



# GUÍA PARA EL DESARROLLO DE OBRAS SUBTERRÁNEAS

EN COSTA RICA

2026

OBRAS SUBTERRÁNEAS PARA UNA  
MAYOR Y MEJOR MOVILIDAD





# GUÍA PARA EL DESARROLLO DE OBRAS SUBTERRÁNEAS EN COSTA RICA

OBRAS SUBTERRÁNEAS PARA UNA MAYOR Y MEJOR MOVILIDAD

GDOS-CR 2026

**REDACTOR PRINCIPAL**

Ing. Marco Antonio Tapia Balladares

**REVISORES PRINCIPALES**

Ing. Marlon Jiménez Jiménez  
Ing. Alexander Solís Barboza

**REVISORES INTERNACIONALES**

Ing. Nicola Della Valle  
Ing. Alexandre R.A. Gomes

**COLABORADORES**

Ing. Fernando Arroyo Zúñiga  
Licda. Fátima Calero Chaverri  
Ing. Francisco Cervantes Loaiza  
Ing. Álvaro Chavarría Chaves  
Ing. Miguel Cruz Azofeifa  
Ing. Minor Novo Bolaños  
Ing. Regina Salas Monge  
Ing. Hugo Salazar Arias  
Ing. Irene Zúñiga Luna

**Colegio de Ingenieros  
Civiles de Costa Rica**  
Junta Directiva 2025-2026

Ing. Daniel Ureña Muñoz  
Presidente  
Ing. Natalia Solano Calderón  
Vicepresidente  
Ing. Adelaida Acevedo Jiménez  
Secretaria  
Ing. Johnny López García  
Tesorero  
Ing. Juan Carlos Rodríguez Arce  
Vocal 1  
Ing. Luis Diego Buitrago Meléndez  
Vocal 2  
Ing. Arturo Chaves Garro  
Fiscal  
Ing. Carolina Maliaño Monge  
Directora Ejecutiva

**Asociación costarricense de  
Obras Subterráneas, ACROS**  
Junta Directiva 2024-2025

Ing. Marlon Jiménez Jiménez  
Presidente  
Ing. Alexander Solís Barboza  
Vicepresidente  
Ing. Josette Fallas Araya  
Secretaria  
Ing. Mefiboset Ávila Espinoza  
Tesorero  
Ing. Sergio Martínez Villavicencio  
Vocal  
Ing. Virginia Alegría Granados  
Fiscal

**Colegio Federado de Ingenieros  
y de Arquitectos de Costa Rica**  
Junta Directiva 2025-2026

Ing. Fernando Escalante Quirós  
Presidente  
Ing. Daniel Ureña Muñoz  
Vicepresidente  
Ing. Mailyn Rivera Chacón  
Contralora

Directores Generales:  
Ing. Johnny López García  
Arq. Dania Chavarría Núñez  
Arq. Luis Alberto Monge Calvo  
Ing. Marco Vinicio Calvo Vargas  
Ing. Olger Murillo Ramírez  
Ing. Juan Pablo Arias Cartín  
Ing. Sofía B. García Romero

Ing. Javier Chacón Hernández  
Director Ejecutivo a.i.



# GUÍA PARA EL DESARROLLO DE OBRAS SUBTERRÁNEAS EN COSTA RICA

OBRAS SUBTERRÁNEAS PARA UNA Y MEJOR MOVILIDAD

©Colegio Federado de Ingenieros y de Arquitectos de Costa Rica



624.19  
 C691g Colegio Federado de Ingenieros y de Arquitectos de Costa Rica  
 Guía para el desarrollo de obras subterráneas en Costa Rica 2026: obras subterráneas para una mayor y mejor movilidad [recurso electrónico] / Colegio Federado de Ingenieros y de Arquitectos de Costa Rica ; Asociación Costarricense de Obras Subterráneas (ACROS) ; Colegio de Ingenieros Civiles. – 1 ed. – San José, C.R. : Colegio Federado de Ingenieros y de Arquitectos, 2026.  
 1 recurso en línea (250 pág.) : ilustraciones, PDF.  
 ISBN: 978-9968-933-35-3  
 1. Obras Subterráneas – Costa Rica. 2. Túneles – Diseño y construcción. 3. Infraestructura del Transporte – Costa Rica. 4. Ingeniería del riesgo – Ingeniería Civil. I. Título.

