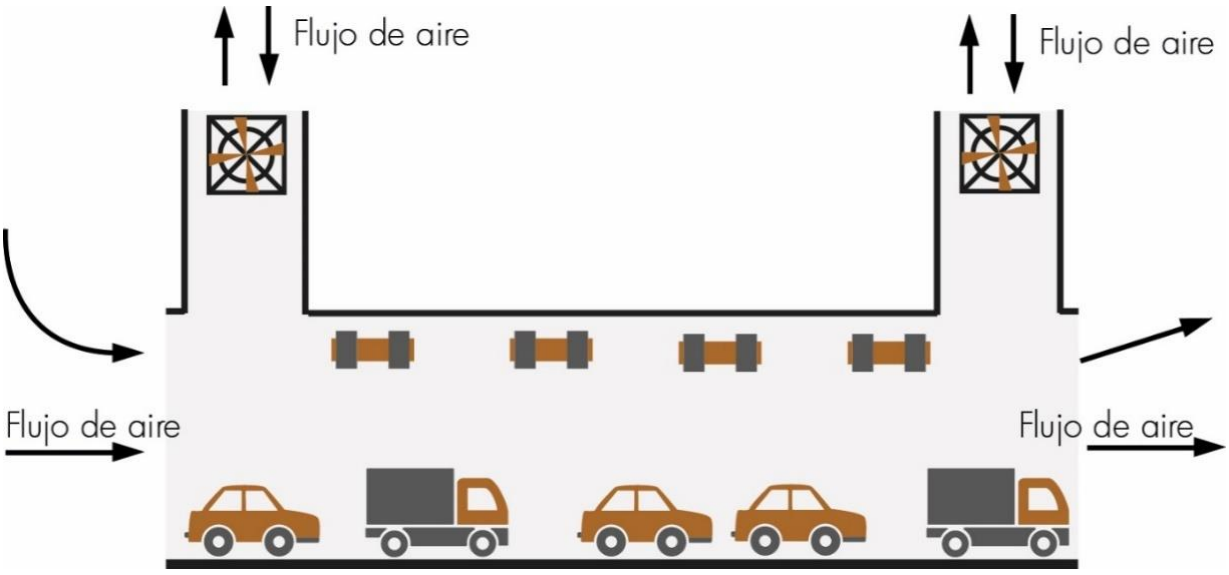


Ilustración 7-6. Ventilación longitudinal con jet fans o ventiladores a chorro

Este sistema de ventilación se adecúa mejor a los túneles unidireccionales, donde el tránsito aguas abajo del incendio puede salir del túnel, y el tránsito aguas arriba quedará en una zona de aire limpio. Algunas recomendaciones sobre el sistema de ventilación se presentan.

7.10.3.2 Ventilación semi transversal

En este sistema existen uno o más conductos que suministran aire fresco a través de rejillas repartidas a lo largo del túnel, mientras que el aire de escape fluye longitudinalmente hacia los portales. Este sistema solo puede ser operado en condición normal; no puede ser usado en caso de incendio. Para esto último existe un sistema semi transversal de tipo reversible, que en una operación de emergencia permite invertir la dirección del flujo de aire en los conductos de forma que el aire fresco fluye desde los portales, y el escape se extrae a través de las rejillas y conductos.

7.10.3.3 Ventilación transversal

En este sistema existen uno o más conductos que suministran aire fresco a través de rejillas repartidas a lo largo del túnel, y uno o más conductos situados al otro lado del túnel retiran el aire de la misma manera (Ilustración 7-7). Las corrientes de aire fresco y de escape crean un flujo en sentido transversal al eje del túnel. En este caso, las cantidades de aire expulsado y suministrado son iguales; sin embargo, puede existir una cantidad menor de aire de escape, que es compensada mediante ventilación longitudinal (*jet fans*) hacia los portales: tal sistema se denomina seudo transversal.

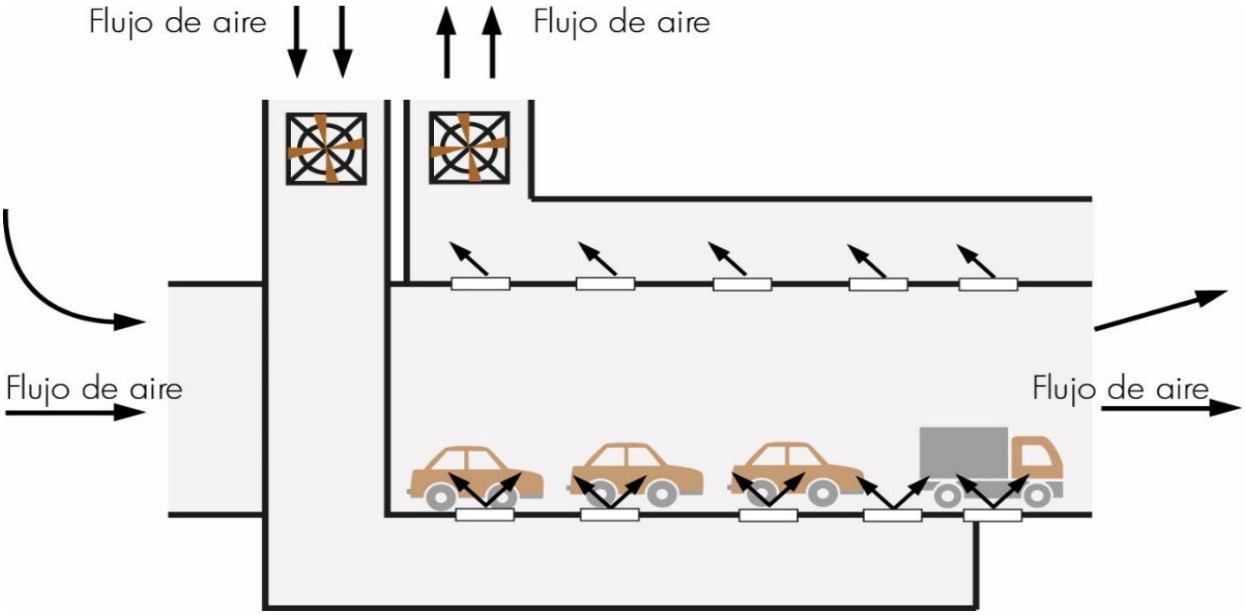


Ilustración 7-7. Ventilación transversal

7.10.4 Operación normal

En operación normal, el nivel de contaminación será inferior a los umbrales definidos para la visibilidad debido a partículas o gases tóxicos como el monóxido de carbono (CO). Para Colombia, se recomienda el control de los límites a los óxidos de nitrógeno (NOx) solamente cuando haya un requerimiento ambiental para el exterior del túnel; en tal caso, pueden adoptarse los valores de la PIARC del año 2019 [234].

Densidad de tráfico pico promedio (PCU / km) Flujo de tráfico por carril (PCU / h)					
Túnel Rural					
Tipo de Tráfico	V (km/h)	Tráfico unidireccional		Tráfico bidireccional	
		uvp / km	uvp / h	uvp / km	uvp / h
Tráfico fluido	60	30	1800	23	1400
Congestión	10	70	700-850	60	600
Trancón	0	150	-	150	-
Túnel urbano					
Tipo de tráfico	V (km/h)	Tráfico unidireccional		Tráfico bidireccional	
		uvp / km	uvp / h	uvp / km	uvp / h
Tráfico fluido	60	33	2.000	25	1.500
Congestión	10	100	1.000	85	850
Trancón	0	165	-	165	-

Tabla 7-3. Flujo promedio de tráfico pico [155].

Para mantener el nivel de contaminación por debajo del umbral es necesario calcular la cantidad necesaria de aire fresco, a fin de determinar la capacidad de ventilación.

Los principales puntos a considerar son:

- Tráfico unidireccional o bidireccional.
- Año de diseño: se deben considerar los años de proyección del flujo de tráfico.
- Densidad del tráfico: los picos de flujo de tráfico y la densidad de tráfico pico promedio (PCU), en unidades de vehículos de pasajeros (UVP), pueden ser calculados con la ecuación 1 que se encuentra en la referencia [155], o tomar el estándar de referencia de la Tabla 7-3.
- La velocidad del tráfico se considerará como en la referencia [155], pero es probable que se haga necesario adaptarla posteriormente según las experiencias en la operación del túnel (Tabla 7-4)
- La flota de vehículos debe ser dividida en:
  - Turismo (PC).
  - Servicio ligero (LDV), generalmente hasta 3,5 t.
  - Camiones, autobuses, vehículos de carga pesada (HGV).
- Valor de emisión: Se recomienda para Colombia con Euro 2, además de esto, se puede adaptar a un nivel superior si el estudio de tráfico permite esa modificación. En el apéndice 3 de la referencia [155] se presentan los valores de emisión en función de la velocidad de los vehículos y la pendiente del túnel desde Euro 1 hasta Euro 6.
- Concentración en el aire ambiental (CAMB): el aire fresco suministrado al túnel debe ser verificado. Los valores típicos de CO oscilan entre 1 y 5 ppm.
- Intercambio de aire mínimo: al menos 4 veces por hora.
- Una vez definidos todos estos puntos, los detalles del procedimiento de cálculo de la cantidad necesaria de aire fresco se explican en la referencia [155].
- Factor altitud.
- Cálculo de la velocidad crítica: tiene que ser considerado a fin de prevenir el retroceso posterior del humo (*back layering*).
- Una vez definida la cantidad necesaria de aire fresco, es necesario evaluar el tipo de ventilación que se logra con mínimos costos de operación.

	Descenso			Plano	Ascenso		
Pendiente	-6%	-4%	-2%	0%	2%	4%	6%
Velocidad (km/h)	35 - 60	40 - 80	70 - 100	80 - 100	70 - 90	40 - 70	35 - 60

Tabla 7-4. Máxima velocidad de vehículos pesados (HGV) en función de la pendiente [155]

Para dimensionar el sistema deberán definirse los valores de diseño y los umbrales. Los primeros determinan su capacidad; y los segundos son valores que exigen una respuesta inmediata del sistema de emergencia cuando sean alcanzados. Los valores de diseño son mostrados en la referencia [155], expresados como coeficiente de extinción y transmisión que miden la pérdida de visibilidad.

Tráfico	Tráfico promedio diario anual/carril	Longitud del túnel (m)	Tipo de ventilación
Tráfico unidireccional	-	≤ 500	Natural
	< 4.500 y sin frecuencia de congestión	≤ 700	Natural
	≥ 4.500 y < 10.000 y sin frecuencia de congestión	500 – 5.000	Longitudinal
	≥ 4.500 y con frecuencia de congestión	500 – 1.500	Longitudinal
	≥ 4.500 y con frecuencia de congestión	1.500 – 5.000	Semi transversal, transversal o longitudinal con punto de extracción masiva
	-	> 5.000	Aspiración de aire de escape con falso techo
Tráfico bidireccional	-	≤ 500	Natural
	< 4.500	≤ 700	Natural
	< 4.500	700 – 3.000	Longitudinal
	< 9.000	500 – 2.000	Longitudinal
	≥ 9.000	500 – 1.500	Longitudinal
	< 4.500	> 3.000	Semi transversal, transversal o longitudinal con punto de extracción masiva
	< 9.000	> 2.000	
	≥ 9.000	> 1.500	

Tabla 7-5. Tipo de ventilación

7.10.5 Operación de emergencia

En contraste con el funcionamiento normal —en el que las condiciones en el túnel cambian lentamente—, las condiciones durante un incendio pueden cambiar con rapidez, lo que da lugar a un deterioro de las condiciones dentro del túnel. En la referencia [170] se caracterizan los acontecimientos en términos de las etapas de desarrollo de un incendio y la respuesta requerida del sistema de ventilación, con el fin de optimizar la seguridad de los usuarios.

7.10.6 Tipo de ventilación

Con base en la clasificación de los túneles se definieron requisitos en túneles para ventilación Tabla 7-1.

Igualmente, a partir de los requisitos de la normativa [171], se presenta una guía general con este mismo objetivo.

Independientemente del sistema de ventilación, todo sistema seleccionado deberá estar acompañado de la simulación de la evacuación, salidas de emergencia y tiempos de respuesta, información resultante que debe quedar registrada en el Plan de respuesta o plan de Gestión del Riesgo.

7.10.7 Memorias de cálculo

Para realizar las memorias de cálculo es preciso analizar lo siguiente:

- Planos topográficos
- Definición de las características del aire (propiedades termodinámicas)
- Análisis de vientos
- Cálculo de concentración de CO, cálculo de concentración del NOx (sólo en el caso mencionado en 7.10.4) y material particulado para visibilidad
- Análisis de riesgo de incendio
- Clasificación del riesgo.
- Tasa de liberación de calor
- Cálculos hidráulicos para red de agua contra incendio
- Calculo de baterías del panel de detección y alarma
- Planos de diseño del túnel
  - Longitud
  - Altitud
  - Área superficial (m^2)
  - Superficie media (m^2)
  - Altura
  - Ancho
  - Número de parqueaderos de emergencia
  - Longitud del gradiente
  - Velocidad promedio
- Estudio meteorológico
  - Humedad
  - Temperatura
  - Vientos
  - Diferencia de presión barométrica entre los portales
- Estudio, estadísticas y censo del tráfico
- Especificaciones de las paredes y estructura del túnel
- Requerimientos de control
- Definición de caudales y de potencia (insumos que se toman para seleccionar un ventilador)
- Diferencia de presión entre los 2 portales, con el fin de calcular el empuje de los ventiladores.

Las memorias de cálculo deben contener:

- Estudio de disolución de contaminantes CO, NOx (sólo en el caso mencionado en 7.10.4) y material particulado para visibilidad, definidos de acuerdo con lo consignado en la referencia [155].
- Calculo de velocidad crítica.
- Planos de detalles.
- Planos de detalle constructivos, de detalle de soporte, de planta y de corte vertical, y diagramas eléctricos unifilares y de control que estén relacionados con el sistema centralizado de automatización y control.
- Especificaciones técnicas, cantidades de obra y lista de materiales.
- Normas que se cumplen en el diseño (PIARC, RABT, RVS, Astra).

7.10.8 Procedimiento de cálculo de la ventilación

El procedimiento de cálculo para obtener el caudal de ventilación se seleccionará de acuerdo con uno de los siguientes modelos:

- Simplificado
- Unidimensional
- Computacional dinámico de fluidos (CDF)

Una vez definido el caudal de ventilación, se establecen la caída de presión, la potencia total y el número de ventiladores. Normalmente, los cálculos se realizan con modelos simplificados o unidimensionales. Los modelos CDF no pueden usarse correctamente para la longitud total del túnel y solo pueden justificarse en situaciones muy especiales (condiciones geométricas especiales en zona de incendio).

7.10.9 Equipamiento del sistema de ventilación

Los motores, ventiladores y componentes críticos del sistema de ventilación que puedan estar expuestas a emergencia de incendio, deben estar en condiciones de permanecer en funcionamiento durante 60 minutos a una temperatura por lo menos de 250°C, de conformidad con la norma NFPA 502 capítulo 11. Un análisis de riesgos especifico [2], determinará el diseño para una capacidad de funcionamiento a 120 minutos y hasta 400° C, aplicando la norma CE 54/04.

Así mismo, es necesario que el sistema de ventilación sea reversible, tanto para la circulación de aire, como para la extracción de humo (NFPA 502 capítulo 11).

El análisis de riesgos a ejecutar deberá ser un “proceso científico de evaluación y/o cuantificación de probabilidades y consecuencias de los riesgos identificados” [2] y se llevará a cabo siguiendo las metodologías y prácticas recomendadas en la referencia [2] publicada por la Asociación Mundial de Carreteras (PIARC) [234].

7.10.10 Tasa de liberación de calor del fuego

Un incendio en un túnel tiene una tasa de liberación de calor o HRR (Heat-Release Rate) más alto de lo que se esperaría en un incendio similar en condiciones abiertas.

El análisis de riesgos podría emplear una tasa de liberación de 10 MW a 100 MW, para túneles con un porcentaje de vehículos pesados (más de 15 toneladas) de 20 %. Para el escenario colombiano, dicho porcentaje puede generar un factor de riesgo más alto, por lo que el escenario de menor riesgo deberá ser de 40 MW (potencia térmica). El escenario de mayor riesgo deberá ser de 100 MW para los túneles con un porcentaje alto de tráfico de vehículos de carga, que transporten materiales peligrosos como gas, biodiesel, petróleo y gasolina, entre otros. Se deberá especificar la HRR según NFPA 502 [175] (Tabla A.11.5.1 Fire Data for Typical Vehicles), para cada proyecto según el riesgo analizado.

El incendio de diseño está sujeto al análisis de riesgos y al paso de mercancías peligrosas, en el caso más crítico se debe diseñar hasta 100MW.

Foto 7-5. Diseño e instalación de sistema de ventilación, Túnel de La Línea

7.11 Sistemas de sensores ambientales

El sensor ambiental para túneles, debe contar con la tecnología necesaria, para monitorear los siguientes elementos:

- Concentración de gas de monóxido de carbono (CO), producido por la combustión en motores diésel y de gasolina, con un mínimo permitido para túneles nuevos de 150 ppm y readaptación de túneles anteriores.

- Visibilidad (VIS) o factor de extinción, el cual es afectado por la producción de hollín en los motores diésel, influenciado por la circulación de vehículos pesados, con un mínimo permitido para túneles nuevos de 250 m.
- Velocidad del aire causado por la regulación de la ventilación.
- El sensor deberá poder integrarse a un sistema de control y supervisión para interactuar con el sistema de ventilación.

El sensor también puede estar en capacidad de combinarse en un solo equipo que realice múltiples mediciones; debe cumplir con los estándares RVS 13.03.41, NFPA 502 [175] o similares, que obtengan y certifiquen la medición de CO (monóxido de carbono).

Los sensores deben ser instalados donde exista un sistema de ventilación forzada. Los requerimientos mínimos para los sensores son los siguientes:

7.11.1 CO (monóxido de carbono):

- Medición principal: infrarrojo (o tecnología certificada).
- Rango de medición: 0-300 ppm.
- Altura de instalación: ≥ 2 m.
- Protección: IP 65.
- Salida: 4-20mA y/o contacto de relé y/o unidad de control (Ethernet o serial).
- Rango de temperatura de trabajo: -25/ +55 °C.
- Funciones correctivas: ajuste automático.

7.11.2 VIS (Visibilidad)

- Rango de medición de visibilidad: 0-15 km-1.
- Altura de instalación: ≥ 2 m.
- Protección: IP 65.
- Salida: 4-20mA y/o contacto de relé y/o unidad de control (Ethernet o serial) o protocolos industriales.
- Temperatura de trabajo: -25/ +55 °C.
- Funciones de corrección: ajuste automático.

7.11.3 Velocidad del aire (VE), anemómetros

- Rango de medición: - 15 m/s + 15 m/s, con capacidad de medición a intervalos de tiempo de 1 min en operación normal y 3 – 10 segundos en caso de incendio.
- Altura de instalación: ≥ 2 m.
- Protección: IP 65.
- Salida: 4-20mA y/o contacto de relé y/o unidad de control (Ethernet o serial).

- Temperatura de trabajo: -25/ +55 °C.
- Funciones de corrección: ajuste automático.

7.12 Sistemas de iluminación

Los túneles necesitan en su interior un alumbrado permanente que haga posible adaptar los ojos de los conductores a las condiciones internas de oscuridad. El sistema de iluminación tiene por objetivo brindar seguridad a los conductores, así como homogeneidad en la intensidad de luz en el ingreso, recorrido y salida del túnel.

Para garantizar una visibilidad adecuada se requiere implementar un sistema de iluminación artificial interno que controle y regule las zonas de acceso, umbral, de transición, interior y de salida del túnel. Para tal fin, se podrán establecer dos sistemas diferentes de iluminación artificial —simétrico y asimétrico—, pero se recomienda utilizar el primero.

7.12.1 Generalidades

El sistema de iluminación de túneles es de vital importancia ya que de este depende la seguridad al ingreso, en el interior y a la salida del túnel en materia de visibilidad; a su vez, la iluminación depende de un buen sistema de revestimiento, que brinde condiciones óptimas de visibilidad homogénea y adecuada en el día y la noche [239].

En Colombia, el Ministerio de Minas y Energía reglamentó la iluminación y el alumbrado público mediante la elaboración del *Reglamento técnico de iluminación y alumbrado público* (Retilap) [143], mediante la resolución 18 1331 del 6 de agosto de 2009. Retilap (versión del 15 de noviembre de 2013, de acuerdo con la resolución No. 90980, sección 570, Iluminación de túneles) describe los requerimientos que aplican para Colombia en cuanto a la iluminación que debe realizarse específicamente en túneles.

Teniendo en cuenta que Retilap es un reglamento de obligatorio cumplimiento para proyectos de iluminación ejecutados en territorio colombiano [143], el presente documento se acoge a las disposiciones que en se encuentran en la sección 570 (Iluminación de túneles) de la versión actual; y de igual manera, se ajustará a las modificaciones y actualizaciones de este reglamento. Sin embargo, la iluminación de los túneles se ajustará solamente a la norma CIE 88-2004 [173] y sus actualizaciones vigentes, a la cual se refiere el Retilap.

Este reglamento establece los requisitos y medidas que han de cumplirse en los sistemas de iluminación de los túneles, “tendientes a garantizar: los niveles y calidades de la energía lumínica requerida en la actividad visual, la seguridad en el abastecimiento energético, la protección del consumidor y la preservación del ambiente; previniendo, minimizando o eliminando los riesgos originados por la instalación y uso de sistemas de iluminación”.

El reglamento “deberá ser observado y cumplido por todas las personas naturales o jurídicas que diseñen, construyan, mantengan y ejecuten actividades relacionadas con las instalaciones de iluminación y Alumbrado Público. Así como por los productores, importadores y comercializadores de los productos objeto del reglamento”.

En el caso que no haya galerías de evacuación y con el propósito de visualizar la evacuación en caso de presencia de humo, se deben instalar luces de emergencia en ambos hastiales y en caso de tener galerías de evacuación, estas luces solo se instalan en el costado de las salidas de emergencia.

El responsable del diseño “deberá entregar un documento suscrito y firmado por él donde se manifieste que el diseño cumple los requisitos aplicables del Retilap [143]; y responderá por los efectos de esa iluminación”.

El nivel de iluminación escogido de un túnel es el resultado de la consideración de los requerimientos de seguridad (calidad de iluminación) y el costo (inversión y operación). Para el beneficio de un diseño económico de la iluminación del túnel sin reducir la calidad y la seguridad, los requerimientos de la iluminación del túnel deben determinarse de acuerdo con el estado actual de la tecnología, tanto en lo que se refiere a las luminarias como al sistema de control de iluminación.

El objetivo de la iluminación es suministrar a los conductores una visibilidad apropiada, tanto en el día como en la noche. Por tanto, los factores que contribuyen en la disminución de la visibilidad tienen que determinar para cada túnel, y comprenden los siguientes aspectos:

- Características de la vía de acceso y sus proximidades
- Características de la vía en el túnel, paredes y techos
- Características del portal del túnel
- Condiciones ambientales y atmosféricas
- Características del tráfico vehicular
- Orientación del túnel con respecto al Sol

El diseño de iluminación deberá estar soportado con unas memorias de cálculo, las cuales deben contener:

- Estudio fotométrico
- Diagramas unifilares
- Cálculos de consumo
- Planos con distribución de luminarias
- Lista detallada de componentes y descripción técnica
- Análisis de costo/ beneficio, beneficio ambiental por emisiones de CO, y la vida útil proyectada.

7.12.2 Iluminación Permanente

Esta iluminación permanente se proporcionará de tal modo que permita a los conductores tener una visibilidad homogénea y adecuada en el día y la noche para las zonas de acceso, umbral, transición, interior y salida. Se deberán incluir los criterios de luminancia para cada zona del túnel, con una velocidad de circulación de acuerdo con

las características particulares del mismo. La iluminación permanente es obligatoria según lo establecido en la norma Retilap [143].

7.12.3 Iluminación de seguridad

Para proporcionar una visibilidad mínima para los conductores en el evento de una falla o corte del suministro de energía eléctrica, se establece una iluminación de seguridad que permite realizar la evacuación del túnel con el uso de los vehículos [174] (ver la Ilustración 7-8).

7.12.4 Iluminación de evacuación

Está iluminación se requiere para orientar a las personas caminando en el caso de una evacuación controlada por una emergencia o un incidente. La iluminación de evacuación debe estar preferiblemente a la altura del andén, o una altura no mayor a 1,5 m y deberá proyectarse de modo que permita guiar a los usuarios del túnel para evacuarlo a pie con un mínimo de 10 lux y 0,2 cd/m^2 [174].

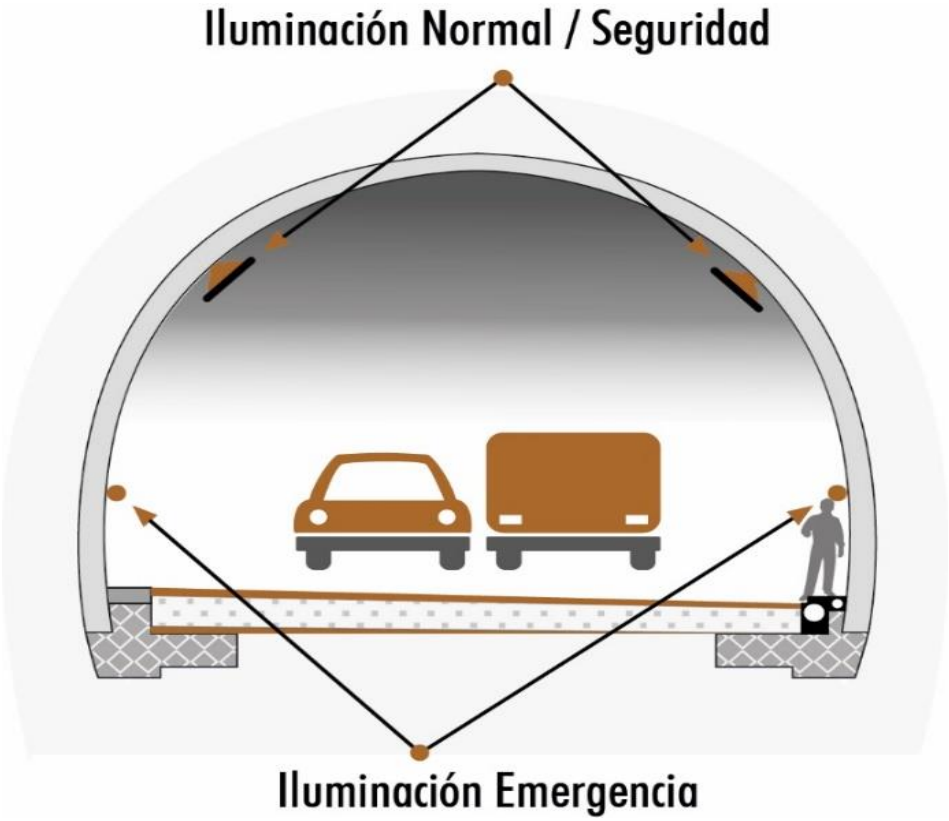


Ilustración 7-8. Diferencia entre iluminación normal y de emergencia

7.13 Sistemas contra incendio

Los eventos ocurridos en túneles existentes han mostrado drásticamente que el fuego es la amenaza más seria para los mismos dadas sus condiciones especiales, tales como la limitada disponibilidad de rutas de escape, la dificultad de aproximación de los

servicios de emergencia (usualmente obstruidos por vehículos) y el espacio limitado para la salida del humo contaminante. Estas características son agravantes adicionales para las reacciones de pánico que se relacionan con este tipo de eventos.

Sumados a lo anterior están el peligro de envenenamiento proveniente del humo tóxico y el tremendo incremento de la temperatura cuando un vehículo se incendia. Un incendio causa rápidamente un daño severo a la infraestructura, por lo cual son necesarios los planes de seguridad para incrementar las posibilidades de supervivencia de las personas, llevar los daños de todo tipo al mínimo y asegurar la disponibilidad de las instalaciones.

Incluso los incendios en las estaciones de suministro de energía, nichos y cuartos de equipos, que usualmente no son un riesgo para la vida, pueden causar daños severos a equipos y afectar la disponibilidad del túnel.

Los siguientes requisitos de seguridad en túneles, en su mayoría han sido referenciados de la norma NFPA502 edición 2020.

Foto 7-6. Sistema de iluminación, Túnel de La Línea con Revestimiento RCD.

7.13.1 Solución y equipamiento

Los aspectos más importantes para prevenir los incendios deberán incluir:

- Medidas estructurales y organizacionales: salidas del túnel, zonas de escape, rápida extracción de contaminación, conceptos de rescate.
- Localización precisa y rápida.

- Realizar interacciones automáticas para controlar el flujo de tráfico accediendo al sitio del fuego, controlar la ventilación y los servicios de alarma y emergencia.
- Sistema de control automático de extinción para atenuar el fuego hasta que los servicios de emergencia arriben al sitio.

El sistema de detección de incendios tiene que estar diseñado para identificar humo o fuego en forma temprana en toda el área correspondiente al tubo del túnel, por medio de tecnología apropiada para ello, las cuales deben ser definidas en el análisis de ingeniería.

Dadas las posibles dimensiones del proyecto, en el que puede haber dos o más túneles y cada uno puede tener diferentes subestaciones y nichos, es necesario recolectar la información de los diferentes detectores en un panel de control local que a su vez requiere conectarse a un panel central, localizado en el centro de control.

7.13.2 Protección de elementos estructurales

La protección de los elementos estructurales ante el fuego debe hacerse bajo los parámetros dados en el numeral 7.3 de NFPA502 [175].

7.13.3 Detección y alarma de incendio

Los túneles clasificados como A, B, C y D deberán tener al menos dos medios independientes de identificación y localización del fuego.

Túneles clasificados como A, B, C y D deberán tener un sistema de detección automática del fuego acorde con el numeral 7.4.6 de NFPA502 [175].

Circuitos cerrados de televisión (CCTV) con dispositivos que indiquen el flujo de tráfico o cámaras de seguridad deben permitirse para la identificación y localización del fuego en túneles con supervisión de 24 horas, acorde al numeral 7.4.3 de NFPA502 [175].

Cuando sean instalados sistemas fijos contra incendio a base de agua al interior del túnel, se deberá proveer un sistema de detección de incendio acorde con el numeral 7.4.6 de NFPA502 [175].

Espacios auxiliares contenidos al interior de túneles clasificados como A, B, C y D (como estaciones de bombeo, cuartos de depósito) y otras áreas deberán ser supervisadas por un sistema automático de alarma de incendio acorde al numeral 7.4.6 de NFPA502 [175].

La tecnología a emplear en el sistema de detección de incendios debe corresponder a la establecida dentro de un estudio de ingeniería a desarrollarse en la **Fase II**, que contemple las diferentes características del túnel y el desarrollo del fuego en su interior, así como de las necesidades de interacción con otros sistemas mecánicos. Los sistemas deben diseñarse siguiendo los parámetros dados en el numeral 7.4.6 de NFPA502 [175].

7.13.3.1 Panel de control de alarma de incendio

Los paneles de detección y alarma de incendio (FACP) deben estar acorde con lo requerido en el numeral 7.4.7 de NFPA502 [175].

El panel principal de detección y alarma de incendio (FACP) deberá comunicarse con el sistema de supervisión y control (SCADA) del proyecto, enviando toda la información referida al sistema de detección de incendios mediante protocolos de comunicación compatibles entre los dos sistemas.

7.13.4 Tuberías principales, conexiones de manguera y suministro de agua

Las tuberías principales, conexiones de manguera, conexiones de bomberos, conexión de manguera y suministro de agua deberán ser diseñadas e instaladas según los requisitos dados en el capítulo 10 de NFPA502 [175].

Las bombas contra incendio deberán ser seleccionadas, instaladas, inspeccionadas y mantenidas de acuerdo con NFPA 502, Cap. 10.5 [175].

Todas las señales de las bombas, su estado de operación y el de sus correspondientes motores Diesel y/o eléctrico, se deben monitorear a través de sus tableros controladores y enviar señales al centro de control de operaciones, según se establece en la norma NFPA 502 Cap. 10.5 [175].

Las tuberías de redes de alimentación de hidrantes y/o conexiones de manguera, gabinetes, sistemas de rociadores automáticos, diluvio o similares deben estar protegidas, no podrán estar expuestas a daño mecánico ni a riesgo de colisiones vehiculares dejando los andenes libres de obstáculos para facilitar la evacuación o tránsito del personal de mantenimiento.

7.13.5 Extintores portátiles contra incendio

El suministro, instalación y mantenimiento de los extintores portátiles deberá estar acorde al numeral 7.9 de NFPA502 [175].

Los extintores portátiles deberán estar alojados en gabinetes metálicos, fabricados lámina *cold-rolled* de calibre 18 de Acero Inoxidable, con acabado color rojo.

7.13.6 Sistemas fijos contra incendio a base de agua

Los túneles clasificados como A, B, y C deberán estar protegidos por sistemas fijos contra incendio a base de agua, cuyo diseño y construcción debe realizarse bajo los lineamientos dados en el capítulo 9 de NFPA502 [175].

7.13.7 Protección de edificaciones complementarias al túnel

Las demás edificaciones complementarias al túnel deberán clasificadas en su uso como Institucional de Servicio Público (I-5) según se caracteriza en el titulo K de la norma sismo resistente NSR-10 y ser protegidas según los requisitos dados en el titulo J de la misma norma (o su equivalente al momento de construcción).

Las edificaciones o recintos que albergan equipos eléctricos deberán ser protegidas cumpliéndose los requisitos dados por el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas - RETIE y la norma NTC2050 según se indica en la NSR-10 numeral J.2.2.1(o su equivalente al momento de construcción).

Las áreas destinadas a equipos eléctricos, como las subestaciones que se encuentren al interior del túnel serán protegidas por sistemas de detección automática acorde a la NFPA72 y sistemas automáticos se supresión de incendios acorde a una de las siguientes normas:

-NFPA 12: Sistemas de dióxido de carbono.
-NFPA 750: Sistemas de agua nebulizada.
-NFPA 770: Sistemas híbridos (agua y gas inerte).
-NFPA 2001: Sistemas de agente limpio.

La protección contra incendio de transformadores debe hacerse bajo los requisitos dados en la sección 450 del RETIE.

La definición de las tecnologías o sistemas a emplear debe ser el resultado del desarrollo de la ingeniería en la **Fase II**.

7.13.8 Aceptación de los sistemas contra incendio

Antes de la puesta en operación de los sistemas contra incendio, estos deben probados para su aceptación bajo los lineamientos dados en el numeral 7.17 de NFPA502 [175].

7.13.9 Plan de emergencias

Antes de la puesta en operación de los sistemas contra incendio, se debe implementar el plan de emergencias acorde a lo establecido en el capítulo 13 de NFPA502 [175].

En cuanto al diseño del sistema de rociadores contra incendio, se debe tener en cuenta la tabla 7-1 (sistemas Fijos de Extinción de Incendio) y numeral 7.13.6. (Sistemas fijos contra incendio a base de agua).

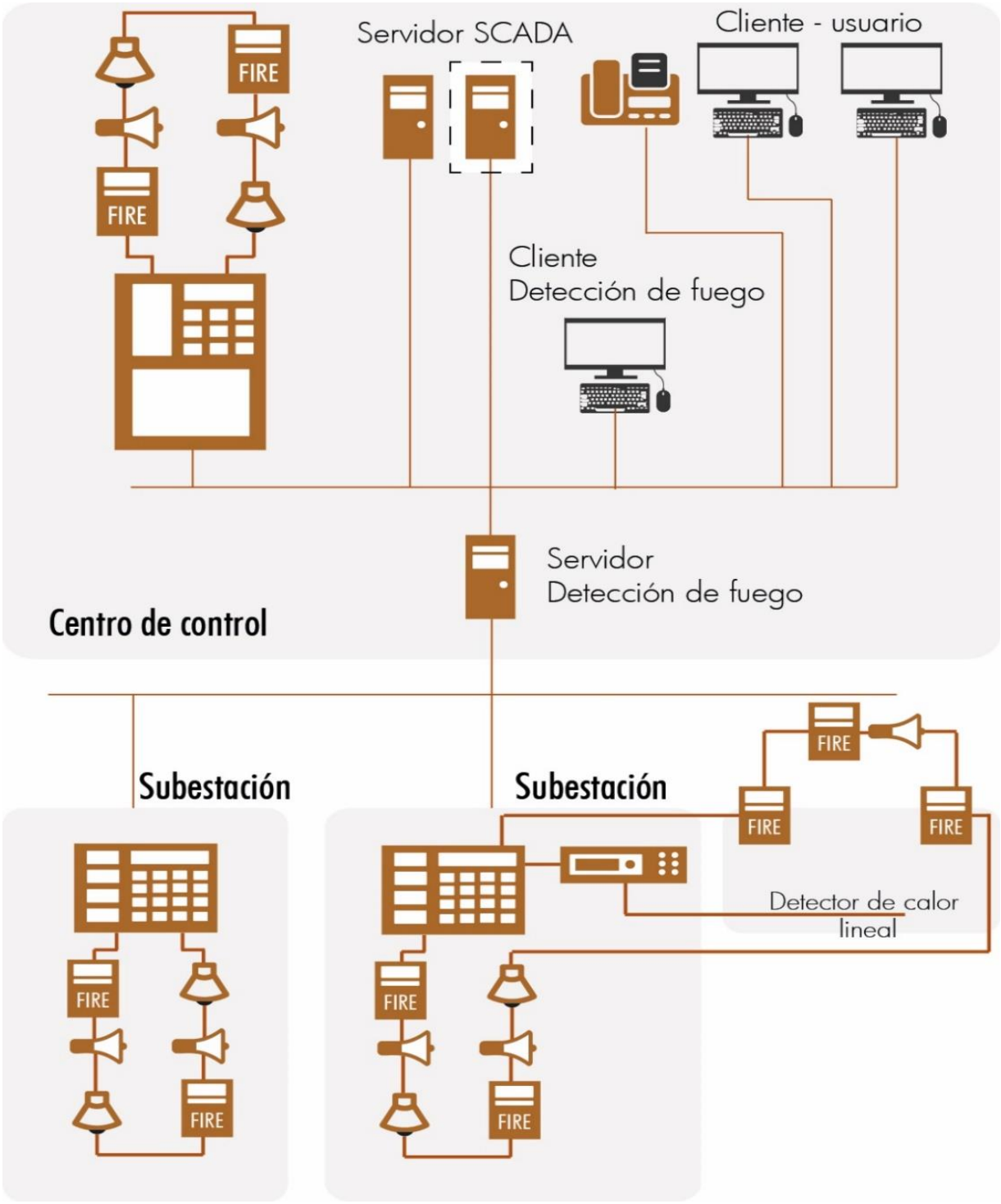


Ilustración 7-9. Sistema de detección de incendios

7.14 Sistemas de control de tráfico

El control de tráfico en un túnel es realizado por sensores, actuadores y por la lógica implementada en los PLC.

Los sensores son dispositivos que miden el tráfico y cantidades físicas; por ejemplo, bucles inductivos que miden la densidad del tráfico. Los actuadores, por su parte, son dispositivos instalados en el campo visual de los conductores que afectan la manera de conducir. Un actuador típico es una señal luminosa o un panel de mensajes variables. El tráfico, en este sentido, está definido por señales fijas y variables.

Este numeral, contiene la caracterización de los regímenes de tráfico en un túnel, y recomendaciones sobre las instalaciones para asegurar los regímenes de tráfico, que aplican básicamente para que el conductor esté obligado a ver las regulaciones de tráfico.

Foto 7-7. Galería de escape, Túnel Renacer, Quetame Cundinamarca con Revestimiento RCD.

Este sistema también comprende áreas adyacentes antes de los portales del mismo, donde las señales de tráfico e instalaciones controladas por el sistema de control son ubicadas y monitoreadas para llevar a cabo el control del tráfico del túnel. El diseño y la extensión de la instalación antes del portal entrando al túnel siempre estarán basados en la seguridad, y también dependen de las soluciones de tráfico dadas para toda el área.

Justo al entrar al túnel se causan problemas específicos para algunos conductores, entre los que se cuentan el sentimiento de confinamiento y claustrofobia que afecta el juicio de distancia y velocidad, debido a una visualización monótona que hace perder la

idea de ubicación del conductor. En adición, el estrés mental intensifica la ansiedad sobre la potencialidad de incendios o las consecuencias de los accidentes. Por lo tanto, es necesario asegurar una conducción segura por medio de instalaciones técnicas de control de tráfico, en los casos de funcionamiento normal y de las irregularidades en el tráfico.

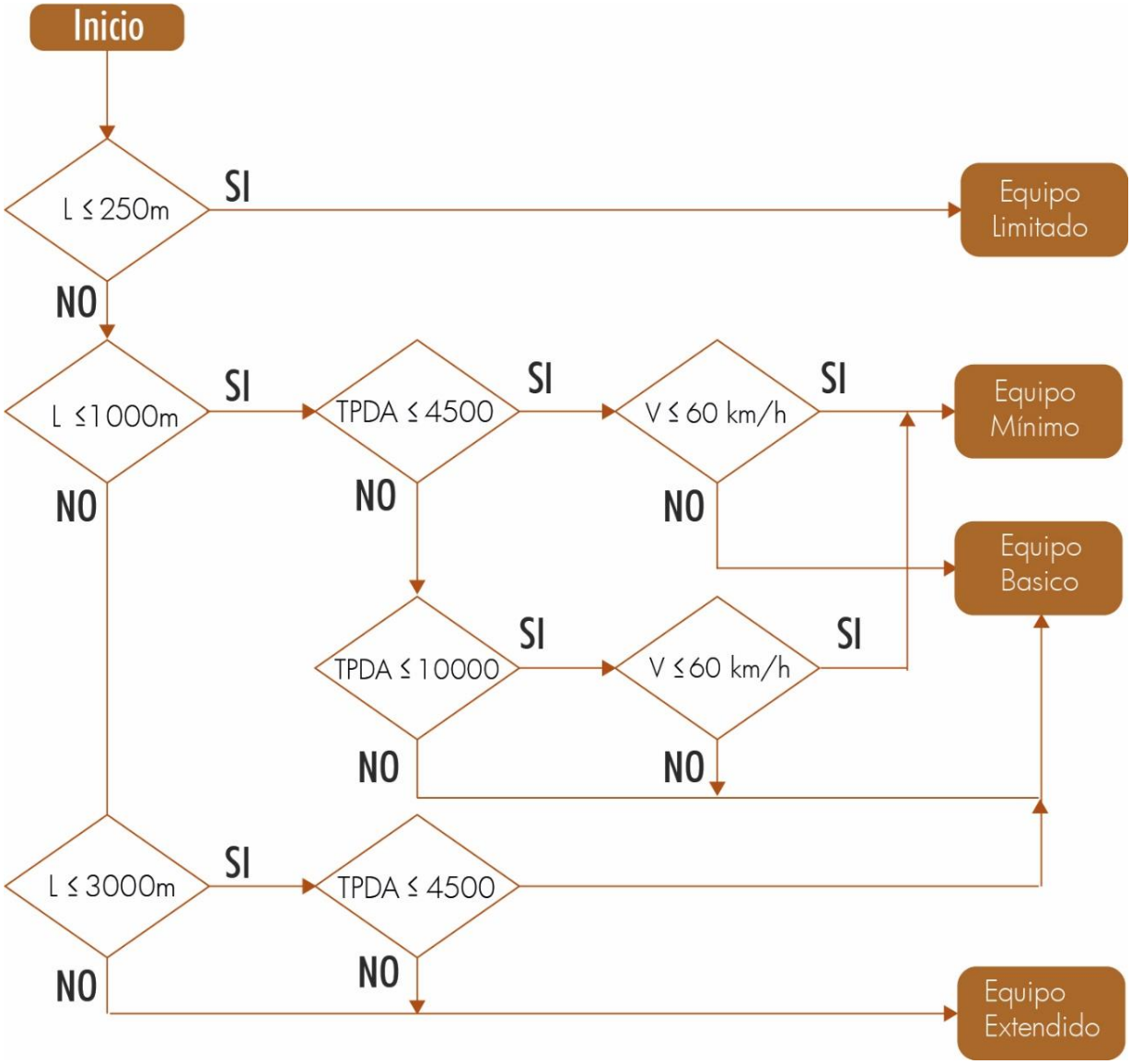


Ilustración 7-10. Selección de equipamiento de control de tráfico

Este parágrafo contiene las características de la señalización de vía, comenzando por las señales permanentes que suministran la información operacional, principalmente con respecto a la vía del túnel. El objetivo principal es proporcionar reglas simples para la implementación de señales de tráfico e instalaciones en el túnel y sus sectores adyacentes, y presentar una lista de propiedades que estas señales e instalaciones deben tener.

Se aplicarán las siguientes reglas en ese sentido.

- Los conductores deben tener prohibido:
  - Conducir en reversa.
  - Realizar giros en U.
  - Parar o parquear el vehículo a excepción de lugares que estén dispuestos para este fin.
- Aun si el túnel es ligero, todos los conductores deben encender las luces de sus vehículos.
- En caso de una parada prolongada, el conductor debe apagar el motor.

Las señales de tráfico se dividen en:

- Permanentes, caracterizadas por símbolos invariables en su superficie.
- Variables, caracterizadas porque su información cambia según los caracteres activados por el sistema de control.

Todas las señales deberán seguir la regulación colombiana, basadas en lo consignado en la referencia [178].