Producto centroamericano

Hecho en Costa Rica

Año 2026

Prohibida la reproducción total o parcial de esta obra, por cualquier medio, sin el permiso escrito del titular de los derechos.

## Contenido

CONTENIDO .....	5
LISTA DE FIGURAS .....	9
LISTA DE TABLAS .....	11
LISTA DE FOTOGRAFÍAS .....	12
ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS .....	13
<b>1 PRÓLOGO .....</b>	<b>15</b>
<b>2 INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>23</b>
<b>3 ANTECEDENTES .....</b>	<b>28</b>
<b>4 OBJETIVO DE LA GUÍA .....</b>	<b>42</b>
<b>5 ALCANCE .....</b>	<b>44</b>
<b>6 CONTEXTO NORMATIVO E INSTITUCIONAL .....</b>	<b>46</b>
6.1 EL CONTEXTO NORMATIVO PARA DESARROLLAR EL ESPACIO SUBTERRÁNEO .....	47
6.2 INSTITUCIONES QUE PARTICIPAN EN EL DESARROLLO DEL ESPACIO SUBTERRÁNEO .....	49
6.3 ACTORES EN LA EJECUCIÓN DE OBRAS SUBTERRÁNEAS .....	50
<b>7 ASPECTOS CONTRACTUALES .....</b>	<b>52</b>
<b>8 TIPOS DE OBRAS SUBTERRÁNEAS .....</b>	<b>55</b>
<b>9 DESARROLLO DE LAS OBRAS SUBTERRÁNEAS .....</b>	<b>57</b>
9.1 CICLO DE VIDA DE PROYECTOS DE INVERSIÓN PÚBLICA .....	57
9.2 ETAPA DE PLANIFICACIÓN .....	58
9.2.1 Objetivos de la etapa de planificación .....	59
9.2.2 Productos esperados de la etapa de planificación .....	59
9.2.3 Métodos y herramientas aplicados en la etapa de planificación .....	59
9.3 ETAPA DE ESTUDIOS PRELIMINARES (FACTIBILIDAD) .....	59
9.3.1 Objetivos de la etapa de estudios preliminares .....	59
9.3.2 Productos de la etapa de estudios preliminares .....	60
9.3.3 Métodos y herramientas aplicados en la etapa preliminar .....	60
9.4 ETAPA DE DISEÑO .....	60
9.4.1 Objetivos del diseño básico .....	61
9.4.2 Productos del diseño básico .....	62
9.4.3 Métodos y herramientas para el diseño básico .....	62
9.4.4 Objetivos del diseño final .....	62
9.4.5 Productos del diseño final .....	63
9.4.6 Métodos y herramientas del diseño final .....	63
9.5 ETAPA DE CONSTRUCCIÓN .....	64
9.5.1 Objetivos de la construcción .....	64
9.5.2 Monitoreo durante la etapa de construcción .....	64
9.6 ETAPA DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO .....	65
9.6.1 Objetivos del mantenimiento .....	65
9.6.2 Actividades de mantenimiento .....	65
<b>10 GESTIÓN DEL RIESGO .....</b>	<b>66</b>
10.1 GESTIÓN DEL RIESGO EN OBRAS SUBTERRÁNEAS .....	67
10.1.1 El sistema de gestión del riesgo .....	68
10.1.2 Etapas del proceso de evaluación del riesgo .....	69