El acceso a un túnel es equipado teniendo en cuenta las siguientes categorías [179]:

- Equipamiento mínimo
- Equipamiento básico
- Equipamiento extendido

El equipamiento también depende de la solución de tráfico del área o vía. La solución final está también dada por los requerimientos de contingencia para tráfico bidireccional en un solo tubo, así como por el concepto general de seguridad. En los parágrafos siguientes se brinda una orientación básica sobre el tema.

Para la selección de equipamiento puede usarse como una guía la Ilustración 7-10, considerando los siguientes criterios [179]:

- Longitud del túnel (agregando la longitud de los túneles sucesivos)
- Intensidad del tráfico
- Velocidad máxima

7.14.1 Equipamiento limitado

El equipo limitado es diseñado para un túnel de clase E (Ilustración 7-11).

7.14.2 Equipamiento de tráfico mínimo

El equipo de tráfico mínimo debe ser instalado en túneles de clases D y C cuyas velocidades de operación no sean mayores que 60 km/h y cuyo TPDA no supere 10.000 vehículos. Debe estar configurado conforme está consignado en la Ilustración 7-12.

Foto 7-8. Señales de aproximación y paisajismo al ingreso del Túnel Los Colibríes

7.14.3 Equipamiento de tráfico básico

El equipo de tráfico básico debe ser instalado en los túneles de clases D y C cuyas velocidades de operación sean mayores que 60 km/h y cuyo TPDA no supere 10.000 vehículos; y en túneles de clase B con TPDA no mayor que 4500 vehículos. El sistema debe estar configurado de acuerdo con lo consignado en la Ilustración 7-13.

7.14.4 Equipamiento de tráfico extendido

El equipo de tráfico extendido se instalará en los otros túneles cuyas características no cumplan los requerimientos para tráfico limitado, mínimo o básico, y se configurará de acuerdo con lo dispuesto en la Ilustración 7-14.

7.14.5 Señales fijas

Las dimensiones y especificaciones de señales de tráfico fijas están descritas en el estándar colombiano sobre señales de tráfico [178]. A continuación, se presentan algunas de las señales reglamentarias, al igual que las recomendaciones para su uso en los túneles colombianos.

7.14.5.1 Nombre del túnel y distancia

Esta señal se empleará para advertir al conductor de la proximidad de un túnel. Será necesario que se complemente con las señales reglamentarias de obligación de circular con las luces bajas del vehículo (SR-35), velocidad máxima (SR-30) y prohibido adelantar (SR-26) para el caso de túneles bidireccionales. Debe ubicarse al menos a 20-50 m desde la entrada del túnel.

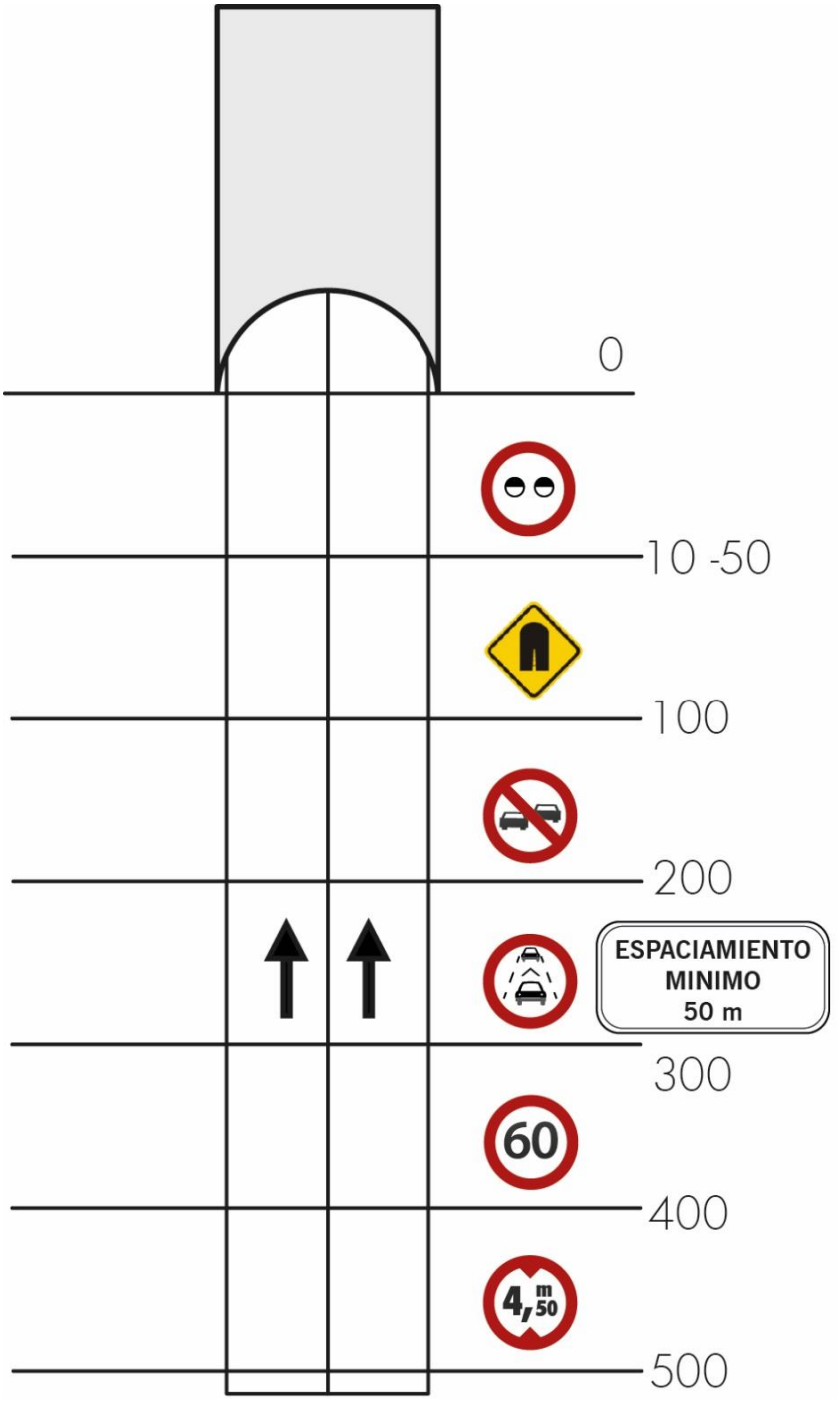


Ilustración 7-11. Equipo limitado.

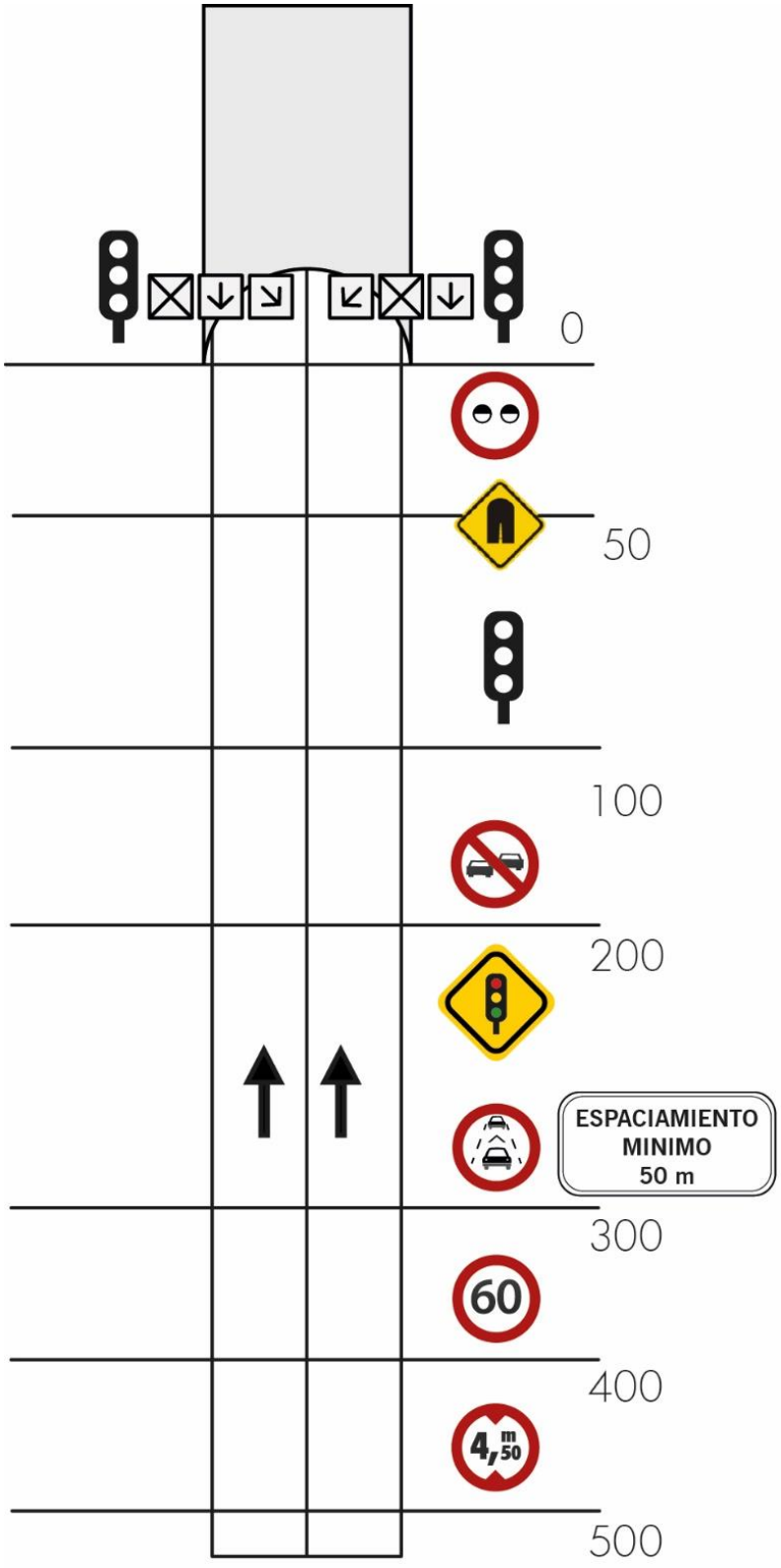


Ilustración 7-12. Equipamiento de tráfico mínimo

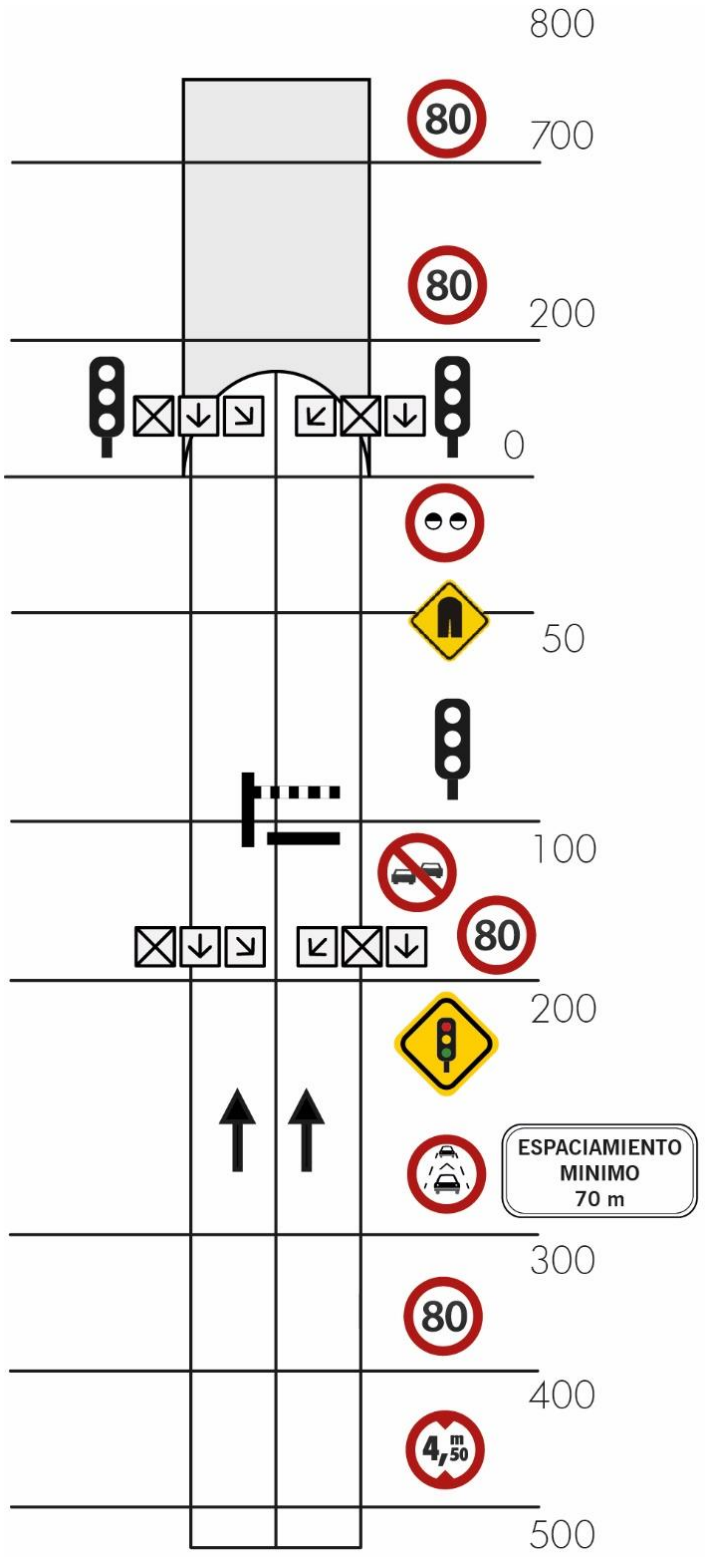


Ilustración 7-13. Equipamiento de tráfico Básico

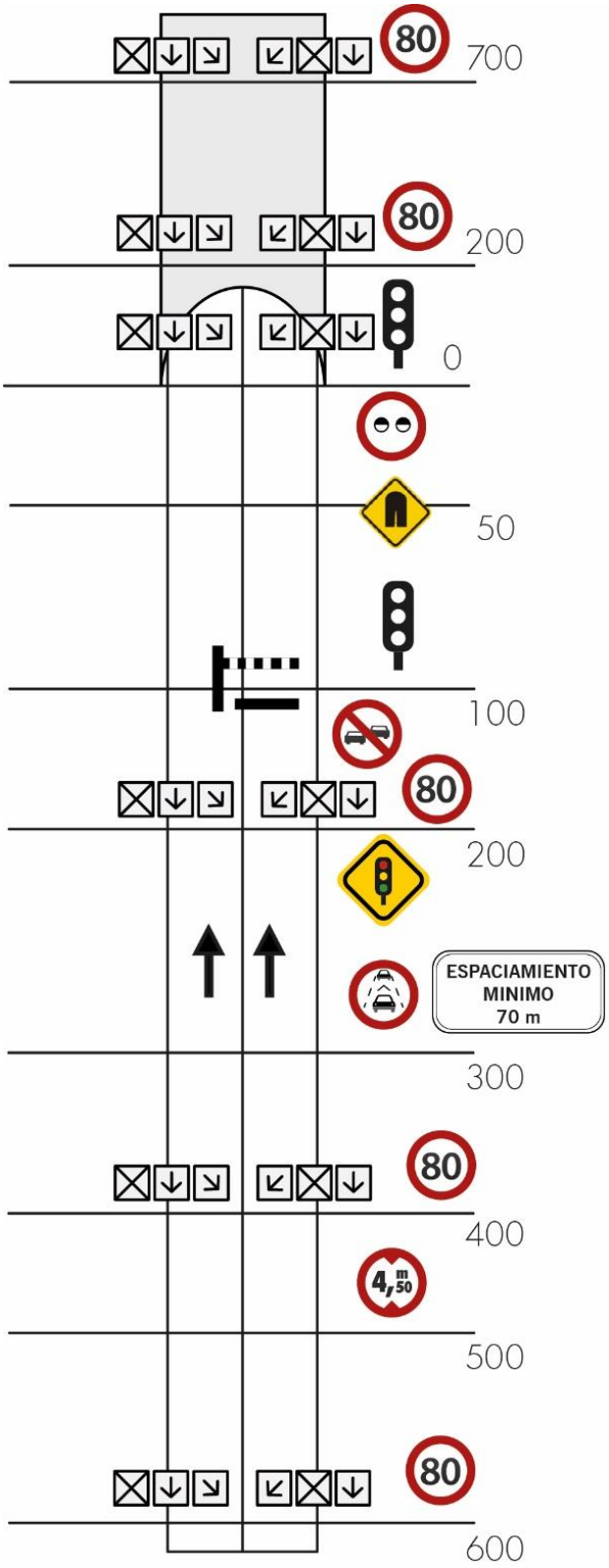


Ilustración 7-14. Equipamiento de tráfico extendido

Ilustración 7-15. Señalización del nombre del túnel y distancia [178]

En los túneles de longitud superior a 3.000 m, se indicará cada 1.000 m la longitud restante del túnel.

7.14.5.2 Circulación con luces bajas

Esta señal se empleará para notificar al conductor la obligación de circular con las luces bajas del vehículo. La no colocación de esta señal no implica la autorización del uso de las luces altas de los vehículos.

Ilustración 7-16. Circulación con luces bajas [178]

7.14.5.3 Velocidad máxima

Esta señal se empleará para notificar la velocidad máxima a la que se puede circular (velocidad de operación), expresada en múltiplos de 10 y en kilómetros por hora (km/h). Su utilización deberá estar soportada en un estudio de velocidad de operación.

Ilustración 7-17. Velocidad máxima [178]

Por razones de economía, no siempre es posible mantener la misma velocidad de diseño en los túneles que en las vías adyacentes. La velocidad de operación general para túneles en Colombia es de 80 km/h para los túneles unidireccionales y de 60 km/h

para los túneles bidireccionales, o la velocidad de operación de la vía de acceso en caso de que esta sea menor.

Foto 7-9. Señales de aproximación vista desde el portal túnel 7 izquierdo hacia portal salida túnel 6 izquierdo, túneles proyecto Buga Buenaventura

7.14.5.4 Prohibido adelantar

Esta señal se empleará para notificar al conductor que está estrictamente prohibido adelantar otros vehículos en los túneles bidireccionales; se complementará y concordará con la respectiva señalización horizontal.

Ilustración 7-18. Prohibido adelantar [178]

7.14.5.5 Altura máxima permitida

Esta señal se empleará para notificar a los conductores la altura máxima total permitida a los vehículos y su carga para el tránsito por la vía. Deberá expresarse en metros y aproximarse a la décima inferior. Será el complemento de la señal de altura libre (SP-50) y concordará con la dimensión expresada en esta.

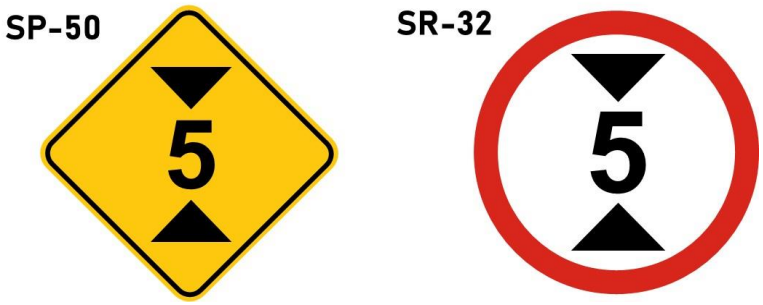


Ilustración 7-19. Altura máxima permitida [178]

7.14.5.6 Espaciamiento

Se usará esta señal en todos los túneles, con el ánimo de notificar a los conductores que deben guardar una distancia mínima de seguridad para evitar colisiones. En todos los túneles se dispondrán señales de espaciamiento mínimo (SR-44) antes de la entrada del túnel, complementadas con una señal informativa (tipo SI-27), que indique la distancia mínima a conservar respecto al vehículo de adelante.

El espaciamiento mínimo requerido se tomará como el necesario para un tiempo de frenado de emergencia de 3 segundos a la velocidad de operación, o un tiempo mayor si el estudio de riesgo lo considera necesario. Además, la señal se complementará con demarcaciones horizontales, mediante cabezas de flecha colocadas de acuerdo con el espaciamiento mínimo. Estas señales se colocarán antes de la entrada y se repetirán en el interior del túnel cada 500 m, o a través de los paneles de señalización variable cada 1.000 m.

Ilustración 7-20. Espaciamiento [178]

7.14.5.7 Semáforo

Se usará esta señal para advertir a los conductores de la proximidad de los semáforos en los accesos a los túneles de carretera, debido a que no es común la existencia de dichos dispositivos en la misma.

Ilustración 7-21. Semáforos [178]

7.14.5.8 Radio

Esta señal se utiliza en túneles que tienen comunicaciones de radio.

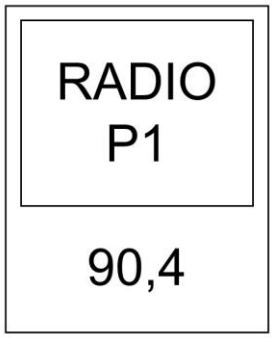


Ilustración 7-22. Señalización comunicaciones por radio [178]

7.14.5.9 Señales y paneles para informar de instalaciones [153]

En las estaciones de emergencia se situarán señales de información, acordes con el Convenio de Viena, que indicarán los equipos disponibles para los usuarios de la carretera, como las mostradas en la Ilustración 7-24.

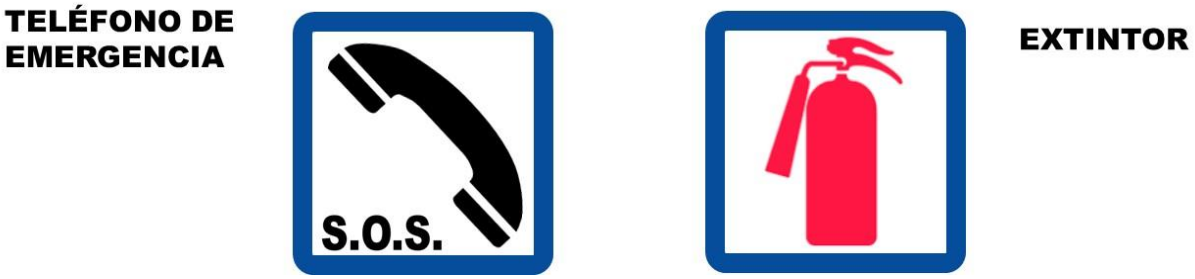


Ilustración 7-23. Señales de teléfono SOS y extintor [178]

En las estaciones de emergencia que estén separadas del túnel por una puerta se indicará, mediante un texto claramente legible y escrito en los idiomas adecuados, que la estación de emergencia no garantiza protección en caso de incendio. Un ejemplo sería el siguiente: “ESTA ZONA NO PROTEGE DEL FUEGO. Siga las señales hacia las salidas de emergencia”.

7.14.5.10 Bahías de parqueo [153]

Las señales que indiquen las bahías de parqueo deben ser de tipo E, acordes con el Convenio de Viena. Los teléfonos y extintores se indicarán mediante un panel adicional o incorporado a la propia señal.

Ilustración 7-24. Señales en bahías de parqueo

7.14.5.11 Galerías de evacuación (salidas de emergencia)

Las señales de salida de emergencia consisten de un símbolo de escape (apuntando a la salida de emergencia más cercana) y símbolos de flechas para la dirección de evacuación, con especificaciones de distancia a la próxima salida de emergencia o el portal superior. Las marcas de la ruta de escape y luces de orientación deben incorporarse dentro del muro del túnel individualmente o combinadas en una iluminación con intervalos de ≤ 25 m.

Las galerías de evacuación [180] se usan en todos los túneles de clases A y B para permitir que sus usuarios los evacúen caminando desde el tráfico del tubo hacia un lugar seguro en una emergencia. En túneles cortos, los portales son adecuados como salidas de emergencia; pero, de todas formas, en la mayoría de los túneles se requieren salidas de adicionales de acuerdo con la distancia que los usuarios deban recorrer para llegar a un lugar seguro. La distancia apropiada entre salidas de emergencia depende de:

- Los tipos de vehículos que usan el túnel, los cuales dictan los tipos de incidentes que podrían ocurrir.
- El volumen de tráfico y el número de usuarios del túnel que podrían necesitar el usar de las salidas de emergencia.
- La capacidad del sistema de ventilación del túnel para tener condiciones aceptables para evacuar el túnel.
- Sistemas de detección de incidentes.
- La naturaleza de la protección de las rutas más allá de las salidas de emergencia (incluyendo sus dimensiones y la presencia de inclinaciones significativas o de escaleras).
- Comportamiento humano.

Foto 7-10. Iluminación homogénea en el túnel vía Cisneros Loboguerrero, proyecto Buga Buenaventura.

La distancia óptima entre dos salidas de emergencia sale del análisis de riesgos; por lo general, se estima en 500 m. Los siguientes principios de diseño son importantes:

- Es necesario señalizar de forma clara las salidas de emergencia para distinguirlas de los accesos a los cuartos de equipos, con señales fotoluminiscentes y flechas electroluminiscentes a cada lado. El color recomendado de las puertas (muy a

menudo el color verde indica “salida de emergencia”), tiene que elegirse de acuerdo con la combinación y con el tipo de iluminación del túnel.

- Se requiere que las puertas y aberturas tengan un tamaño manejable para el paso de varias personas en corto tiempo, así como para el paso de rescatistas con equipo y camillas.
- Las salidas de emergencia tienen que ser visibles directamente, o por medio de señalización visible desde cualquier posición del túnel.
- Galerías presurizadas al menos con 50Pa respecto al túnel y 0,75m/s de velocidad de aire en caso de apertura de la puerta para el proceso de evacuación, o una velocidad de 2m/s en caso de realizar operaciones de lucha contra el incendio desde las galerías (UNE EN12101-6).
- Para el dimensionamiento de las condiciones seguras de evacuación en las galerías, se debe adoptar la norma UNE EN12101-6.
- Es necesario que la iluminación del piso de acceso, los pasos de puerta, etc. y el cuarto justo después de la salida de emergencia “inviten” a salir del túnel, y estarán diseñados para prevenir caídas o tropiezos de los usuarios.
- Las luminarias y marcas no podrán ser obstáculos para las personas que transitan caminando.
- En ningún caso se asegurarán las puertas de las salidas de emergencia.

7.14.6 Señales variables

Las señales variables se utilizan para dar a los viajeros información acerca de eventos especiales o cambios de comportamiento en el flujo de tráfico (preventivas, informativas y restrictivas), las cuales deben estar diseñadas e implementadas en los lugares y con las distancias necesarias, tanto en los portales de ingreso, como en el interior del túnel. La especificación técnica general de las mismas es la siguiente:

- Luminosidad automática con al menos 10 niveles controlados y censados, gestionados de forma remota o con un fotosensor.
- Sus características se ceñirán a lo dispuesto por la EN 12966 [181] en los siguientes puntos:
  - Color: EN 12966, clase C1/C2.
  - Intensidad lumínica: EN 12966, clase L3.
  - Ratio de luminancia (LR): EN 12966, clase R2
  - Ancho de emisión: EN 12966, clase B4/B6
  - Clase de temperatura: EN 12966, clase T1/T2/T3
  - Aislamiento: IP66 – EN 12966, clase P3
- Tendrán que presentar certificación ISO 9001 o similar.
- Cumplirán con una prueba de impacto, de acuerdo con EN 60598-1 [182] o similar.
- Cumplirán con una prueba de vibración, de acuerdo con EN 60068-2-64 [183] o similar.
- Cumplirán con una prueba de corrosión, de acuerdo con EN ISO 9227 [184] o similar.
- Cumplirán con una protección de cubierta, de acuerdo con EN 60529 [185] o similar.
- Cumplirán con una prueba de temperatura, de acuerdo con EN 60068 o similar.

- Prueba EMC - EN 61000 [186] o similar.
- Protocolos de comunicación:
  - NTCIP
  - TCP/IP Ethernet
  - Modbus
  - Modbus TCP/IP
  - Profibus
  - Profinet
  - Contacto seco

Las señales deben ser controladas por un PLC para que su funcionamiento no se altere en caso de que la comunicación con el centro de control se pierda.

7.14.6.1 Señalización de los carriles

Las señales de control de carriles se ubicarán donde sean necesarias, una por cada carril de la vía. Las dimensiones deberán considerar, al menos, las siguientes limitaciones:

- Dentro del túnel: 50 cm x 500 cm.
- Fuera del túnel: 100 cm x 1000 cm.
- Una desviación puede aceptarse si la construcción del túnel introduce una limitación.
- La instalación debe considerar la limitación de la altura del túnel.

Las señales tienen 4 aspectos de control de carril:

- Aspa roja
- Flecha verde
- Flechas diagonales blancas

7.14.6.2 Señales de límite de velocidad

Las señales de límite de velocidad variables se ubicarán donde sean necesarias, una por cada carril de la vía. Las dimensiones deberán considerar, al menos, las siguientes limitaciones:

- Dentro del túnel: 50 cm x 500 cm.
- Fuera del túnel: 100 cm x 1000 cm.
- Puede aceptarse alguna desviación del estándar cuando sea necesario debido a las características del túnel.
- La instalación debe considerar la limitación de la altura del túnel.

Cuando la señal esté iluminada, mostrará el círculo rojo iluminado y una cifra de dos dígitos representando la velocidad máxima.

7.14.6.3 Señales de mensaje

Las señales de mensaje variable mostrarán indicaciones claras que informen a los usuarios del túnel de las eventuales congestiones, averías, accidentes, incendios u otros peligros [153]; como en los casos anteriores, su instalación tendrá que considerar la limitación de la altura del túnel. Se debe instalar una señal de mensajes variables que tenga la capacidad de representar simultáneamente 2 pictogramas, cuando menos.

7.14.6.4 Semáforo

El semáforo deberá ser modular para cada una de las distintas cabezas, pudiéndose combinar estas de manera longitudinal para facilitar su reparación y mantenimiento. El semáforo puede ser:

- Con tres colores: rojo, amarillo y verde (pare – prevención – paso).
- Con dos colores: rojo y amarillo (pare – prevención).

7.14.6.5 Señalización horizontal

Deberá haber líneas horizontales en el borde de la carretera. En los túneles bidireccionales, se utilizarán medios claramente visibles a lo largo de la mediana (sencilla o doble) para separar ambas direcciones.

7.14.6.6 Señalización horizontal

Los símbolos empleados en la señalización de emergencia seguridad humana, seguridad contra incendios y riesgos asociados, deberán estandarizarse y ajustarse a los lineamientos de la norma NFPA 170. El uso de estos símbolos facilitará la uniformidad y comprensión en etiquetas y letreros proporcionando coherencia, evitará la posible confusión y mejorará la comunicación de los usuarios.

Los planos de diseño y documentación relacionada deberán seguir la simbología de esta norma.

7.14.6.7 Barreras

Cuando un evento serio (accidente, incendio, etc.) ocurre en un túnel, tendrá que ser posible prevenir en una etapa temprana a los usuarios respecto del acceso al mismo. De hecho, un dispositivo efectivo y rápido puede prevenir la entrada de los usuarios a una situación potencialmente peligrosa, y prevenir más incidentes [180].

En muchos países, la experiencia muestra que cerrar el túnel simplemente con señales de parada ubicadas fuera de su entrada no es muy efectivo. Por tal razón, estas se acompañan de barreras y señales de mensajes variables, que permiten al usuario estar informado de la razón del cierre. El dispositivo de cierre del túnel puede activarse desde el centro de control, o automáticamente en túneles que son monitoreados de forma continua.

El dispositivo de cierre está hecho para funcionar en una situación de emergencia. No obstante, también puede emplearse en otras situaciones; particularmente, en cierres programados por temas de mantenimiento.

7.15 Sistema de control de gálibo

El sistema gálibo permitirá controlar la altura de los vehículos que se aproximen al ingreso del túnel y cuyo tamaño exceda la altura máxima permitida de acuerdo con las condiciones arquitectónicas y de construcción particulares del mismo. Este sistema estará integrado al centro de control para ejercer un desvío sobre el vehículo que exceda las dimensiones permitidas, y evitar de esta forma los daños y el bloqueo del tráfico vehicular. Estará conformado por un gálibo electrónico y uno mecánico (Ilustración 7-25).

El sistema de gálibo deberá estar integrado con la automatización del sistema (PLC).

Deberá contener, como mínimo:

- Barrera óptica
- Dos columnas
- Detector de vehículos
- Panel de señal de exceso de gálibo

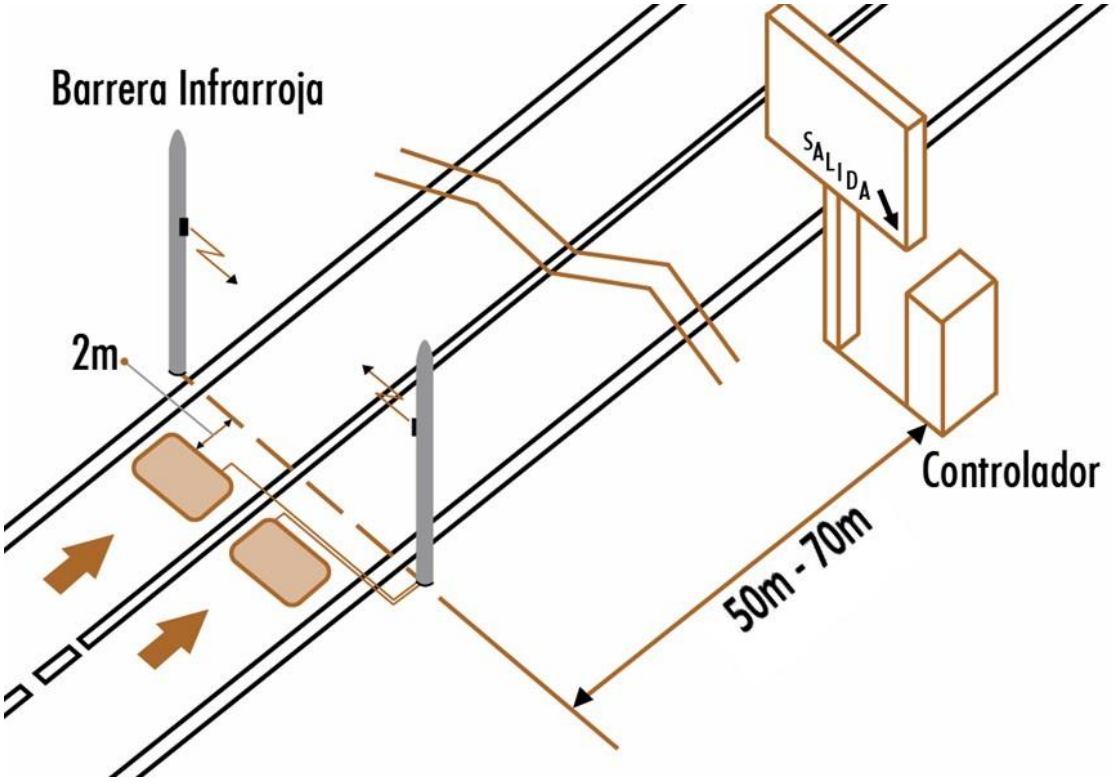


Ilustración 7-25. Esquema general del control de gálibo

7.16 CCTV Y DAI (sistema de detección automática de incidentes)

Este sistema tiene como finalidad visualizar todas las áreas, zonas que conformar el interior del túnel y sus ingresos, para determinar incidentes, riesgos o amenazas físicas que puedan suceder en la operación normal del túnel. Estará conformado por cámaras fijas y móviles, equipos de grabación, equipos de visualización y equipos de administración y control.

El circuito cerrado de televisión (CCTV) es un sistema de monitoreo, control y supervisión visual de los acontecimientos que suceden al interior del túnel y en los accesos vehiculares en cada sentido; su uso es importante para la vigilancia de lo que sucede en la vía desde el centro de control de operaciones. El sistema recoge todas las señales de las cámaras por medio de la red del sistema y muestra la información en los monitores del centro de control, 24 horas al día.

El CCTV permite detectar y monitorear los siguientes aspectos:

- El tráfico del túnel.
- El estado de la infraestructura del túnel.
- Verificar la correcta operación de los otros sistemas.
- Controlar y gestionar los incidentes. El sistema de videovigilancia permite realizar el procedimiento evaluando detección, verificación, toma de información, respuesta, mantenimiento, plan de mejoramiento y prevención del incidente.
- Responder rápidamente a las emergencias o situaciones del túnel.
- Verificar el óptimo funcionamiento del plan de actuación de incidentes y tiempos de respuesta. Lo anterior se visualiza a través del despliegue de imágenes de diferentes sitios determinados en el túnel en tiempo real y de grabación de imágenes de manera automática. Estas imágenes se observan en el centro de control y permiten a los operadores verificar las alarmas emitidas por los diferentes sistemas, así como controlar la situación.

La arquitectura general del sistema es mostrada en la Ilustración 7-26, e incluye:

- Cámaras IP ubicadas en los túneles.
- Cámaras ubicadas en los edificios.
- Cámaras con función PTZ en el exterior de los túneles y la vía para vigilancia y control.
- Decodificadores para interpretar la señal analógica de las cámaras.
- Servidor *streaming* con *software* de control para visualizar las imágenes de las cámaras.
- Servidor de *display* para manejar los monitores por la *videowall.*
- Servidor de grabación.
- Monitores para visualizar las cámaras.
- Servidor DAI.
- Cliente DAI, *streaming* y *grabación*.
- Módulos de detección.

El sistema deberá estar totalmente integrado al sistema Scada (numeral 7.22).

El servidor de video trabaja en conjunto con el servidor de visualización, a fin de mostrar en el monitor una secuencia de imágenes predefinidas o secuencias cambiantes. Desde el cliente, el operador tiene la posibilidad de “llamar” el video de una cámara para controlar una situación específica en el proyecto.

El servidor DAI tiene el alcance de detectar eventos y enviar esta información al Scada. La información de las cámaras es elaborada por el módulo de detección, ubicado en el centro de control, y enviado al DAI. El Scada recoge la información; permite reaccionar y tomar una decisión específica e implementar un plan de emergencia, con la supervisión o intervención del operador.

El servidor de grabación tiene el alcance de grabar todos los eventos que pasan en el proyecto. Desde el cliente, el operador también está habilitado para llamar una grabación específica relacionada con un evento. Los diferentes clientes se emplean para definir la parametrización relacionada con sistemas específicos (video, DAI o grabación).

El medio físico de comunicación para transmitir la señal de vídeo será fibra óptica sobre protocolo IP. Si se requiere, todos los servidores pueden tener una configuración redundante. El número de monitores o el tamaño de la *videowall,* a su turno, se elegirá de acuerdo con las necesidades del proyecto.

7.16.1 Disposición de equipos

Los equipos se deben ubicar en áreas localizadas a lo largo del túnel, evitando siempre los puntos ciegos. En áreas de curvas y entradas del túnel, es necesario que los equipos instalados se ubiquen de tal manera de que no se pierda ninguna visualización. Los teléfonos de emergencia SOS, por su parte, deben tener la mejor visualización. El área de los portales tendrá que conectarse a las cámaras y la imagen de video se visualizará en la pantalla del centro de control.

El monitoreo deberá ser total: cubrirá visualmente desde el inicio hasta el final del túnel, con cámaras domo para las extensiones de vía. Dentro del túnel, la distancia mínima entre las cámaras es de 90m y no podrá exceder de 120 m, conforme un análisis que determine la Inter distancia sugerida. El diseño de la supervisión del tráfico se hará sin espacios e incluirá salidas y rutas de emergencia.

7.16.2 DAI

El sistema deberá proveer la siguiente información:

- Detección automática de incidencias
  - Vehículo detenido
  - Sentido contrario
  - Vehículo lento

- Vehículo rápido
- Reducción brusca de velocidad
- Nivel de servicio: 5 niveles de servicio (normal, denso, lento, congestionado, retenciones)

- Incidencias no relacionadas con el tráfico
  - Peatón
  - Objeto extraño en la vía[5]
  - Humo

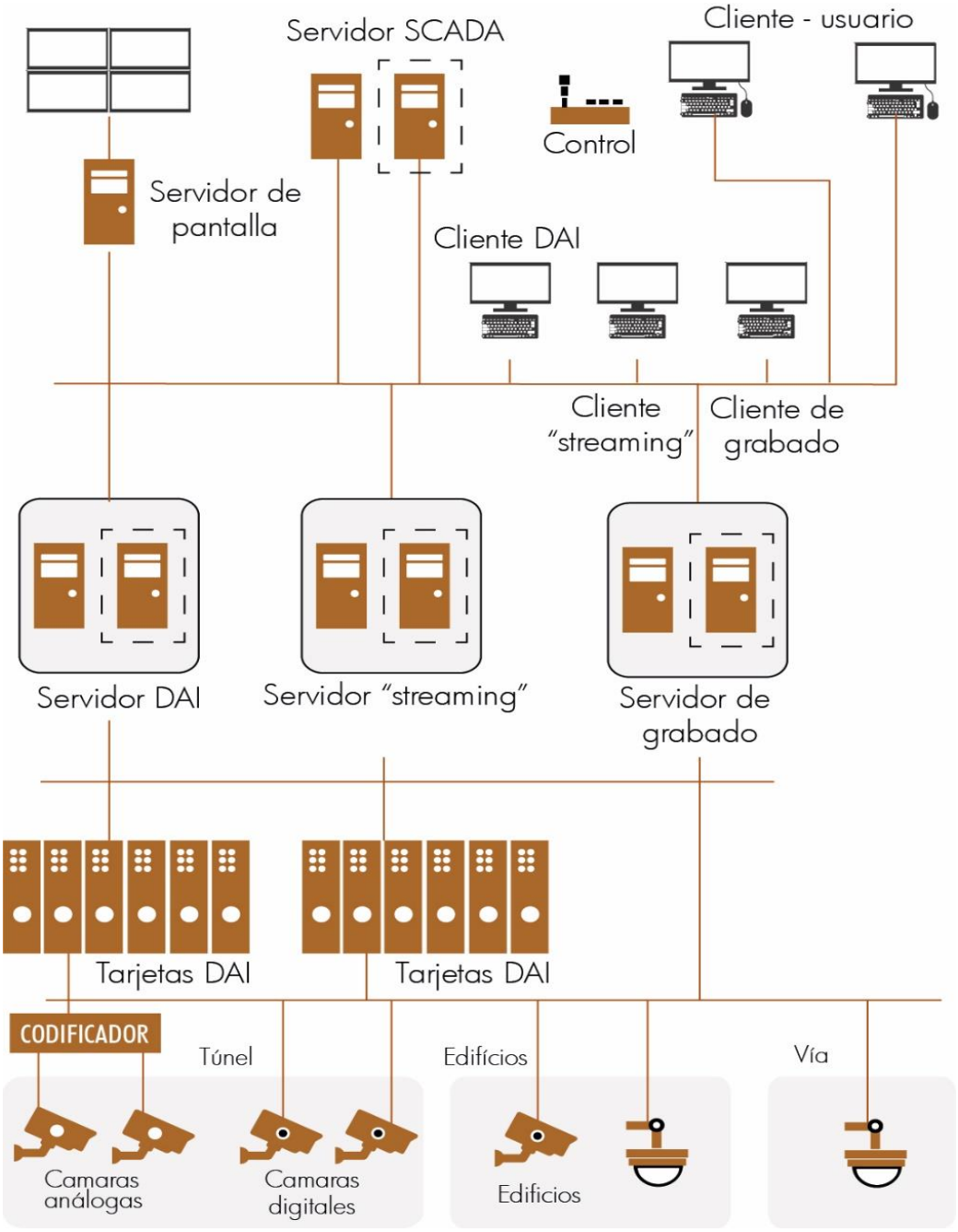


Ilustración 7-26. CCTV y DAI

[5] Objeto extraño, elemento caído o abandonado en la línea de desplazamiento de los vehículos, que se constituye en condición de riesgo para los usuarios de la vía

- Supervisión del tráfico y recopilación de datos de tráfico
  - Volumen: número de vehículos por clase de vehículo por carril.
  - Velocidad media por clase de vehículo y carril
  - Progreso
  - Intervalo de paso por clase de longitud por carril
  - Ocupación por carril
  - Densidad (número de vehículos/km) por carril
  - Longitud media de vehículos por carril
- Detección de presencia
  - Algoritmos de detección de presencia (vehículo presente, longitud de cola).
- Supervisión técnica
  - En ausencia de vídeo
  - Reinicio de la tarjeta
  - Cambio de configuración
  - Movimiento de cámara
  - Error de comunicaciones
  - Calidad de imagen
  - Temperatura de la tarjeta

7.17 Sistema de telefonía SOS y telefonía IP

Este sistema tiene como finalidad establecer una comunicación bidireccional entre un usuario ubicado en un punto SOS y el centro de control (operador), desde el cual se le podrá dar orientación sobre los pasos a seguir por el incidente presentado, en aras de brindarle una atención relacionada con cuestiones como bomberos; puestos de emergencia; centros médicos; estaciones de servicio; compañías de seguros; fuerzas militares; vehículos de asistencia; y otros servicios complementarios.

Todas las conversaciones entre el usuario y el operador se almacenarán de forma digital en tiempo real. El sistema está constituido por (Ilustración 7-27):

- Servidor SOS: ubicado en el centro de control.
- Teléfono para recibir llamadas.
- Estación SOS: desde ella, el usuario puede llamar a al centro de control en caso de emergencia.
- Estación cliente para la configuración y el mantenimiento del sistema.

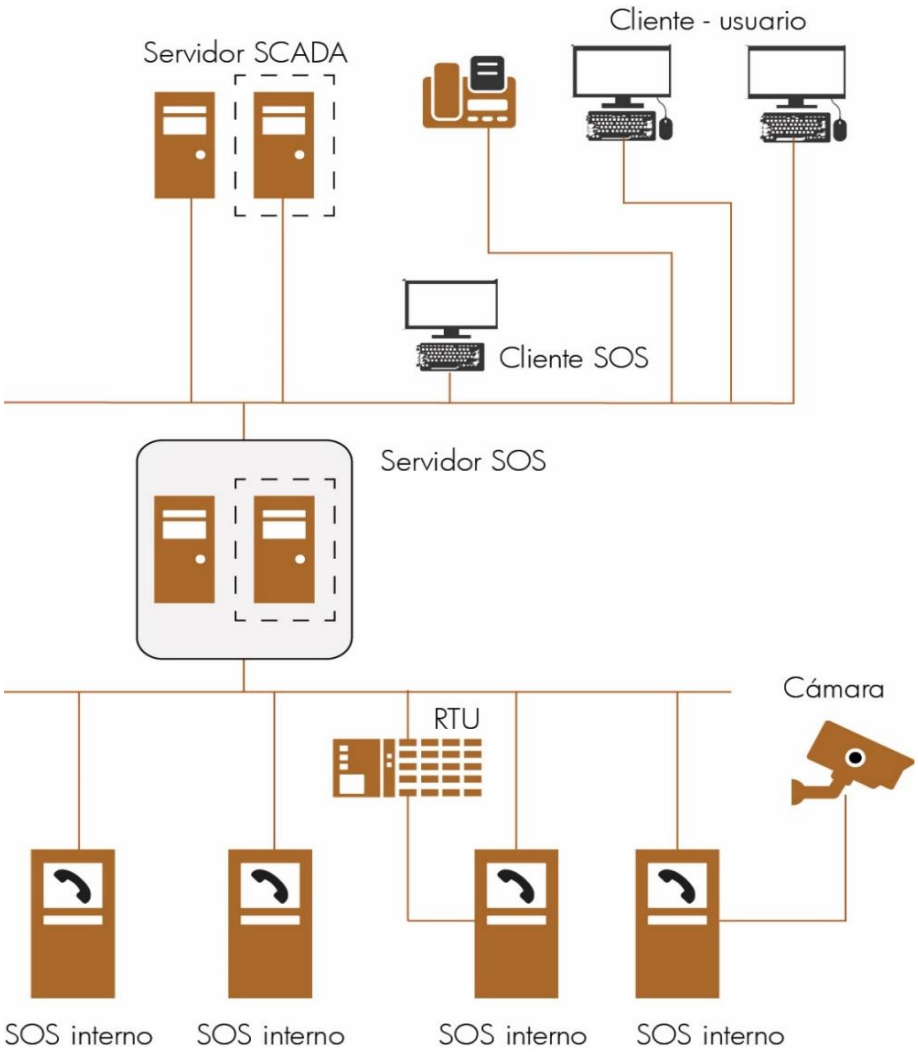


Ilustración 7-27. Sistema SOS

7.17.1 Teléfonos de emergencia, SOS

El sistema estará constituido por teléfonos de tipo SOS o postes SOS, y una consola principal ubicada en el centro de control para permitir una comunicación bidireccional con el operador. Los teléfonos tipo SOS deberán establecer una comunicación *full* dúplex y un modo de operación de tipo manos libres.

La consola principal deberá identificar el poste SOS que genera la llamada, además de contar con las capacidades de llamada en espera, supervisión del estado de los teléfonos, registro de hora y finalización de la llamada, identificación del operador que recibe la llamada, estado de la red y grabación de las conversaciones.

Los postes SOS se situarán a máximo 150 m de distancia entre sí en el interior del túnel, en los nichos habilitados para su instalación; y se ubicarán en las entradas y salidas del mismo (ver numeral 6.4.5).

Los teléfonos SOS son instalados a un costado del túnel en túneles de un solo sentido, y en los dos costados si este es de dos vías; asimismo, en vías peatonales y en nichos. Deben cumplir con las siguientes características:

- Marcados por señales informativas “Teléfono de emergencia” con letras SOS.
- Con dispositivos a prueba de ruido.
- Equipados con robustos sistemas de bocinas para realizar llamadas de emergencias (con al menos dos botones: SOS y reporte de incendio).
- Cada armario debe ser monitoreado con un contacto de puerta abierta que debe encender una alarma.
- Es recomendable instalar el mismo equipamiento en la entrada y salida del túnel.
- Se deben detallar las dimensiones máximas y mínimas de los armarios SOS, y la verificación que estos puedan instalarse en los nichos, con el suficiente espacio para implementación y mantenimiento

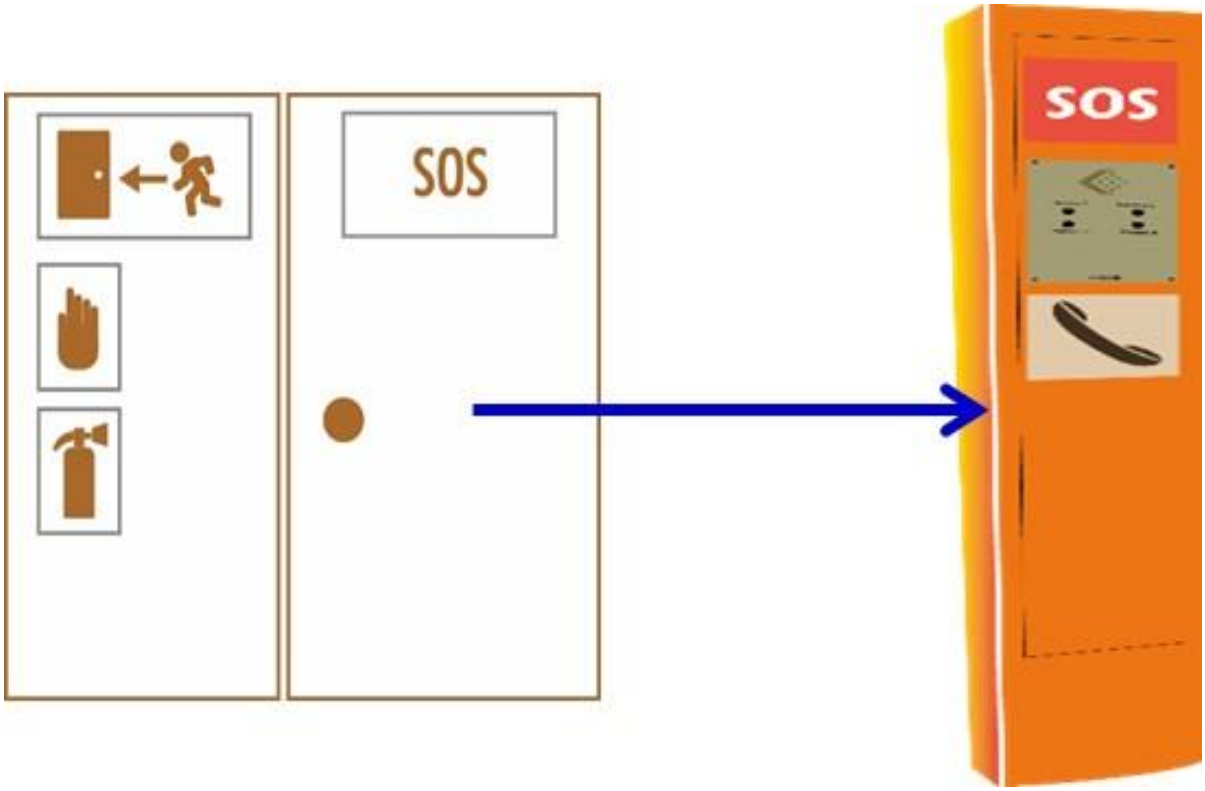


Ilustración 7-28. Ejemplos de armarios y postes SOS

7.17.2 Estación SOS

Los teléfonos SOS permiten al usuario contactar al centro de control y de comando encargado de la operación del túnel. Además de la comunicación por voz, el uso de un SOS le informa al centro de control cuál es su ubicación precisa.

Los teléfonos de emergencia se disponen en intervalos fijos, en instalaciones que pueden ser de diferentes tipos. Se ubican en la entrada, la salida del túnel y el interior del túnel al lado derecho, a una distancia ≤ 150 m para túneles de longitud superior a 500 m, montados de tal forma que se pueda ver de dónde proviene la llamada. Tienen que estar protegidos contra el polvo y tener una luz interna. En caso de tener puesta una protección, esta debe tener una liberación de pánico.

Las estaciones SOS se proveerán con una batería. Asimismo, en el lugar donde se instalen será necesario disponer una alarma de incendio, o amoblar un detector de incendios. Las estaciones deberán tener al menos dos botones para señalizar de manera rápida un problema o situación de emergencia. La protección de aislamiento de las estaciones será IP 65; y deberán basarse en tecnología IP - VOIP como SIP.

7.17.3 Servidor SOS

El sistema está habilitado para administrar todas las llamadas, y debe estar integrado con el sistema Scada para que el operador atienda la llamada sin necesidad de cambiar de su ubicación ni la interfaz de usuario. La información mínima enviada desde el servidor SOS al Scada es la siguiente:

- Estación SOS libre
- Llamada entrante de una estación SOS
- Estación SOS ocupada
- Estación SOS con llamada en espera

Todas las llamadas entrantes se grabarán en formato digital.

7.17.4 Cliente

La estación cliente proveerá toda la configuración del sistema y el posible mantenimiento en caso de problemas en el mismo.

7.18 Sistema de megafonía

7.18.1 General

Este sistema tiene como objeto enviar mensajes a los usuarios ante un incidente o emergencia, durante la primera fase de control de incendios y de estratificación de humos con ventilación mecánica detenida, para la evacuación peatonal. Los mensajes se originan desde el centro de control por el operador, o por la ejecución programada de mensajes pregrabados existentes en el sistema.

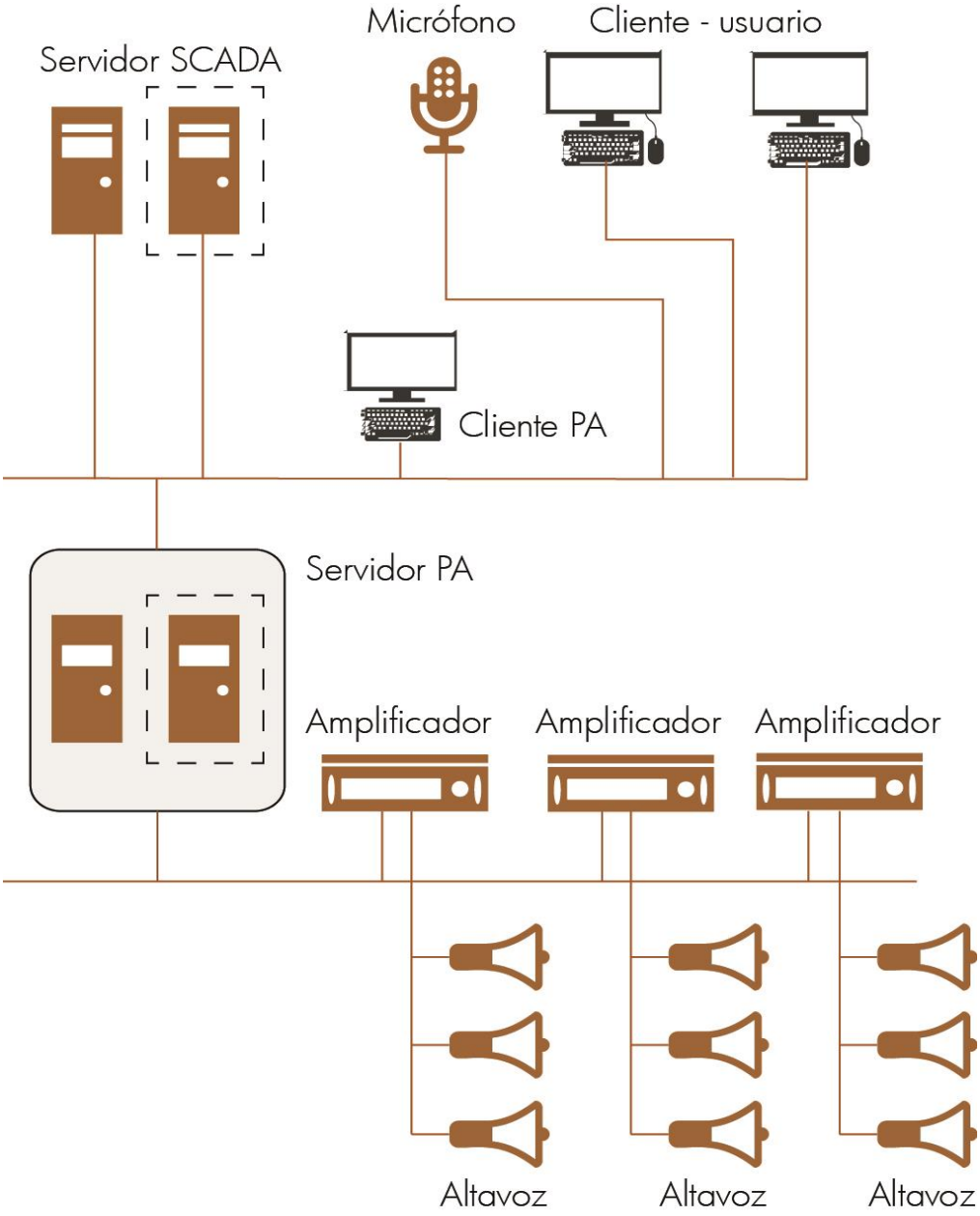


Ilustración 7-29. Sistema de Megafonía

La guía al público por medio de sonido no es común en túneles; debido a los altos niveles de ruido y reverberación, las dos situaciones pueden hacer ininteligible el mensaje y muy difícil de captar. Un diseño de parlantes y el uso de líneas de retardo pueden minimizar estos efectos. El sonido desde los parlantes más cercanos es retrasado en milisegundos por medio electrónico mientras el sonido de los otros parlantes llega, con lo cual se asegura que el sonido en una determinada zona pueda ser escuchado adecuadamente. Como bases para el diseño se tiene lo consignado en las referencias [187], [188] y [189].

CLASIFICACIÓN	STI
Mala	0,00 a 0,29
Pobre	0,30 a 0,39
Aceptable	0,40 a 0,44
Buena	0,45 a 0,59
Notable	0,60 a 0,74
Excelente	0,75 a 1,00

Ilustración 7-30. Inteligibilidad, medición del "Speech Transmission Index" (STI), (Segura, Enrique)

Es preciso tener en cuenta los siguientes escenarios y requerimientos sobre la calidad de cualquier mensaje trasmitido:

- Audiencia: una persona o todas las personas en un túnel.
- Posición de los usuarios en el túnel: en el carro o cerca del vehículo.
- Velocidad del tráfico: alta velocidad del tráfico en caso de un vehículo detenido en la línea de emergencia, o movimientos lentos o tráfico estático en caso de congestión.
- Ventilación activa o inactiva.
- El volumen del parlante debe ser operado individualmente o en grupo.

Los principales factores que se deben tener en cuenta son:

- SPL total: 90 dB.
- S/N-ratio.
- Tiempo de reverberación: es necesario considerar los tiempos de reverberación dentro de un túnel en el rango específico de frecuencias de 400 a 500 Hz de 3,2 s a 1000 Hz cayendo a 1,6 s [179].
- Posición y dirección de los parlantes.
- Líneas de retardo.
- Calidad de trasmisión del mensaje medido con el STI (Speech Transmission Index) de 0,5.
- Los valores de entendimiento calculados deberán ser alcanzados para el nivel total (directo y difuso) en el rango encima de 100 dB, para una frecuencia correspondiente entre 50 y 6000 Hz, decisiva por el volumen entre cada uno de los parlantes [179].

7.18.2 Arquitectura

El servidor de administración de sonido es un sistema capaz de enviar mensajes acústicos a los usuarios del túnel a través de micrófonos instalados en el centro de control. Las situaciones consideradas para un mensaje acústico son:

- Congestión
- Accidentes
- Incendio
- Emergencia general

Es imperativo que los mensajes puedan ser pregrabados (en los formatos WAV, MP3 y WMA) de acuerdo con la definición de mensajes simples y claros que no permitan malentendidos a los usuarios. En algunos casos, el operador también podrá emitir mensajes desde el micrófono; en ese caso, no deberá sobre modular un mensaje pregrabado que esté activo.

El sistema estará integrado al Scada de tal manera que sea posible iniciar una serie predefinida de mensajes. Igualmente, el diagnóstico del sistema deberá enviarse al Scada y visualizarse en la interfaz de usuario de cada cliente.

El servidor cliente del sistema de megafonía es la estación que posibilita configurar el sistema; deberá contar con lo siguiente:

- Números de zona.
- Mensajes.
- Secuencias de mensajes.
- Micrófono: este elemento debe ser instalado en cada centro de control y cada operador deberá tener acceso él, o tener uno propio.
- Parlantes que se instalarán en el túnel.
- Retardante de fuego clase DIN 4102, clase B2, protección clase IP 65 y certificación en EN 60849 para mensajes de emergencia.
- Amplificadores: se utilizan para amplificar la señal proveniente del servidor administrador de sonido y llevarla a los parlantes.
- Tecnología IP para conectarse al servidor administrador de sonido.

La distribución de los amplificadores se hará considerando las altas temperaturas producidas por estos equipos. Por esta razón, no se recomienda instalar estos dispositivos en un lugar donde la temperatura sea inadecuada.

7.19 Sistema de comunicaciones y red de conectividad

El objetivo del sistema de redes es prestar la capacidad necesaria para el transporte de voz, datos y video en todos los sistemas que corresponden a los túneles y a la vía. El sistema de comunicaciones y red de conectividad estará conformado por los componentes activos y pasivos.

Red pasiva: estará basada en un *backbone* de fibra óptica con redundancia para garantizar la conectividad del medio de transmisión por dos rutas diferentes, disminuyendo la probabilidad de fallas en el sistema por pérdida en el medio de

transmisión. Todas las señales de automatización, control y seguridad de los diferentes equipos electromecánicos se transportarán por una red de cableado estructurado que garantiza 10G o superior; y toda la infraestructura pasiva requiere sus respectivas certificaciones, conectores y equipos activos que permiten la conversión de los medios de transmisión.

Red activa: los equipos activos que conforman la red de conectividad incluyen *switches*, gabinetes, *racks*, organizadores, distribuidores, servidores, estaciones de trabajo y demás componentes necesarios para la correcta operación de la red. La fibra óptica que se instalará con el objetivo de realizar la infraestructura central de telecomunicaciones debe cumplir con la recomendación ITU-T G.652d; y sus características y especificaciones deben cumplir con las recomendaciones ITU-T serie G.600 a serie G.900, aplicables y pertinentes en relación con la red de transporte y fibra óptica.

El sistema de red constará de los siguientes equipos:

- *Switch* de campo, nivel 1: se encontrará dentro del túnel y proporcionará la conectividad de todos los dispositivos correspondientes a los demás sistemas con el centro de control.
- *Switch* industrial acceso, nivel 2: se ubicará en las subestaciones eléctricas a lo largo de la vía y proporcionará la conectividad entre el centro de control y todos los dispositivos correspondientes a las subestaciones y los datos provenientes de los túneles.
- *Switch core* apilable, nivel 3: este equipo se situará en el CCO; su función es la recepción del anillo y servir como acceso a los operadores del túnel, los servidores y demás equipos que requieran conexión a la red.
- PC de gestión de red: es un equipo de cómputo que tendrá acceso a todos los *switches* para la configuración de la red y a su administración.
- Toda la información también será visible en el sistema Scada.

7.20 Sistema de bandejas porta cables

Las bandejas *´porta cable,´* son elementos diseñados para apoyar y transportar cables de conducción eléctrica, cables de instrumentación y cables de control; también pueden ser utilizados para tuberías, pero destinadas al alojamiento de cables. Se puede considerar el sistema de porta cables como el componente estructural de un sistema eléctrico, pues soporta todo el cableado para la conducción de energía y datos. Un sistema porta cables debe cumplir con lo siguiente:

- La bandeja porta cable, debe cumplir los requisitos de producto, basados en normas tales como NEMA VE1 y/o IEC 61537 y el fabricante debe presentar la correspondiente certificación de su cumplimiento. Estas normas se refieren a todo lo concerniente con la construcción, pruebas y funcionamiento de un sistema de bandejas porta cables. También debe cumplir los requisitos de instalación establecidos en la sección 318 de la NTC 2050, la IEC 60354-5-52 y/o NEMA VE2. Estas normas adicionalmente consideran la manipulación y almacenamiento de los sistemas de bandejas porta cables.

- La bandeja porta cable deberá certificar la capacidad de carga para la cual fue construida, con el fin de garantizar un soporte rígido adecuado para los conductores. El sistema porta cable, deberá permitir la ventilación de los cables. Las bandejas que permiten mayor capacidad de carga y una buena ventilación son las de tipo escalera.
- El sistema porta cable deberá garantizar la continuidad eléctrica y la equipotencialidad entre las diferentes secciones de la bandeja metálica, de acuerdo con lo establecido en la norma NTC2050.
- La cantidad de conductores será de acuerdo con lo estipulado en la sección 318 en la NTC 2050.
- Para bandejas porta cables tipo escalera no se debe superar el 40% del volumen de llenado de la bandeja para cables de potencia y control, ni el 50% para cables de instrumentación tal como lo establecen las normas IEEE 525 e IEEE 422.
- Considerando que la atmósfera existente en el interior de los túneles es extremamente agresiva a causa de la combinación de la humedad y de los componentes de los gases emitidos por los vehículos, las bandejas y sus elementos de unión y sujeción deben presentar una alta resistencia a la corrosión.
- Se sugiere utilizar sistemas ventilados como lo son: bandejas tipo escalera con peldaños o ductos ventilados, que cumplan las características tanto de carga como de corrosión.
- La protección anticorrosiva podrá obtenerse mediante el uso de materiales específicos como: acero inoxidable o acero galvanizado por inmersión en caliente o fibra de vidrio.
- Se debe evitar la unión de materiales que puedan generar par galvánico y los elementos que puedan presentar concavidades que acumulen humedad.
- Teniendo en cuenta algunos posibles eventos al interior del túnel, como los incendios, los cuales generan humos tóxicos y corrosivos, es necesario mantener los sistemas de iluminación y extracción de aire para facilitar las labores de auxilio del personal de emergencias, para ello se debe certificar que la bandeja porta cable y los cables, cumplen con la norma DIN 4102-12, con resistencia al fuego de 1000ºC durante 90 minutos.
- Adicional a todo lo anterior, la bandeja porta cable deberá cumplir con el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE).

7.21 Sistema de radio y emisora

El sistema de radiocomunicación se instala debido a las dificultades de la comunicación en el interior del túnel. Su objetivo radica en enviar información relacionada con el estado del túnel a los usuarios por medio de las estaciones FM comerciales y VHF interno, por medio del cable radiante que tiene un recorrido longitudinal respecto del túnel, ver ANI [152].

En los túneles con longitudes mayores a 500 m, se dispondrá de una red de comunicaciones con canales específicos para uso de los servicios de emergencia, mediante la utilización de cable radiante ignífugo, a través de un recorrido longitudinal a lo largo del túnel. En este sentido, el operador del túnel y los servicios de emergencia (bomberos, fuerzas militares, ambulancias y Defensa Civil, entre otros), deberán ser capaces de enviar mensajes de emergencia interrumpiendo la transmisión vía radio y generando el mensaje de alarma correspondiente.

En los túneles en los que se pueda recibir información a través de la radio, se indicará a los usuarios antes de la entrada —mediante los signos adecuados— cómo es posible recibirla.

Para optimizar el desempeño durante el manejo de una emergencia y por seguridad, se recomienda que el sistema de radio esté integrado dentro del sistema Scada, determinando la georreferenciación de los diferentes radios de comunicación móviles, para mayor efectividad en la operación y movilización de los equipos, grabando las posiciones y las conversaciones que estén autorizadas.

Se recomienda por seguridad y mayor comunicación, dar prioridad a la integración de la emisora de la Policía Nacional y/o la emisora de la concesión u operador del tramo vial, al sistema de emisora del túnel en el espacio cerrado, siguiendo las regulaciones del Reglamento del Sector de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones y demás normas pertinentes.

Al respecto, la introducción general presentada en la referencia [153] dice lo siguiente:

- El equipo de retrasmisión de radio para servicios de emergencia se instalará en todos los túneles con longitud superior a 500 m independientemente del volumen de tránsito.
- Si el sistema de radiocomunicación se encuentra en un centro de control, tendrá que posibilitar la interrupción de la retrasmisión de radio de canales atendidos por los usuarios del túnel, para así poder trasmitir mensajes de emergencia.
- Los refugios y otras instalaciones donde los usuarios que evacuen el túnel deban esperar antes de alcanzar la salida tendrán que equiparse con parlantes para el suministro de información.

7.22 Centro de control CCO

El centro de control es el espacio físico donde se integran todas las variables de los sistemas existentes en el túnel y se visualizan de forma gráfica en una interfaz de usuario para administrar, controlar, registrar y supervisar todas las señales digitales que permitirán tomar acciones para el funcionamiento adecuado del túnel, en aras de garantizar control de tráfico, seguridad y protección de vidas.

El personal del Centro de Control, las instalaciones, los equipos, sistemas e información, deben contar con la debida seguridad física desde el mismo inicio de operación del centro y durante todo el tiempo de operación del sistema vial, de manera tal, que no se vea alterada la función que se cumple en este lugar.

En el centro de control se supervisan y administran los parámetros de los siguientes sistemas:

- Sistema DAI
- Grabación y visualización del CCTV
- Detección y alarma de incendios del túnel y del centro de control.
- Consola central del sistema de telefonía SOS.
- Consola central del sistema de megafonía.
- Equipos activos del sistema de comunicaciones
- Servidores y administradores de los subsistemas

Los equipos que componen el centro de control son:

- Servidor principal del sistema de control
- Servidor de *backup* del sistema de control
- PC – estación de trabajo con monitor
- PC – estación de trabajo para el sistema DAI
- Sistema de visualización; dependiendo de la clasificación del túnel, pueden ser pantallas o una *videowall*.
- Monitores para el despliegue de CCTV.

De acuerdo con la clasificación de los túneles se determina si se requiere de un centro de control. En caso de que este no sea necesario, deberá existir un nicho concentrador que permita administrar de forma autónoma y manual las variables provenientes de algunos sistemas, entre los cuales se encuentran semáforos, detectores de CO, opacímetros y postes SOS.

Un centro de control podrá administrar y vigilar varios túneles si estos se encuentran a una distancia máxima de 2 kilómetros uno del otro y no superan una distancia de 15 kilómetros en el total de las longitudes de los túneles controlados.

El centro de control se recomienda para los túneles de tipo C y es obligatorio para los de tipos A o B.

Las tareas relacionadas, deben estar vinculadas con el centro de Supervisión, Control y Adquisición de Datos SCADA.

7.23 Documentos entregables

Los documentos entregables de cada uno de los sistemas (iluminación, ventilación mecánica, comunicación, control de tráfico, sistema para cierre del túnel, detección de incidentes, control de incendios, energía eléctrica, sistema de respaldo y señalización) serán los siguientes en el caso que aplique:

- Planos de sistemas
- Planos de detalle
- Planos de montaje

- Diagramas unifilares para el caso que aplique
- Diagrama de bloques
- Memorias de cálculo para el caso que aplique
- Documento descriptivo y especificaciones técnicas
- Manual de operación
- Planes de control de variables
- Planes de control de señalización
- Procedimiento de inspección diario
- Manual de mantenimiento preventivo
- Manual de mantenimiento correctivo
- Organigrama operativo y organigrama de mantenimiento
- Organigrama del personal para emergencias
- Coordinación con organismos del Estado para emergencias
- Procedimiento ante un incendio
- Lista de materiales
- Herramientas y dotación para el mantenimiento
- Identificación de las instalaciones

Los equipos y sistemas seleccionados para cada túnel tendrán que contar con certificaciones de que han sido probados y desarrollados para ese tipo de aplicaciones.

8 Capítulo - CONSTRUCCIÓN

8.1 Glosario

Avance de excavación: distancia de excavación por ciclo paralela al eje del túnel

Cobertura: corresponde a la dimensión en términos de distancia vertical u horizontal comprendida entre la pared del área excavada en el túnel y la superficie del terreno natural; esta puede ser cobertura vertical y/o lateral, según el caso.

Comportamiento del terreno: reacción del terreno a la excavación sin consideraciones de secuencia de excavación o medidas de soporte.

Comportamiento del sistema: aquel que resulta de la interacción entre el terreno y el sistema de soporte.

Frente de excavación: superficie temporal del túnel durante la construcción, usualmente perpendicular al eje del túnel.

Lectura cero: primera medición de un parámetro físico dentro de la campaña de monitoreo.

Medios y métodos: maquinaria y métodos o procesos constructivos a cargo del contratista.

Memoria técnica para construcción: documento a cargo del contratista donde se incluyen los aspectos organizacionales (planos y esquemas de zona de campamentos, zonas de talleres, zona de patios, acometidas de servicios) necesarios durante la etapa de construcción.

Método de excavación: procedimiento de construcción seleccionado para la excavación del túnel.

Método observacional: revisión y actualización continua del diseño, considerando las condiciones del terreno encontradas durante la etapa de construcción.

Modelo del terreno: conjunto de los diferentes factores que caracterizan el área del proyecto (modelo topográfico, geológico, geotécnico, hidrogeológico). En este se reúnen todas las características y las condiciones predominantes del terreno.

Monitoreo: medición de parámetros físicos.

Observación: recolección en campo de información cualitativa o cuantitativa.

Propiedades relevantes del terreno: son aquellas que dictan su comportamiento y modo de falla.

Revestimiento definitivo: estructura permanente que se construye posterior a la estabilización total de la excavación.

Incertidumbre geológica: herramienta contractual que cubre las incertidumbres del modelo geotécnico con respecto a las condiciones reales del terreno donde se realiza la obra subterránea (túnel).

Secuencia de excavación: combinación de avance de excavación y división o seccionamiento del área transversal del túnel.

Sistema de soporte: conjunto de elementos de soporte y secuencia de excavación que se emplean para lograr la oportuna estabilización del túnel antes de la instalación del revestimiento definitivo.

Solera curva *invert*: excavación que se construye en la parte inferior del túnel.

Soporte primario: todas aquellas medidas de soporte implementadas durante la excavación, antes de la instalación del revestimiento definitivo.

Terreno: término general para referirse al material en el que se excava el túnel.

Foto 8-1. Proyecto cruce cordillera central, sostenimiento galería de evacuación

8.2 Generalidades y alcances

Este capítulo describe las actividades y aspectos organizacionales a realizar durante la etapa de construcción de túneles excavados por método convencional, en este caso el método de perforación y voladura, que garantizan el cumplimiento de los requisitos establecidos durante la etapa de diseño. No se incluye el manejo de la ejecución de las actividades propias de obra, ni el control de calidad de los materiales, ni la forma de pago; dichos aspectos son establecidos dentro del contrato de construcción (a cargo de la entidad contratante), las especificaciones particulares de construcción (a cargo del diseñador), documentos de la incertidumbre geológica, documentación sobre seguridad industrial, los documentos socioambientales y demás documentos necesarios para la ejecución del proyecto.

8.3 Actividades durante la construcción

En proyectos de túneles y en general, en obras subterráneas, es complejo conocer en detalle las condiciones del terreno a lo largo de todo el trazado del túnel antes del inicio de la etapa de construcción. Esta consideración conlleva un grado de incertidumbre que ha de considerarse (y minimizarse) mediante la implementación de un procedimiento sistemático, que permita la verificación de la estabilidad del sistema [101]. Dicho proceso, descrito en la Ilustración 8-1, se lleva a cabo durante la construcción y constituye, a su vez, la fase final de materialización y ajuste del diseño de un túnel (numeral 6.13.5).

El análisis detallado del comportamiento del sistema sirve como base para la actualización del modelo del terreno, así como para el ajuste del sistema de soporte a las condiciones del terreno encontradas durante excavación. La determinación de la efectividad de la secuencia de excavación y del tipo y sistema de soporte solo es posible en el campo con base en el monitoreo y las observaciones realizadas durante la excavación.

8.3.1 Determinación del tipo de terreno

La documentación geológica durante la excavación debe enfocarse en recolectar y documentar los parámetros relevantes, definidos para cada tipo de terreno durante el diseño. La documentación se hace en formatos específicos para este fin. Igualmente, es necesario documentar todos los parámetros adicionales no considerados en el diseño que puedan influenciar el comportamiento del sistema.

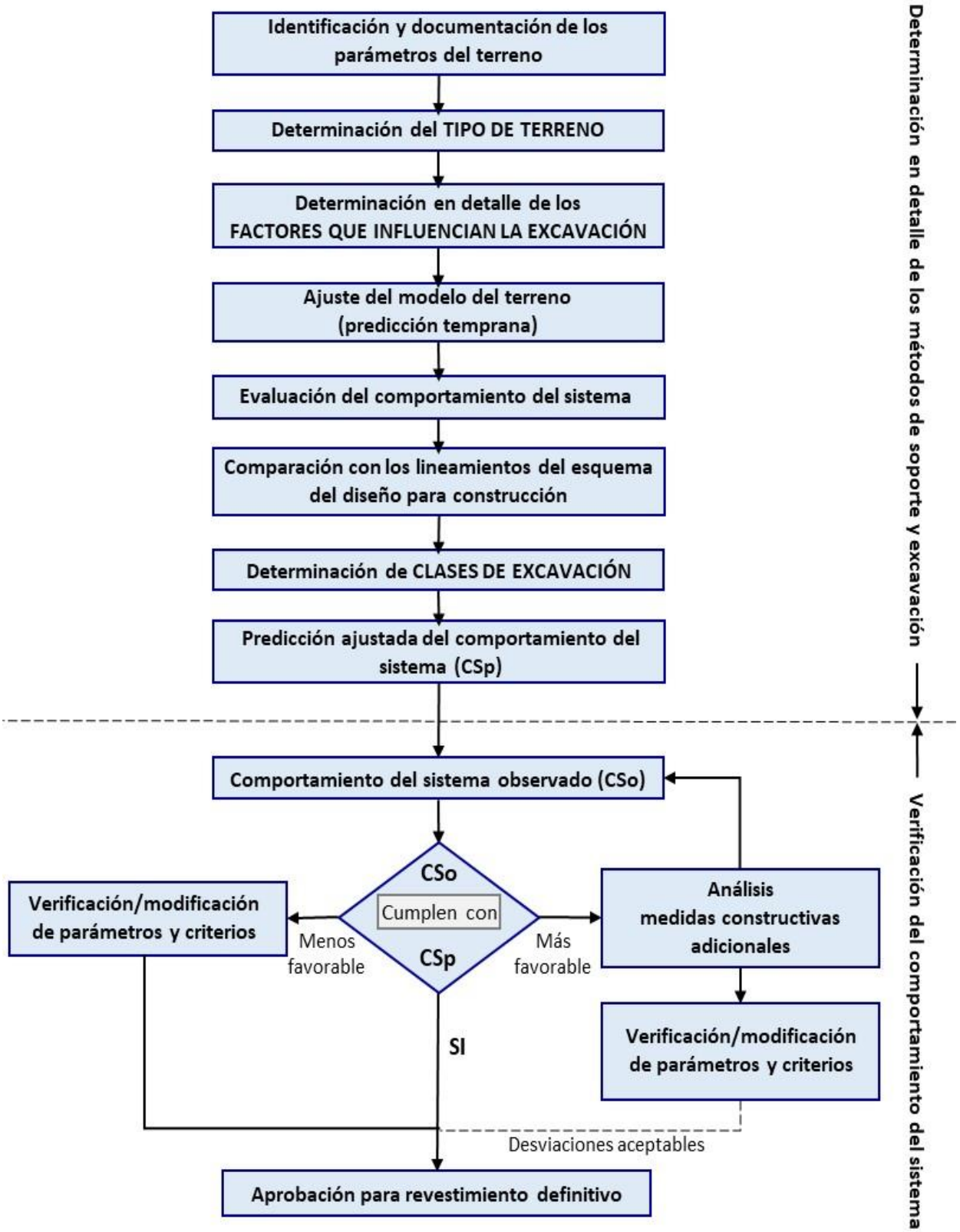


Ilustración 8-1. Diagrama de flujo para el control durante la construcción (modificado de [101])

La determinación del tipo de terreno se realiza mediante la ponderación de los diferentes parámetros, siguiendo los procedimientos definidos durante la etapa de diseño. Este paso es necesario para la evaluación y estimación de las condiciones del terreno en el frente y delante de la excavación, y para la actualización del modelo del terreno. Se requieren perforaciones exploratorias en el frente de excavación y monitoreo geotécnico.

8.3.2 Determinación en detalle de los factores que Influencian la excavación

En este paso se describen y miden los factores que actúan sobre los diferentes tipos de terrenos determinados. Es preciso cuantificar el ingreso de agua subterránea, las características de las estructuras geológicas y el estado de esfuerzos. Para obtener el estado y distribución de los esfuerzos se recomienda la ejecución de ensayos *in situ* y el ajuste con base en el monitoreo geotécnico. Estos factores complementan el modelo actualizado del terreno.

8.3.3 Evaluación del comportamiento del sistema

La evaluación del comportamiento se realiza mediante el monitoreo geotécnico (numeral 6.8.3), que evalúa la reacción del terreno y los elementos de soporte durante la excavación (método observacional). El monitoreo es utilizado para determinar las condiciones del terreno y la presencia de estructuras geológicas no visibles en el frente de excavación, y es un parámetro importante para la calibración de las simulaciones del comportamiento del sistema (los métodos de análisis, implementación y requerimientos se encuentran en el numeral 6.8.4.1 y la evaluación de los datos se describe en detalle en el numeral 8.7).

8.3.4 Comparación con los lineamientos del anteproyecto del diseño para construcción

La determinación del sistema de soporte a implementar (medidas de soporte y secuencia de excavación) debe seguir los criterios contenidos en el documento “anteproyecto de diseño para construcción” (numeral 6.5.4.1). Es imperativo verificar si las condiciones reales del terreno y el comportamiento del sistema se ajustan a la predicción realizada durante la etapa de diseño: cuando son iguales a las previstas, se siguen los lineamentos descritos dentro del documento; en caso contrario, se evalúa y reajusta el documento para adaptarse a las condiciones específicas encontradas.

El incremento de la información procedente de la excavación permite refinar los criterios (*p.e.* mayor cantidad de parámetros, determinación de rangos más precisos) para la determinación de las medidas constructivas a implementar en cada tipo de comportamiento del terreno identificado. Cualquier ajuste realizado en el anteproyecto de diseño tiene que justificarse y documentarse debidamente, en aras de ser sometido a la aprobación conjunta de las partes involucradas en la construcción.

8.3.5 Predicción del comportamiento del sistema adelante del frente de excavación

El anteproyecto del diseño para la construcción incluye el procedimiento para la predicción de las condiciones del terreno adelante del frente de excavación, que será la base para predecir el comportamiento del sistema. Durante la construcción, con el incremento de la información disponible procedente de la excavación, es necesario confirmar la predicción del comportamiento para una longitud mínima de 20 m adelante del frente de excavación. Esta debe contener:

- Magnitud y orientación de desplazamientos
- Cuando aplique, predicción ajustada de asentamientos
- Factor de utilización de los elementos de soporte

La secuencia de excavación y las medidas de soporte se determinarán antes de iniciar una excavación; una vez comenzada, y teniendo en cuenta que se dispone de un modelo del terreno validado y una predicción del comportamiento del terreno ajustada, solo se permiten modificaciones menores (*p.e.* instalación de pernos adicionales y drenajes).

Foto 8-2. Manejo de paso crítico, sector La Soledad, cruce cordillera central

8.3.6 Verificación del comportamiento del sistema

Se realiza la verificación mediante la comparación entre el comportamiento del terreno previsto durante la etapa de diseño, el comportamiento real registrado con el monitoreo geotécnico y las observaciones realizadas durante la excavación.

Es preciso verificar que el comportamiento esté dentro de los rangos permitidos en el diseño; cualquier variación debe analizarse y documentarse, considerando lo siguiente:

- Diferencias en las condiciones geológicas y geotécnicas.
- El comportamiento del terreno es diferente al previsto.
- Selección inapropiada de parámetros para caracterizar el terreno.
- Diferencias con los factores que influyen en la excavación.

Si las condiciones del terreno resultan mejores que las previstas, se hace necesario ajustar el modelo del terreno; cuando las diferencias sean importantes, se ajusta el criterio para la determinación del sistema de soporte a implementar (ajuste del esquema para el diseño durante la construcción). Por el contrario, si resultan peores y se exceden los rangos delimitados durante el diseño, se procede a implementar las medidas de contingencia incluidas en el anteproyecto para el diseño durante la construcción (*p.e.* construcción de solera curva, instalación de pernos adicionales). Cuando haya desviaciones significativas, se requieren ajustes del modelo del terreno y de los criterios para determinar el sistema de soporte. De todos los ajustes realizados se deberá dejar constancia en la bitácora de obra y contar con la aprobación técnica de la interventoría, para luego realizar los ajustes contractualmente estén contemplados

8.3.7 Validación y documentación del diseño

Durante la etapa de construcción se cuenta con un volumen importante de información detallada del terreno, que se utiliza para verificar y validar el diseño geomecánico. Los ingenieros deben documentar y reportar las desviaciones importantes, en comparación con las previstas durante el diseño. El personal del contratista, diseñador y supervisor, recolectan la información en un informe detallado. La información, que incluye el modelo del terreno validado, los sistemas de soporte implementados a lo largo del túnel y todos los cambios realizados durante excavación, se recogen en un documento que ha de titularse *Validación del diseño durante la construcción*, el cual llevará la aprobación de todas las partes involucradas y quedará en la documentación para los efectos del contrato.

8.4 Adquisición y manejo de explosivos

El proceso de perforación y voladura (método convencional), es un sistema ampliamente utilizado para la excavación de túneles en su etapa de construcción, requiere del empleo de sustancias explosivas en su proceso de cargue, cebado,

secuencia, iniciación y disparo. Los explosivos y accesorios de voladura, revisten especial cuidado, por sus características físico químicas, donde por un mal manejo, pueden perder su estabilidad y llegar a cambiar violentamente de su estado original al gaseoso, produciendo una detonación no controlada, generando incalculables consecuencias.

Los explosivos producidos por la Industria Militar INDUMIL, así como los importados por esta, son suficientemente estables, lo cual garantiza que, con un correcto transporte, almacenamiento y manejo, se consideran una sustancia segura, eficiente y económica a la hora de ser empleada como herramienta de corte de roca, particularmente para la excavación de túneles.

La adquisición, transporte, almacenamiento y manejo de explosivos, debe estar en concordancia con los requisitos exigidos por el gobierno donde se fijan las normas y requisitos para la adquisición, uso y tenencia de explosivos y sus accesorios. Se debe llevar a cabo con los más altos estándares de seguridad, su administración y cuidado, debe estar en manos de profesionales especializados en explosivos, acreditados y certificados en cada uno de los procesos en los que participa, desde el diseño de los esquemas de voladura descritos en el Capítulo - DISEÑO, el proceso de adquisición y los procesos inherentes a la etapa de construcción del presente capítulo.

8.4.1 Adquisición de explosivos

Los explosivos gracias a sus características y propiedades, pueden ser empleados eficientemente como herramienta ingenieril, sin embargo, por su poder de detonación, desafortunadamente son empleados como un elemento destructor por parte de grupos armados ilegales y delincuencia organizada en actividades de terrorismo, por tal motivo, cumplir la norma, no solo evita sanciones penales, administrativas y disciplinarias a quienes infringen la ley, sino que también impide que los explosivos y accesorios de voladuras de uso comercial se pierdan y vayan a terminar en el mal llamado “mercado negro de los explosivos”. Para tal efecto, el gobierno en cumplimiento de la Constitución Nacional (Art. 223), cuenta con el Decreto 2535 de 1993 que emite normas para el manejo de armas, municiones y explosivos, el Decreto 334 de 2002 que establece las normas en materia de explosivos, el Decreto 1609 de 2002 que reglamenta el manejo y transporte terrestre automotor de mercancías peligrosas por carretera, y junto con el Decreto 1070 de 2015 como decreto único reglamentario del sector Defensa, en su conjunto detallan los mecanismos con que cuenta el Ministerio de Defensa nacional para que la ingeniería, con apego a la ley, pueda contar con los explosivos para sus actividades en obras civiles, actividades mineras y petroleras.

Para lograr la obtención del material explosivo en un proyecto se deberá tener en cuenta que este actualmente es otorgado para industrias como la Minería, la Sísmica exploratoria, el cañoneo, las diferentes obras civiles, el Desminado Humanitario y hasta la realización de producciones cinematográficas, no obstante, se debe llevar a cabo todo un proceso para dicha obtención, que comienza con la inscripción de usuario para la compra de explosivos. Cualquier persona natural o jurídica, siempre y cuando cumpla con ciertas condiciones, una muy importante no presentar antecedentes judiciales, puede requerir material explosivo, sin embargo, esta deberá presentar la siguiente documentación:

1. Carta de solitud solicitud
2. Cámara de Comercio
3. Cédula del representante legal
4. Carta de autorización de verificación de antecedentes
5. Formulario de Inscripción diligenciado

Es muy importante que se defina el almacenamiento del material explosivo antes de comenzar el proceso.