10.1.3	El plan de gestión del riesgo .....	72
10.1.4	Identificación de las amenazas .....	77
10.1.5	Evaluación del riesgo .....	78
10.1.6	Respuesta ante los riesgos .....	82
10.1.7	Monitoreo de la respuesta a los riesgos .....	82
10.2	GESTIÓN AMBIENTAL Y SOCIAL DEL PROCESO CONSTRUCTIVO .....	86
<b>11</b>	<b>ESTUDIOS TÉCNICOS DE OBRAS SUBTERRÁNEAS .....</b>	<b>88</b>
11.1	ESTUDIOS REQUERIDOS .....	89
11.1.1	Estudios topográficos y cartográficos .....	89
11.1.2	Estudios geológicos e hidrogeológicos .....	90
11.1.3	Estudios geotécnicos .....	91
11.1.4	Estudios ambientales .....	93
11.1.5	Estudio del Riesgo .....	93
11.1.6	Otros estudios técnicos .....	93
11.2	DOCUMENTACIÓN DE LOS ESTUDIOS TÉCNICOS .....	94
11.3	MODELAJE BIM .....	95
11.3.1	Generalidades .....	95
11.3.2	Implantación del BIM .....	96
11.3.3	Funciones y responsabilidades .....	98
11.3.4	El Plan de Ejecución del BIM (PEBIM) .....	98
11.3.5	Modelo del terreno con el BIM .....	99
11.3.6	Experiencias en Costa Rica .....	99
<b>12</b>	<b>DISEÑO DE OBRAS SUBTERRÁNEAS .....</b>	<b>101</b>
12.1	CARACTERÍSTICAS DEL DISEÑO DE OBRAS SUBTERRÁNEAS .....	101
12.2	PARTICIPANTES EN EL PROCESO DE DISEÑO .....	104
12.3	REQUERIMIENTOS FUNCIONALES Y CONCEPTO DEL PROYECTO .....	104
12.4	MODELO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO .....	106
12.5	MÉTODOS DE DISEÑO .....	109
12.6	DISEÑO DE OBRAS CONSTRUIDAS POR EL MÉTODO CONVENCIONAL .....	111
12.7	DISEÑO DE OBRAS CONSTRUIDAS POR MÁQUINAS TUNELADORAS .....	113
12.8	DISEÑO GEOMÉTRICO .....	114
12.9	DISEÑO ESTRUCTURAL .....	116
12.9.1	Particularidades del diseño estructural de obras subterráneas .....	116
12.9.2	Interacción entre el terreno y la estructura .....	117
12.9.3	Modelo para el análisis estructural .....	118
12.9.4	Métodos empíricos .....	125
12.9.5	Métodos analíticos .....	126
12.9.6	Métodos numéricos .....	127
12.9.7	Elementos estructurales .....	130
12.9.8	Cargas sobre el revestimiento .....	130
12.9.9	Condiciones por verificar .....	131
12.10	DISEÑO SÍSMICO .....	132
12.10.1	Comportamiento ante sismos .....	132
12.10.2	Enfoque del diseño sísmico de la obra subterránea .....	134
12.10.3	Definición de la amenaza sísmica .....	135
12.10.4	Evaluación de la respuesta del terreno .....	140
12.10.5	Determinación del comportamiento de la estructura .....	143

12.11	DISEÑO ELÉCTRICO Y DISEÑO MECÁNICO .....	144
12.12	DISEÑO ARQUITECTÓNICO .....	145
12.12.1	Consideraciones funcionales .....	145
12.12.2	Consideraciones de integración estética .....	147
12.13	RESISTENCIA CONTRA EL FUEGO .....	147
<b>13</b>	<b>ASPECTOS CONSTRUCTIVOS .....</b>	<b>149</b>
13.1	SELECCIÓN DEL MÉTODO DE EXCAVACIÓN .....	149
13.2	EXCAVACIÓN CONVENCIONAL .....	150
13.2.1	Principios de la excavación convencional .....	150
13.2.2	Excavación secuencial .....	151
13.2.3	Excavación convencional mecanizada .....	153
13.2.4	Secuencia de la excavación .....	154
13.2.5	Tipos de soporte en la excavación convencional .....	155
13.2.6	Medidas auxiliares de soporte .....	160
13.2.7	Iluminación y ventilación durante la construcción .....	163
13.2.8	Instalaciones hidráulicas y eléctricas .....	164
13.2.9	Revestimientos y acabados finales .....	165
13.2.10	Equipos en la excavación convencional .....	165
13.2.11	Organización del sitio de obra .....	169
13.3	EXCAVACIÓN CON TUNELADORA .....	169
13.3.1	Conceptos básicos de la excavación con máquinas tuneladoras .....	169
13.3.2	Tipos de máquinas tuneladoras .....	171
13.3.3	Proceso de excavación con máquina tuneladora .....	178
13.3.4	Criterios de selección de la TBM .....	185
13.3.5	Escenarios de riesgo para la TBM.....	185
13.4	EXCAVACIÓN DESDE LA SUPERFICIE .....	189
13.4.1	Método de cortar y cubrir ("cut and cover") .....	190
13.4.2	Pozos .....	191
13.4.3	Túneles falsos .....	193
13.5	EXCAVACIÓN SUBACUÁTICA .....	194
13.5.1	Túneles sumergidos .....	194
13.5.2	Túneles flotantes .....	195
13.6	OTROS MÉTODOS CONSTRUCTIVOS .....	196
13.6.1	Tubería hincada .....	196
13.6.2	Micro túneles (excavación sin zanja) .....	198
13.7	MONITOREO DURANTE EL PROCESO CONSTRUCTIVO .....	200
13.7.1	Parámetros por controlar .....	201
13.7.2	Monitoreo dentro del túnel .....	202
13.7.3	Monitoreo fuera del túnel .....	203
13.7.4	Monitoreo de excavaciones profundas desde la superficie .....	204
13.8	SEGURIDAD Y SALUD OCUPACIONAL DURANTE EL PROCESO CONSTRUCTIVO..	204
<b>14</b>	<b>TÚNELES VIALES .....</b>	<b>206</b>
14.1	CLASIFICACIÓN DE LOS TÚNELES VIALES .....	207
14.2	DISEÑO GEOMÉTRICO .....	208
14.2.1	Diseño geométrico en planta .....	208
14.2.2	Diseño geométrico en perfil (alineamiento vertical) .....	210
14.2.3	Sección transversal .....	211