8.4.1.1 Compra de explosivos

La Industria Militar – INDUMIL, solo puede tramitar pedidos de explosivos a los usuarios registrados ante el Departamento Control Comercio de Armas, municiones y explosivos – DCCAE que estén inscritos como usuarios para la compra de explosivos, previo cumplimiento de los requisitos y cuenten con cupo aprobado para tal fin, en las cantidades previstas y por un lapso determinado.

8.4.1.2 Solicitudes de explosivos

Previo a la solicitud de venta de explosivos debe existir un permiso para la utilización de explosivos por parte de la autoridad correspondiente, igualmente, debe existir un contrato entre la entidad estatal y un constructor, además, en el caso que, adicionalmente haya una empresa contratada exclusivamente para el manejo de los explosivos, también se debe aportar el respectivo contrato, los cuales son la base de la solicitud de cupo de explosivos, todo esto, junto con los documentos que prevé las precitadas normas; de igual forma, se deben organizar en una carpeta para radicar la solicitud ante el DCCAE.

Dentro de los requisitos, se debe contar con el diseño de los esquemas de voladura avalados y firmados por un profesional especializado en explosivos y voladuras, pues estos diseños permiten definir el volumen de roca a remover (ver Capítulo - DISEÑO), los explosivos y accesorios de voladura a utilizar, así como la lista de las personas que componen los equipos o frentes de trabajo, pues sobre ellos, a nombre propio, el DCCAE exige los certificados de idoneidad en todos los frentes (transporte, almacenamiento y manejo), así como de los diferentes perfiles a cargo (profesionales y técnicos), buscando que éste personal esté debidamente contratado y cubierto con su seguridad social, no solo por su seguridad y bienestar, sino porque se debe buscar su estabilidad laboral, toda vez que un nuevo ingreso debe ser tramitado ante el DCCAE y eso también demanda tiempo. En conclusión, la solicitud debe contener en su cuerpo:

1. Carta de solicitud
2. Revista y concepto favorable del polvorín de almacenamiento
3. Cámara de comercio de empresas que intervienen
4. Cedula del representante legal, de los explosivitas y del Ingeniero que hace los cálculos
5. Carta de autorización para la verificación de antecedentes
6. Certificados de idoneidad

7. Contrato de entidad estatal con la empresa solicitante del material explosivo
8. Contratos adicionales si el del uso de los explosivos es un tercero
9. Justificación técnica
10. Álbum fotográfico del polvorín de almacenamiento
11. CD con video del polvorín

8.4.1.3 Transporte y disposición del material explosivo

Referente al transporte de explosivos y accesorios, en Colombia nuestra legislación está amparada bajo el decreto 1609 del 2002 emitido por el Ministerio de Transporte, y en particular para esta labor el decreto 1886 de 2015 del Ministerio de Minas (reglamento de seguridad en la labores Mineras en Colombia) en sus artículos 138 al 145; igualmente contempla la norma internacional o código de materiales explosivos NFPA 495:2001; este código identifica niveles razonables de seguridad para la fabricación, transporte, almacenamiento, venta y uso de materiales explosivos a empresas dedicadas en labores de voladuras. Así mismo se debe tener en cuenta la NFPA 704 que es la norma que explica el "diamante de materiales peligrosos", la NTC 3966 que trata del transporte de mercancías peligrosas, Clase 1 Explosivos para el transporte terrestre por carreteras y la NTC 4702-1 que trata de los embalajes y envases para transporte de mercancías peligrosas, Clase 1 Explosivos

Una vez el cupo es aprobado y avalado por el jefe del DCCAE, es direccionado a la Brigada que tiene en su jurisdicción el proyecto y se procede a autorizar la compra local del material explosivo; para hacer este proceso se debe solicitar a Indumil la cotización del material y al jefe de Estado Mayor de la Brigada la autorización de la compra.

Posteriormente y luego de la consignación se direcciona el material en una ruta nacional para que llegue hasta dicha Brigada y se comienza el trámite de escolta militar, para el transporte del mismo hasta su destino de consumo.

Foto 8-3. Depósito temporal de explosivos bajo tierra, demarcación

8.4.1.4 Almacenamiento de explosivos

Los explosivos industriales que comercializa la Industria Militar, son sustancias estables, que solo reaccionan ante una acción iniciadora controlada, pero que también deben ser correctamente dispuestos para su almacenamiento bajo estrictas medidas de seguridad, ya que la acción externa de calor, choque o chispa, ponen en riesgo su estabilidad, así como también se deben cuidar de alguna amenaza social externa, que pueda atentar contra su seguridad física.

Referente al almacenamiento en labores subterráneas el decreto 1886 de 2015 emitido por el Ministerio de Minas y Energía contempla entre otros en el artículo 124 las disposiciones para el almacenamiento de explosivos y accesorios específicamente resaltando el parágrafo uno (tablas de seguridad de almacenamiento de explosivos) y el parágrafo 2 (Almacenamiento de explosivos en diferentes construcciones)

8.4.1.4.1 Selección del depósito de explosivos (magazín o polvorín)

La selección del depósito de explosivos (polvorín o magazín), así como la ubicación, son requisitos indispensables, para presentar la solicitud de explosivos ante el DCCAE.

Para determinar el diseño y ubicación del depósito de explosivos, se debe contemplar lo previsto en el Sistema Globalmente Armonizado de Clasificación y etiquetado de productos químicos, de las Naciones Unidas del Decreto 1496 de 2018 (Tabla 1-2), con el cual se puede definir el tipo de riesgo del material, así mismo, dar cumplimiento al reglamento de seguridad en la labores Mineras en Colombia (decreto 1886 de 2015), aplicable para este tipo de proyectos, entre los cuales se resaltan los artículos 124 al 134 en adelante, aplicar la norma de la Industria Militar IM-FE- GIN-IF-021 de 2016 donde tendrá en cuenta los aspectos técnicos para el almacenamiento de los explosivos fabricados por INDUMIL (ver catálogo de explosivos) y las normas NFPA-499 y NFPA-500 para definir especificaciones del depósito de explosivos.

8.4.2 Manejo de explosivos

El proceso de perforación y voladura (sistema convencional), para la apertura de túneles, no solo requiere de un correcto diseño de cada esquema de voladura (ver Capítulo - DISEÑO), también requiere el planeamiento y ejecución de un estricto protocolo para la perforación, el cargue, retaque, cebado y el disparo de la voladura, por lo tanto, esta actividad de planeamiento y ejecución de cada voladura, debe ser llevada a cabo por un equipo donde cada miembro tenga perfectamente definido y por escrito, el perfil, funciones, controles y responsabilidades respectivas, en cabeza de un profesional o técnico profesional especializado en explosivos y voladuras, como se dijo, todos ellos con certificado de idoneidad en el manejo de explosivos vigente.

8.4.2.1 Perforación

La perforación requiere un tratamiento técnico especial, toda vez que la efectividad en el manejo del cuele para generar cara libre, además de los barrenos de contorno con técnicas de corte y precorte, depende en gran medida de la precisión en la perforación, esto indica que se debe contar con el uso de nuevas tecnologías en materia de perforación, en la misma medida cada voladura será eficiente y podrá garantizar la precisión el rendimiento y calidad en cada una de ellas.

8.4.2.2 Uso de los explosivos

Los explosivos utilizados para trabajos de voladura en Colombia, son los fabricados o importados únicamente por la industria militar, de acuerdo con nuestra legislación; no está permitido el empleo de los llamados explosivos caseros o de fabricación improvisada, tampoco de los accesorios de voladura o iniciadores “hechizos”, hacerlo, permitirlo o facilitarlo, acarrea consecuencias legales a la Empresa u organización donde suceda este tipo de actividades, así como hacia los diferentes niveles de ejecución y control del proyecto, por su acción u omisión, enmarcando esta actividad ilegal, como fabricación, porte o uso indebido de explosivos.

De la misma forma, no está permitido el transporte, almacenamiento y manipulación de explosivos, por parte de personas sin contar con el respectivo “*certificado de idoneidad para el manejo de explosivos*” para el trabajo pertinente, por tal motivo, contratistas, concesionarios e interventores, deben dar estricto cumplimiento a lo que prevé la ley y propender también, por contar desde el principio, con el personal altamente capacitado y entrenado desde el nivel técnico, tecnológico, profesional y especializado, que le garanticen el estudio, planeamiento y ejecución de voladuras modernas, seguras, económicas y técnicamente diseñadas conforme la caracterización del macizo rocoso y explosivo a emplear.

8.4.2.3 Disparo de la voladura

Se debe contar con los protocolos de seguridad que permitan garantizar la seguridad de todo el personal que trabaja en el proyecto, los equipos y demás infraestructura, inclusive aquellas personas ajenas al trabajo con explosivos, siguiendo un paso a paso previo y posterior al disparo de la voladura, guardando el tiempo de seguridad que prevé el análisis de riesgos antes de volver a ingresar a la zona (manejo de gases no deseados o humus), así mismo, prever estrictos y constantes horarios para la ejecución de la voladura, esto permitirá, que todo el personal del proyecto esté informado y se activen los protocolos de seguridad.

8.4.2.4 Medidas de seguridad con explosivos

Desde el Ministerio de Trabajo, junto con las demás entidades que tienen injerencia en la comercialización, el control, la capacitación, el manejo, la seguridad y la reglamentación de los explosivos, se emitió en agosto de 2019 la “Guía Técnica de Seguridad para el Uso de los Explosivos en Voladuras bajo tierra y a Cielo abierto”, allí se detalla, además la terminología y marco legal con explosivos.

Los proyectos de Ingeniería que requieren el uso de explosivos y su almacenamiento, deben elaborar las propias medidas de seguridad en voladuras bajo tierra y a cielo

abierto, todo esto bajo las normas de seguridad y salud en el trabajo, tal como se muestra en la guía técnica de seguridad, atendiendo los resultados derivados de un previo análisis y gestión del riesgo del proyecto.

8.5 Aspectos de la planeación en la construcción

La planeación de la ejecución de la obra está asociada de manera directa con la experiencia del constructor. En general, debe prepararse un documento que analice los Ítems principales que puedan afectar la ejecución. Este análisis permite identificar aspectos fundamentales:

- Accesos a los frentes de obra, adecuados para los equipos de construcción.
- Disponibilidad de servicios públicos (energía, comunicaciones, agua, etc.).
- Análisis de servicios afectados por la construcción.
- Estado de permisos y licencias, y demás documentos legales necesarios.
- Análisis de la situación de orden gubernamental.
- Metodología e instrumentación geodésico-topográfica.
- Zonas de préstamo.
- Zonas de disposición de materiales.
- Zona de almacenamiento de explosivos (8.4.2).
- Verificación geológica.
- Análisis de todas las instalaciones necesarias.
- Organigramas, reuniones con el cliente y asesores.

Como parte de las actividades involucradas en la planeación en la construcción, antes del inicio el contratista presentará —para aprobación ante la entidad contratante— una *memoria técnica para construcción*, la cual incluirá planos y esquemas de zona de campamentos, zonas de talleres, zona de patios, obras de mitigación ambiental y acometidas de servicios necesarios para la ejecución de la obra (tales como agua, energía etc.), a la vez que entregará un listado de chequeo de los requisitos solicitados por la autoridad ambiental. Igualmente, y teniendo en cuenta las condiciones definidas en el diseño, es obligatorio presentar una descripción detallada de los aspectos más importantes para el desarrollo de la obra, entre los que se destacan los siguientes:

- Método de excavación seleccionado, que incluye la descripción de los equipos a emplear.
- Ciclos de excavación y sus rendimientos asociados.
- Personal a emplear, lo cual debe quedar consignado en el programa de construcción.
- Sistemas de ventilación, bombeo y drenaje durante la construcción.
- Programa de implementación del plan de manejo ambiental.

- Sistema de control de calidad.
- Sistema de instrumentación geotécnica a implementar.
- Sistema de control y mitigación de riesgos, desde el punto de vista de seguridad, durante la ejecución de la obra.

Un aspecto muy importante de la planeación de la construcción, que suele no tener la importancia que merece, es el trabajo topográfico durante la ejecución de los túneles. Para evitar la imposición de un excesivo número de normas respecto a la precisión requerida es esencial realizar una simulación *a priori*, la cual aporta los resultados que indican si es posible cumplir los objetivos de precisión con un determinado sistema (redes, equipos, sensibilidad, método, etc.). La planeación correcta deberá ser la siguiente:

- Determinar los elementos básicos, desde el punto de vista geodésico-topográfico:
  - Diseño de redes exteriores (constituyen el sistema geodésico de referencia) en el que se fundamentan los trabajos posteriores. Dichas redes deben observarse con técnicas GNSS (*Global Navegación Satellite Systems*).
  - Diseño de redes interiores, en las que corresponde utilizar estaciones totales con precisiones adecuadas a la obra a realizar.
  - Instrumentación y accesorios necesarios (estaciones, giroteodolitos, sensores, soportes, etc.).
- Realizar una simulación mediante programas informáticos que permita *a priori*, en función de la metodología, instrumentación, etc., predecir los resultados que se van a obtener en la excavación de los túneles.
- Una vez realizada la simulación, y contrastada por los ingenieros especialistas contra las necesidades del proyecto (tolerancias de alineamiento, longitudes, cotas de nivel), se aprobaría el sistema para la realización del trabajo geodésico-topográfico. Si esto no ocurriese, se haría el ajuste necesario a la instrumentación y la metodología, y se procedería a realizar una nueva simulación.

La metodología e instrumentación geodésico-topográfica seleccionada después de la simulación *a priori* deberá incluirse en la *memoria técnica para construcción*.

8.6 Aspectos organizacionales durante la construcción

Es necesario establecer una estructura de responsabilidades y funciones claramente definidas durante la construcción del túnel. Las partes involucradas dentro del contrato incluyen:

- Entidad contratista (cliente/dueño): es la encargada final de tomar decisiones en cuanto a variaciones en presupuesto y cronograma; igualmente, es responsable de aceptar medidas complementarias no previstas en el contrato.
- Supervisor y/o interventor: es designado por la entidad contratante y representa los intereses de la entidad en la obra. La supervisión es responsable de validar todas las actividades en obra, garantizando que los trabajos estén acordes con las condiciones contractuales.

- Contratista: es el encargado de realizar los trabajos de construcción de acuerdo con el contrato firmado entre él y la entidad. Es el responsable de la obra en general, de los medios y métodos constructivos y de la seguridad del personal, y está obligado a garantizar el cumplimiento oportuno de los requerimientos de calidad.
- Geólogos: tanto la supervisión como el contratista deben contar con geólogos con disponibilidad total durante todo el tiempo que dure la construcción, quienes registran y aprueban de manera conjunta las condiciones del frente de excavación con base en el anteproyecto de diseño para construcción (numeral 6.5.4.1). Ellos se encargan de realizar recomendaciones sobre ensayos a realizar (parámetros relevantes).
- Personal para el monitoreo geotécnico: puede ser un ente independiente asignado por la entidad contratante, o hacer parte del equipo de supervisión; es responsable de validar la ejecución del plan de seguridad geotécnico.
- Especialista en túneles: tanto el contratista como el supervisor deben contar con un experto, con disponibilidad total durante todo el tiempo que dure la construcción de los túneles; este se encarga de interpretar los datos de monitoreo y predecir las condiciones del terreno.
- Experto independiente: El contrato de construcción debe incluir la participación de expertos independientes, los cuales participan en el contrato para resolver controversias.

8.6.1 Actividades de la supervisión

Como se mencionó, la labor de supervisión consiste en representar los intereses de la entidad contratante dentro del proyecto. Al inicio de la etapa de construcción, el contratista puede proponer modificaciones menores a la ubicación de portales, las cuales afectan el alineamiento del túnel. Estos cambios han de presentarse al supervisor; junto con el diseñador, este último revisará las modificaciones presentadas y las aprobará o negará de acuerdo con los criterios técnicos y parámetros que rigen el contrato.

El método observacional requiere como herramienta el programa de monitoreo geotécnico, que incluye observaciones permanentes en campo e interpretación en tiempo real en la ejecución de la excavación. En este sentido, el supervisor se encarga de revisar, de forma permanente, las actividades de excavación, soporte primario y revestimiento definitivo. Para este fin, debe contar con los profesionales idóneos que están obligados a permanecer en los frentes de excavación según los ciclos de construcción previstos, teniendo en cuenta lo dispuesto en el plan de seguridad geotécnica durante la construcción (numeral 6.6).

En cuanto a la calidad y costos de los trabajos, el supervisor debe verificar el uso y el manejo apropiado de los materiales de construcción, establecer un cronograma para medición de cantidades y revisar las cuentas presentadas por el contratista.

Adicionalmente, el supervisor revisa la reparación o corrección de cualquier eventualidad durante la construcción.

Aunado a lo anterior, la Supervisión del proyecto, deberá cumplir con las obligaciones establecidas en el Manual de Interventoría vigente (o documento equivalente), en la entidad contratante.

8.6.2 Reuniones durante la construcción

Durante el proyecto, y en especial durante la excavación e instalación de soporte primario, se debe contar con la disponibilidad de las diferentes partes involucradas en el túnel, de tal forma que sea posible reunirse de forma inmediata ante cualquier situación que se presente en la construcción del túnel.

8.6.2.1 Reuniones geotécnicas

Estas reuniones se realizan 3 veces por semana, como mínimo, aunque se recomienda efectuar encuentros diarios entre interventoría y contratista. En estas reuniones participan:

- Representante de la entidad (puede ser el supervisor y/o Gestor).
- Representante del contratista.
- Representante de la interventoría o quien haga sus veces.
- Geólogos: presentan las observaciones y mediciones del frente de excavación.
- Equipo de monitoreo: durante la reunión se presentan los resultados de la campaña de monitoreo.
- Especialista en túneles: es el encargado de la interpretación de los datos.

En estas reuniones se analiza la información que proviene del intervalo de tiempo entre las reuniones geotécnicas y se discuten los siguientes temas:

- Comparación entre los comportamientos observado (resultados campaña de monitoreo) y previsto (diseño).
- Sistemas de soporte implementados.
- Ajustes del método de excavación.
- Predicción del comportamiento del terreno para los siguientes avances de excavación.
- Actualización del modelo del terreno.
- Cuantificación de la incertidumbre geológica, como mínimo una vez cada 15 días. Durante los comités se tratarán todos los temas concernientes a las situaciones que se presenten en construcción respecto la incertidumbre geológica.

Al final de la reunión se produce un documento (que debe llevar las firmas de los asistentes) en el que se registran los acuerdos y demás observaciones realizadas durante la misma. En caso de no llegar a acuerdos entre la entidad (representada por el supervisor) y el contratista en cuanto a la definición de sistemas de soporte a implementar, este último continuará con la ejecución de las actividades.

La diferencia en cantidades y tiempos de ejecución (sea superior o inferior) deberá ser justificada ante la entidad contratante en un reporte desarrollado por el contratista. En el evento de continuar la controversia, posterior al estudio del reporte presentado por el contratista, la decisión final será tomada por el experto independiente, previsto en el contrato general.

8.7 Monitoreo geotécnico durante construcción (evaluación e interpretación)

El riesgo residual, procedente de las incertidumbres del modelo del terreno y de las simplificaciones realizadas durante la etapa de diseño, debe atenderse durante la etapa de construcción. En este sentido, el método observacional es, quizás, la principal herramienta complementaria para la construcción de túneles de una manera segura y económica; desde su introducción, en la década de 1960 [190], dicho método ha sido optimizado con el desarrollo de nuevas técnicas y metodologías enfocadas al área de túneles [120, 191].

Foto 8-4. Sector crítico La Soledad, cruce cordillera central en observación

El método nombrado requiere de organización y preparación apropiadas antes del inicio de la obra. En el caso de los túneles de carreteras en Colombia, la preparación del documento donde se detallan las labores, esquemas, especificaciones, etc. del monitoreo geotécnico se realiza durante la fase de estudios y Diseños (**Fase III)** ver numeral 2.2.2.3, y se acostumbra incluirlo en las especificaciones particulares de construcción. Sin embargo, se recomienda que todo lo referente al monitoreo geotécnico se realice en un numeral específico, titulado “Plan de seguridad geotécnica para construcción” (numeral 6.8).

El objetivo principal de este plan de monitoreo es dictar los lineamientos a seguir para determinar la estabilidad del sistema y su impacto en el ambiente. El éxito de la campaña de monitoreo no depende solo en un análisis e interpretación continua de los datos; también requiere lo siguiente:

- Entendimiento del proceso mecánico
- Identificación del comportamiento normal
- Detención oportuna de desviaciones
- Evaluación y predicción del desarrollo de desplazamientos y las condiciones del terreno alrededor del túnel

Este numeral presenta el estado del arte en cuanto a métodos para la evaluación, presentación e interpretación de datos de monitoreo, con especial atención al monitoreo de desplazamientos absolutos, tomando como referencia lo presentado en el manual *Monitoreo geotécnico para túneles construidos por el método convencional* [122, 194], publicado por la Sociedad Austriaca de Geomecánica (OeGG).

8.7.1 Desarrollo general de desplazamientos

La Ilustración 8-2 representa de manera gráfica el desarrollo típico de los desplazamientos. En esta se identifican diferentes componentes, cuya comprensión es importante para una adecuada interpretación de los datos de monitoreo. La línea Z_0 representa los desplazamientos totales inducidos por la excavación del túnel. Los desplazamientos totales se subdividen en:

- Desplazamientos adelante del frente de excavación (Z_{P0}).
- Desplazamientos que ocurren entre el avance y la lectura cero (Z_{P1}).
- Desplazamientos “medibles” después de la lectura cero ($Z_m = Z_1$).

8.7.2 Monitoreo de desplazamientos absolutos 3D

Existen varios métodos para la visualización y verificación del proceso de estabilidad, los cuales se explicitan a continuación.

8.7.2.1 Diagrama tiempo – desplazamiento

Los diagramas de este tipo se utilizan para presentar las componentes de desplazamientos verticales, horizontales y longitudinales con respecto al tiempo; generalmente, se grafican uno o varios puntos de la sección de monitoreo dentro de los mismos diagramas. Es necesario incluir las fases de excavación para correlacionarlas con el desarrollo de desplazamientos. Este diagrama se emplea para evaluar el proceso de estabilización de la sección.

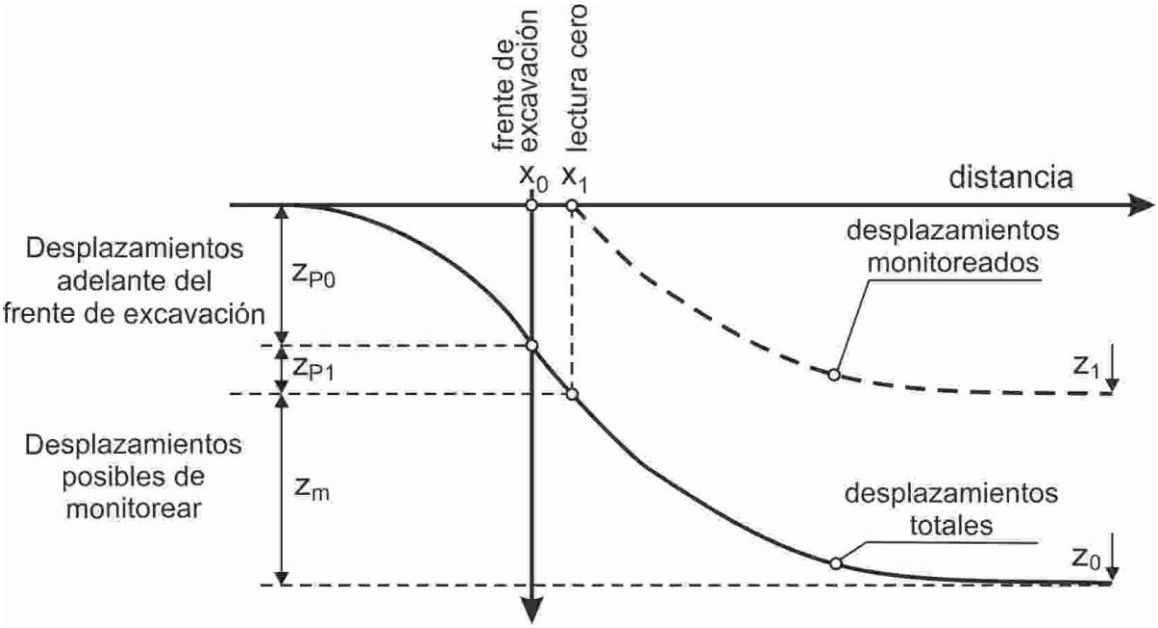


Ilustración 8-2. Desarrollo típico de desplazamientos radiales (cortesía de OeGG)

8.7.2.2 Diagrama distancia – desplazamiento

Al igual que en el caso del diagrama de tiempo-desplazamiento, este se utiliza para la evaluación del proceso de estabilización. Es posible representar más de un componente o punto de monitoreo en un mismo diagrama de este tipo, así como desplazamientos de varias secciones de monitoreo.

8.7.2.3 Evaluación de la estabilidad

La regla general es que la tasa de aumento de los desplazamientos disminuye a medida que aumenta la distancia entre el frente de excavación y la sección de monitoreo (Ilustración 8-2). A continuación, se presentan diferentes factores que afectan el desarrollo de los desplazamientos.

8.7.2.3.1 Avance continuo

Como puede observarse en las Ilustración 8-3 e Ilustración 8-4, no existen diferencias entre las dos representaciones gráficas. Tanto la interpretación del comportamiento del sistema, como la evaluación del proceso de estabilidad se hacen de manera directa. En los dos diagramas se observa que la tasa de desplazamientos disminuye a medida que aumenta la distancia respecto al frente de excavación.

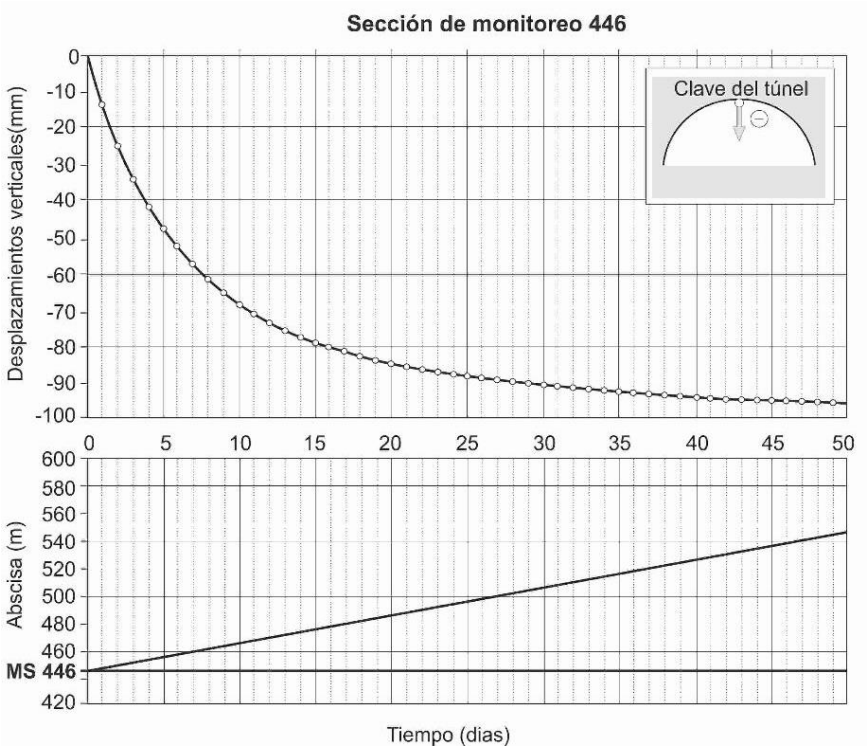


Ilustración 8-3. Forma típica de un diagrama de tiempo – desplazamiento, estabilización de la sección – avance continuo (cortesía de OeGG)

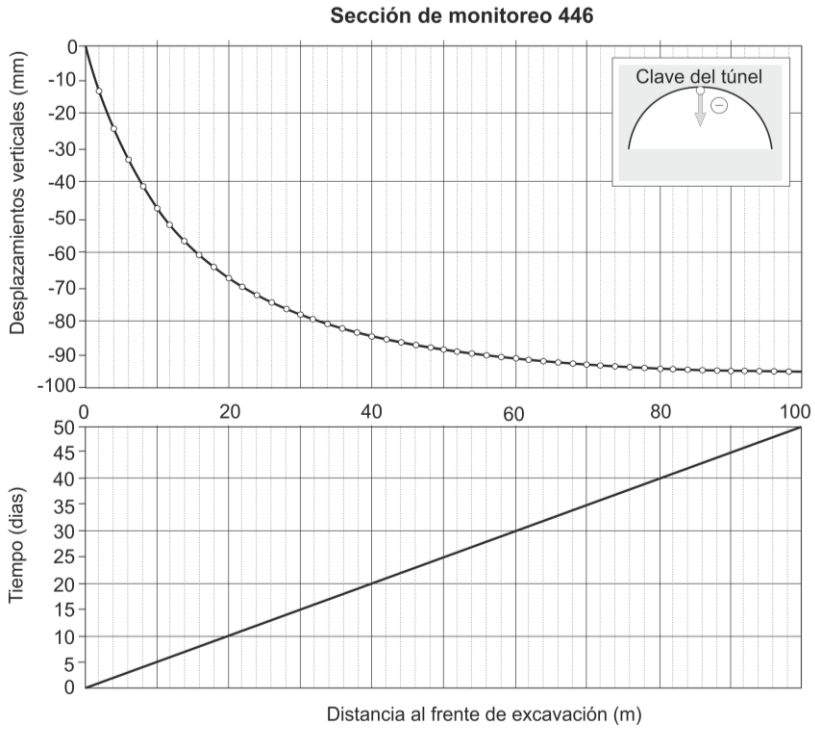


Ilustración 8-4. Forma típica de un diagrama distancia-desplazamiento, estabilización de la sección – avance continuo (cortesía de OeGG)

8.7.2.3.2 Cambios en la tasa de avance y paros durante construcción

El desarrollo de desplazamientos es afectado principalmente por dos variables: la redistribución de esfuerzos causada por el avance de la excavación y, en menor medida, por el comportamiento del terreno y los materiales de soporte dependiente del tiempo. La representación gráfica de los desplazamientos en función de la distancia al frente de excavación, elimina los cambios en la pendiente de la curva de desplazamientos causados por diferentes tasas de avance de la excavación. La Ilustración 8-5 presenta esta situación: en la parte izquierda se muestra el diagrama tiempo-desplazamiento, y en la derecha el diagrama distancia-desplazamiento.

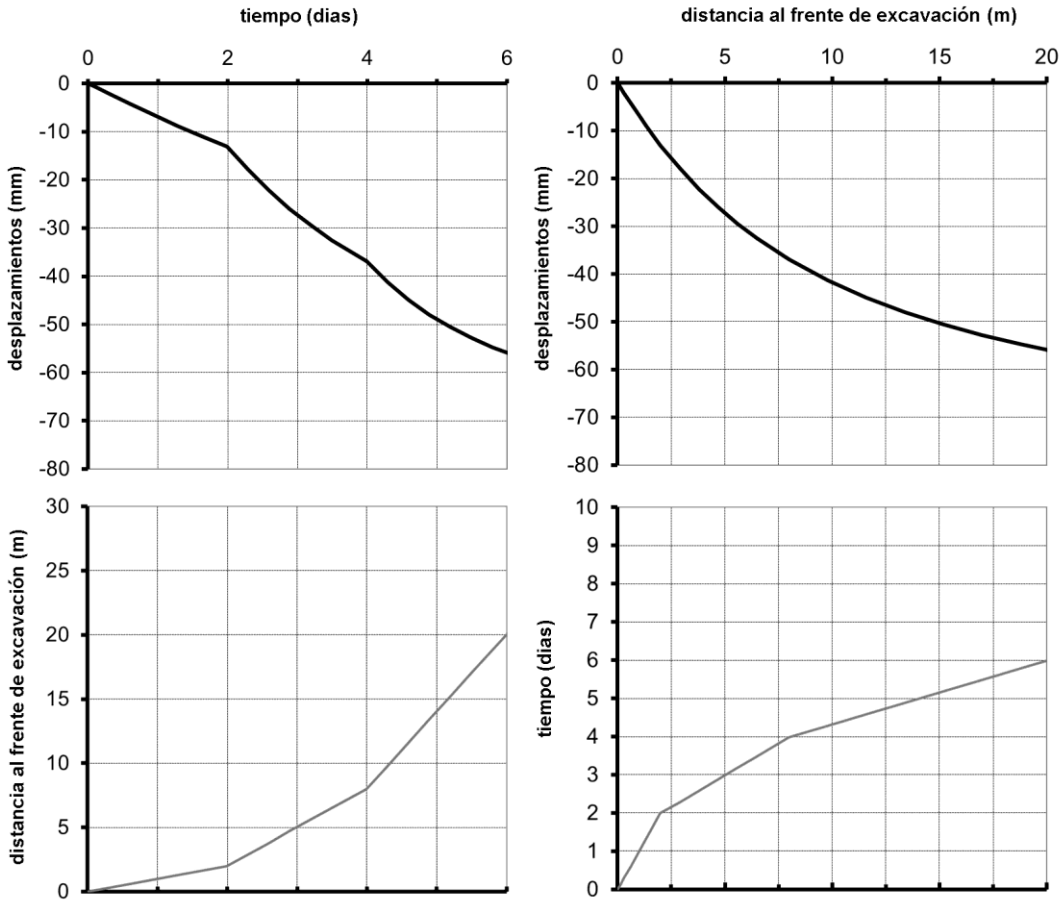


Ilustración 8-5. Desarrollo de desplazamientos en caso de avances variables [192]

De manera análoga, una pausa prolongada de la excavación causa la detención del desarrollo de los desplazamientos. En la Ilustración 8-6 se puede observar el diagrama tiempo-desplazamiento (parte izquierda) y su correspondiente diagrama distancia – desplazamiento. En este caso, se recomienda utilizar este último para evitar problemas en la interpretación, debido al aumento significativo de desplazamiento con el reinicio

de las actividades de excavación. Cabe resaltar que este tipo de representación gráfica es útil para el análisis de fases singulares de excavación.

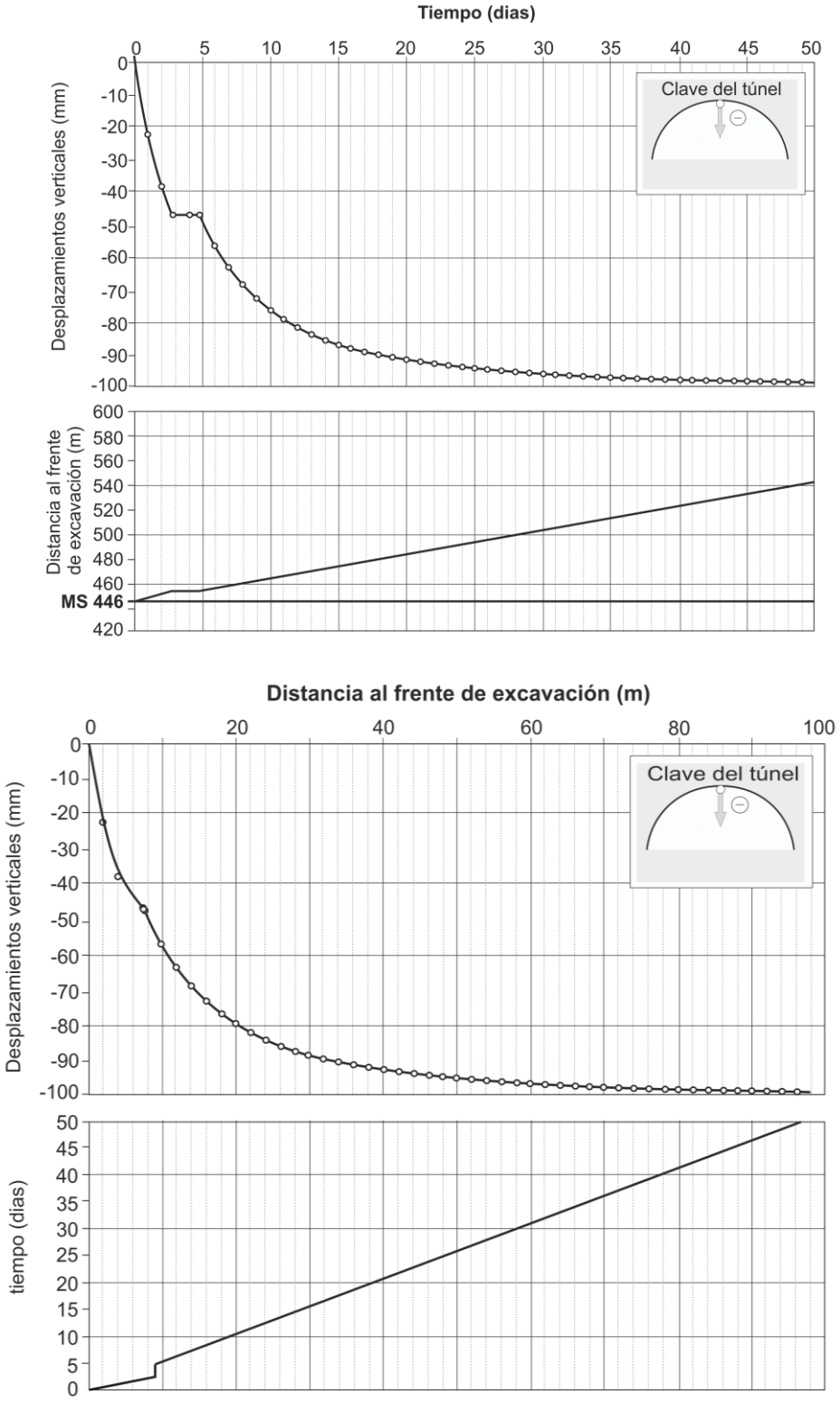


Ilustración 8-6. Desarrollo de desplazamientos en caso de detención temporal del avance (cortesía de OeGG)

8.7.2.3.3 Fases de excavación

Las Fases de excavación típicas de un túnel, se muestran en la Ilustración 8-7, Ilustración 8-8 e Ilustración 8-9.

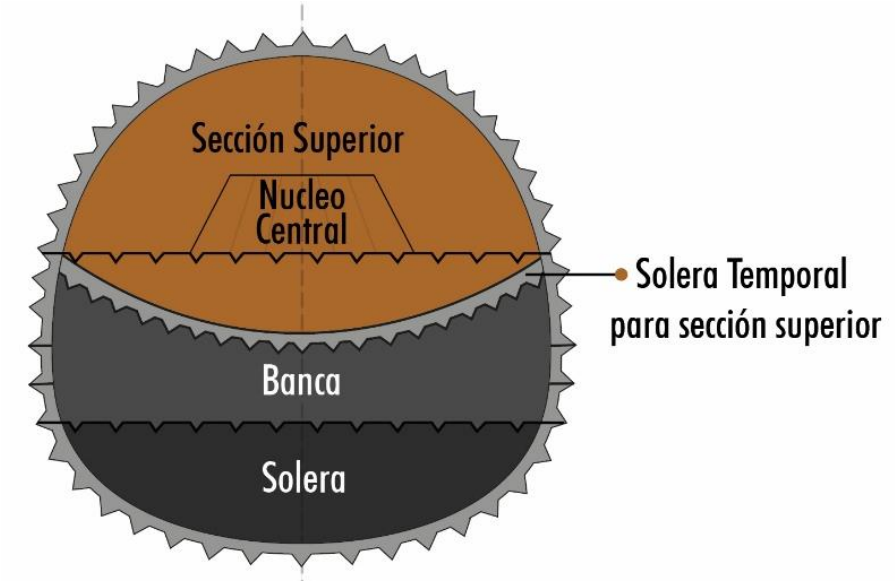


Ilustración 8-7. Fases de excavación - sección transversal típica

Las fases adicionales de excavación, tales como excavación de banca, solera o galerías laterales, ocasionan un aumento temporal de la tasa de desplazamiento.

La pendiente máxima se puede observar cuando el frente de excavación de la fase subsecuente (banca, solera, galerías) atraviesa la sección de monitoreo (Ilustración 8-7).

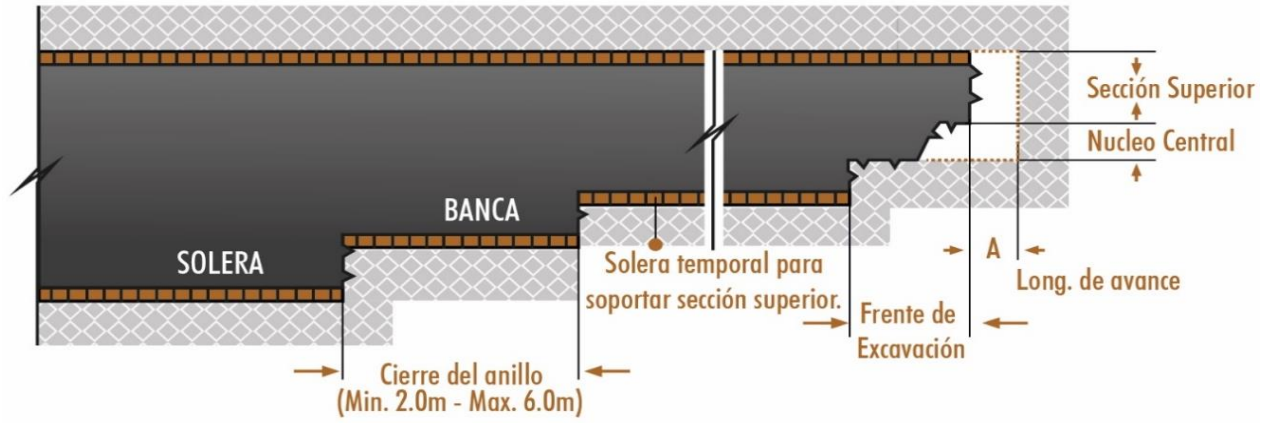


Ilustración 8-8. Fases de excavación - sección longitudinal

La evaluación e interpretación de este tipo de situación es relativamente sencilla cuando se cuenta con una distancia suficiente entre las fases de excavación (*p.e.* sección superior – banca) de tal manera que no exista una interacción mutua en el proceso de redistribución de esfuerzos.

En caso de que exista una interacción entre las fases de excavación, es preciso aplicar métodos avanzados de interpretación.

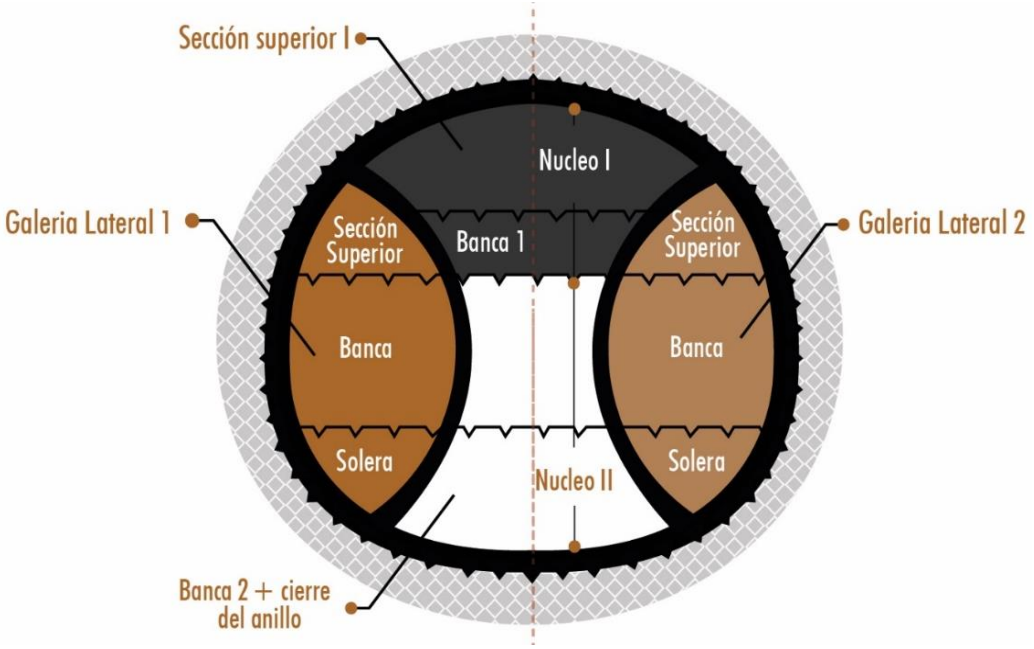


Ilustración 8-9. Fases de excavación - sección transversal con núcleo central

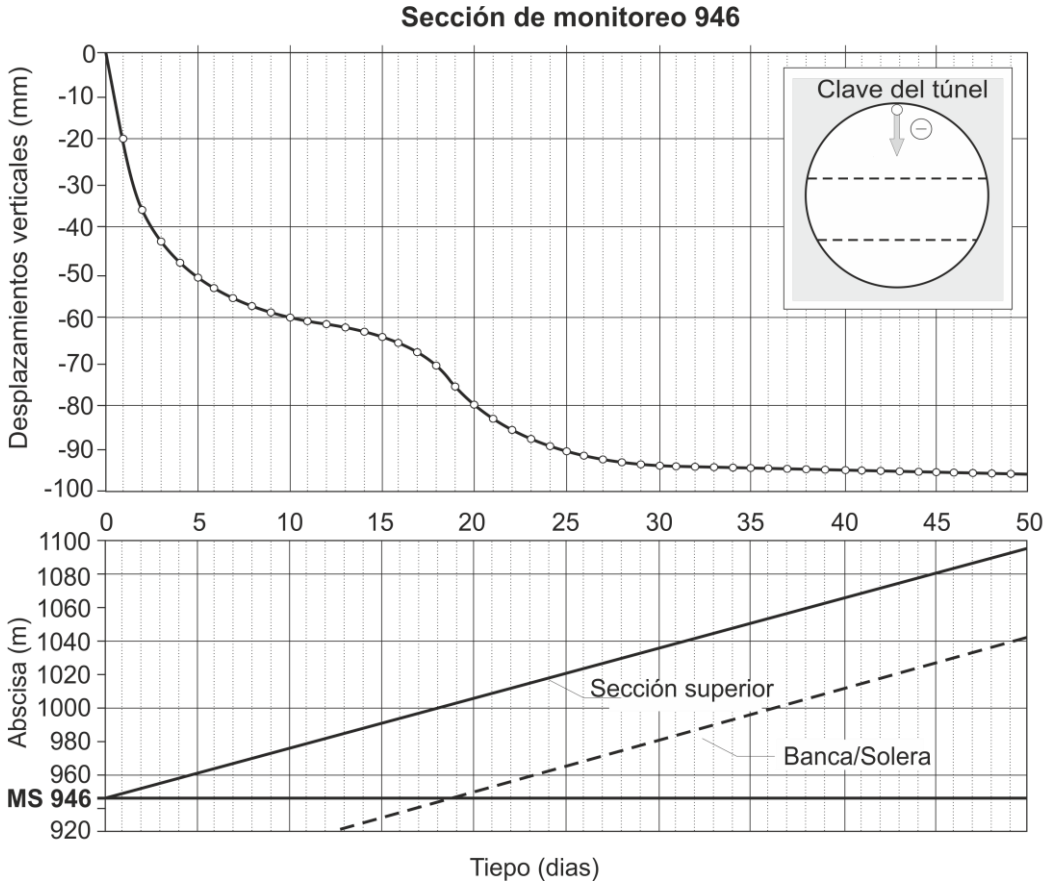


Ilustración 8-10. Diagrama tiempo-desplazamiento para la excavación de sección superior y banca (cortesía de OeGG)

8.7.2.3.4 Influencia de la instalación de medidas de soporte

Los cambios en la resistencia del soporte tienen una influencia apreciable en el comportamiento del sistema; en particular, el efecto del cierre del anillo (solera) afecta claramente las características de los desplazamientos. Como se aprecia en la Ilustración 8-11, el cierre del anillo muestra una disminución considerable en la tasa de desplazamientos, representada por un cambio en la pendiente de la curva de desplazamientos en el diagrama tiempo-desplazamiento [110, 121, 193, 194].

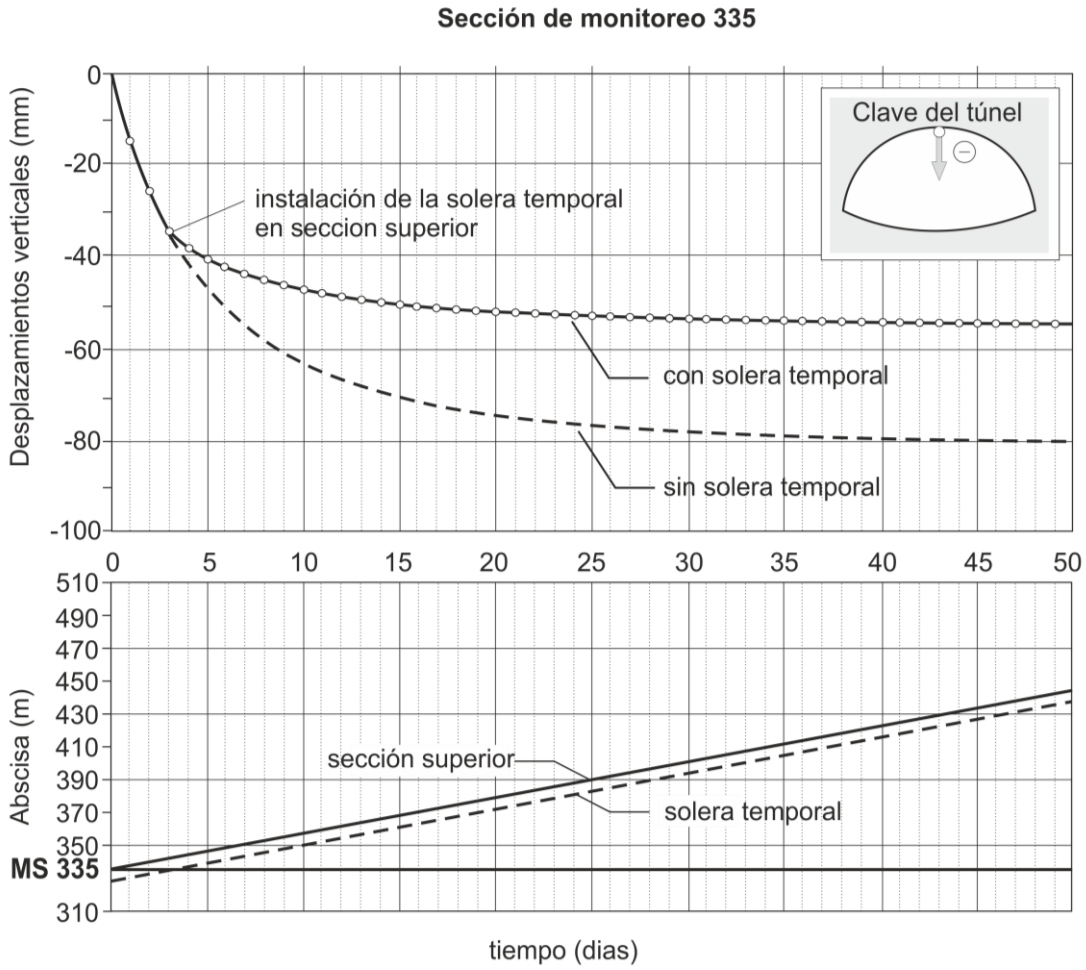


Ilustración 8-11. Influencia del cierre del anillo en el desarrollo de desplazamientos (cortesía de OeGG)

8.7.2.4 Vectores de desplazamiento

La representación gráfica de estos vectores se realiza en un plano perpendicular (sección transversal) y paralelo (sección longitudinal) al eje del túnel (Ilustración 8-12). Este tipo de representación gráfica es útil para mostrar la influencia de las estructuras

geológicas alrededor de la excavación, las cuales influyen de manera directa en las características del vector de desplazamientos [195 - 196].

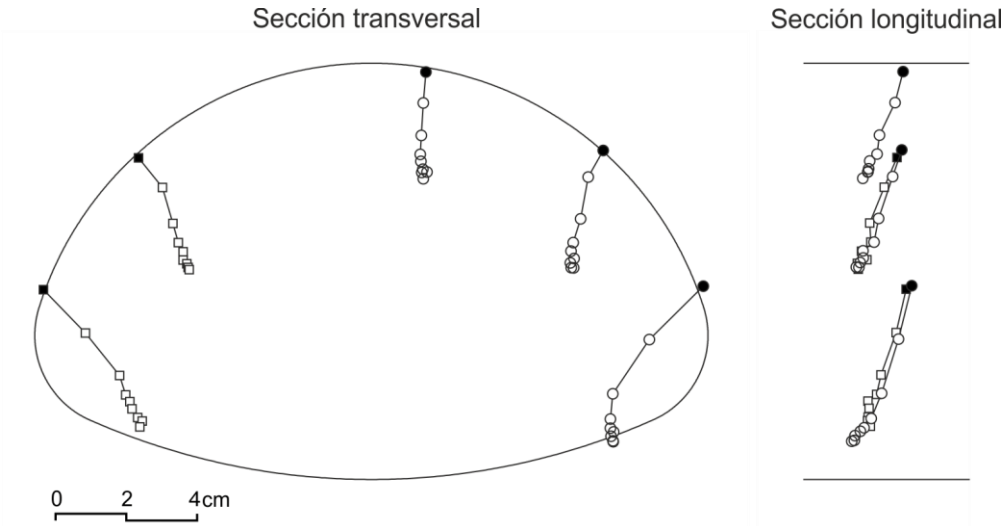


Ilustración 8-12. Vectores de desplazamientos de secciones transversal y longitudinal [201]

La Ilustración 8-13 muestra la influencia de una estructura geológica (lineamiento subparalelo al eje del túnel) en el vector de desplazamientos; en ella se observa que ocurre lo siguiente: a), la concentración de esfuerzos entre la estructura geológica y la excavación, que ocasiona un aumento en los desplazamientos en la pared lateral izquierda; b), la presencia de una estructura adicional en la parte derecha del túnel, que ocasiona un incremento de los desplazamientos en la pared lateral derecha; y c), la presencia de la estructura geológica en el centro de la excavación, que causa un aumento de los desplazamientos en la clave del túnel.

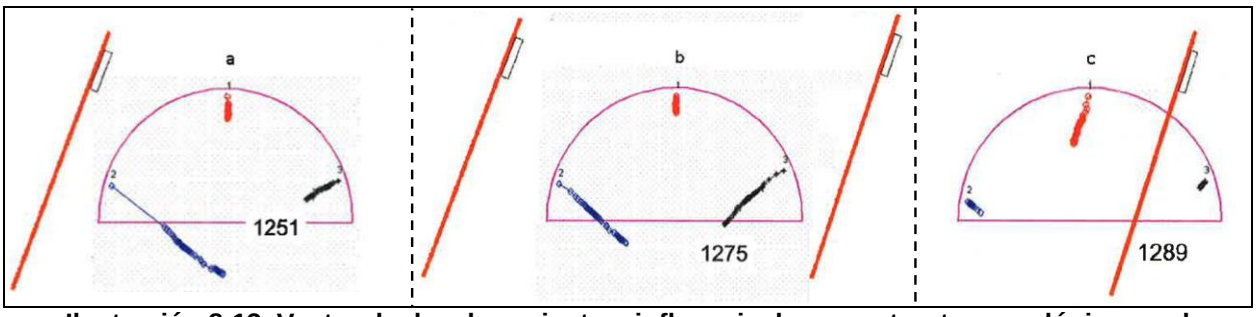


Ilustración 8-13. Vector de desplazamientos, influencia de una estructura geológica en el comportamiento [199]

8.7.2.5 Curvas de deflexión con líneas de tendencia

Las curvas de esta naturaleza se producen mediante la unión de los desplazamientos medidos en una línea de múltiples puntos de monitoreo a lo largo del eje del túnel en un determinado momento. Este tipo de gráficas permite una apropiada visualización general de los desplazamientos en un tramo determinado del túnel para componentes individuales de desplazamiento [200, 201].

Para eliminar la influencia de diferentes tiempos/distancias de la lectura cero con respecto a la posición del frente de excavación, se recomienda considerar los desplazamientos en el frente de excavación como cero; esto requiere estimar los desplazamientos entre la sección de monitoreo y el frente de excavación. La estimación se puede realizar mediante una interpolación por *splines* considerando el desarrollo de los desplazamientos en por lo menos tres secciones de monitoreo, o bien a través de métodos de predicción [194].

La Ilustración 8-14 presenta la influencia de cada avance de excavación en las secciones anteriormente excavadas y soportadas.

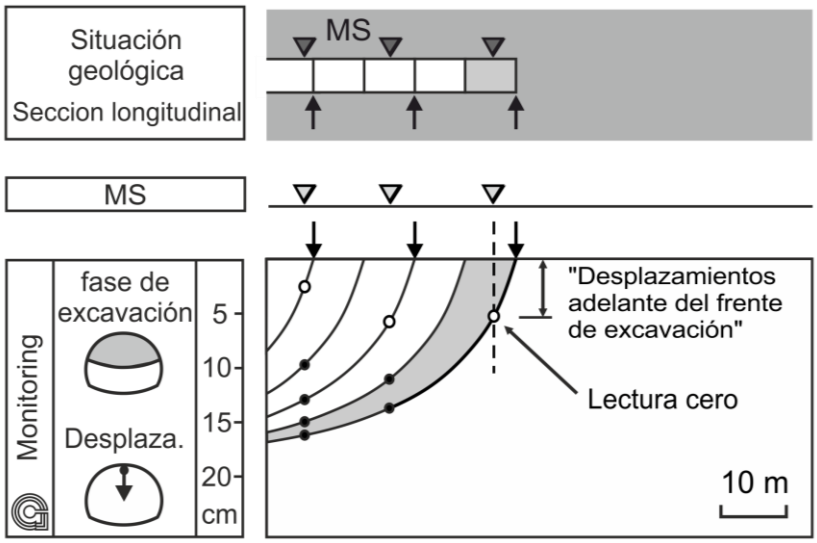


Ilustración 8-14. Diagrama de curvas de deflexión, clave del túnel [201, 202]

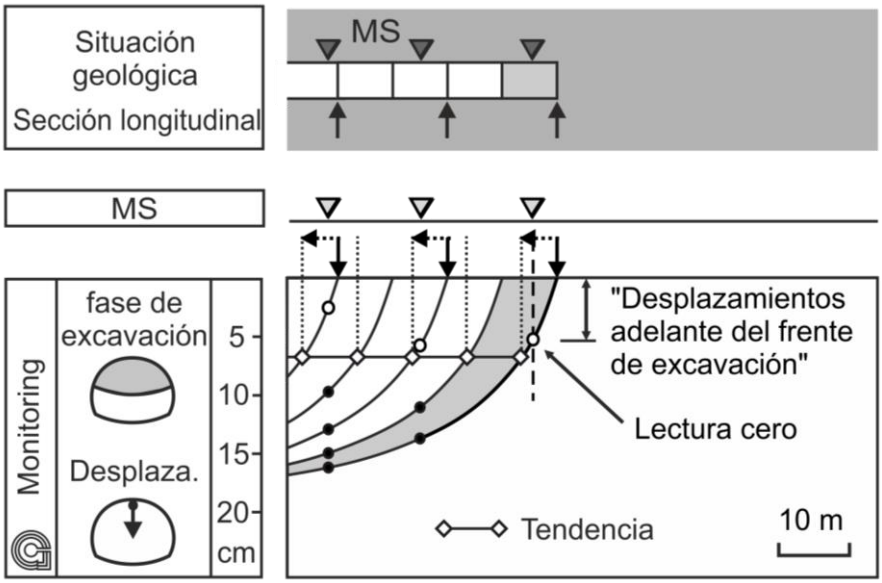


Ilustración 8-15. Diagrama de curvas de deflexión con líneas de tendencia [201, 202]

Generalmente, dentro de un mismo diagrama se combinan las curvas de deflexión con líneas de tendencia; estas últimas son la conexión de las diferentes curvas de deflexión para una distancia constante al frente de excavación. La tendencia es horizontal cuando la excavación tiene lugar en terrenos homogéneos a lo largo del tramo de observación (Ilustración 8-15).

La Ilustración 8-16 muestra la influencia de una zona de falla atravesando el eje del túnel de manera perpendicular. El aumento en la tasa de desplazamientos, inducido por la zona de falla, se evidencia a medida que la excavación se acerca a dicha zona.

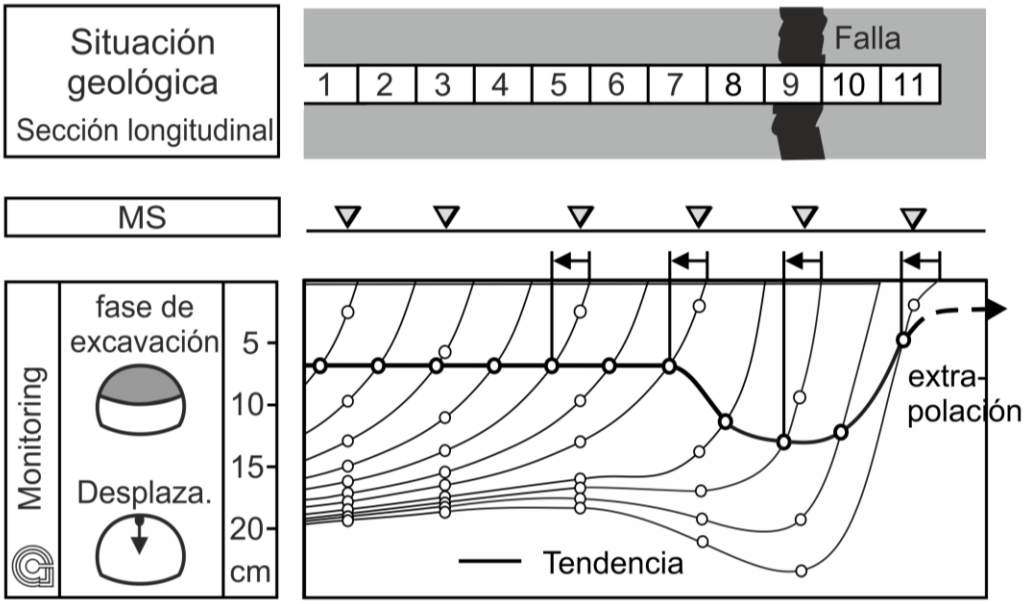


Ilustración 8-16. Diagrama de curvas de deflexión con líneas de tendencia, influencia de una zona de falla [202]

8.7.2.6 Evaluación de tasas de desplazamiento

La evaluación de tasa de desplazamientos, con su respectiva representación gráfica, es una herramienta útil para la detección de cambios en el comportamiento del sistema o alteraciones en las condiciones del terreno afuera del área de excavación.

8.7.2.6.1 Misma componente en múltiples puntos de monitoreo

Este método se recomienda cuando la diferencia absoluta de desplazamientos es relevante para el comportamiento del sistema. La comparación entre asentamientos superficiales y desplazamientos en la clave del túnel se presenta en la Ilustración 8-17, en ella se aprecia la manera como el bajo confinamiento en el terreno resulta en menores desplazamientos en la clave que en la superficie (asentamientos).

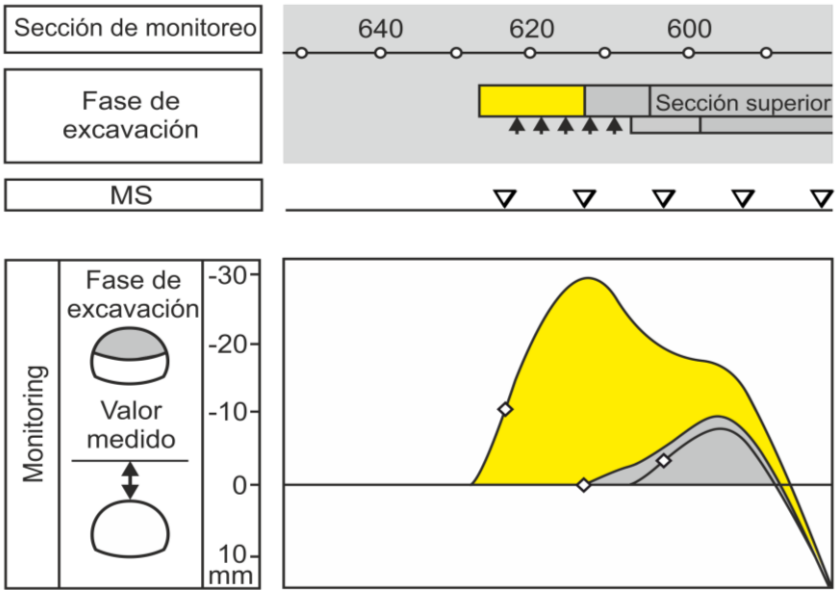


Ilustración 8-17. Evaluación de asentamientos superficiales y desplazamientos en la clave del túnel [201]

Los desplazamientos mayores en las paredes que en la clave del túnel son un indicativo de altos esfuerzos cortantes altos entre el terreno y el concreto neumático. El cambio de la tendencia de desplazamientos mostrado en la Ilustración 8-18 representa un efecto de arco a lo largo de una zona débil del terreno, que conlleva un aumento de cargas en el soporte para la zona donde este último (solera temporal) ya ha sido instalado; y en la zona donde no ha sido cerrado el anillo se registran altos desplazamientos en las paredes de la excavación.

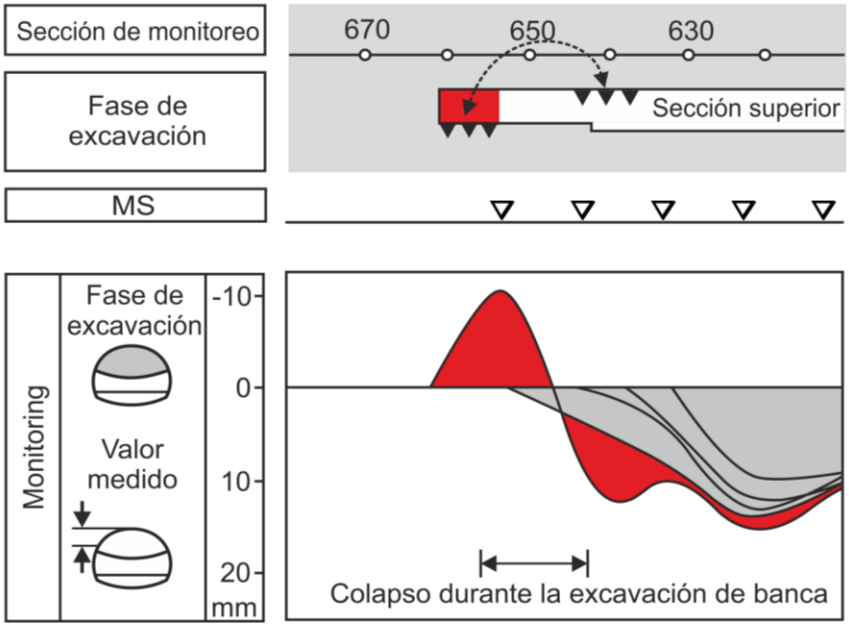


Ilustración 8-18. Desarrollo de desplazamientos en la clave y pared izquierda del túnel (modificado de [201])

Otra herramienta útil para la determinación del comportamiento del sistema es la utilización de componentes individuales en diferentes secciones de monitoreo. Generalmente, dependiendo de las condiciones de esfuerzos *in-situ*, los desplazamientos en la clave del túnel son superiores a los de sus paredes.

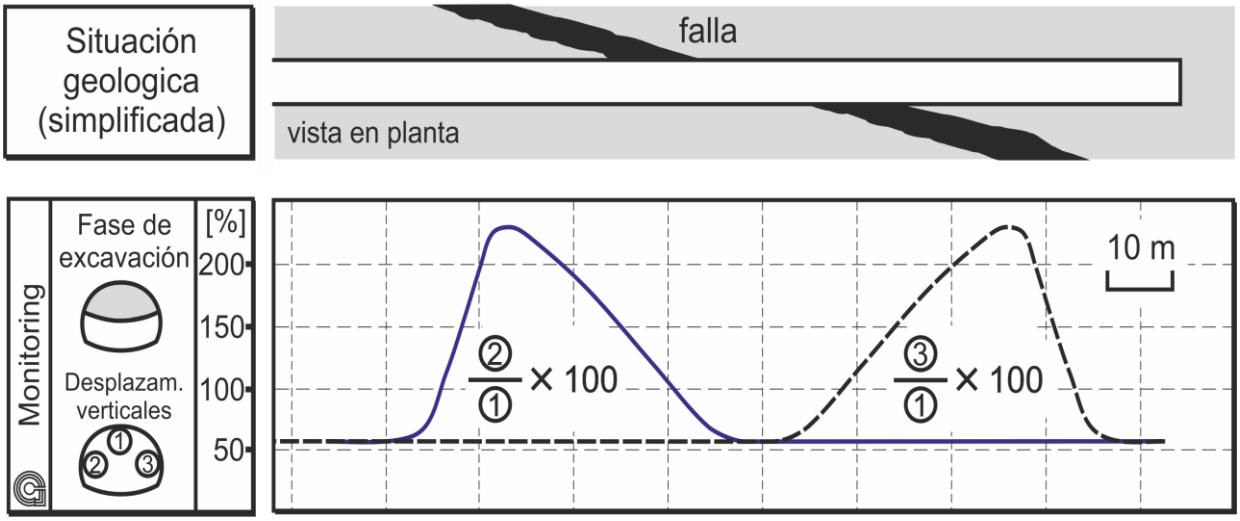


Ilustración 8-19. Líneas de tendencia con la tasa de desplazamiento clave-pared izquierda y clave-pared derecha del túnel [202]

La Ilustración 8-19 muestra la variación del comportamiento de los desplazamientos al cruzar una zona de falla que intercepta el túnel en ángulo agudo; se muestra en la gráfica la forma en que la tasa de desplazamientos clave-pared izquierda aumenta, incluso antes de llegar a la zona de falla.

8.7.2.6.2 Diferentes componentes en el mismo punto de monitoreo

La orientación del vector de desplazamientos “L/S” es la proporción entre los desplazamientos longitudinales (L) y verticales (S), y se expresa como la desviación angular con respecto a un plano vertical [203-205]. El vector de desplazamientos es considerado la herramienta más apropiada para determinar cambios relativos en el terreno adelante del frente de excavación.

La Ilustración 8-20 muestra el desarrollo del vector de desplazamientos al atravesar una zona de terreno “blando”. En la gráfica se puede observar que, en términos generales, el vector de desplazamientos se reorienta en la dirección de la excavación cuando las condiciones del terreno mejoran; adelante del frente de excavación, por el contrario, la reorientación del vector alejándose de la dirección de excavación representa un deterioro de las condiciones del terreno hacia adelante.

La correcta interpretación de resultados con base en el vector de desplazamientos depende de la definición del comportamiento normal del vector.

Esta definición se realiza durante la etapa de diseño (numeral 6.5.2.5) y puede ajustarse de acuerdo con las condiciones encontradas durante la construcción.

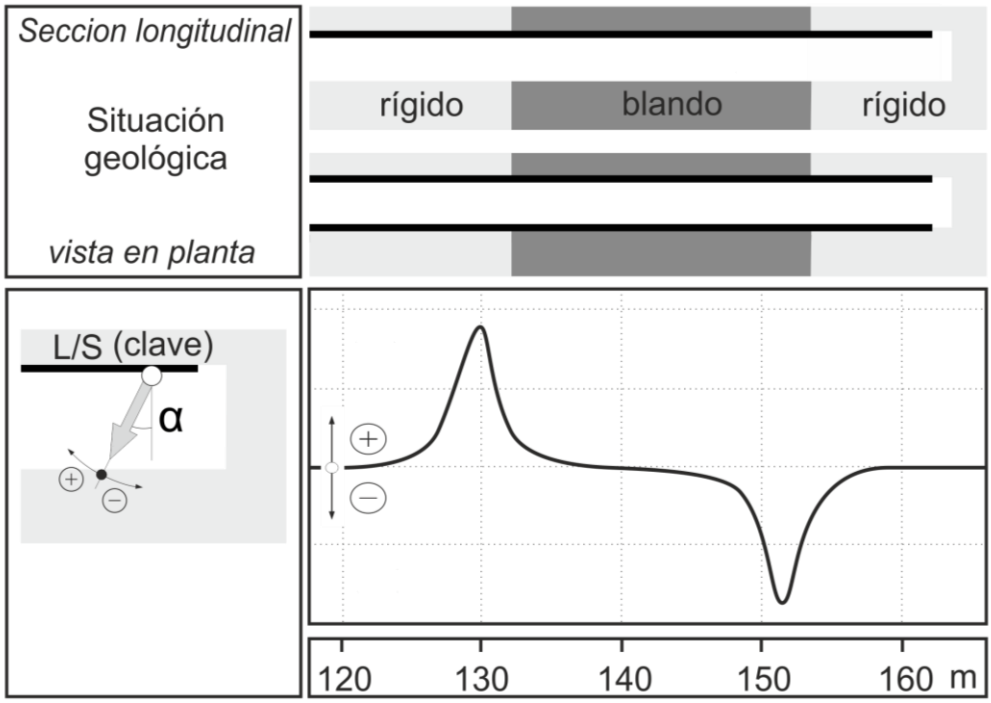


Ilustración 8-20. Ejemplo de la tendencia del vector de desplazamientos [197 - 198]

8.7.2.6.3 Diferentes componentes en el mismo punto de monitoreo

La determinación de la condiciones del terreno adelante del frente de excavación también es posible mediante la evaluación e interpretación de diferentes tendencias [206]. Dependiendo de orientación relativa de la transición con respecto al eje del túnel, se observa un cambio en las características de los desplazamientos para diferentes tendencias.

A manera de ejemplo, en la Ilustración 8-21 se pueden observar las diferentes tendencias y su comportamiento al atravesar una transición, incluyendo desplazamientos en la clave del túnel; orientación L/S del vector de desplazamientos; proporción entre los desplazamientos horizontales y verticales (H/S); y proporción de desplazamientos verticales para las paredes del túnel (SL/SR). En la Ilustración 8-21, se puede observar que, incluso antes de llegar la zona de transición, las tendencias muestran una clara variación.

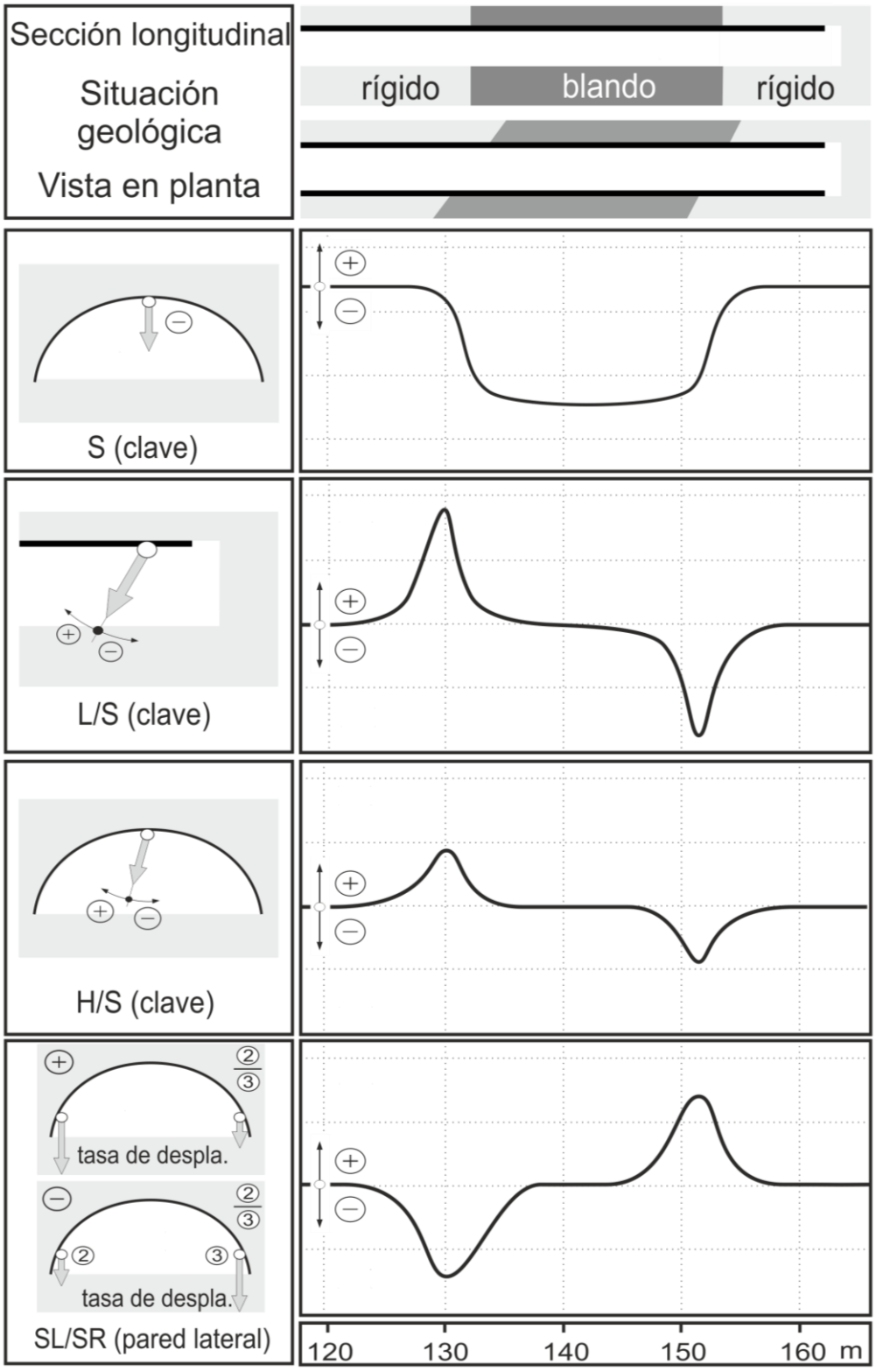


Ilustración 8-21. Líneas de tendencia típicas al atravesar una zona de falla [206]

8.7.2.7 Representación en estereogramas del vector de desplazamientos

La orientación espacial de todos los puntos en una sección de monitoreo puede ser presentada en una proyección estereográfica, en aras de facilitar el reconocimiento de

zonas con diferentes rigideces [202, 207]. La Ilustración 8-22 muestra la secuencia de vectores de desplazamiento para tres secciones de monitoreo (sección superior, cada una con 3 puntos de monitoreo) acercándose a una zona de mayor rigidez. En la primera sección se observa el comportamiento “normal” del vector, con una orientación opuesta a la dirección de la excavación, a medida que la excavación avanza; el punto más cercano a la transición muestra un cambio importante con respecto a su comportamiento “normal”, orientado en el mismo sentido de la excavación; y el punto de la clave del túnel muestra un comportamiento similar, pero de menor magnitud.

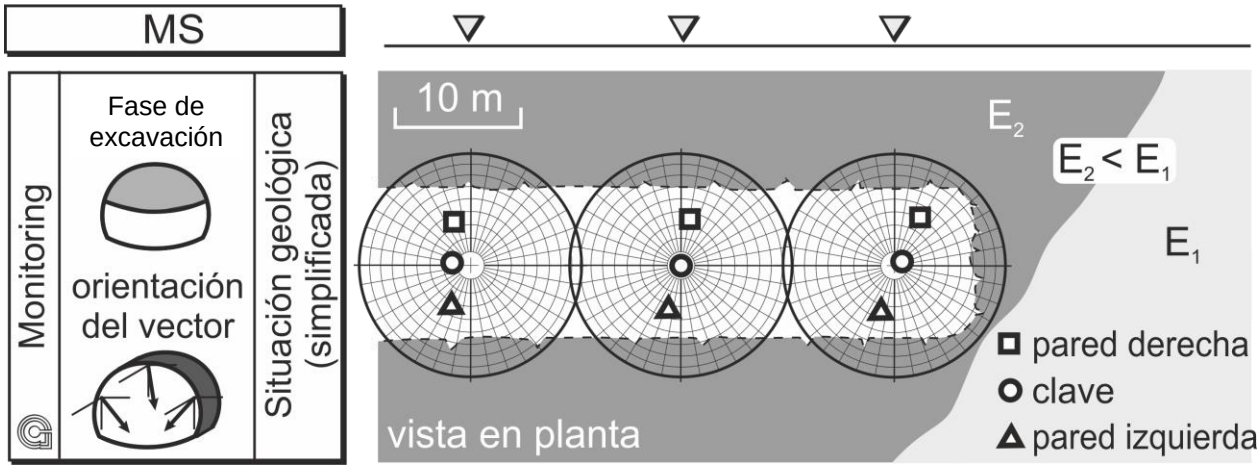


Ilustración 8-22. Representación estereográfica de vectores de desplazamiento (hemisferio inferior) [207]

8.7.2.8 Evaluación del grado de utilización del concreto neumático

El grado de utilización se refiere a la comparación entre la resistencia disponible del concreto neumático y las solicitaciones dadas por los esfuerzos inducidos por el entorno (terreno). El monitoreo de desplazamientos puede emplearse para evaluar las deformaciones de las capas de concreto neumático. Actualmente, este cálculo se realiza mediante los métodos de tasa de flujo (*flow rate method)* [208 - 209] o híbrido (*hybrid method*) [210 - 211]: el primero utiliza un conjunto de relaciones semiempíricas para describir el comportamiento reológico del concreto lanzado; mientras que el segundo hace uso de modelos constitutivos mecánico-químico-térmicos para la simulación del comportamiento del material. Los dos requieren de ensayos especiales (ensayo calorímetro, ensayo de compresión simple con determinación del módulo de elasticidad, ensayo adiabático y ensayos de fluencia y contracción, entre los más importantes). Las siguientes referencias son recomendadas para el cálculo de la utilización [215 - 216 - 218].

8.7.2.9 Relevancia de los métodos de evaluación de desplazamientos

En este numeral se han presentado múltiples métodos para la evaluación de desplazamientos absolutos; donde la Tabla **8-1** se presenta como una ayuda para determinar la relevancia de cada uno de ellos.

	Propósito de la evaluación					
	Proceso de estabilización	Predicción de desplazamientos	Redistribución longitudinal de esfuerzos	Detección de zonas débiles por fuera del área de excavación	Predicción de condiciones adelante del frente de excavación	Estimación de esfuerzos en el revestimiento
Diagrama tiempo-desplazamiento	■	■	—	□	—	■
Diagrama distancia-desplazamiento	■	■	—	□	—	■
Curvas de deflexión con líneas de tendencia	□	—	■	□	□	—
Tendencias	—	—	—	■	—	—
Vector de desplazamiento (sección transversal)	—	—	—	■	—	■
Vector de desplazamiento (sección longitudinal)	—	—	■	■	■	—
Orientación global del vector de desplazamiento	—	—	■	■	■	—
Grafica de utilización del concreto (neumático/hidráulico)	—	—	—	□	—	■
Grafica de asentamientos	□	—	□	□	□	—
■ Relevante □ Limitada — No aplica						

Tabla 8-1. Relevancia de diferentes métodos de evaluación de desplazamientos [219]

8.8 Recomendaciones para retiro de materiales de excavación

Una vez realizado el proceso de excavación y remoción de los fragmentos de material potencialmente inestables en el contorno de la excavación, es necesario proceder a realizar las actividades de desescombro o retiro de materiales de excavación de manera sostenible. En este sentido, la Tabla 8-2 muestra las principales características de los sistemas básicos convencionales de retiro de materiales de excavación en túneles (ver numeral 4.2).

Sistema		Resumen	Comentarios	Ambiente subterráneo
Acarreo por carreteable	Volqueta	Los escombros se cargan en una volqueta mediante cargadores de ruedas o similares.	Posible interrupción en las operaciones de cargue de escombros debido a actividades propias al interior del túnel.	Debido al empleo de motores de combustión interna, el túnel debe estar ventilado adecuadamente.
	Tipo contenedor	Dos o más contenedores se alojan al interior del túnel de forma tal, que puedan ser cargados para su transporte al patio de rezaga.	Los escombros permanecen temporalmente detrás del frente de excavación, con lo cual lo cual se eliminan los tiempos de trasbordo.	Debido al empleo de motores de combustión interna, el túnel debe estar ventilado adecuadamente.
Acarreo por vía férrea	Vagones escombreros	El escombro es cargado en vagones mediante un cargador para su posterior transporte al patio de rezaga.	Posibilidad de descarrilamiento en casos de mal manejo de la vía férrea	Debido al empleo de motores eléctricos mantiene el ambiente dentro del túnel permanece limpio.
Banda transportadora		Los escombros son transportados directa y continuamente al patio de rezaga.	Se requiere adicionalmente un marco e impulsor.	Debido al empleo de motores eléctricos, el ambiente dentro del túnel puede mantenerse limpio.

Tabla 8-2. Sistemas básicos de retiro de la rezaga en túneles

Es imperativo adoptar un *plan de retiro de materiales de excavación,* el cual debe contemplar entre los aspectos más importantes, el equipo a utilizar; las condiciones del terreno; el tamaño de la sección transversal del túnel; la longitud y pendiente del mismo; el método de excavación; el tipo y tamaño de los fragmentos; y la cantidad de material a retirar. Dicho plan deberá consignarse apropiadamente en la *Memoria técnica para construcción.*

Igualmente, será necesario considerar que durante las operaciones de cargue y retiro se definen las zonas de alto riesgo con una señalización adecuada, y se designa el personal autorizado para permanecer en dichas áreas (ver numeral 4.2). Desde el punto de vista del transporte de material de rezaga, es importante que al interior del túnel se establezcan reglas de tránsito. Los conductores, el personal que dirige el tránsito y todas las personas involucradas en dicha actividad deberán ser educados en seguridad del tránsito. Este y otros lineamientos para el transporte se incluirán en la *Memoria técnica para construcción*.

8.9 Recomendaciones para el revestimiento definitivo

A continuación, se presentan algunos aspectos que deben ser tenidos en cuenta desde el punto de vista constructivo, relacionados con el revestimiento definitivo en concreto hidráulico para los túneles de carretera en Colombia.

8.9.1 Formaletas

Las formaletas se refieren al juego de paneles de acero (formaleta de metal), estructura, grúa pórtico o de deslizamiento y sus accesorios. Las formaletas más empleadas para el revestimiento de túneles pueden ser de deslizamiento o ensambladas. La primera está fabricada de forma que puede viajar como una única unidad sobre una plataforma de desplazamiento; mientras que la segunda está diseñada de forma tal que la estructura y los paneles de acero son ensamblados y desmantelados cada vez que se funde el revestimiento.

Las formaletas tienen que proporcionar la resistencia y la seguridad adecuadas para absorber las cargas aplicadas durante la colocación del concreto hidráulico; este deberá quedar fundido de acuerdo las formas, líneas y dimensiones de los diseños, proporcionando calidad y brindando las condiciones necesarias para garantizar la facilidad y calidad de los trabajos.

La longitud de una formaleta deslizante o la luz de una sección de concreto se determinan considerando el cronograma de trabajo, la capacidad de producción de concreto y las curvas horizontales en el alineamiento del túnel. En general, se diseñan para longitudes de 9 a 12 m, a fin de evitar el agrietamiento causado por el fenómeno de retracción térmica.

Las formaletas deslizantes se diseñan como estructuras sólidas, de tal manera que brinden alta movilidad y durabilidad, y puedan soportar el desplazamiento, la instalación, la colocación y la inspección del concreto. Las formaletas ensambladas, por su parte, deben diseñarse con el objetivo de ser fáciles de armar y retirarse, sin que esto comprometa su solidez estructural.

En cuanto el posicionamiento y posterior deslizamiento sobre rieles de las formaletas, es preciso tener en cuenta que estas tendrán que posicionarse de manera precisa, de tal forma que, en la medida de lo posible, se garantice que no sufrirán deformaciones, reubicaciones o asentamientos durante el proceso de vaciado del concreto, y que no se presenten resaltes durante el deslizamiento.

Como complemento a lo anterior es importante tener en cuenta que, durante todo el proceso de revestimiento de túnel, las superficies de la formaleta tendrán que verificarse, prepararse y limpiarse de forma tal que se evite la adhesión del concreto a la misma, garantizando una adecuada calidad en el terminado de la superficie del revestimiento. Para esto, será imperativo revisar, limpiar y recubrir periódicamente dichas superficies, minimizando con ello la posible generación de efectos adversos tales como la rugosidad y la abrasión, y facilitando la apropiada remoción de las mismas.

Finalmente, se debe tener en cuenta que durante el proceso de revestimiento las formaletas solo se desencofrarán cuando el concreto sea lo suficientemente resistente para soportar su propio peso.

8.9.2 Construcción del revestimiento

El procedimiento general para la construcción del revestimiento en concreto hidráulico se determinará con base el método de excavación y soporte del túnel, con especial consideración al comportamiento del terreno, evaluado a partir de los registros de instrumentación geotécnica instalada.

8.9.3 Vaciado del concreto de revestimiento

Para el vaciado del concreto es necesario tener en cuenta que antes de colocarlo, el interior de las formaletas debe limpiarse con el fin de prevenir la contaminación del concreto con materiales extraños y su deterioro. De igual manera, se requerirá drenar el agua que quede en la formaleta por entrada de agua y charcos.

El concreto vaciado será vibrado de forma suficiente para prevenir la segregación del material y llenar todas las esquinas para evitar vacíos, sin pasar por alto que el concreto deberá ser vaciado a una velocidad apropiada para crear una superficie correcta; esto es, uniforme y simétrica de acuerdo con las líneas finales de la sección transversal proyectadas en todo el contorno del túnel.

8.9.4 Solera curva en concreto hidráulico

En caso de requerirse el vaciado de una solera curva en concreto hidráulico, será imperativo tener especial cuidado en realizar una adecuada limpieza de las juntas de construcción, las superficies de excavación y las superficies de concreto lanzado, antes del vaciado del concreto. El concreto vaciado en la solera curva debe ser vibrado de forma eficiente, poniendo especial atención a la geometría de la forma diseñada, para que así se logre la adecuada redistribución de esfuerzos al interior del túnel.

En general, se debe vaciar el concreto de forma secuencial, de tal manera que no se generen juntas frías; sin embargo, es necesario procurar durante todo el proceso constructivo, que el vaciado de la solera curva se realice en el momento y con el método apropiados, considerando siempre las condiciones del terreno, e comportamiento del mismo y la facilidad de colocación. En terrenos que tienden a hincharse, se vaciará el concreto de la solera curva tan cerca del frente de excavación como sea posible, de tal manera que se cierre completamente la sección transversal.

8.9.5 Refuerzo para el concreto de revestimiento

El refuerzo diseñado para el concreto de revestimiento y el concreto de solera curva deberá instalarse adecuadamente, de forma tal que no desgarre o fisure el sistema de

impermeabilización. De igual manera, será necesario tener en cuenta que el refuerzo posea un adecuado recubrimiento, y que no se deforme debido al peso propio del concreto vaciado.

9 Capítulo - OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

9.1 Glosario

Circuito cerrado de televisión (CCTV): sistema de cámaras de vigilancia conectadas a monitores de vídeo o televisores, acompañado de un sistema de almacenamiento de las imágenes capturadas por las cámaras.

Controlador lógico programable (PLC) (*Programmable Logic Controller*): computador utilizado para automatizar procesos electromecánicos.

Detección automática de incidentes (DAI): sistema que detecta la ocurrencia de actividades peligrosas o accidentes al interior del túnel.

Mantenimiento: conjunto de acciones que tienen como objetivo mantener un sistema o restaurarlo a un estado en el cual pueda cumplir la función para la que fue concebido.

Nivel de servicio: condiciones operativas del tránsito vehicular en relación con variables como la velocidad, tiempo de recorrido, libertad de maniobra, comodidad, deseos del usuario y seguridad vial.

Norma Técnica Colombiana (NTC): Normas de calidad para empresas y actividades profesionales emitidas por el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (Icontec), organismo de normalización de Colombia.

Retie: reglamento técnico de instalaciones eléctricas.

Sistema de iluminación: conjunto de dispositivos con la función de iluminar el túnel en forma eficiente y segura.

Sistema de incendios: conjunto de equipamientos diversos integrados en la estructura que ofrecen seguridad en caso de combustión.

Sistema de megafonía: conjunto de micrófonos, altavoces y otros aparatos que, debidamente coordinados, aumentan el volumen del sonido en un lugar de gran concurrencia.

Sistema de ventilación: en condiciones normales, garantiza una calidad suficiente del aire en el túnel, mediante la disolución de los contaminantes. En una situación de incendio, debe conseguir que el entorno sea lo más seguro posible para los usuarios y los servicios de rescate mediante el control apropiado del flujo de humo.

Supervisión, control y adquisición de datos (Scada) (*Supervisory Control and Data Acquisition*): plataforma de *software* que permite controlar y supervisar automáticamente procesos industriales a distancia a través de sensores y actuadores.

9.2 Generalidades y alcances

Todo túnel o grupos de túneles (a cargo de un mismo operador), debe tener un Manual de Operación y Mantenimiento, conforme se trata en el presente capítulo, basado en las mejores prácticas de autoprotección, sostenibilidad, movilidad y seguridad vial.

El manual de operación y mantenimiento es extensivo a todas las clasificaciones de los túneles de carretera; debe contener toda la información relacionada en las etapas de diseño, construcción y puesta en marcha o apertura para tránsito vehicular. El manual tiene los siguientes objetivos principales:

- Seguridad: garantizar el uso adecuado y organizado de la infraestructura, instalaciones, señalización y sistemas electromecánicos que permitan brindar protección a los usuarios, operadores, brigadas de emergencia y al personal encargado del mantenimiento.
- Operación: proporcionar niveles altos de servicio para los usuarios, basados en la conservación de las instalaciones, infraestructura, servicios y equipamiento.
- Relación costo – beneficio: garantizar que valor de la operación y mantenimiento permita alcanzar el menor costo de propiedad (*total cost of ownership*) por todo el ciclo de vida del túnel, sin afectar los niveles óptimos de servicio y la seguridad para sus usuarios, así como la sostenibilidad socioambiental del mismo.

El manual de operación y mantenimiento particular de cada túnel indicará los parámetros y estrategias a seguir por el operador —público o privado— para alcanzar los objetivos principales en este sentido. En ese documento se define el modelo general a tener en cuenta para que el operador establezca todos los procedimientos, directrices y reglamentación que garanticen una gestión integral y segura.

Foto 9-1. Portales de Túneles 5 y 6 vía Bogotá Villavicencio, Quetame Cundinamarca

El manual de operación del túnel deberá incluir en su contenido:

- Planes de actuación para emergencia e incidentes
- Manual de evacuación
- Manual de desvíos de tráfico
- Programa de actualización de manuales

Siempre que existan vías alternas al túnel (by pases), que buscan mantener la operación constante del corredor, estos deben contar con monitoreo permanente desde el CCO.

Este manual no es sustituto de la documentación, planos, cálculos de ingeniería, memorias de diseño y toda la información relacionada con la construcción del proyecto; por el contrario, toda esta información hace parte del insumo bibliográfico que permitirá construir de forma particular el manual para cada túnel.

El manual de operación y mantenimiento entregará los parámetros para determinar la administración de las situaciones de emergencia u otras actividades que suceden en su normal funcionamiento. Una vez definidos dichos parámetros, se podrán establecer los procedimientos de actuación, reglas y lineamientos para cada uno de los diferentes subsistemas del componente electromecánico y de las condiciones de infraestructura particulares de cada túnel.

Para establecer los procedimientos, se requiere que en el momento de la implementación se haga un análisis de riesgos que defina las reglas y lineamientos a seguir por los operadores, los programadores y por todo el personal que garantiza la seguridad y la administración de la infraestructura y del equipamiento.

Además, durante la operación debe tenerse en cuenta lo siguiente:

- Será imperativo reemplazar de inmediato todos los equipos y componentes defectuosos, en aras de garantizar el correcto funcionamiento y operación del túnel. Adicionalmente, deberá incluirse un registro físico con el reporte del tipo de falla, que indique la fecha y hora de la validación del daño en el equipo.
- Es obligatorio que en todos los sistemas que requieran de un mantenimiento correctivo, se realice una inspección general de su funcionamiento y de su operación integrada al centro de control.
- Los equipos que conforman los sistemas electromecánicos tendrán que ostentar un grado de resistencia al fuego adecuado, a fin de garantizar la seguridad dentro del túnel en el evento de un incendio.
- Se requiere desarrollar un cronograma de mantenimiento en el cual se indiquen las actividades a desarrollar, su duración y el recurso humano empleado para ejecutarlas (personal de mantenimiento).

- Deberá realizarse una inspección visual diaria del estado físico de los componentes periféricos de todos los sistemas electromecánicos, con el fin de determinar cuáles podrían requerir un mantenimiento correctivo o preventivo.
- El sistema de drenaje deberá tener un procedimiento de mantenimiento como una parte del sistema hidrosanitario diseñado para el túnel.

El Manual de operación y mantenimiento, debe incluir estrategias pedagógicas y demás medidas tendientes al cumplimiento, por parte de los usuarios de la vía, de la Resolución 3027 de 2010, por la cual se actualiza la codificación de las infracciones de tránsito, de conformidad con lo establecido en la Ley 1383 de 2010, se adopta el Manual de Infracciones y se dictan otras disposiciones, o la norma que la sustituya; así como las gestiones suficientes ante la autoridad de tránsito, para que se apliquen las sanciones a que haya lugar a los infractores.

9.3 Velocidad de operación y distancia entre vehículos

La velocidad de operación de los vehículos y la distancia de seguridad entre ellos son aspectos importantes a cumplir en los túneles y recibirán especial atención por parte de las autoridades. Así, se recomendará a los usuarios de los túneles la velocidad y distancia adecuadas y se emprenderán medidas pedagógicas, informativas, disuasivas y coercitivas según proceda , gestión que se debe iniciar desde la fase de diseño, para que sea implementada por el operador del túnel (manual de operación), de manera que se logre el estricto cumplimiento al presente numeral por parte de los usuarios de la vía, implementando los controles y correctivos del caso, apelando a las herramientas legales disponibles..

Desde el punto de vista de la operación, se restringe la velocidad máxima dentro del túnel a ochenta (80 km/h) ochenta kilómetros por hora en los túneles unidireccionales y a una velocidad máxima de sesenta (60 km/h) kilómetros por hora en los túneles bidireccionales, o a la velocidad de operación de la vía de acceso, en caso de que esta sea inferior. Es necesario que cualquier cambio en estos valores esté soportado por un análisis de riesgos, que tenga en cuenta las condiciones de seguridad al interior del túnel durante la operación normal.

No obstante, en los túneles bidireccionales donde no se permite el paso de sustancias peligrosas y el TPD sea ≤ a 1000 vehículos/carril la velocidad de operación podrá aumentarse a setenta (70 km/h) kilómetros por hora.

Para todos los casos, operación unidireccional o bidireccional deben mantener, respecto del vehículo que los precede, una distancia de seguridad entre vehículos de 50 m. Los túneles deben tener dispositivos de señalización iluminados que indiquen la separación de seguridad entre vehículos como puntos de referencia. Se deberá difundir entre los usuarios la disposición de esta señalización, considerada como fundamental para la seguridad en los túneles y deben recibir especial atención por parte del operador del corredor vial.

Cuando el tráfico se detiene al interior de un túnel, se requiere que los usuarios de la carretera se detengan conservando la mayor distancia posible respecto del vehículo que los precede y se orillen en el costado de su carril hasta el andén, de manera que faciliten el paso de los vehículos de emergencia por el centro y así permitan reducir y/o

mitigar la afectación ante un evento adverso, salvo que no sea posible debido a una parada de emergencia.

9.4 Documentación mínima de infraestructura

Con relación a la infraestructura se requiere que cada proyecto suministre la siguiente información, relacionada con su arquitectura, diseño, construcción y puesta en marcha.

9.4.1 Presentación del proyecto

Es necesario entregar una breve descripción que indique toda la información relacionada con el diseñador, ubicación del proyecto, concesionario, constructor y documentación relacionada con el mismo proyecto.

9.4.2 Descripción del proyecto

Esta es una descripción detallada del proyecto en la que se indican longitud, pendiente, condiciones ambientales, características de la excavación, características de los portales, condiciones de construcción de la obra civil y geométricas.

9.4.3 Instalaciones civiles y arquitectónicas

Es necesario acopiar la información relacionada con las instalaciones civiles y arquitectónicas, para garantizar la operación constante y adecuada de cada túnel; esta incluye lo siguiente:

- Evaluación de obras en concreto
- Evaluación de obras civiles
- Definición de posibles fallas superficiales
- Determinar tipo de deterioro
- Evaluación de obras en acero
- Definición de obras complementarias en diferentes materiales
- Andenes y cárcamos

9.4.4 Estudio de proyección del tráfico

Es preciso establecer un análisis de tráfico promedio diario anual (TPDA) en el cual se determinen las proyecciones del tránsito, separando los vehículos de carga y los automóviles en volumen y porcentaje, para identificar cuáles sistemas son susceptibles a cambios en su programación o estructura debido al incremento del mismo.

9.4.5 Evaluación y mantenimiento de instalaciones civiles y arquitectónicas

Se establece una periodicidad de 5 meses o inmediata cuando se presenten incidentes como movimientos telúricos, incendios, asonadas, actos vandálicos, inundaciones, deslizamientos de tierra u otros accidentes que puedan afectar la estabilidad de la infraestructura y poner en peligro la vida útil del túnel. Determinadas estas situaciones debe realizarse una inspección visual detallada, registrarla en formatos y fotografías, establecer la conclusión y evaluar las reparaciones y mantenimientos necesarios. Es necesario que esta información se consigne en un registro o tabla de chequeo que incluya, como mínimo, lo siguiente: ingeniero evaluador, nombre del proyecto; estructura; descripción; fecha; y evaluación de las instalaciones civiles y arquitectónicas.

Dentro de cada túnel existen estructuras en concreto andenes, cárcamos, salidas de emergencia, nichos de emergencia y galerías de acceso, entre otros cuyo mantenimiento e inspección son fundamentales para garantizar la seguridad, operación y estética de cada proyecto. Se requiere hacer dicho mantenimiento cada mes, o cuando se realice el cierre del túnel para otros mantenimientos. El procedimiento para el mantenimiento de andenes y cárcamos debe realizarse con horarios de restricción vehicular, para garantizar la seguridad de los operadores y usuarios, y evitar incidentes.

9.4.6 Instalaciones electromecánicas

Los sistemas electromecánicos están determinados por la clasificación particular de cada túnel e incluyen los siguientes elementos:

- Iluminación
- Ventilación mecánica
- Comunicación
- Control de tráfico
- Sistema para cierre del túnel
- Detección de incidentes
- Control de incendios
- Energía eléctrica
- Señalización
- Sistema de control del túnel

Para determinar el manual de operación y mantenimiento particular de cada túnel se requiere que el proveedor de los equipos electromecánicos anexe la siguiente información:

- Lista detallada de equipos de cada sistema
- Fabricante
- Proveedor e instalador
- Recomendaciones de operación
- Indicaciones de periodicidad de mantenimiento

- Lista de herramienta necesaria para el desarrollo del mantenimiento preventivo y correctivo
- Lista de repuestos para un año de operación
- Recurso humano
- Lista de elementos con el PK del sitio de instalación
- Fichas técnicas
- Manual técnico de cada equipo y sistema
- Actuaciones en caso de fallas y generación de reportes

9.5 Operación y mantenimiento de sistemas

Como parte fundamental de la operación y mantenimiento, cada túnel o conjunto de túneles, deberá tener la siguiente documentación previa a la puesta en servicio para los usuarios:

- Modelación de Índice de Riesgos y las medidas compensatorias.
- Marco general de operación y mantenimiento.
- Plan de operación de túneles.
- Plan de emergencias y contingencias.
- Plan detallado del mantenimiento.
- Plan de implantación y seguimiento.
- Plan de simulacros
- Protocolos
- Registro de Actuaciones
- Registro de Incidentes
- Marco Legal Contractual
- Documento de Mejores Practicas
- Capacitación y contenido formativo.
- Actuaciones con verificación sobre vehículos con mercancías peligrosas para los corredores viales que no tienen restricción del tránsito de estos vehículos.

Foto 9-2. Construcción y adecuación centro de control, Túnel de La Línea

9.5.1 Sistema de control de iluminación

9.5.1.1 Operación

Por medio de una adquisición de datos, el sistema de control de iluminación supervisa y controla la operación de la iluminación para ejercer funciones de encendido y apagado, incluido el ajuste de la intensidad lumínica para adecuar los niveles de iluminación de manera dinámica en el ingreso a los portales, zonas de acceso, zona de umbral, zona de transición, zona interior y zona de salida del túnel, en aras de garantizar una adecuada visibilidad en todo el recorrido.

Las medidas de luminancia se establecen de acuerdo con los niveles exteriores que se tienen al ingreso y a la salida del túnel, por medio de luminancímetros que entregan información para el ajuste de las zonas interiores del recorrido. Como la variación de la luminancia exterior se produce de una manera continua, la manera más adecuada de ajustarse a ésta será la implementación en el interior del túnel de un número óptimo de niveles de luminancia. De esta manera el confort de los conductores crecerá, la seguridad aumentará y el ahorro de energía será maximizado. Los sistemas de control de iluminación de túneles deberán permitir la implementación, operación, actualización y mantenimiento de un número óptimo de niveles de luminancia interior, determinado según un estudio estadístico de la variación de luminancia exterior en las coordenadas geográficas de los portales. Para determinar el número óptimo de niveles de luminancia interior, se utilizarán también los parámetros de densidad y velocidad de tránsito y de calzada mojada o seca. En el interior del recorrido se deberán ubicar los sensores necesarios tal como lo prescribe Retilap [143].

Será obligatorio tener cuantificada la cantidad de luminarias para los estados permanente, seguridad y evacuación.

9.5.1.2 Mantenimiento

Los sistemas de iluminación requieren una inspección y verificación general constante para garantizar que no existan deterioros prematuros, ni se presenten daños vandálicos o en el cableado de interconexión de energía y control. Esta labor se puede asegurar, en su mayor parte, por los sistemas de control inteligente que monitorean de forma individual el estado de las luminarias y del sistema de iluminación, y generan alarmas pertinentes cuando se presentan anomalías, gracias a una comunicación de señales de control y monitoreo bidireccional para cada luminaria de manera individual.

Adicionalmente, se deberá verificar el nivel de suciedad y pérdida de flujo luminoso. Para ello se utilizarán luminancímetros o iluminancímetros distribuidos en las diferentes zonas del túnel, que permitirán medir la luminancia o el flujo luminoso e informar al sistema de control de iluminación para adecuar el flujo luminoso de las fuentes de luz; mantener los niveles de luminancia exigidos por Retilap [143]; y compensar dinámicamente los efectos de la suciedad y degradación.

Se requiere implementar un programa de mantenimiento que garantice la limpieza de las paredes y de las luminarias, cuya duración no podrá exceder seis (6) meses. El personal de mantenimiento preventivo se encargará de esa labor y la ejecutará cuando se realice el cierre del túnel para otros mantenimientos.

La reposición de las luminarias se realizará de forma inmediata cuando el nivel de luminancia esté por debajo del establecido en el estudio del diseño, o cuando la falta de iluminación uniforme no sea tolerable.

9.5.2 Ventilación mecánica

9.5.2.1 Operación

La operación del sistema de ventilación se clasifica en tres modos diferentes: automática, manual y en caso de incendio.

El modo de operación automática se utiliza la mayor parte del tiempo; ejecuta acciones encaminadas al control de CO, NOx (cuando aplique) y partículas contaminantes. Esta función es desempeñada por los ventiladores en conjunto con sus respectivos variadores de velocidad, y de acuerdo con los parámetros entregados por los periféricos —anemómetros y medidores de CO, NOx (cuando aplique) y visibilidad—. Todas estas variables están supervisadas y controladas por un sistema centralizado, el cual gestiona todos los algoritmos necesarios para una operación segura. En este modo de operación el sistema de ventilación depende de la autonomía del sistema de control y sus respectivos algoritmos.

Es recomendable que el modo de operación automática permanezca activa la mayor cantidad de tiempo posible, ya que de esta forma se favorece el uso racional de energía, se gestiona adecuadamente los ventiladores según sus horas de operación y, finalmente, se asegura la cantidad necesaria de aire fresco que debe ingresar al túnel para diluir los contaminantes.

El modo de operación manual se utiliza cuando el operador necesita desligar los ventiladores de una secuencia de operación normal, para poder hacer una actuación particular generada por unos parámetros de concentración que estén fuera de lo normal y que se determinen por análisis visual. Adicionalmente, la operación manual se utiliza en el evento de un incendio o presencia de fuego, cuando la movilidad se reduce a cero.

El modo de operación en caso de incendio, por su parte, utiliza la programación establecida por zonas, determinada por el sistema de detección y alarma de incendio. Las variables ejercen un control sobre el sistema de ventilación, según el procedimiento y las reglas de los algoritmos, para que los ventiladores actúen de acuerdo con las indicaciones recibidas del sistema de detección y alarma de incendio.

9.5.2.2 Mantenimiento

Se requiere que el mantenimiento del sistema de ventilación mecánica atienda los siguientes lineamientos para garantizar una operación segura y eficiente para el control del CO, NOx (cuando aplique), visibilidad, otros gases contaminantes y la eventualidad de un incendio.

- El mantenimiento preventivo de los ventiladores se debe realizar cada tres (3) meses, como mínimo, e incluirá: revisión general del estado del ventilador; verificación de la vibración y balanceo del ventilador; recomendación del ajuste dentro de la operación; y programación. Será necesario dejar uno o dos grupos de ventiladores en funcionamiento semanalmente por cinco minutos, con el fin de que no se produzcan atascamientos o malos funcionamientos mecánicos.
- Es preciso realizar pruebas mensuales a los sensores de CO, NOx (cuando aplique), visibilidad, caudal de aire (anemómetros), chequeo de variables y rotación, y ajuste mecánico.
- Debe tenerse un motor de repuesto para los ventiladores, en caso de falla.
- Es necesario hacer pruebas en los tres modos de operación cada tres meses para validar el correcto funcionamiento del sistema.

9.5.3 Comunicación

9.5.3.1 Operación

El sistema de comunicación permite anunciar la existencia de una emergencia en el interior del túnel, e indicar los procedimientos a seguir ante las diferentes situaciones. Adicionalmente, permite establecer una comunicación entre los usuarios y el cuarto de control. Con base en la clasificación establecida para cada túnel, se podrán tener los siguientes sistemas:

- Teléfonos de emergencia: permiten generar una llamada bidireccional por un usuario al centro de control.
- Sistemas de radiocomunicación: permiten establecer un enlace entre el centro de control y operadores de mantenimiento, funcionarios, brigadas de emergencia, policía y fuerzas militares. Está comunicación es bidireccional y puede emplearse

para enviar mensajes a los usuarios por medio del sistema de megafonía, ante un incidente o una emergencia.

- Emisora: este sistema tiene como finalidad enviar información relacionada con el estado del túnel a los usuarios por medio de las estaciones FM comerciales y VHF interno, por medio del cable que tiene un recorrido longitudinal respecto al túnel.
- Megafonía: este sistema tiene como objeto enviar mensajes a los usuarios ante un incidente o emergencia. Los mensajes se envían desde el centro de control y pueden ser generados por el operador, o por la ejecución programada de mensajes pregrabados existentes en el sistema.
- Estaciones meteorológicas: este sistema tiene como objeto informar al centro de control sobre las condiciones ambientales existentes en el exterior del túnel, vitales para el manejo seguro de los vehículos al salir del mismo. El sistema reporta condiciones del viento, lluvia, visibilidad, temperatura y humedad relativa. Está información es transmitida por el sistema de radio y por las pantallas de mensajes variables.

9.5.3.2 Mantenimiento

El mantenimiento para los sistemas de comunicaciones se establece en adelante:

- **Teléfonos de emergencia.** Se requiere supervisar el estado de los teléfonos, así como verificar la calidad del audio y la conectividad en la red. El mantenimiento debe ser trimestral e incluir las siguientes actividades:
  - Realizar una llamada desde el teléfono al centro de control.
  - Realizar una llamada desde el centro de control al teléfono.
  - Validar la calidad de la acústica de la conversación.
  - Realizar una verificación física, si los teléfonos presentan golpes o daños.
  - Validar la conectividad.
  - Verificar el estado de las alarmas.
  - Realizar una limpieza interior y exterior.
- **Sistema de radio.** Es necesario ejecutar un mantenimiento trimestral que incluya las siguientes actividades:
  - Verificación física de la central y de los radios portátiles
  - Verificación de la carga de las baterías y de la capacidad de almacenamiento
- **Sistema de emisora.** Debe realizarse un mantenimiento trimestral que incluya las siguientes actividades:
  - Verificación de la calidad del sonido en FM
  - Verificación física del cable transmisor
  - Verificación del funcionamiento en general
  - Verificación del estado de las alarmas

- **Megafonía.** Es preciso adelantar un mantenimiento semestral que incluya las siguientes actividades:
  - Verificación física de los parlantes, amplificadores y de la central de control
  - Verificación de la impedancia de salida de cada línea
  - Comprobación del funcionamiento de la potencia de los amplificadores
  - Activación de cada zona por separado
  - Limpieza del interior y exterior de los altavoces o parlantes
- *Estaciones meteorológicas.* Debe realizarse un mantenimiento trimestral que incluya lo siguiente:
  - Verificación de los datos de los sensores
  - Verificación del ajuste mecánico de los contactos
  - Verificación de las fuentes de energía de los sensores
  - Limpieza general de gabinetes, mástiles, sensores y conexiones
  - Verificación física visual del estado de los diferentes componentes

9.5.4 Control de tráfico

9.5.4.1 Operación

Los subsistemas relacionados con el control de tráfico que incorporen los túneles estarán configurados con los siguientes componentes:

- CCTV: este sistema brindará imágenes en tiempo real del comportamiento general de cada túnel, permitirá detectar incidentes de forma temprana y alertará al operador para tomar decisiones. El CCTV permite mejorar los tiempos de respuesta en la toma de decisiones, almacenar todos los eventos, y hacer un despliegue de imágenes con analítica de video. El sistema opera de forma ininterrumpida.
- Centro de control: es el espacio físico donde se visualizan, supervisan, controlan y almacenan las acciones sobre todos los subsistemas electromecánicos existentes en cada túnel. El sistema centralizado permite la conectividad de todas las variables digitales, para determinar las reglas y parámetros que rigen la operación general de los diferentes subsistemas.
- Siempre que existan vías alternas al túnel (by pases), que buscan mantener la operación constante del corredor, estos deben contar con monitoreo permanente desde el Centro de Control CCO, con todos los subsistemas disponibles.
- Sistema para detección de vehículos dentro del túnel: contabiliza el número de vehículos de entrada y salida del túnel. Este sistema tiene como finalidad la toma de datos, con la mayor fidelidad y flexibilidad, del número de vehículos que transitan por cada túnel de acuerdo con su clasificación, determinando el flujo vehicular y el porcentaje de automóviles y vehículos de carga que circulan por el mismo.
- Red de conectividad: tiene su objeto es permitir la transmisión de los servicios de voz, datos y video en una sola plataforma, la cual debe ser de fibra óptica para evitar interferencias electromagnéticas, degradación de la señal y descargas eléctricas. La red de conectividad se compone, a su vez, de las redes pasiva

(fibra óptica y cableado) y activa (equipos de comunicaciones, *switches*, transmisores y receptores).

- PLC y Scada: el sistema de controladoras PLC deberá permitir supervisar y controlar todas las diferentes variables digitales existentes en los diferentes equipos electromecánicos, así como integrar diferentes tipos de lenguaje —Modbus, Bacnet y LonWorks— y otros integrados al sistema Scada. Este último es un conjunto de aplicaciones y procesos ejecutados para cumplir funciones de acuerdo con las diferentes variables que se integran a través de los PLC (video, detección de incendio), directamente o por medio de la red de conectividad.

El sistema reporta datos de estado, alarmas, flujo vehicular e imágenes en tiempo real para ejercer control de la actuación de ventiladores, señalización, iluminación, barreras, y otros procedimientos (automáticos o manuales) que garantizan una operación segura para los usuarios. Toda la programación, así como el despliegue del estado de todas las diferentes variables —incluidas las imágenes de video—, se visualizan de forma gráfica como una interfaz de usuario para el operador del centro de control. Como mínimo, se requiere mostrar en detalle los siguientes planes de programación de los PLC y Scada:

- Planes de control de variables
- Planes de control de señalización
- Planes de operación normal, falla, prealarma, alarma y evacuación

Sistema de control gálibo: determina la altura de los vehículos que se aproximan al túnel. En los túneles que tengan centro de control, informará al sistema de señalización si el tamaño de un vehículo tamaño excede las dimensiones arquitectónicas del túnel.

Foto 9-3. Construcción y adecuación centro de control, Túnel de La Línea

9.5.4.2 Mantenimiento

Será imperativo realizar las siguientes actividades de mantenimiento en los subsistemas relacionados con el control de tráfico:

- **CCTV.** Se requiere realizar diariamente la verificación de las cámaras y su conectividad. Esta actividad se desarrolla desde el centro de control. Adicionalmente, debe realizarse un mantenimiento semestral que incluya las siguientes actividades:
  - Verificar la emisión de la señal desde los equipos transmisores de fibra óptica al centro de control.
  - Realizar la limpieza de las carcasas de las cámaras con el material apropiado.
  - Verificar la calidad de las imágenes en el centro de control.
  - Ajustar contactores y borneras.
  - Verificar el funcionamiento de la analítica de video.
  - Hacer ajuste mecánico.
- **Centro de control.** Se debe realizar un mantenimiento trimestral que incluya las siguientes actividades:
  - Limpieza de monitores y computadores.
  - Limpieza de servidores.
  - Limpieza de ventiladores.
  - Limpieza de impresoras.
  - Verificación de monitores de despliegue.
  - Copia de seguridad del servidor o servidores.
  - Verificación de alarmas históricas.
  - Verificación de fallas.
  - Verificación de operación de los sistemas integrados.
- **Sistema para detección de vehículos dentro del túnel – aforadores.** Es necesario realizar un mantenimiento trimestral que incluya las siguientes actividades:
  - Verificar las cámaras de conteo vehicular y su conectividad.
  - Verificar la emisión de la señal desde los equipos transmisores de fibra óptica al centro de control.
  - Realizar la limpieza de la carcasa de las cámaras con el material apropiado.
  - Verificar la calidad de las imágenes en el centro de control.
  - Ajustar contactores y borneras.
  - Verificar el funcionamiento de la analítica de video para clasificación de vehículos.
  - Hacer ajuste mecánico.
- **Red de conectividad.** Se requiere verificar la transmisión y recepción de los puntos de datos, voz y video a diario. Esta actividad debe desarrollarse desde el centro de control. Adicionalmente, se debe realizar un mantenimiento semestral que incluya las siguientes actividades:
  - Verificar la emisión de la señal desde los equipos transmisores de fibra óptica al centro de control.

- Realizar la limpieza de todos los *switches*, transmisores y receptores.
- Ajustar contactores y borneras.

- **PLC y Scada.** Se debe realizar un mantenimiento trimestral que incluya las siguientes actividades:
  - Revisión de los transmisores y receptores de fibra óptica
  - Revisión de las fuentes de alimentación y conectores
  - Limpieza de transmisores, receptores y fuentes con productos indicados por el fabricante
  - Verificación de los niveles de señales en el cuarto de control
  - Verificación del funcionamiento de la programación y de las alarmas
  - Ajuste físico de todos los contactos
  - Copia de seguridad de la programación del sistema Scada, servidor y de todos los eventos a la fecha
- **Sistema de control gálibo.** Es necesario realizar un mantenimiento semestral que incluya las siguientes actividades:
  - Limpieza general de todos los paneles y conexiones
  - Verificación de las alarmas de gálibo electrónico y mecánico
  - Ajuste de todos los contactos
  - Verificación de todos los cables
  - Verificación de la conectividad

9.5.5 Sistema para cierre del túnel

9.5.5.1 Operación

Este sistema tiene como finalidad indicar el estado de apertura y de operación del túnel, por medio de los semáforos exteriores y de la habilitación interna de los respectivos carriles del tránsito vehicular. Las barreras de control, a su turno, permiten el ingreso o el cierre del túnel por situaciones de incidentes internos, o por vehículos cuyo tamaño sobrepasa las dimensiones arquitectónicas del túnel. Estos dispositivos son controlados por el sistema central y supervisados desde el centro de control.

9.5.5.2 Mantenimiento

Se requiere adelantar las siguientes actividades de mantenimiento en los subsistemas relacionados con el cierre del túnel:

- Barreras exteriores. Se debe realizar un mantenimiento semestral que incluya las siguientes actividades:
  - Verificación de la conectividad de la barrera al PLC de control.
  - Verificación del funcionamiento de la barrera para apertura y cierre
  - Verificación del funcionamiento desde el cuarto de control.

  - Validación física del estado de la barrera y de su equipo de control.
  - Ajuste general de todo el sistema.
- Semáforos exteriores e interiores. Se requiere llevar a cabo un mantenimiento trimestral que incluya las siguientes actividades:
  - Verificación del funcionamiento del sistema óptico de ledes
  - Verificación desde el centro de control de los cambios de señalización y del monitoreo de las alarmas y el estado de conectividad
  - Limpieza general
  - Verificación física y ajuste de los soportes de sujeción de la carcasa
  - Verificación del estado de conectividad de todos los cables, incluido el conexionado al PLC.

9.5.6 Detección de incidentes

9.5.6.1 Operación

Este sistema envía información al centro de control para que los operadores la analicen y se tomen decisiones sobre las situaciones presentadas.

En los túneles que incorporen los subsistemas relacionados con la detección de incidentes, deberá tenerse la siguiente configuración mínima para cada uno de ellos:

- DAI: realiza labores de conteo de vehículos, velocidad del tráfico, índice de ocupación y clasificación. Adicionalmente, permite almacenar en formato digital las imágenes enviadas por las cámaras, así como hace posibles la correlación de alarmas con las imágenes de video y el filtro de imágenes por incidentes. Está compuesto por cámaras, módulos de procesamiento de imágenes, *software* de análisis de video y servidor de gestión.
- Detección de incendios: está compuesto por dos subsistemas que permiten realizar la detección temprana de incendios o de humo a lo largo del túnel, o en las áreas internas correspondientes a los cuartos técnicos.
  - Detección lineal de incendios: este sistema estará conformado por un cable especial o por fibra óptica que permita determinar la posición del fuego a una distancia de precisión inferior a 10 m. Este cable deberá estar zonificado cada 100 m máximo, para enviar señales de supervisión al centro de control. Este sistema no podrá tener partes electromecánicas.
  - Detección de incendios en cuartos técnicos: dicho sistema estará conformado por sensores de humo y detectores térmicos que reportarán al sistema central las alarmas provenientes de estos dispositivos ante una eventualidad de humo o de elevación de temperatura. Este sistema tiene dispositivos de alarmas manuales y procedimientos para alarmas automáticas.
- Alarma manual: los pulsadores de esta alarma permiten activar de forma voluntaria y transmitir una señal de indicación de incendio puntual a lo largo del túnel. Estos dispositivos están interconectados al sistema de detección de incendio central y al centro de control.
- Alarma automática: las sirenas con luces estroboscópicas tienen como finalidad alertar a los usuarios de la existencia de un incendio o de humo detectado por los dispositivos automáticos lineales y los sensores puntuales de humo o térmicos.

Estos dispositivos estarán interconectados al sistema de detección de incendio central y al centro de control.

9.5.6.2 Mantenimiento

En los túneles que incorporen los subsistemas relacionados con la detección de incidentes será necesario adelantar las siguientes actividades de mantenimiento:

- **DAI.** Debe realizarse un mantenimiento semestral que incluya las siguientes actividades:
  - Verificación de las cámaras y su conectividad
  - Verificación de la emisión de la señal desde los equipos transmisores de fibra óptica al centro de control
  - Limpieza de la carcasa de las cámaras con el material apropiado
  - Verificación de la calidad de las imágenes en el centro de control
  - Ajuste de contactores y borneras
  - Verificar el funcionamiento de la analítica de video
  - Verificación del estado de los módulos de procesamiento de imágenes
  - Copia de seguridad del servidor
- **Detección de incendios.** Es necesario realizar un mantenimiento trimestral que incluya las siguientes actividades:
  - Inspección física de toda la instalación.
  - Verificación de fallas en el panel y en el centro de control.
  - Limpieza general del panel de control y de los dispositivos periféricos.
  - Verificación del estado de las baterías.
  - Realización de pruebas de simulacros de alarma por medio de los pulsadores manuales.
  - Limpieza detallada de sirenas.
  - Verificación de la conectividad de todas las borneras.
  - Verificación del funcionamiento de las sirenas.
  - Diligenciamiento de los formatos establecidos por las normativas y estándares (RABT – Alemania, RVS – Austria, Astra – Suiza, NFPA – EE. UU.) para este tipo de instalaciones, y las recomendaciones para la programación y simulacros.
  - Implementación de las estrategias de control en caso de incendios; y para el efecto puede seguirse lo dispuesto en la referencia [170].
- **Alarma manual.** Es preciso llevar a cabo un mantenimiento trimestral que incluya las siguientes actividades:
  - Limpieza general de los pulsadores de alarma manual
  - Verificación de funcionamiento
  - Verificación de conectividad de todas las borneras

  - Protocolos de pruebas y registro de acuerdo con las normativas y estándares (RABT – Alemania, RVS – Austria, Astra – Suiza, NFPA – EE. UU.)
- **Alarma automática.** Debe realizarse un mantenimiento trimestral que incluya las siguientes actividades:
  - Limpieza general de los dispositivos.
  - Verificación de funcionamiento.
  - Verificación de conectividad de todas las borneras.
  - Protocolos de pruebas y registro de acuerdo con las normativas y estándares (RABT – Alemania, RVS – Austria, Astra – Suiza, NFPA – EE. UU.).

9.5.7 Sistemas contra incendio

9.5.7.1 Operación

Los túneles que incorporen subsistemas de protección activa contra incendio, deben ser dotados como se indica en el numeral 7.13 del presente manual, el cual comprende los siguientes:

- Sistema de detección y alarma de incendio.
- Tuberías principales, conexiones de manguea, conexiones de bomberos, hidrantes o conexiones de manguera y componentes para el suministro de agua.
- Extintores portátiles.
- Sistemas fijos contra incendio a base de agua.
- Sistemas de supresión de incendio.

Foto 9-4. Sistemas S.O.S. y control contra incendios, Túnel de La Línea

9.5.7.2 Inspección, Prueba y Mantenimiento (IPM)

Los diferentes componentes de los sistemas contra incendio, serán Inspeccionados, Probados y Mantenidos bajo los parámetros dados en las siguientes normas:

- **Sistema de detección y alarma de incendio.** Las labores de inspección, prueba y mantenimiento se realizarán según como se indica en el capítulo 14 de NFPA72 edición 2019 [177].
- **Redes Hidráulicas de extinción de incendios.** Las labores de inspección, prueba y mantenimiento para los diferentes sistemas de extinción a base de agua y sus componentes se realizarán bajo los parámetros de NFPA 502 Cap. 9 y 10; edición 2020, en donde se detalla para cada tipo de sistema la periodicidad y forma de llevar a cabo las diferentes labores tendientes a un correcto funcionamiento de los mismos.
- **Extintores.** Las labores de inspección, mantenimiento y recarga se realizarán según como se indica en el capítulo 7 de NFPA10 edición 2018 [176].
- **Sistemas automáticos de supresión de incendios.** Estos deben ser Inspeccionados, Probados y Mantenidos bajo la normatividad NFPA aplicable que le corresponde a cada sistema en su versión vigente y las recomendaciones del fabricante.

La ejecución de las rutinas de IPM para los diferentes sistemas deben ser realizadas por profesionales y técnicos idóneos con experiencia específica y certificada en los sistemas contra incendio existentes en la infraestructura del túnel y edificaciones auxiliares.

Las actividades de IPM deben realizarse bajo la frecuencia establecida al interior de las normas mencionadas anteriormente, las cuales deben ser registradas en formatos similares a los allí contenidos. Esta información resultante debe ser guardada en físico y en medio digital como parte del archivo administrativo del Túnel durante toda su vida útil.

9.5.8 Energía eléctrica – sistema de respaldo

9.5.8.1 Operación

Los túneles que incorporen los subsistemas relacionados con el sistema de respaldo de energía eléctrica pueden tener dentro de su operación un doble circuito eléctrico, plantas eléctricas y UPS, encargados de suministrar energía a la iluminación de emergencia y a los diferentes sistemas, así como de energizar la ventilación en operación normal.

Los circuitos eléctricos, tanto los de medida como los de control, se implementarán de tal manera que un fallo en el sistema no alterará los circuitos que no hayan sufrido daños.

9.5.8.2 Mantenimiento

Los sistemas de energía eléctrica y de respaldo requieren un mantenimiento periódico de periodicidad trimestral, compuesto por las siguientes actividades:

- Inventario físico
- Limpieza general
- Cambio de artefactos eléctricos de acuerdo con la programación dada por el fabricante o proveedor
- Validación de las horas de funcionamiento
- Verificación del combustible existente en las plantas eléctricas
- Verificación del monitoreo remoto de las variables visualizadas en el centro de control
- Revisión de la carga de los bancos de baterías
- Revisión de consumo de energía eléctrica
- Verificación física de que no existan daños
- Verificación de los sistemas de puesta a tierra
- Verificación del estado de las protecciones
- Pruebas de transferencias
- Ajuste mecánico de contactos y terminales.
- Verificación del estado de los filtros y alternadores
- Utilización de las recomendaciones de mantenimiento indicadas en el IEC o en la NTC, y en el Retie
- Puesta en operación de la planta eléctrica cada 10 días por un periodo de 15 minutos

9.5.9 Señalización

9.5.9.1 Operación

Los túneles que incorporen los subsistemas relacionados con señalización deberán tener la siguiente operación mínima:

- Señalización con mensajes variables: este sistema tiene como finalidad enviar mensajes a los usuarios para desplegar información relacionada con la operación normal del túnel o para indicar condiciones de incidentes en el interior, y para informar las condiciones viales en el exterior del túnel.
- Señalización de carril: tiene como objeto mostrar uno de tres estados posibles, de acuerdo con las condiciones en el interior del túnel; carril cerrado (aspa), carril operativo (flecha vertical) y precaución (flecha de desvío).
- Señalización con pictogramas – fotoluminiscentes: las señales fotoluminiscentes están ubicadas en los laterales del túnel con 25 m de interdistancia e indican la dirección de las salidas de evacuación más cercanas.

- Señalización con pictogramas – retroiluminadas: las señales retroiluminadas se utilizan para indicar salidas de emergencia, nichos de emergencia (bermas), prohibido estacionar, prohibido adelantar, distancia mínima de seguridad, entre otros.
- Señalización de elementos de emergencia con señales retroiluminadas con tecnología led y fotoluminiscentes.
- Control de velocidad: esta señalización tiene como objeto indicar la velocidad máxima permitida en el interior del túnel e indicar la velocidad de circulación.

9.5.9.2 Mantenimiento

Será necesario realizar las siguientes actividades de mantenimiento en los túneles que incorporen los subsistemas relacionados con señalización:

- **Señalización con mensajes variables.** Se requiere adelantar un mantenimiento semestral que incluya las siguientes actividades:
  - Verificación de energía
  - Verificación del sistema de comunicaciones
  - Revisión de protecciones
  - Verificación del estado de todos los ledes
  - Verificación de envío de mensajes desde el centro de control
  - Limpieza general del interior y exterior con el producto apropiado, indicado por el fabricante
- **Señalización de carril.** Es preciso realizar un mantenimiento semestral que incluya las siguientes tareas:
  - Limpieza general del exterior con el material apropiado, indicado por el fabricante
  - Verificación de funcionamiento
  - Verificación de la fuente de alimentación
  - Revisión de tierras
  - Revisión de protecciones
- **Señalización con pictogramas – fotoluminiscentes.** Se debe realizar un mantenimiento semestral que constará de una tarea: verificación física y limpieza exterior.
  - Verificación física y limpieza exterior
- **Señalización con pictogramas – retroiluminadas.** Es necesario llevar a cabo un mantenimiento semestral que incluya las siguientes labores:
  - Verificación física y limpieza exterior
  - Verificación de la conectividad
  - Verificación del funcionamiento de las luminarias

- Control de velocidad. Se debe realizar un mantenimiento semestral que incluya las siguientes actividades:
  - Limpieza general del exterior con el material apropiado indicado por el fabricante
  - Verificación de funcionamiento
  - Verificación de la fuente de alimentación
  - Revisión de tierras
  - Revisión de protecciones.

Foto 9-5. Operación del Túnel de La Línea, proyecto cruce cordillera central

9.5.10 Evacuación

9.5.10.1 Operación

Los elementos de evacuación serán, como mínimo, los siguientes en los túneles que los incorporen:

- Procedimientos de manejo de incidentes
- Procedimiento de coordinación de evacuación
- Señalización controlada para evacuación
- Supervisión de salidas de emergencia
- Coordinación con organismos de apoyo
- Brigada de emergencia

9.5.10.2 Mantenimiento

Se debe garantizar el cumplimiento mínimo de los niveles de servicio definidos en el contrato, que rijan los compromisos y necesidades de operación y mantenimiento de la infraestructura, donde se recomienda establecer los requisitos de disponibilidad de todos los activos que conforman el corredor vial.

En los túneles que incorporen los elementos de evacuación será necesario realizar, como mínimo, las siguientes labores de mantenimiento:

- Verificación visual detallada y permanente del estado superficial y estructural del revestimiento.
- Limpieza general
- Verificación de drenajes
- Verificación de salidas de emergencias
- Estado físico de los componentes electromecánicos
- Verificación del estado de andenes
- Mantenimiento correctivo inmediato para los elementos que lo requieran
- Se realizará un mantenimiento preventivo general, que constará de: inspección visual detallada; limpieza general; pruebas de los sistemas; y mantenimientos correctivos que se necesiten.
- Los componentes como andenes, drenajes, bahías de estacionamiento, acceso a los vehículos de emergencia, centros remotos de emergencia y salidas de emergencia tendrán que formar parte del plan estratégico de la arquitectura civil y arquitectónica del túnel.

9.6 Organigrama de recursos humanos

9.6.1 Organigrama del equipo de mantenimiento

Se recomienda un contenido mínimo sugerido del personal de mantenimiento en interacción con el personal de la empresa concesionaria de cada túnel, o con el personal encargado por parte del Gobierno en el caso que el túnel esté a cargo del Estado. La concesión u operador del túnel, establecerá el contenido del organigrama, no obstante, se recomienda:

- Director del programa de mantenimiento
- Director de la empresa concesionaria o prestadora del servicio
- Especialista en control
- Especialista en *hardware*
- Especialista en *software*
- Técnico de soporte en *hardware* y *software*
- Cuadrilla especializada por subsistemas

Nota: De acuerdo con las condiciones de cada túnel se debe establecer el número de cuadrillas requeridas para mantenimiento.

Con este personal se debe garantizar una correcta operación de mantenimiento y asistencia telefónica 24 horas al día.

El director del programa de mantenimiento asignará los recursos necesarios para los mantenimientos preventivos y correctivos.

9.6.2 Organigrama para el equipo de operación

Se recomienda un contenido mínimo sugerido del personal de operación del túnel que deberá tener una formación adecuada en los equipos electromecánicos de forma particular para cada proyecto; La concesión u operador del túnel, establecerá el contenido del organigrama, no obstante, se recomienda:

- Director de operación del túnel
- Operadores de medios tecnológicos
- Personal de apoyo
- Director administrativo
- Coordinador de brigada de emergencia
- Brigada de emergencia

9.7 Herramienta y dotación mínima para el mantenimiento

Para cada túnel se indicarán la herramienta, vehículos y maquinaria requeridos para adelantar las tareas de mantenimiento preventivo y correctivo. Estos vehículos y maquinaria pueden ser los siguientes:

- Vehículo camioneta
- Camiones de tipo canasta
- Elevadores móviles

Se requiere que la dotación para el personal encargado del mantenimiento y de la operación en el interior del túnel sea, como mínimo, la siguiente:

- Chaqueta reflectiva
- Chaleco reflectivo
- Casco de protección
- Botas con protección metálica y eléctrica
- Protección ocular
- Mascarilla
- Tapones auditivos
- Guantes de protección mecánica
- Herramienta menor (destornillador, alicates, linternas, cintas aislantes, martillos y cortafríos, entre otros)
- Multímetros
- LAN tester
- Portátiles
- Almacén bodega de repuestos

9.8 Organismos externos de apoyo para la seguridad y operación

Los siguientes son los organismos con los cuales se requiere establecer un medio de comunicación para el manejo de la emergencia ante cualquier incidente ocurrido por incendio, terrorismo, asonada, vandalismo, movimientos telúricos u otro evento de origen natural o antrópico.

- Policía Nacional
- Policía de Carreteras
- Cruz Roja
- Ejército Nacional
- Bomberos
- Defensa Civil

El personal de mantenimiento y operación del túnel, apoya las labores propias y misionales de los organismos externos, pues éstos despliegan su capacidad institucional y operativa en el manejo de la emergencia que se pueda presentar en el túnel

10 ANEXOS

10.1 Anexo A – Método excavación TBM

10.1.1 Construcción con máquinas tuneladoras TBM

La primera edición del *Manual de diseño, construcción, operación y mantenimiento de túneles de carretera para Colombia* no tuvo en su alcance la construcción mediante tuneladoras tipo TBM. Dicho tema, amplio y complejo, requiere un enfoque diferente al que tiene la construcción de túneles por método convencional, por cuanto consta de variaciones en el tratamiento de la gestión de riesgos, la investigación del terreno, el impacto en el medio ambiente y los procesos de control y monitoreo, entre otros aspectos.

No existe experiencia en el uso de TBM para túneles de carretera en Colombia. Sobre esto es preciso anotar que 150 túneles carreteros (aprox.) planeados en Colombia a corto y mediano plazos (de los cuales cerca de 40 están actualmente en construcción) se construirán, o están en construcción, con el método convencional; con esto, en este momento no se tiene proyectado utilizar tuneladoras para ningún túnel de carretera en nuestro país. No obstante, la próxima edición de este *Manual* incluirá un espacio dedicado al tema en cuestión.

Las tuneladoras TBM son equipos que tienen muchas ventajas respecto al método convencional: grandes velocidades de avance, operación continua, menos daño al terreno y exigencia en el soporte, características uniformes en la rezaga, más seguridad para los trabajadores y la posibilidad de trabajar automáticamente y a control remoto. Sin embargo, la alta inversión inicial en equipos exige una planeación rigurosa, con el fin de reducir las incertidumbres mediante estudios y diseños más amplios y detallados (y costosos) que los exigidos por la construcción convencional.

En Colombia, prácticamente todas las excavaciones de túneles de carretera se han realizado con método convencional, con perforación y voladura o con rozadoras (minadores). Debido a que muchos túneles de carretera en el mundo se están construyendo actualmente por medio de TBM, se presentan a continuación las características generales de estas tuneladoras y se sugieren unas lecturas complementarias.

Las tuneladoras se clasifican como tuneladoras TBM (*tunnel boring machines*) y tuneladoras de escudo SM (*shield machines*). Estas, a su vez, se subdividen en:

- TBM con escudo
- TBM sin escudo
- SM para excavación de cara completa:
  - Sin soporte
  - Con soporte mecánico
  - Con aire comprimido
  - Con soporte de lodos
  - Con soporte de presión de tierra EPB (*Earth Pressure Support*)

- SM para excavación de cara parcial
    - Sin soporte
    - Con soporte parcial
    - Con aire comprimido
    - Con soporte de lodos

Por lo general, las tuneladoras de escudo se emplean para la excavación de suelos y rocas blandas. Para rocas duras suelen usarse tuneladoras TBM o tuneladoras para excavación de cara parcial, según la estabilidad del macizo rocoso.

Una tuneladora TBM es una máquina concebida para excavar en rocas duras mediante una cabeza cortadora circular equipada, casi siempre, con discos cortadores. La roca se corta mediante rotación y empuje simultáneos. Para lograr el empuje, la máquina se arriostra mediante presión contra las paredes del túnel. La cabeza cortadora recoge el material excavado y este es transportado por bandas colocadas detrás de la máquina. En general, estas máquinas funcionan en rocas que tienen una resistencia a la compresión superior a 200 N/mm^2.

En las tuneladoras SM, a medida que se excava el material, se empuja un cilindro hueco metálico (escudo) en el sentido del eje del túnel. El escudo se encarga de soportar la excavación y contener el agua subterránea mientras se coloca el soporte o el revestimiento. El soporte se coloca en el intervalo de tiempo que transcurre entre la excavación y la construcción del revestimiento. Generalmente, la fuerza de empuje del escudo se logra mediante el apoyo contra el revestimiento ya colocado; es decir, excavación y revestimiento son operaciones coordinadas. El revestimiento consiste, casi siempre, en secciones prefabricadas o tubos de concreto.

La excavación con SM puede ser manual cuando se trata de cavidades pequeñas con buenas condiciones geológicas, por encima del nivel de agua subterránea. En los demás casos se usan excavación mecánica y diferentes métodos de soporte de la cara. Cuando la excavación es parcial de la cara, se utilizan máquinas rozadoras o minadoras. En ese caso, se pueden construir túneles con secciones de cualquier forma. Para la excavación de cara completa con túnel de sección circular, se usan cabezas cortadoras o fluidos proyectados a chorro mediante aire comprimido. El material se extrae de la excavación mediante bombeo de lodo, cintas transportadoras, camiones o trenes.

La mayor ventaja que tiene la construcción con SM son los diferentes métodos de los cuales se dispone para soportar el frente de excavación mientras se avanza. Cuando no hay agua subterránea o el flujo puede manejarse con drenajes, es posible usar el soporte natural del terreno o un soporte mecánico; el tipo de soporte en este último caso depende de si la excavación es de cara parcial o completa, pero por lo general son placas que reaccionan contra la cabeza cortadora mediante un sistema de resortes.

En otros casos, cuando es necesario soportar el frente o controlar un flujo abundante de agua subterránea, pueden usarse soportes mediante aire comprimido, lodos y EPB.

- Soporte mediante aire comprimido: tiene la finalidad fundamental de controlar el agua, no de soportar el terreno. Este método es poco usado actualmente por cuanto tiene bastantes limitantes y riesgos: por ejemplo, la cavidad debe tener una cobertura superior a varios diámetros para evitar que el terreno se reviente.
- Soporte del frente mediante lodos: tiene una aplicación bastante alta para cualquier tipo de terreno, con agua subterránea o sin ella. Una suspensión de agua y bentonita o arcilla con aditivos se pone a presión contra el frente de excavación, formando una pasta impermeable. Esta última se mezcla con el terreno excavado, lo que permite luego bombearlo como un lodo para extraerlo

de la excavación. En este método, la separación en superficie del material excavado y el lodo conllevan costos altos y problemas ambientales.

- Tuneladoras de escudo EPB: fueron desarrolladas en la década de 1970 para excavar en suelos de características plásticas con ángulos de fricción interna pequeños, buena deformabilidad y baja permeabilidad. Las condiciones óptimas de aplicación del EPB se dan en los suelos limoarcillosos y arenolimosos. La efectividad se reduce a medida que se incrementa la permeabilidad del terreno y se hace necesario adicionar lodos o espumas. En este método, el escudo constituye la herramienta de corte y el suelo excavado es el medio de soporte del frente de excavación.

10.1.2 Bibliografía sugerida TBM

La bibliografía sobre el tema de las tuneladoras TBM es muy amplia; a continuación, se presentan las referencias recomendadas para consulta.

- Deere, D. Adverse geology and TBM tunneling problems. in Proceedings of the 5th Rapid Excavation and Tunneling Conference Held in San Francisco, California, Volume 1. 1981.
- Guglielmetti, V., et al., Mechanized tunnelling in urban areas: design methodology and construction control. 2008: CRC Press.
- Herrenknecht, M. & K. Bappler, The technological innovation and application of shield and TBM. Construction Mechanization, 2011. 8: p. 018.
- Herrenknecht, M. EPB or slurry machine: the choice. Tunnels and Tunnelling, 1994. 26(6): p. 35-6.
- Herrenknecht, M., U. Rehm, & B.C. Liebler. Tunnelling in Changing Geology. in Tunnelling and Underground Space Technology. Underground Space for Sustainable Urban Development. Proceedings of the 30th ITA-AITES World Tunnel Congress Singapore, 22-27 May 2004. 2004.
- Jingjian, Z., The application and some problems of TBM and its prospects. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999. 18(3): p. 363-367.
- Kuesel, T. R., E. H. King & J.O. Bickel, Tunnel engineering handbook. 2012: Springer Science & Business Media.
- Kurosawa, S., Earth pressure balanced shield tunneling. Journal of the Construction Division, 1981. 107(4): p. 609-618.
- Langmaack, D.-I.L. & Q. Feng, Soil conditioning for EPB machines: balance of functional and ecological properties. 2005.
- Ligang, L. S. F. Analysis on the factors affecting ground settlements caused by EPB TBM tunneling [J]. Modern Tunnelling Technology, 2007. 5: p. 015.
- Maidl, B. et al. Hardrock tunnel boring machines. 2012: John Wiley & Sons.
- Maidl, B. et al. Mechanised Tunnelling, in Handbook of Tunnel Engineering. 2013, Wiley-VCH Verlag GmbH. p. 285-378.

- Merrifield, E. et al. Recent innovations in TBM development. Tunnels & Tunnelling International, 1990. 22(1).
- Nilsen, B. et al. New test methodology for estimating the abrasiveness of soils for TBM tunneling. in Proceedings of the Rapid Excavation and Tunneling Conference (RETC). 2007.
- Nilsen, B. et al. Abrasivity of soils in TBM tunnelling. Tunnels & Tunnelling International, 2006.
- Shichun, W. Relationship between TBM tunneling and geological conditions. World Tunnel, 1998. 2: p. 39-43.
- U. S. Army Corps of Engineers, Engineering and Design Tunnels and Shafts in Rock, Engineer Manual 1110-2-2901. 1997, Department of the Army: Washington, DC.

11 REFERENCIAS

11.1 Bibliografía

[1] E. S. D, «Guidelines for tunnelling risk management: International Tunnelling Association, Working Group No. 2,» de *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2004, pp. 217-237.

[2] PIARC, Risk Analysis for Road Tunnels Technical Committee 3.3 - Group 2 "Management of Road Tunnel Safety", 2006.

[3] CEO, Technical Guidance Note No. 25 - Geotechnical Risk Management for Tunnel Works, Geotechnical Engineering Office, Editor., 2005.

[4] R. Peck, «Advantages and Limitations of the Observational Method in Applied Soil Mechanics.,» de *Geotechnique*, 1969, pp. 171-187.

[5] D. Patel, The observational method in geotechnics in XIV European Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Madrid: Citeseer, 2007.

[6] AFTES, Recommendation on the characterisation of geological, hydrogeological and geotechnical uncertainties and risks, 2012.

[7] E. Hoek, «Geotechnical considerations in tunnel desing and contract preparation.,» de *Trans. Instn Min, Metall*, 1982, pp. A101-9.

[8] CIRIA, «Tunnelling - improved contract practices,» de *Construction Industry Research and Information Association*, 1978, p. 70.

[9] National Academy of Sciences, «Better contracting for underground construction,» de *National Committee on Tunneling Technology*, Washington DC, 1974, p. 143.

[10] C. M. y L. E, Hidrología Subterránea. 2a edición, Barcelona: Ediciones Omega, 2001.

[11] Commitee on Ground Water Modeling Assessment, Ground Water Models, Whasington DC: National Academy Press, 1990.

[12] M. J. S. y J. R, «Numerical modeling of the transient hydrogeological response produced by tunnel construction in fractured bedrocks,» de *Eng. Geol*, 2002, pp. 369-386.

[13] Font-Capó, Interaction between groundwater and TBM (Tunnel Boring Machine) excavated tunnels, Universitat Politecnica de Catalunya, 2012.

[14] Lunardi, «Desing and Construction of Tunnels: Analysis of Controlled Deformations in Rock and Soils (ADECO-RS),» Springer Science & Business Media, 2008.

[15] Werner, Introducción a la Hidrogeología, Linares, Nuevo León, Mexico: Universidad Autónoma de Nuevo León, 1996.

[16] B. C. H. H. Einstein y P. Huggenberger, Effects of tunneling on groundwater flow and swelling of clay-sulfate rock, 2011.

[17] C. Rosenzweig y W. Solecki, Manual of Applied Field Hydrogeology Vol I, Mc Graw Hill, 2004.

[18] J. M. Reynolds, An Introdcution to Applied and Environmental Geophysics. 1 st ed, West Sussex, England: John Wiley & Sons Ltd, 1997.

[19] P. Gattinoni, «Hydrogeological Risk and Mining Tunnels: the Fontane-Rodoretto Mine Turin (Italy),» de *International Journal of Environmental, Ecological, Geological and Geophysical Engineering*, 2013, pp. 8-12.

[20] M. Pesendorfer, Hydrogeologic Exploration and Tunneling in a Karstified and Fractured Limestone Aquifer Acknowledgmets, Zurich: Swiss Federal INstitute of Technology, 2006.

[21] F. R. Yang, «The impact of tunneling construction on the hydrogeological environment of 'Tseng-Wen Reservoir Transbasin Diversion Project' in Taiwan.,» 2009, pp. 39-58.

[22] Norwegian Public Roads Administration, Road Tunnels 03.04, NPRA Printing Center, 2004.

[23] Water Science and Technology Board, Committee on USGS Water Reources Research, National Research Council, Division on Earth and Life Studies, Commission on Geosciences, Environmet and Resources, 2000.

[24] Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales, Formato Único Nacional de Inventario de Puntos de Agua Subterránea, 2013.

[25] E. Johnson, El agua subterránea y los pozos 1st ed, Saint Paul, Minnesota: Johnson Division UOP Inc 513, 1975.

[26] V. Martinez y I. Lopez, Pozos y acuíferos, técnicas de evaluación mediante ensayos de bombeo 1ra ed, Madrid, España: Instituto Geológico y Minero de España.

[27] Tóth, «A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins,» 1963, pp. 4795-4812.

[28] Tóth, «Gravitational Systems of Groundwater Flow (Theory, Evaluation, Utilization),» Cambridge Press, 2009.

[29] Hiscock, Hydrogeology Principles and Practice, Malden, Oxford, Carlton: Blackwell Publishing, 2005.

[30] Auge, «Vulnerabilidad de Acuíferos.,» *Revista Latino-Americana de Hidrogeología.,* pp. 58-103, 2004.

[31] INVIAS, Requeimientos técnicos para estudios y diseños de carreteras a nivel de fase III. Numeral 3.9. Capítulo IX Estudio y diseño de túneles., Bogotá , 2011.

[32] INVIAS, Requerimientos técnicos para estudios y diseños de carreteras a nivel de fase I. Numeral 3.3 - Vol III - Prefactibilidad de túneles, Bogotá , 2011.

[33] INVIAS, Requerimientos técnicos para estudios y diseños de carreteras a nivel de fase II. Numeral 3.8 - Vol VIII - Estudios para túneles, Bogotá , 2011.

[34] Hoek, «Putting numbers to geology-an engineer´s viewpoint.,» de *Felsbau*, 1999, pp. 139-151.

[35] P. Marinos y Hoek, GSI: A geological friendly tool for rock mass strength estimation, 2000.

[36] M. Cai, «Determination of residual strength parameters of joined rock masses using GSI,» *Int. J. of Rock Mechanics and Mining Science ,* pp. 247-265, 2007.

[37] B. Amadei y W. Savage, «Effects of joints on rock mass strength and deformability.,» de *Comprenhensice Rock Engineering*, 1993, pp. 331-365.

[38] E. Hoek y M. Diedericht, «Empirical estimation of rock mass modulus,» de *Int. J. of Rock Mechanics and Minig Science*, 2006, pp. 203-215.

[39] R. Bashin y K. Hoeg, «Numerical modelling of block size effects and influence of joint properties in multiply jointed rock.,» de *Tunnelling and Underground Space Technology*, 1998, pp. 181-188.

[40] CEN/TC, Eurocode 7 - Geotechnical desing - Part 2: Ground investigation and testing, E.C.f. Standardization, Editor, 2007.

[41] USACE, Geotechnical investigations No. EM 110-1-1804, Washington DC: Department of the Army, 2001.

[42] IAEG, «Rock and soil description and classificaion for the engineering geological maping,» *Bulletin IAEG,* pp. 235-274, 1981.

[43] Geol. Society Engin, «The description ofrock masses for engineering purposes,» *Journal of Engineering Geology,* pp. 355-388, 1977.

[44] DIM, T1/T2 Benennen und Beschreiben von Boden und Fels, 1981.

[45] ISRM, «Suggested methods of petrographic description of rocks,» de *Int. J. Rock Mech*, Min. Sci. Geomech, 1978, pp. 41-45.

[46] Geol. Society Engin, «The description and classification of weathered rocks for engineering purposes,» *Journal of Engineering geology ,* 1995.

[47] D. Cragg y J. Ingman, «Rock weathering descriptions - current difficulties.,» *Journal of Engineering geology,* pp. 277-286, 1995.

[48] D. A. Price, «A suggested method for the description of rock mass wathering by a rating system.,» *Journal of*

Engineering geology, pp. 68-76, 1933.

[49] ISRM, «Suggested Methods for quantitative description of discontinuities in rock masses.,» *Int. J. of Rock Mechanics and Mining Science.,* pp. 319-368.

[50] D. Wise , «Fault-related rocks: Suggestions for terminology,» de *Geology*, 1984, pp. 391-394.

[51] M. Bridges, Identification and charaterisation of sets of fractures and faults in rock. in Proc. Int. Symp Rock Joints, Loen, 1990.

[52] S. Priest, Discontinuity analysis for rock engineering, London: London Chapman & Hall, 1993.

[53] W. Dershowitz y H. Herda, Interpretation of fracture spacing and intensity - Rock Mechanics, Rotterdam: Tillerson & Waversik, 1992.

[54] R. Göktan y C. Ayday, «A suggested improvement of the Schmidt rebound hardness,» de *Int. J. Rok Mech. Min. Sci. Geomech*, 1993, pp. 321-322.

[55] Ö. Aydan, Y. Shimizu y T. Kawamoto, «The anisotropy of surface morphology characteristics of rock discontinuities.,» de *Rock Mech. Rock Engineering*, 1996, pp. 47-59.

[56] N. Barton, «Deformation phenomena in jointed rock,» de *Geotechnique*, 1986, pp. 147-167.

[57] N. Barton y V. Choubey, «The shear strength of rock joints in theory and practice.,» de *Rock Meth.*, Felsmech. u. Ingenieurgeologie, 1977, pp. 1-54.

[58] J. Muralha, «ISRM suggested method for laboratory determination of the shear strength of rock joints: revised version,» de *The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring*, Springer, 2007-2014, pp. 131-142.

[59] N. Barton, S. Brandis y K. Bakhtar, «Strength, deformation and conductivity of rock joints,» de *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech*, 1985, pp. 121-140.

[60] S. Bandis, «Engineering properties and characterisation of rock discontinuities,» de *Comprehnsive rock engineering*, J.A. Hudson, 1993, pp. 155-183.

[61] U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation, Engineering Geology Field Manual. 2nd ed. Vol I, 1998.

[62] J. Hudson, Comprehnsive rock engineering, Rock testing and site characterisation. Vol 3, 1993.

[63] E. Hoek, Rock Engineering: course notes, 2004.

[64] Z. T. Bieniawski, The geomechanics classification in rock engineering applications in 4th ISRM Congress, International Society for Rock Mechanics, 1979.

[65] B. Celada, Innovating Tunnel Desing by an Improved Experience-based RMR System. in Proc. World Tunnel Congress, 2014.

[66] Z. T. Bieniawski, «The Rock Mass Rating (RMR) System (Geomechanics Classification) in Engineering Practice, in ASTM STP 984 Rock Classification System for Engineering Purposes,» de *American Society for Testing and Materials*, Philadelphia, L. Kirkaldie, 1988, pp. 17-34.

[67] N. Barton, «Rock Mass Classification and Tunnel Reinforcement Selection Using the Q-System,» de *ASTM STP 984 Rock Classification Society for Testing Materials*, Philadelphia, pp. 59-88.

[68] T. Takahashi, «ISRM Suggested Methods for land geophysics in rock engineering.,» *International journal of rock mechanics and mining sciences,* pp. 885-914, 2004.

[69] T. Takahashi, T. Takeuchi y K. Sassa, «ISRM suggested methods for borehole geophysics in rock engineering,» *International journal of rock mechanics and mining sciences,* pp. 337-368, 2006.

[70] R. E. Hunt, Geotechnical engineering investigation handbook, Crc Press, 2005.

[71] P. Kearey, M. Books y I. Hill, An introduction to geophysical exploration, JohnWiley & Sons, 2013.

[72] A. Aydin, «ISRM suggested method for determination of the Schmidt hammer rebound hardness: revised version,,» de *The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring*, 2007-2014, pp.

25-33.

[73] G. Riedmueller y W. Schubert, Project and rock mass specific investigatino for tunnels, Espoo: EUROCK 2001, 2001.

[74] Q. Liu , G. Riedmüller y K. Klima, Quantification of parameter relationship in tunnelling, Espoo: EUROCK 2001, 2001.

[75] K. Prakash y A. Sridharan, «Free swell ratio and clay mineralogy of fine-grained soils.,» *Geotechnical Testing Journal,* pp. 220-225, 2004.

[76] ISRM, «Suggested methods for laboratory testing of argillaceous swelling rock.,» de *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech*, 1989, pp. 415-426.

[77] ISRM, «Suggested methods for laboratory testing of swelling rocks.,» de *Int. J. Rock. Mech & Min. Sci*, 1999, pp. 291-306.

[78] M. Blümel y F. Bezar, «Advanced control techniques for direct shear testing of jointed rock specimens.,» de *Nondestructive and automated testing for soil and rock properties*, W.A. Marr, Fairhurst, C, 1998.

[79] M. Blümel, «Improved procedures for laboratory rock testing,» de *EUROCK 2000*, Aechen, 2000, pp. 573-578.

[80] ISRM, «Suggested methods for determining the Uniaxial Compressive Strength and deformability of rock materials.,» de *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech*, 1979, pp. 135-140.

[81] ISRM, «Suggested methods for determinating in the strength of rock masses in triaxial compression,» de *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech*, 1983, pp. 283-290.

[82] ISRM, «Suggested methods for determining shear strength,» de *Rock Characterisation Testing and monitoring*, E.T. Brown, 1981, pp. 129-140.

[83] ISRM, «Suggested methods for determining hardness and abrasiveness of rocks,» de *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech*, 1978, pp. 89-97.

[84] Ö. Aydan, «Suggested methods for determining the creep characteristics of rock,» de *ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007-2014*, Springer, 2013, pp. 115-130.

[85] K. Tsidsi, «A quantitative petrofabric characterisation of metamorphic rocks.,» *Bulletin IAEG,* pp. 2-12, 1986.

[86] G. Simmons y D. Richter, Microcracks in rocks streng, London: T.p.a.c.o.m.a. rocks, 1976.

[87] ISRM, «Suggested methods for large-scale sampling and triaxial testing on jointed rock.,» de *Int. J. RockMech. Min. Sci. Geomech*, 1989, pp. 427-434.

[88] D. Howarth y J. Rowlands, «Quantitative assessment of rock texture and correlation with drillability and strength properties.,» de *Rock Mech. Rock Engineering*, 1987, pp. 57-85.

[89] A. F. Normalisation, «d´abrasivité et de broyabilité,» 1990, pp. 18-579.

[90] J. Hudson, F. Cornet y R. Christiansson, «SRM Suggested Methods for rock stress estimation - Part 1: Strategy for rock stress estimation.,» *International Journal of Rock Mechanics and Minig Sciences,* pp. 991-998, 2003.

[91] J. Sjöberg, R. Christiansson y J. Hudson, «ISRM suggested methods for rock stress estimation - Part 2: overcoring methods.,» *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,* pp. 999-1010, 2003.

[92] B. Haimson y F. Cornet, «ISRM Suggested methods for rock stress estimation - part 3: hydraulic fracturing (HF) and/or hydraulic testing of pre-existing fractures (HTPF).,» *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,* pp. 1011-1020, 2003.

[93] R. Christiansson y J. Hudson, «ISRM Suggested methods for rock stress estimation - part 4: quality control of rock stress estimation.,» *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,* pp. 1021-1025, 2003.

[94] O. Stephansson y A. Zang , «ISRM Suggested methods for rocks stress estimation - Part 5: establishing a model for rock characterization, tesitng and monitoring: 2007-2014,» *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,* pp. 187-201, 2015.

[95] M. Tingay, J. Reinecker y B. Müller, Borehole breakout and drilling-induced fracture analysis from image logs World Stress Map Project., Postdam: Image Logs, Gfz, 2008.

[96] A. Lavrov, «The Kaiser effect in rocks: principles and stress estimation techniques.,» *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,* pp. 151-171, 2003.

[97] L. Pan y S. Zhang, «An improved differential strain analysis method for super deep wells,» *Open Petroleum Engineering Journal,* pp. 69-77, 2012.

[98] B. Widarsono, J. Marsden y M. King, In situ stress prediction using differential strain analysis and ultrasonic shear-wave splitting, 1996.

[99] INVIAS, Manual de diseño geométrico, 2008.

[100] FSV, «Guideline and Regulation - para el trazado de túneles» de *RVS 09.01.21.*, Austria, 2007.

[101] OeGG, Guideline for the Geotechnical Desing of Underground Sructures with Conventional Excavatoin, Austran Society for Geomechanics, 2010.

[102] C. Leber y W. Schubert, «Review of Current Rock Mass Characterization Practices,» de *Underground Constructions C.t.A*, Prague, ITA-AITES, 2010.

[103] G. Riedmueller y W. Schubert, «Rock mass modeling in tunnelling versus rock mass clasifications,» de *US RockMechanics Symposium*, 1999.

[104] W. Schubert, «Are Classification System outdated?,» de *EUROCK 2013*, Tschechische Republik, 2013.

[105] OeGG-NATM, «The Austrian practice of conventional tunneling,» Salzburg, Austrian Society of Goemechanics., 2010.

[106] ITA y W.G.C.T, «Guidelines on Contractual Aspectos of COnventional Tunnelling,» ITA, 2013.

[107] R. Goodman, «Block theory and its application to rock engineering,» 1985.

[108] E. Hoek, P. Kaiser y W. Badwen, «Support of underground excavations in hard rock,» 1995.

[109] G. Feder, «Zum Stabilitaestsnachweis fuer Hohlraume in festem Gebirge bei Richtungbetonten Primaerdruck - und Hüttenmännische Monatshefte,» 1977, pp. 131-140.

[110] J. Sulem, M. Panet y A. Guenot, «Closure analysis on deep tunnels,» 197-204, Int. J. Rock Mech and Min.Sci, p. 1982.

[111] E. Brown, «Ground response curves for rock tunnels,» *Journal of Geotechnical Engineering,* pp. 15-39, 1983.

[112] C. Leber y N. Randoncic, «Influence of the primary stress state on the displacements characteristics,» de *Rock Engineering in difficult ground condition, soft rocks and karst*, 2009, pp. 471-476.

[113] B. Mortiz, K. Grossauer y W. Schubert, «Short term prediction of system behavior of shallow tunnels in heterogeneous ground,» Felsbau, 2004, pp. 44-52.

[114] J. Jeon, «Prediction of ground conditions ahead of the tunnel face by vector orientation analysis.,» de *Tunelling and Undergound Space Technology*, 2005, pp. 344-355.

[115] C. J. Hung, «FHWA Technical Manual for Desing and Construction of Road Tunnels - Civil Elements,» Report No. FHWA-NHI-10-034, 2009.

[116] Y. Hashash, «Seismic desing and analysis of underground structures (ITA/AITES),» de *Tunelling and Undergound Space Technology*, 2001, pp. 247-293.

[117] República de Colombia, *Decreto 926 por el cual se establecen los requisitos de carácter técnico y científico para construcciones sismo resistentes NSR-10,* Diario Oficial 47663, 2010.

[118] p.-I. 18674, Geotechnical investigation and testing - geotechnical monitoring by field instrumentation - general rules, 2014.

[119] CEN/TC, EUROCODE 7 Geotechnical Desing, 2006.

[120] OeGG, Geotechnical Monitoring in Conventinal Tunnel, Austrian Society for Geomechanics, 2014.

[121] M. Panet y A. Guenot, Analysis of Convergence behid the face of a tunnel., Laboratorie Central des Ponts et Chaussees, 1982.

[122] CEN/TC, Eurocode 0: Basis of structural desing, 1990.

[123] N. Radoncic, W. Schubert y B. Moritz, «Ductile support desing. Zur Auslegung duktiler Ausbauten,» de *Geomechanics and Tunnelling* , 2009, pp. 561-577.

[124] W. ITA, «General report on Conventional Tunnelling Method,» 2009, p. 28.

[125] G. Lombardi , «La roca y el macizo rocoso - Leyes constitutivas, La Mecánica de Rocas enla Ingeniería CIvil,» Buenos Aires, Argentina., Academia Nacional de Ciencias Físicas, Exactas y Naturales, 1987.

[126] G. Lombardi y D. Deere, «Proyecto y control de inyecciones usando el principio GIN "Water Power & Dam Construction",» 1993.

[127] J. Warner , «Grouting Intensity Number (GIN),» de *Practical Handbook of Grouting: Soil, Rock and Structures*, 2004.

[128] Plaxis, «Preliminary 3D Modelling of Structural behavior of Fae Bolting and Umbrella Arch inTunneling,» Plaxis Bulletin 2014, 2014.

[129] T. Marcher, M. John y M. Ristic, «Determination of Load Sharing Effects in Sprayed Concrete Tunnel Linings.,» de *Underground Construction*, 2011, p. 8.

[130] ISO y I.O.F.S, «Geotechnical investigation and testing - Identification and classification of soil - Part 2: Principles for a classification (ISO 14688),» 2004.

[131] ISO y I.O.F.S., «Geotechnical investigation and description (ISO 14689-1),» 2003.

[132] G. Barla, «Tunnelling under squeezing rock conditions,» de *Tunnelling Mechanics - Advances in Geotechnical Engineering and Tunnelling* , D. Kolymbas, 2002, pp. 169-268.

[133] ISRM y I.S.o.R.M, «Suggested methods for laboratory teting of swelling rocks,» *International Journal of Rock Mechanics and Mining,* pp. 291-306, 1999.

[134] OeVBB y O.V.f.B.-u.B., «Guideline_Sprayed Concrete,» 2006, p. 103.

[135] M. Romer, «Detachment of shotcrete linings due to long term interaction with ground water in International seminar on the thaumasite form of sulfate attack on concrete,» United Kingdom, 2003.

[136] DIN y D.I.f.N, «Beurteilung Betonangerifender Waesser, Boden un Gasse DIN 4030 Teil 2,» 1991.

[137] DIN y D.I.f.N, «Beurteilung Betonangreifender Waesser, Borden un Gasse DIN 4030 Teil 1,» 1991.

[138] L. Jing y J. Hudson, «Numerical Methods in Rock Mechanics,» de *Int. J. Rock. Mech. and Min. Sci.*, 2002.

[139] E. Hoek y R. Guevara, «Overcoming squeezing in the Yacambu-Quibor tunel, Venezuela.,» de *Rok Mechanics and Rock Engineering - Vol 2*, 2009, pp. 389-418.

[140] M. Cotera, «Ataque químico al concreto,» Peru, E.e.e.c.o.p.e. ACI, 1991.

[141] M. Arias, «Diseño de portales evitando o reduciendo el corte en rocas en Ingeniería CIvil,» Bogotá, Colombia, Escuela Colombiana de Ingeniería - Julio Garavito , 2014.

[142] W. Fellenius, «Erdstatische Berechnungen mit Reibung und Kohäsion (Adhäsion) und unter Annahme kreiszylindrischer Gleiflächen,» Berlín, Ernst & Sohn, 1927.

[143] Ministerio de Minas y Energía, «Resolución No. 90980 Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público,» Bogotá , 2013.

[144] E. Hoek, «When is a rock engineering desing, Table 3, Page 4,» 2007. [En línea]. Available: https://www.rockscience.com/hoek/corner/2when-is-a-rock-engineering-desing-acceptable.pdf.

[145] J. Suarez, «Diseño Geométrico de Tuneles,» 2010.

[146] A. Bishop , «The use of the slip circle in the stability analysis of slopes,» de *First technical session: General theory of stability of slopes*, 1955.

[147] N. Janbu, «Slope Stability Computations. Institutt for Geotknikk og Fundamenteringslaere.,» de *Norges Tekniske Hogskole. Soils Mechanics and FoundationEngineering*, Technical University of Norway, 1968.

[148] USACE;, «Stability of Earth and Rock-Fill Dams,» de *EM 1110-2-1902*, U.S. Army Engineering Waterways Experiment Statios , 1970.

[149] E. Spencer, «A method for analysis of the stability of embankments assuming parallel interslice forces,» Geotechnique, 1967, pp. 11-26.

[150] N. Morgenstern y V. Price, «The analysis of the stability of generalised slip surfaces,» Geotechnique, 1965, pp. 79-93.

[151] FSV, «Richtlinien und Vorschriften fuer das Strassenwegen (Tunnelquerschnitte) RVS 09.01.22.2010,» 2010.

[152] ANI (Agencia Nacional de Infraestructura), «Apéndice técnico para la etapa de factibilidad, Numeral V "Túneles",» Bogotá , 2011.

[153] EU Commission of the European COmmunities, «Minimum safety requirements for tunnels in the trans-European road network,» de *Directive 2004/54/EC of the European Parliament and the Council*, 2004.

[154] UK The Highways Agency, «Desing manual for roads and bridges, Highway structure desing (substructures and special structures) materials, PArt 9, BD 78/99: Desing of road tunnels,» 1999.

[155] PIARC, «Road tunnels: vehicle emissions and air demand for air demand for ventilation,» World Road Association, 2012.

[156] I. E. Commission, «IEC 60364 Electrical installations of buildings».

[157] ICONTED, «NTC 2050 Código Eléctrico Colombiano,» 1998.

[158] Ministerio de Minas y Energía, «Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas,» Bogotá D.C, RETIE, M.d.M.y.Energía, 2005.

[159] CREG Ministerio de Minas y Energía, «Por la cual se aprueban los principios generales y la metodología para el establecimiento de los cargos por uso de los Sistemas de Transmisión Regional y Distribución Local,» 2008.

[160] International Electrotechnical COmmission, «IEC 62271 Standards for high-voltage switchgear and controlgear».

[161] International Electrotechnical Commission, «IEC 61641 Enclosed low-voltage switchgear and controlgear assemblies.».

[162] International Electrotechnical Commission, «IEC 60529 Degrees of protection provide by enclosures (IP Code)».

[163] International Electrotechnical Commission, «IEC 61439 Low voltage switchgear and controlgear assemblies.».

[164] International Electrotechnical Commission, «IEC 60947 Standars for low - voltage switchgear and controlgear.».

[165] International Electrotechnical Commission, «IEC 61439-1 Low-voltage switchgear and controlgear assemblies - Part 1: General rules,» 2011.

[166] International Electrotechnical Commission, «IEC 62271-200 High-voltage switchgear and controlgear - Part 200: AC metal-enclosed switchgear and controlgear for rated voltages above 1 kV up to and including 52 kV,» 2011.

[167] Institute of Electrical and Electronics Engineers, «ANSI/IEEE C37.20.2-1993,» de *Standard for MEtal-Clad and Station Type Cubicle Switchgear*, 1994.

[168] Institute of Electrical and Electronics Engineers, «ASI/IEEE C37.20.7-2007,» de *Guide for Testing Metal-Enclosed Switchgear Rated Up to 38 kV for Internal Arcing Faults*, 2008.

[169] International Electrotechnical Commission, «IEC 62491 Industrial systems, installations and equipment and industrial products - Labellinf of cables and cores.».

[170] PIARC, «Road tunnels: operational strategies for emergency ventilation,» World Road Association, 2011.

[171] National Roads Administration, «Guidelines and Regulations for Road Construction: Ventilation, Fundamentals RVS 9.262.,» Austria, 1997.

[172] Austrian Standards Institute, «ÖNORM EN 13501-4 Fire classification of construction products and building elements - Part 4: Classification using data from fire resistance tests on components of smoke control systems,» 2011.

[173] International Commission on Illumination, «CIE 088: 2004 Guide for the Lighting of Road TUnnels and

Underpasses,» 2004.

[174] Real Decreto 635 (España), «Requisitos mínimos de seguirdad en los túneles de carreteras del Estado,» 2006.

[175] NFPA 502, «Fire Protection. Standards for Road TUnnels, Bridges and Other Limited Acces Highways,» National Fire Protection Association, 2011.

[176] NFPA 10, «Standard for Portable Fire Extinguishers,» National Fire Protection Association, 2013.

[177] NFPA 72, «National Fire Alarm and Signaling Code,» National Fire Protection Association, 2013.

[178] Ministerio del Transporte, «Manual de Señalización Vial - Dispositivos para la Regulación del Tránsito en Calles, Carreteras y Ciclorutas de COlombia,» Bogotá, 2004.

[179] RABT, «Guidelines for equipment and operation of road tunnels,» Road and Transportation Research Association, 2006.

[180] PIARC, «Systems and equipment for fire and smoke control in road tunnels.,» World Road Association, 2007.

[181] Austrian Standards Institue, «ÖNORM EN 12966-1 Road vertical signs - Variable message traffic signs Part 1: Product standard,» 2010.

[182] Austrian Standards Institute , «ÖVE/ÖNORM EN 60598-1 Luminaires Part 1: General requirements and tests,» 2009.

[183] Austrian Standards Institute , «ÖVE/ÖNORM EN 60068-2-64 Environmental testing - Part 2-64: Tests - Test Fh: Vibration, broadband random and guidance,» 2009.

[184] Austrian Standards Institute , «ÖNORM EN ISO 9227 Corrosion tests in artificial atmospheres - Salt spray tests,» 2012.

[185] Austrian Standards Institute , «ÖVE/ÖNORM EN 60529 Degrees of protection provided by enclosures (IP Code),» 2014.

[186] Austrian Standards Institute , «ÖVE/ÖNORM EN 61000 Electromagnetic compatibility (EMC),» 2015.

[187] D. Evert Start, «Desing of Voice Alarm Systems for Traffic Tunnels: Optimisation of Speech Intelligibility,» de *STUVA Conference: Tunnels - Key to sustainable Mobility* , Hamburg, 2009.

[188] E. 60268-16, «Sound system equipment - Part 16: Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index,» 2011.

[189] B. E. 60849, «Sound systems for emergency purposes,» 1998.

[190] R. B. Peck, «Advantages and limitations of the observational method in applied soil mechanics.,» Geotechnique, 1969, pp. 171-187.

[191] BTS, «British Tunnelling Society Society - Monitoring Underground Constrution. A best practice guide,» London, ICE Publishing: London, 2011.

[192] W. Schubert y B. Moritz, «State of the art in evaluation and interpretation of displacements monitoring data in tunnels.,» de *Geomechanics and Tunnelling 2011*, 2011.

[193] J. Barlow, «Interpretation of tunnel convergence measurements,» de *Dep. Of Civil Engineering*, University of Alberta: Canada, 1986.

[194] P. Sellner, K. Grossauer y W. Schubert, «Advanced analysis and prediction of displacement an system behavior in tunnelling,» de *EUROCK 2002 Intern symp on rock engineering for mountainous regions*, Lisboa, S.p.d. geotecnia, 2002.

[195] J. Klopcic, «Analysis and prediction of displacements for tunnel built in foilated rock mass of perm-carboniferous age,» de *Institute of rock mechanics and tunnelling* , Austria, Graz University of Technology, 2009.

[196] A. Goricki, «The influence of discontiniuty orinetation on the behaviour of tunnels,» Felsbau, 2005.

[197] J. Davila, «Analysis of displacement in foilated rock masses,» de *ITA, Underground spaces and millennium developments goals*, Tehran, H. Mozafari, Editor., 2013.

[198] K. Grossauer, «Tunneling in heterogeneous ground,» de *Institute for rock mechanics and tunnelling*, Austria, Graz University of Technology, 2001.

[199] W. Schubert, «Lecture notes: Interpretation of displacement monitoring data,» Cours NATM engineer, 2010.

[200] G. Vavrosky, «Gebirgsdruckentwicklung, Hohlraumverformung und Ausvaudimensionierung.,» Felsbau, 1994, pp. 312-329.

[201] G. Vavrosky y N. Ayaydin, «Bedeutung der vortriebsorientierten Auswertungen geotechnischer Messungen im oberflaechennahen Tunnelbau,» Forschung und Praxis, 1988.

[202] A. Steindorfer, «Short term prediction of rock mass behavior in tunnelling by advanced analysis of displacement of displacement monitoring data.,» Schriftenreihe der Gruppe Gotechnik Graz, 1996.

[203] A. Budil, «Laengsverformungen im Tunnelbau,» de *Institute for rock mechanics and tunnelling*, Graz University of Technology Austria, 1996.

[204] W. Schubert, «Erfahrungen bei der Druchoerterung einer Grosstoerung im Inntaltunnel,» Felsbau, 1993.

[205] A. Steindorfer y W. Schubert, «Application of new methods of monitoring data analysis for short term prediccion in tunnelling,» de *Proc 23rd General Assembly of the Inter.* , Rotterdam, Tunnelling Association (ITA), 1997.

[206] K. Grossauer, «Expert system development for the evaluation and interpretation of displacement monitoring data in tunneling,» de *Institute for rock mechanics and tunnelling*, Austria, Graz University of Technology Austria, 2009.

[207] A. Steindorfer y W. Schubert, «Problemorientierte Auswertung geotechnischer Messungen,» Felsbau, 1995.

[208] W. Aldrian, «Beitrag zum Material verhalten von frueh belastetem Spritzbeton.,» Leoben university, 1999.

[209] W. Schubert, «Beitrag zum rheologischen Verhalten von Spritzbeton,» Felsbau, 1988, pp. 150-153.

[210] P. Hellmich, «Shoetree as a part of the new Austrian tunnelling method: from the thermochemomechanical material modelling to sructural analysis and safety assessment of tunnels,» Vienna, University of Technology: Vienna, 1999.

[211] C. Hellmich, J. Macht y H. Mang, «Ein hybrides Verfahren zur Bestimmung der Ausalastung von Spritzbetonschalen auf der Basis von In-situ-Verschiebungsmessungen und termo-chemo-mechanischer Materialmodellierung,» Felsbau, 1999, pp. 307-323.

[212] S. Scheiner y C. Hellmich, «Continuum microelasticity model for aging basic creep of early-age concrete.,» *Journal of Engineering Mechanics,* pp. 444-457, 2009.

[213] S. Ullah, B. Pichler y C. Hellmich, «Modelling ground-shell contact forces in NATM tunneling based on three-dimensional displacement measurements.,» *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,* pp. 444-457, 2013.

[214] S. Ullah, «Shell-specific interpolationof measured 3D displacements for michomechanicals-based sensitivity analyses.,» nº Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech., pp. 279-314, 2010.

[215] M. Brandtner, B. Moritz y P. Schubert, «On the callenge of evaluating stresses in a shotcret lining.,» Felsbau, 2007, pp. 93-98.

[216] M. Brandtner, B. Moritz y C. Seywald, «Insight into the mode of action by evaluation stresses in the shorcrete lining,» de *2nd International Conference on Computational Methods in Tunneling*, Aedificatio: Bochum, 2009.

[217] B. Mortiz y M. Brandtner, «Yet another way of calculating stresses in a shotcrete lining,» de *International Conference Shotcrete for Underground Support XI*, Davos, 2009.

[218] R. Rokahr y R. Zachow, «Advanced observation techniques for sophisticated shallow tunnel projects.,» de *Geomechanik und Tunnelbau*, 1997, pp. 466-476.

[219] W. Schubert y B. Moritz, «Displacement monitoring in tunnels an overview.,» Felsbau, 2002, pp. 7-15.

[220] S. Torabi, M. Ataei y M. Javanshir, «Application of Schmidt hammer rebound number for estimating rock strenght under specific geological conditions.,» *Journal of Mining and Environment,* 2011.

[221] Universidad del Quindío, Manual para el diseño, construcción, operación y mantenimiento de túneles de carretera., Bogotá D.C: Universidad del Quindío, 2015.

[222] Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca - CAR, Guía para la explotación, mitigación y recuperación de canteras. Tomo I y II., Bogotá: CAR, 2009.

[223] International Society of Explosives Engineers, Manual del Especialista en Voladuras. 17a Edición., Cleveland, Ohio: ISEE, 2008.

[224] E. Lopez Jimeno, C. López Jimeno y P. García Bermudez, Manual de perforación y voladura de rocas, Madrid, España, 2003.

[225] C. Lopez Jimeno, Manual de túneles y obras subterráneas, Madrid, España: Cegal, 2011.

[226] C. Lopez Jimeno, E. Lopez Jimeno y P. García Bermudez, Manual de voladuras en túneles, Madrid, España, 2014.

[227] J. O. Bickel, T. R. Kuesel y Erwin, Tunnel Engineering Handbook, London: Kluwer Academic Publisher Boston Idordrechtl, 2004.

[228] FIDIC, Emerald Book, Conditions of contract for Underground Works,, The Geotechnical Baseline Report, Appendix A,, p. 85.

[229] ITIG, A code of practice for risk management of tunnel works, 2019.

[230] Suescún Casallas, Luis Camilo, «Modelación analítica y numérica para predicción y calibración de caudales de infiltración en obras subteráneas,» Bogotá DC Colombia, 2016.

[231] Correa Arroyave Alvaro , Caracterización de rocas y ensayos de laboratorio, Bogotá DC: Universidad Nacional de Colombia, 2000.

[232] C. A. Álvaro, Métodos recomendados por la ISRM para la caracterización de rocas en el laboratorio, Bogotá D.C: Sociedad Colombiana de Gotécnia, 2013.

[233] C. A. Álvaro, «Materiales de Excavación de Reutilización Industrial - MERI,» *Anales de Ingeniería,* vol. 944, pp. 35, 36, 2019.

[234] World Road Association Mondiale de la Route, Manual de Túneles de Carretera PIARC, Paris Francia: AIPCR, 2019.

[235] Dirección General de Crédito Público y Tesoro Nacional, «Metodología de valoración de obligaciones contingentes para proyectos de infraestructura: caso colombiano,» Bogotá, 2020.

[236] Dirección General de Carreteras de España, «Metodología de inspección de Túneles,» Circular 27 de 2008, Madrid España, 2008.

[237] Arcila, M. García, J., Montejo, J., Eraso, J., Valcarcel, J., Mora, M., Viganò, D., Pagani, M. y Díaz, F., «Modelo nacional de amenaza sísmica para Colombia",» Servicio Geológico Colombiano y Fundación Global Earthquake Model, Bogotá Colombia, 2020.

[238] L. F. C. &. L. P. Andrés, «Planificación, proyecto y construcción de túneles de gran longitud,» *Escola Tecnica Superior d´enginyers de camins,* 2012.

[239] Germán Pardo & Antonio J. Rodríguez, «Recomendaciones Técnicas al Revestimiento para túneles viales, en beneficcio de la seguridad, sostenibilidad y su vida útil,» Bogotá Colombia, 2021.

[240] CE54/2004, T. E. P. a. o. t. Council, - Directive 2004/54/EC, Official Journal of the European Union L 167, 29 April 2004 .

[241] PIARC. A. M. d. l. Carretera, factores humanos y seguridad de los túneles de carretera desde el punto de vista de los usuarios, La defense, Francia, 2014.

11.2 INDICE DE TABLAS

TABLA 1-1. (A) LEYES COLOMBIANAS APLICABLES A PROYECTOS DE INFRAESTRUCTURA VIAL 1-18
TABLA 1-2. (A) DECRETOS NACIONALES APLICABLES A PROYECTOS DE INFRAESTRUCTURA VIAL 1-19
TABLA 1-3. RESOLUCIONES EMITIDAS POR EL MINISTERIO DE TRANSPORTE. 1-20
TABLA 1-4. (A) OTRAS RESOLUCIONES APLICABLES A PROYECTOS 1-21
TABLA 1-5. MARCO JURÍDICO NACIONAL EN MATERIA DE SOSTENIBILIDAD 1-22
TABLA 1-6. MANUALES Y NORMAS APLICABLES A PROYECTOS DE INFRAESTRUCTURA VIAL 1-23
TABLA 1-7. DOCUMENTOS CONPES DE POLÍTICAS, PROYECTOS Y LINEAMIENTOS APLICABLES 1-24
TABLA 2-1. CLASIFICACIÓN DE TÚNELES VIALES POR COBERTURA EN COLOMBIA 2-37
TABLA 4-1. IMPACTO SOCIOECONÓMICO A ACUEDUCTOS COMUNALES POR POSIBLE ABATIMIENTO 4-84
TABLA 4-2. LEVANTAMIENTO DE ACTAS DE VECINDAD CON OCASIÓN DE ACTIVIDADES DE VOLA EN TÚNELES 4-85
TABLA 4-3. IMPACTO A LAS CADENAS PRODUCTIVAS Y UNIDADES ECONÓMICAS CON ARRAIGO EN EL ÁREA 4-85
TABLA 4-4. IMPACTO POR VÍAS QUE QUEDAN EN DESUSO EN PROCESO DE CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES 4-86
TABLA 4-5. IMPACTOS EN LAS COMUNIDADES POR CAMBIOS EN DINÁMICAS DE TRANSITO 4-86
TABLA 4-6. CONFINAMIENTO 4-87
TABLA 5-1. PARÁMETROS BÁSICOS A ANALIZAR EN MUESTRAS DE AGUA SUBTERRÁNEA 5-108
TABLA 5-2. CONSTITUYENTES FUNDAMENTALES Y SECUNDARIOS DEL AGUA SUBTERRÁNEA 5-108
TABLA 5-3. RECOMENDACIONES PARA LA RED DE MONITOREO DE AGUA SUBTERRÁNEA 5-110
TABLA 5-4. APLICABILIDAD DE ALGUNOS MÉTODOS GEOFÍSICOS EN LA EXPLORACIÓN PARA TÚNELES [69-72] 5-133
TABLA 5-5. EJEMPLO DE PARÁMETROS RELEVANTES DEPENDIENDO DEL TIPO DE MATERIAL 5-142
TABLA 6-1. DISTANCIA DE SEGURIDAD EN TÚNELES [99] 6-163
TABLA 6-2. CORRECCIÓN DE LA DISTANCIA DE PARADA SEGÚN LA PENDIENTE [99] 6-164
TABLA 6-3. PENDIENTES MÁXIMAS PARA TÚNELES VIALES DE CARRETERA EN COLOMBIA 6-166
TABLA 6-4. RADIOS MÍNIMOS VERTICALES [100] 6-166
TABLA 6-5 SECCIÓN TRANSVERSAL DE LOS TÚNELES DE CARRETERA EN COLOMBIA 6-167
TABLA 6-6. DISTANCIAS DE REFERENCIA PARA LAS BAHÍAS DE PARQUEO. 6-168
TABLA 6-7. CATEGORÍAS BÁSICAS DE TIPOS DE COMPORTAMIENTO DEL TERRENO [101] 6-185
TABLA 6-8. VALORES PARA CÁLCULO DE CUELE Y CONTRA CUELE (VER ILUSTRACIÓN 6-16) 6-194
TABLA 6-9. VALORES DEL COEFICIENTE POR EL ÁREA DE PERFORACIÓN DE LA SECCIÓN 6-196
TABLA 6-10. VALORES DE LA PROFUNDIDAD DEL TÚNEL O COBERTURA 6-197
TABLA 6-11. VALORES CORRESPONDIENTES AL RMR BASE 6-197
TABLA 6-12. VALORES CORRESPONDIENTES A ESPACIAMIENTO Y RETAQUE 6-197
TABLA 6-13. VALORES DE LONGITUDES DE PERFORACIÓN EN FUNCIÓN DEL RMR 6-198
TABLA 6-14. VALORES DE RMR (CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA DEL MACIZO ROCOSO) 6-200
TABLA 6-15. CÁLCULO DE DAÑO 6-202
TABLA 6-16. COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA Y CORRESPONDIENTE VARIABLE PARA MONITOREO (MODIF 6-203
TABLA 6-17. VARIABLE PARA MONITOREO Y MÉTODO DE MONITOREO A IMPLEMENTAR, MODIFICADA DE [120] 6-204
TABLA 6-18. RANGO Y FRECUENCIA DE MONITOREO 6-213
TABLA 6-19. FACTORES DE SEGURIDAD PARA ELEMENTOS DE SOPORTE 6-225
TABLA 6-20. VALORES LÍMITE DE CONTENIDO DE SUSTANCIAS NOCIVAS EN EL AGUA SUBTERRÁNEA – 6-240
TABLA 6-21. VALORES LÍMITE PARA EL AGUA SUBTERRÁNEA – ELEMENTOS QUE AFECTAN EL CONCR. LANZ 6-240
TABLA 6-22. DISMINUCIÓN DE LA RESISTENCIA DE LOS MATERIALES DE SOPORTE POR LA PRESENCIA DE SUSTANCIAS AGRESIVAS 6-242
TABLA 6-23. ESPECIFICACIONES DEL GEOTEXTIL NO TEJIDO DE PROTECCIÓN 6-248
TABLA 6-24. ESPECIFICACIONES DE LA MEMBRANA DE IMPERMEABILIZACIÓN 6-249
TABLA 6-25. ESPECIFICACIONES DE LA LÁMINA IMPERMEABLE 6-250
TABLA 6-26. DEFINICIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS E HIDRÁULICAS MÍNIMAS DEL GEOCOMPUESTO 6-257
TABLA 6-27. FORMA Y UNIDADES DE MEDICIÓN 6-258
TABLA 6-28. MÉTODOS DE ANÁLISIS DE TALUDES (MODIFICADA DE [7]) 6-265
TABLA 6-29. FACTORES DE SEGURIDAD 6-266

TABLA 6-30. VALOR DEL COEFICIENTE SÍSMICO DE DISEÑO PARA ANÁLISIS SEUDO ESTÁTICO 6-267
TABLA 7-1. REQUISITOS MÍNIMOS SEGÚN LA CLASE DE TÚNEL 7-294
TABLA 7-2. NIVEL DE TENSIÓN DE TRANSFORMADORES 7-307
TABLA 7-3. FLUJO PROMEDIO DE TRÁFICO PICO [155]. 7-315
TABLA 7-4. MÁXIMA VELOCIDAD DE VEHÍCULOS PESADOS (HGV) EN FUNCIÓN DE LA PENDIENTE [155] 7-316
TABLA 7-5. TIPO DE VENTILACIÓN 7-317
TABLA 8-1. RELEVANCIA DE DIFERENTES MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE DESPLAZAMIENTOS [219] 8-396
TABLA 8-2. SISTEMAS BÁSICOS DE RETIRO DE LA REZAGA EN TÚNELES 8-397
TABLA 1-1. (A) LEYES COLOMBIANAS APLICABLES A PROYECTOS DE INFRAESTRUCTURA VIAL 1-18
TABLA 1-2. (A) DECRETOS NACIONALES APLICABLES A PROYECTOS DE INFRAESTRUCTURA VIAL 1-19
TABLA 1-3. RESOLUCIONES EMITIDAS POR EL MINISTERIO DE TRANSPORTE. 1-20
TABLA 1-4. (A) OTRAS RESOLUCIONES APLICABLES A PROYECTOS 1-21
TABLA 1-5. MARCO JURÍDICO NACIONAL EN MATERIA DE SOSTENIBILIDAD 1-22
TABLA 1-6. MANUALES Y NORMAS APLICABLES A PROYECTOS DE INFRAESTRUCTURA VIAL 1-23
TABLA 1-7. DOCUMENTOS CONPES DE POLÍTICAS, PROYECTOS Y LINEAMIENTOS APLICABLES 1-24
TABLA 2-1. CLASIFICACIÓN DE TÚNELES VIALES POR COBERTURA EN COLOMBIA 2-37
TABLA 4-1. IMPACTO SOCIOECONÓMICO A ACUEDUCTOS COMUNALES POR POSIBLE ABATIMIENTO 4-84
TABLA 4-2. LEVANTAMIENTO DE ACTAS DE VECINDAD CON OCASIÓN DE ACTIVIDADES DE VOLADURAS EN T 4-85
TABLA 4-3. IMPACTO A LAS CADENAS PRODUCTIVAS Y UNIDADES ECONÓMICAS CON ARRAIGO EN EL ÁREA. 4-85
TABLA 4-4. IMPACTO POR VÍAS QUE QUEDAN EN DESUSO EN PROCESO DE CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES 4-86
TABLA 4-5. IMPACTOS EN LAS COMUNIDADES POR CAMBIOS EN DINÁMICAS DE TRANSITO 4-86
TABLA 4-6. CONFINAMIENTO 4-87
TABLA 5-1. PARÁMETROS BÁSICOS A ANALIZAR EN MUESTRAS DE AGUA SUBTERRÁNEA 5-108
TABLA 5-2. CONSTITUYENTES FUNDAMENTALES Y SECUNDARIOS DEL AGUA SUBTERRÁNEA 5-108
TABLA 5-3. RECOMENDACIONES PARA LA RED DE MONITOREO DE AGUA SUBTERRÁNEA 5-110
TABLA 5-4. APLICABILIDAD DE ALGUNOS MÉTODOS GEOFÍSICOS EN LA EXPLORACIÓN PARA TÚNELES [69-72] 5-133
TABLA 5-5. EJEMPLO DE PARÁMETROS RELEVANTES DEPENDIENDO DEL TIPO DE MATERIAL 5-142
TABLA 6-1. DISTANCIA DE SEGURIDAD EN TÚNELES [99] 6-163
TABLA 6-2. CORRECCIÓN DE LA DISTANCIA DE PARADA SEGÚN LA PENDIENTE [99] 6-164
TABLA 6-3. PENDIENTES MÁXIMAS PARA TÚNELES VIALES DE CARRETERA EN COLOMBIA 6-166
TABLA 6-4. RADIOS MÍNIMOS VERTICALES [100] 6-166
TABLA 6-5 SECCIÓN TRANSVERSAL DE LOS TÚNELES DE CARRETERA EN COLOMBIA 6-167
TABLA 6-6. DISTANCIAS DE REFERENCIA PARA LAS BAHÍAS DE PARQUEO. 6-168
TABLA 6-7. CATEGORÍAS BÁSICAS DE TIPOS DE COMPORTAMIENTO DEL TERRENO [101] 6-185
TABLA 6-8. VALORES PARA CÁLCULO DE CUELE Y CONTRA CUELE (VER ILUSTRACIÓN 6-16) 6-194
TABLA 6-9. VALORES DEL COEFICIENTE POR EL ÁREA DE PERFORACIÓN DE LA SECCIÓN 6-196
TABLA 6-10. VALORES DE LA PROFUNDIDAD DEL TÚNEL O COBERTURA 6-197
TABLA 6-11. VALORES CORRESPONDIENTES AL RMR BASE 6-197
TABLA 6-12. VALORES CORRESPONDIENTES A ESPACIAMIENTO Y RETAQUE 6-197
TABLA 6-13. VALORES DE LONGITUDES DE PERFORACIÓN EN FUNCIÓN DEL RMR 6-198
TABLA 6-14. VALORES DE RMR (CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA DEL MACIZO ROCOSO) 6-200
TABLA 6-15. CÁLCULO DE DAÑO 6-202
TABLA 6-16. COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA Y CORRESPONDIENTE VARIABLE PARA MONITOREO DE [120]) 6-203
TABLA 6-17. VARIABLE PARA MONITOREO Y MÉTODO DE MONITOREO A IMPLEMENTAR, MODIFICADA DE [120] 6-204
TABLA 6-18. RANGO Y FRECUENCIA DE MONITOREO 6-213
TABLA 6-19. FACTORES DE SEGURIDAD PARA ELEMENTOS DE SOPORTE 6-225
TABLA 6-20. VALORES LÍMITE DE CONTENIDO DE SUSTANCIAS NOCIVAS EN EL AGUA SUBTERRÁNEA – AFECTACIÓN DEL CONCRETO LANZADO 6-240
TABLA 6-21. VALORES LÍMITE PARA EL AGUA SUBTERRÁNEA – ELEMENTOS QUE AFECTAN EL CONCRETO LANZADO Y EL ACERO 6-240
TABLA 6-22. DISMINUCIÓN DE LA RESISTENCIA DE LOS MATERIALES DE SOPORTE POR LA PRESENCIA DE 6-242
TABLA 6-23. ESPECIFICACIONES DEL GEOTEXTIL NO TEJIDO DE PROTECCIÓN 6-248
TABLA 6-24. ESPECIFICACIONES DE LA MEMBRANA DE IMPERMEABILIZACIÓN 6-249
TABLA 6-25. ESPECIFICACIONES DE LA LÁMINA IMPERMEABLE 6-250
TABLA 6-26. DEFINICIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS E HIDRÁULICAS MÍNIMAS DEL GEOCOMPUESTO 6-257
TABLA 6-27. FORMA Y UNIDADES DE MEDICIÓN 6-258
TABLA 6-28. MÉTODOS DE ANÁLISIS DE TALUDES (MODIFICADA DE [7]) 6-265
TABLA 6-29. FACTORES DE SEGURIDAD 6-266

TABLA 6-30. VALOR DEL COEFICIENTE SÍSMICO DE DISEÑO PARA ANÁLISIS SEUDO ESTÁTICO 6-267
TABLA 7-1. REQUISITOS MÍNIMOS SEGÚN LA CLASE DE TÚNEL 7-294
TABLA 7-2. NIVEL DE TENSIÓN DE TRANSFORMADORES 7-307
TABLA 7-3. FLUJO PROMEDIO DE TRÁFICO PICO [155]. 7-315
TABLA 7-4. MÁXIMA VELOCIDAD DE VEHÍCULOS PESADOS (HGV) EN FUNCIÓN DE LA PENDIENTE [155] 7-316
TABLA 7-5. TIPO DE VENTILACIÓN 7-317
TABLA 8-1. RELEVANCIA DE DIFERENTES MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE DESPLAZAMIENTOS [219] 8-396
TABLA 8-2. SISTEMAS BÁSICOS DE RETIRO DE LA REZAGA EN TÚNELES 8-397

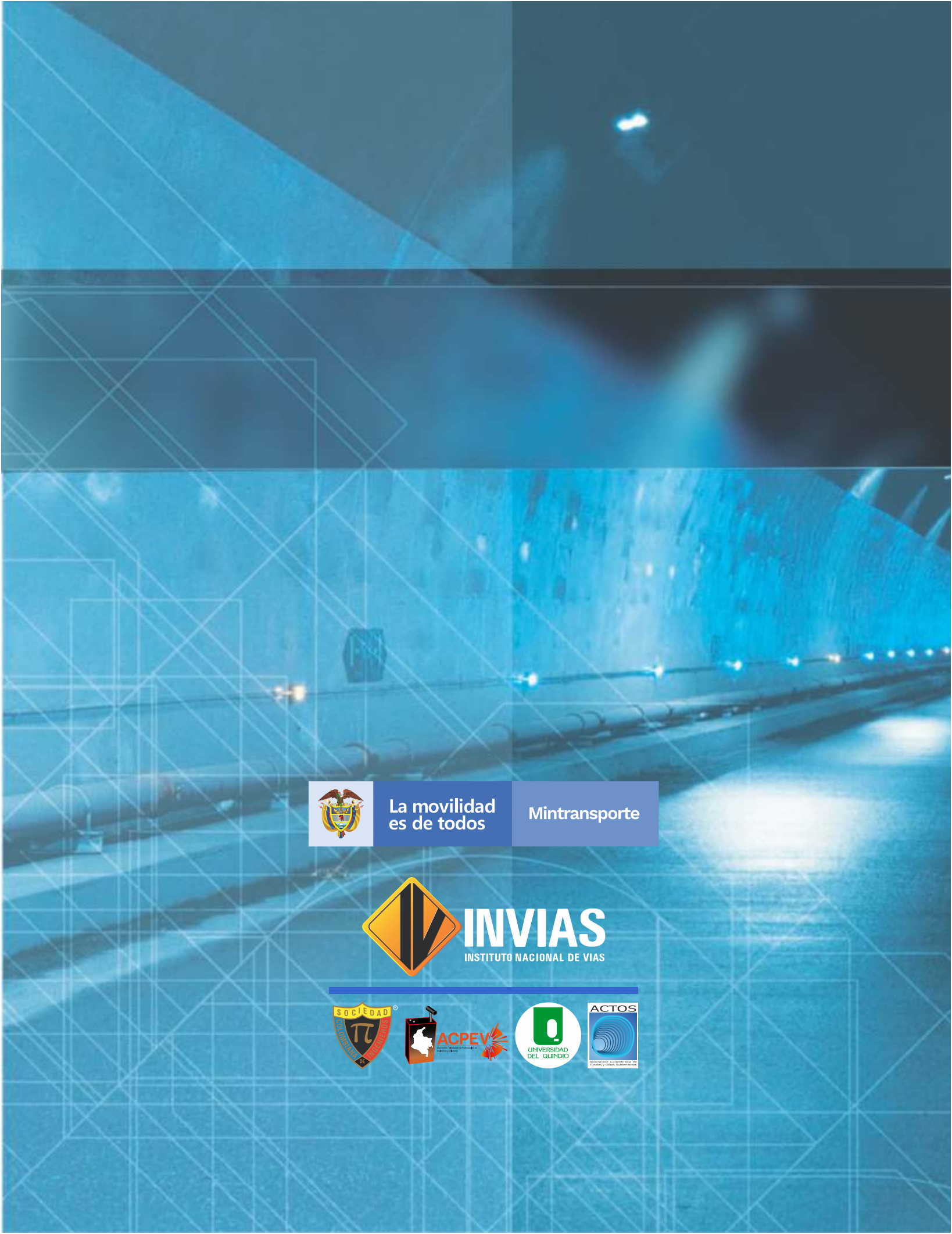
11.3 ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

ILUSTRACIÓN 2-1. CLASIFICACIÓN DE TÚNELES VIALES POR LONGITUD Y TPD EN COLOMBIA 2-37
ILUSTRACIÓN 3-1. FLUJOGRAMA DE EVAL DE RIESGO PARA SU ANÁLISIS, VALORACIÓN Y REDUCCIÓN 3-59
ILUSTRACIÓN 5-1. ESQUEMA METODOLÓGICO PARA UN MODELO NUMÉRICO [230]. 5-118
ILUSTRACIÓN 5-2. REPRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA EXPLORACIÓN CON PERFORACIONES Y COMBINADA. ARRIBA: EXPLORACIÓN CON PERFORACIONES; ABAJO: CON POZOS ADICIONALES A LAS PERFORACIONES 5-140
ILUSTRACIÓN 6-1. REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA PARA EL CÁLCULO DEL RADIO DE CURVAT [100].....6-164
ILUSTRACIÓN 6-2. SECCIÓN TRANSVERSAL DE SERVICIO DE TÚNELES CARRETEROS EN COLOMBIA 6-167
ILUSTRACIÓN 6-3. LOCALIZACIÓN DE LAS BAHÍAS DE PARQUEO EN TÚNELES BIDIRECCIONALES CON DISTANCIA DE REFERENCIA CE54/2004 [239]. 6-168
ILUSTRACIÓN 6-4. SECCIÓN TRANSVERSAL DE SERVICIO DE LAS BAHÍAS DE PARQUEO.....6-169
ILUSTRACIÓN 6-5. BAHÍA DE PARQUEO TÚNEL UNIDIRECCIONAL (DIMENSIONES EN PLANTA) 6-170
ILUSTRACIÓN 6-6. SECCIÓN TRANSVERSAL DE SERVICIO DE LAS GALERÍAS DE EVACUACIÓN.....6-171
ILUSTRACIÓN 6-7. DIMENSIONES DE REFERENCIA DEL NICHO DE EMERGENCIA.....6-173
ILUSTRACIÓN 6-8. EJEMPLOS DE ARMARIOS.....6-174
ILUSTRACIÓN 6-9. DIMENSIONES TÍPICAS DE NICHO DE CONTROL DE INCENDIO (PLANTA) 6-175
ILUSTRACIÓN 6-10. DIMENSIONES DE REFERENCIA PARA EL NICHO DE CONTROL DE INCEND (PERFIL) ...6-175
ILUSTRACIÓN 6-11. CONFIGURACIÓN TÍPICA DEL NICHO ELÉCTRICO 6-176
ILUSTRACIÓN 6-12. DIAGRAMA DE FLUJO PARA EL DISEÑO GEOMECÁNICO DE TÚNELES [105].....6-178
ILUSTRACIÓN 6-13. NOMENCLATURA PROPUESTA PARA LOS SISTEMAS DE SOPORTE.....6-184
ILUSTRACIÓN 6-14. CONFIGURACIÓN DEL DISEÑO GENERAL DE PERFORACIÓN Y VOLAD EN UN TÚNEL. .6-191
ILUSTRACIÓN 6-15. POSIBLES POSICIONES DE LOS BARRENOS DEL CUELE.....6-192
ILUSTRACIÓN 6-16. ESQUEMA Y DISTRIBUCIÓN DE CUELE Y CONTRA CUELE (VER TABLA 6-8) 6-193
ILUSTRACIÓN 6-17. ESQUEMA DE DISEÑO DE UNA VOLADURA CON CUELE CENTRAL.....6-194
ILUSTRACIÓN 6-18. ESQUEMAS DE VOLADURA, EN RELACIÓN RMR I, 125 BARRENOS EN PRECORTE.....6-198
ILUSTRACIÓN 6-19. ESQUEMAS DE VOLADURA, EN RELACIÓN RMR II, 105 BARRENOS EN PRECORTE.....6-199
ILUSTRACIÓN 6-20. ESQUEMAS DE VOLADURA, EN RELACIÓN RMR III, 91 BARRENOS EN PRECORTE.....6-199
ILUSTRACIÓN 6-21. ESQUEMA DE MONITOREO EN SUPERFICIE PARA TÚNELES CON BAJA COBERTURA (MODIFICADA DE [120]) 6-210
ILUSTRACIÓN 6-22. MACIZO ROCOSO CON BLOQUES, POTENCIAL DE SOBRE EXCAVACIONES 6-211
ILUSTRACIÓN 6-23. MACIZO ROCOSO CON PLANOS DE DEBILIDAD (FOLIACIÓN, ESTRATIFICACIÓN) 6-211
ILUSTRACIÓN 6-24. MACIZO ROCOSO CON POTENCIAL EXPANSIVO.....6-212
ILUSTRACIÓN 6-25. ESQUEMA DE ZONAS Y DISTANCIAS PARA MONITOREO (MODIFICADA DE [120]).....6-213
ILUSTRACIÓN 6-26. INTERCONEXIONES ASIMÉTRICAS A EVITAR 6-216
ILUSTRACIÓN 6-27. ESQUEMA DEL SISTEMA DE INTERCONEXIÓN PARA EL MÉTODO DE “LOCALIZACIÓN LIBRE DE LA ESTACIÓN”.....6-216
ILUSTRACIÓN 6-28. COMPONENTES DE LOS PUNTOS DE MONITOREO DE DESPLAZAMIENTO.....6-217
ILUSTRACIÓN 6-29. ESQUEMA DE INSTALACIÓN PARA PUNTOS DE MONITOREO DE DESPLAZAMIENTO 6-218
ILUSTRACIÓN 6-30. PERNO CON PROTECCIÓN E INSTALACIÓN EN EL TERRENO.....6-219
ILUSTRACIÓN 6-31. ESQUEMA PARA EL MONITOREO DE TÚNELES CON SECCIÓN SUPERIOR, ...6-219
ILUSTRACIÓN 6-32. ESQUEMA PARA EL MONITOREO DE TÚNELES CON GALERÍAS LATERALES 6-220
ILUSTRACIÓN 6-33. ESQUEMA DE INSTALACIÓN DEL PIEZÓMETRO DE TUBO ABIERTO 6-222
ILUSTRACIÓN 6-34. ESQUEMA DE INSTALACIÓN DEL PIEZÓMETRO DE CABEZA ABIERTA 6-223
ILUSTRACIÓN 6-35. ESQUEMA DE INSTALACIÓN DE PIEZÓMETRO NEUMÁTICO.....6-223
ILUSTRACIÓN 6-36. DESARROLLO DE LA RESISTENCIA DEL CONCRETO NEUMÁTICO PARA TÚNELES 6-226
ILUSTRACIÓN 6-37. SISTEMA GENERAL DE INYECCIONES.....6-229
ILUSTRACIÓN 6-38. CÁLCULO DE SISTEMA DE ENFILAJE COMO UNA VIGA SIMPLEMENTE APOYADA.....6-231
ILUSTRACIÓN 6-39. VISUALIZACIÓN DEL ANÁLISIS DE SILO O CHIMENEA 6-231
ILUSTRACIÓN 6-40. DISTRIBUCIÓN DE PERNOS EN EL FRENTE DE EXCAVACIÓN.....6-232
ILUSTRACIÓN 6-41. CONFIGURACIÓN DE REVESTIMIENTO DEFINITIVO.....6-236
ILUSTRACIÓN 6-42. MEMBRANA DE PVC EN UN TÚNEL EXCAVADO CON AGUA DE INFILTRACIÓN 6-244
ILUSTRACIÓN 6-43. MEMBRANA DE PVC EN UN TÚNEL EXCAVADO CON AGUA DE INFILTRACIÓN 6-245
ILUSTRACIÓN 6-44. TOLERANCIA MÁXIMA DE RUGOSIDAD PARA LA INSTALACIÓN DE LA MEMBRANA 6-246
ILUSTRACIÓN 6-45. CORTE Y RELLENO DE VÁSTAGO Y LA PLACA DE UN PERNO 6-247
ILUSTRACIÓN 6-46. IMPERMEABIL. CON MEMBRANA DE PVC + GEOTEXTIL ADHERIDO Y ANCLAJES.....6-251
ILUSTRACIÓN 6-47. SISTEMA DE COMPARTIMIENTOS Y VÁLVULAS DE INYECCIÓN PARA REPARACIÓN DE UNA IMPERMEABILIZACIÓN CON MEMBRANA DE PVC 6-252
ILUSTRACIÓN 6-48. ANCLAJE DEL GEOTEXTIL Y SOLDADURA DE LA MEMBRANA.....6-254
ILUSTRACIÓN 6-49. DETALLE DEL DRENAJE EN TÚNELES CONVENCIONALES 6-257
ILUSTRACIÓN 6-50. TRASLAPO ESPECIAL CON CANAL CENTRAL 6-259

ILUSTRACIÓN 6-51. TRASLAPO CON CANAL CENTRAL 6-259
ILUSTRACIÓN 6-52. CONTROL DE SOLDADURA 6-260
ILUSTRACIÓN 7-1. CLASIFICACIÓN DE LOS TÚNELES VIALES PARA COLOMBIA 7-295
ILUSTRACIÓN 7-2. SISTEMAS ELECTROMECÁNICOS, MODELO DE TRES CAPAS 7-296
ILUSTRACIÓN 7-3. SISTEMA DE AUTOMATIZACIÓN 7-300
ILUSTRACIÓN 7-4. ARQUITECTURA DE SISTEMA DE AUTOMATIZACIÓN 7-301
ILUSTRACIÓN 7-5. VENTILACIÓN NATURAL 7-312
ILUSTRACIÓN 7-6. VENTILACIÓN LONGITUDINAL CON JET FANS O VENTILADORES A CHORRO 7-314
ILUSTRACIÓN 7-7. VENTILACIÓN TRANSVERSAL 7-315
ILUSTRACIÓN 7-8. DIFERENCIA ENTRE ILUMINACIÓN NORMAL Y DE EMERGENCIA 7-324
ILUSTRACIÓN 7-9. SISTEMA DE DETECCIÓN DE INCENDIOS 7-329
ILUSTRACIÓN 7-10. SELECCIÓN DE EQUIPAMIENTO DE CONTROL DE TRÁFICO 7-331
ILUSTRACIÓN 7-11. EQUIPO LIMITADO. 7-334
ILUSTRACIÓN 7-12. EQUIPAMIENTO DE TRÁFICO MÍNIMO 7-335
ILUSTRACIÓN 7-13. EQUIPAMIENTO DE TRÁFICO BÁSICO 7-336
ILUSTRACIÓN 7-14. EQUIPAMIENTO DE TRÁFICO EXTENDIDO 7-337
ILUSTRACIÓN 7-15. SEÑALIZACIÓN DEL NOMBRE DEL TÚNEL Y DISTANCIA [178] 7-338
ILUSTRACIÓN 7-16. CIRCULACIÓN CON LUCES BAJAS [178] 7-338
ILUSTRACIÓN 7-17. VELOCIDAD MÁXIMA [178] 7-338
ILUSTRACIÓN 7-18. PROHIBIDO ADELANTAR [178] 7-339
ILUSTRACIÓN 7-19. ALTURA MÁXIMA PERMITIDA [178] 7-340
ILUSTRACIÓN 7-20. ESPACIAMIENTO [178] 7-340
ILUSTRACIÓN 7-21. SEMÁFOROS [178] 7-341
ILUSTRACIÓN 7-22. SEÑALIZACIÓN COMUNICACIONES POR RADIO [178] 7-341
ILUSTRACIÓN 7-23. SEÑALES DE TELÉFONO SOS Y EXTINTOR [178] 7-342
ILUSTRACIÓN 7-24. SEÑALES EN BAHÍAS DE PARQUEO 7-342
ILUSTRACIÓN 7-25. ESQUEMA GENERAL DEL CONTROL DE GÁLIBO 7-347
ILUSTRACIÓN 7-26. CCTV Y DAI 7-350
ILUSTRACIÓN 7-27. SISTEMA SOS 7-352
ILUSTRACIÓN 7-28. EJEMPLOS DE ARMARIOS Y POSTES SOS 7-353
ILUSTRACIÓN 7-29. SISTEMA DE MEGAFONÍA 7-355
ILUSTRACIÓN 7-30. INTELIGIBILIDAD, MEDICIÓN DEL “SPEECH TRANSMISSION INDEX” (STI) 7-356
ILUSTRACIÓN 8-1. DIAGRAMA DE FLUJO PARA EL CONTROL DURANTE LA CONS (MODIF [101]) 8-366
ILUSTRACIÓN 8-2. DESARROLLO TÍPICO DE DESPLAZAMIENTOS RADIALES (CORTESÍA DE OEGG) 8-381
ILUSTRACIÓN 8-3. FORMA TÍPICA DE UN DIAGRAMA DE TIEMPO – DESPLAZAMIENTO, ESTABILIZACIÓN DE LA SECCIÓN – AVANCE CONTINUO (CORTESÍA DE OEGG) 8-382
ILUSTRACIÓN 8-4. FORMA TÍPICA DE UN DIAGRAMA DISTANCIA-DESPLAZAMIENTO, ESTABILIZACIÓN DE LA SECCIÓN – AVANCE CONTINUO (CORTESÍA DE OEGG) 8-382
ILUSTRACIÓN 8-5. DESARROLLO DE DESPLAZAMIENTOS EN CASO DE AVANCES VARIABLES [192] 8-383
ILUSTRACIÓN 8-6. DESARROLLO DE DESPLAZAMIENTOS EN CASO DE DETENCIÓN TEMPORAL DEL AVANCE (CORTESÍA DE OEGG) 8-384
ILUSTRACIÓN 8-7. FASES DE EXCAVACIÓN - SECCIÓN TRANSVERSAL TÍPICA 8-385
ILUSTRACIÓN 8-8. FASES DE EXCAVACIÓN - SECCIÓN LONGITUDINAL 8-385
ILUSTRACIÓN 8-9. FASES DE EXCAVACIÓN - SECCIÓN TRANSVERSAL CON NÚCLEO CENTRAL 8-386
ILUSTRACIÓN 8-10. DIAGRAMA TIEMPO-DESPLAZAMIENTO PARA LA EXCAVACIÓN DE SECCIÓN SUPERIOR Y BANCA (CORTESÍA DE OEGG) 8-386
ILUSTRACIÓN 8-11. INFLUENCIA DEL CIERRE DEL ANILLO EN EL DESARROLLO DE DESPLAZAMIENTOS (CORTESÍA DE OEGG) 8-387
ILUSTRACIÓN 8-12. VECTORES DE DESPLAZAMIENTOS DE SECCIONES TRANSVERSAL I [201] 8-388
ILUSTRACIÓN 8-13. VECTOR DE DESPLAZAMIENTOS, INFLUENCIA DE UNA ESTRUCTURA GEOLÓGICA EN EL COMPORTAMIENTO [199] 8-388
ILUSTRACIÓN 8-14. DIAGRAMA DE CURVAS DE DEFLEXIÓN, CLAVE DEL TÚNEL [201, 202] 8-389
ILUSTRACIÓN 8-15. DIAGRAMA DE CURVAS DE DEFLEXIÓN CON LÍNEAS DE TENDENCIA [201, 202] 8-389
ILUSTRACIÓN 8-16. DIAGRAMA DE CURVAS DE DEFLEXIÓN CON LÍNEAS DE TENDENCIA, INFLUENCIA DE UNA ZONA DE FALLA [202] 8-390
ILUSTRACIÓN 8-17. EVALUACIÓN DE ASENTAMIENTOS SUPERFICIALES Y DESPLAZAMIENTOS EN LA CLAVE DEL TÚNEL [201] 8-391
ILUSTRACIÓN 8-18. DESARROLLO DE DESPLAZAMIENTOS EN LA CLAVE Y PARED IZQUIERDA DEL TÚNEL (MODIFICADO DE [201]) 8-391
ILUSTRACIÓN 8-19. LÍNEAS DE TENDENCIA CON LA TASA DE DESPLAZAMIENTO CLAVE-PARED IZQUIERDA Y CLAVE-PARED DERECHA DEL TÚNEL [202] 8-392
ILUSTRACIÓN 8-20. EJEMPLO DE LA TENDENCIA DEL VECTOR DE DESPLAZAMIENTOS [197 - 198] 8-393
ILUSTRACIÓN 8-21. LÍNEAS DE TENDENCIA TÍPICAS AL ATRAVESAR UNA ZONA DE FALLA [206] 8-394
ILUSTRACIÓN 8-22. REPRESENTACIÓN ESTEREOGRÁFICA DE VECTORES DE DESPLAZAMIENTO (HEMISFERIO INFERIOR) [207] 8-395

11.4 ÍNDICE DE FOTOS

FOTO 1-1 TÚNEL DE LA LÍNEA, PROYECTO CRUCE DE LA CORDILLERA CENTRAL 2020 1-15
FOTO 2-1 PROYECTO CRUCE DE LA CORDILLERA CENTRAL, TÚNEL OSO DE ANTEOJOS 2-31
FOTO 3-1. PROYECTO TÚNEL DEL TOYO, VÍAS MAR 1 Y MAR 2 AL OCCIDENTE DE ANTIOQUIA 3-39
FOTO 3-2. CONSTRUCCIÓN TÚNELES DE MULATOS, COMUNICA A LOS MUNICIPIOS DE BOLOMBOLO, LA PINTADA Y PRIMAVERA AL SUR DE ANTIOQUIA.....3-49
FOTO 4-1. PROYECTO CRUCE DE LA CORDILLERA CENTRAL, COSTADO OCCIDENTAL A CALARCÁ.....4-63
FOTO 4-2. PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES - PTARI, TÚNEL LA LÍNEA.....4-65
FOTO 4-3. RECUPERACIÓN QUEBRADA LA GATA, CAJAMARCA TOLIMA.....4-67
FOTO 4-4. ZONA DE DISPOSICIÓN DE MATERIALES SOBRANTES DE EXCA ZODMES, TÚNEL LA LÍNEA.....4-71
FOTO 4-5. COMPENSACIONES SIEMBRA DE ÁRBOLES (BOSQUES CONSOLIDADOS), TÚNEL LA LÍNEA.....4-77
FOTO 4-6. PEAJE Y ZODME NARANJAL - TÚNEL RENACER, VÍA BOGOTÁ VILLAVICENCIO 4-79
FOTO 4-7. COMUNIDAD Y PROYECTO – VÍA BOGOTÁ VILLAVICENCIO - GUAYABETAL CUNDINAMARCA 4-83
FOTO 4-8. PUENTE SAN MIGUEL, ENTRE TÚNELES 14 Y 15, VÍA BOGOTÁ VILLAVICENCIO 4-90
FOTO 5-1. ECOSISTEMA CRUCE CORDILLERA CENTRAL, TÚNEL DE LA LÍNEA, CAJAMARCA TOLIMA.....5-97
FOTO 5-2. PROCESO CONSTRUCTIVO, TÚNEL GUILLERMO GAVIRIA ECHEVERRI (TÚNEL DEL TOYO) 5-111
FOTO 5-3. TÚNEL VÍA CISNEROS LOBOGUERRERO, PROYECTO BUGA - BUENAVENTURA 5-121
FOTO 5-4. INVESTIGACIÓN DE CAMPO E INFORMACIÓN SECUNDARIA, CRUCE CORDILLERA CENTRAL 5-124
FOTO 5-5. CRUCE CORDILLERA CENTRAL, CAJAMARCA TOLIMA, INVESTIGACIÓN DE CAMPO 5-153
FOTO 6-1. PROYECTO TÚNEL CRUCE DE LA CORDILLERA CENTRAL – GALERÍA 9A 6-158
FOTO 6-2. CRUCE CORDILLERA CENTRAL, TÚNEL DE LA LÍNEA. 6-179
FOTO 6-3. CRUCE CORDILLERA CENTRAL, LABORES DE PERFORACIÓN Y VOLAD TÚNEL DE LA LÍNEA.....6-189
FOTO 6-4. SISTEMA CONVENCIONAL DE EXCAVACIÓN – PERFORACIÓN Y VOLADURA DE ROCA 6-193
FOTO 6-5. IMPERMEABILIZACIÓN PARA REVESTIMIENTO DEFINITIVO, TÚNEL MULATOS 6-228
FOTO 6-6. REVESTIMIENTO DE CAPA DOBLE RCD, TÚNEL MULATOS Y TÚNEL DE LA LÍNEA 6-243
FOTO 6-7. CAJA DE INSPECCIÓN PARA INYECCIÓN DE RESINAS EN UN SIST. DE COMPARTIMENTACIÓN..6-253
FOTO 6-8. CONSTRUCCIÓN Y ADECUACIÓN PORTAL TÚNEL DE LA LÍNEA 6-266
FOTO 6-9. GEOMETRÍA, EQUIPAMIENTO Y ESTADO FINAL DEL TÚNEL – CRUCE CORDILLERA CENTRAL....6-278
FOTO 7-1. NARANJAL - TÚNEL RENACER, VÍA BOGOTÁ VILLAVICENCIO 7-287
FOTO 7-2. ASPECTO FINAL, TÚNEL 6 VÍA BOGOTÁ VILLAVICENCIO.....7-293
FOTO 7-3. GALIBO, SISTEMA DE TÚNELES, CRUCE DE LA CORDILLERA CENTRAL 7-302
FOTO 7-4. SISTEMA DE VENTILACIÓN, TÚNEL DE LA LÍNEA 7-311
FOTO 7-5. DISEÑO E INSTALACIÓN DE SISTEMA DE VENTILACIÓN, TÚNEL DE LA LÍNEA 7-320
FOTO 7-6. SISTEMA DE ILUMINACIÓN, TÚNEL DE LA LÍNEA.....7-325
FOTO 7-7. GALERÍA DE ESCAPE, TÚNEL RENACER, QUETAME CUNDINAMARCA.....7-330
FOTO 7-8. SEÑALES DE APROXIMACIÓN Y PAISAJISMO AL INGRESO DEL TÚNEL LOS COLIBRÍES 7-333
FOTO 7-9. SEÑALES DE APROXIMACIÓN VISTA DESDE EL PORTAL TÚNEL 7 IZQUIERDO HACIA PORTAL SALIDA TÚNEL 6 IZQUIERDO, TÚNELES PROYECTO BUGA BUENAVENTURA.....7-339
FOTO 7-10. ILUMINACIÓN TÚNEL VÍA CISNEROS LOBOGUERRERO, PROYECTO BUGA BUENAVENTURA 7-343
FOTO 8-1. PROYECTO CRUCE CORDILLERA CENTRAL, SOSTENIMIENTO GALERÍA DE EVACUACIÓN 8-364
FOTO 8-2. MANEJO DE PASO CRÍTICO, SECTOR LA SOLEDAD, CRUCE CORDILLERA CENTRAL 8-368
FOTO 8-3. DEPÓSITO TEMPORAL DE EXPLOSIVOS BAJO TIERRA, DEMARCACIÓN 8-372
FOTO 8-4. SECTOR CRÍTICO LA SOLEDAD, CRUCE CORDILLERA CENTRAL EN OBSERVACIÓN 8-379
FOTO 9-1. PORTALES DE TÚNELES 5 Y 6 VÍA BOGOTÁ VILLAVICENCIO, QUETAME CUNDINAMARCA 9-402
FOTO 9-2. CONSTRUCCIÓN Y ADECUACIÓN CENTRO DE CONTROL, TÚNEL DE LA LÍNEA.....9-408
FOTO 9-3. CONSTRUCCIÓN Y ADECUACIÓN CENTRO DE CONTROL, TÚNEL DE LA LÍNEA.....9-413
FOTO 9-4. SISTEMAS S.O.S. Y CONTROL CONTRA INCENDIOS, TÚNEL DE LA LÍNEA.....9-418
FOTO 9-5. OPERACIÓN DEL TÚNEL DE LA LÍNEA, PROYECTO CRUCE CORDILLERA CENTRAL.....9-422


La movilidad
es de todos
Mintransporte
INVIAS
INSTITUTO NACIONAL DE VIAS
SOCIEDAD COLOMBIANA DE INGENIEROS
ACPEV
UNIVERSIDAD DEL QUINDIO
ACTOS