14.3	REQUERIMIENTOS FUNCIONALES .....	213
14.3.1	Sistema de drenaje .....	213
14.3.2	Sistema de bombeo .....	213
14.3.3	Revestimiento y acabados finales .....	213
14.3.4	Sistema de impermeabilización .....	214
14.4	ELEMENTOS DE SEGURIDAD .....	215
14.4.1	Bahías de parqueo de emergencia .....	215
14.4.2	Túneles de emergencia para evacuación .....	217
14.4.3	Nichos de emergencia .....	217
14.4.4	Estaciones de auxilio .....	218
14.5	SISTEMAS Y EQUIPOS POR INSTALAR EN EL TÚNEL .....	219
14.5.1	Suministro de energía .....	219
14.5.2	Sistemas de ventilación .....	221
14.5.3	Sistemas de iluminación .....	222
14.5.4	Sistemas de comunicación y alerta .....	223
14.5.5	Sistemas de control del tránsito .....	224
14.5.6	Sistema de control de incendios .....	225
14.5.7	Sistema de monitoreo de gases y visibilidad .....	227
14.5.8	Sistema de control de gálibo .....	227
14.5.9	Sistemas de automatización .....	227
14.5.10	Centro de control .....	228
<b>15</b>	<b>SISTEMAS DE TRANSPORTE MASIVO .....</b>	<b>229</b>
15.1	FACTIBILIDAD DE UN SISTEMA DE TRANSPORTE MASIVO DE PERSONAS .....	229
15.2	ESTUDIOS DE PREFACTIBILIDAD .....	229
15.3	ESTUDIOS DE FACTIBILIDAD .....	234
<b>16</b>	<b>TÚNELES FALSOS .....</b>	<b>238</b>
16.1	DEFINICIÓN .....	239
16.2	CONFIGURACIÓN .....	239
16.3	DISEÑO .....	240
16.3.1	Estimación de la fuerza de impacto .....	240
16.3.2	Sistema de amortiguación .....	241
16.3.3	Respuesta estructural .....	241
16.3.4	Cimentación .....	242
16.4	ESTABILIDAD GLOBAL .....	242
<b>17</b>	<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>243</b>

## Lista de Figuras

<b>FIGURA 1.</b>	USOS DEL ESPACIO SUBTERRÁNEO .....	15
<b>FIGURA 2.</b>	USOS DEL ESPACIO SUBTERRÁNEO EN EL ENTORNO URBANO .....	16
<b>FIGURA 3.</b>	MODELO DE PLANIFICACIÓN DEL ESPACIO SUBTERRÁNEO (MODIFICADO DE ITACUS, 2011) .....	17
<b>FIGURA 4.</b>	PROYECCIÓN DEL CRECIMIENTO POBLACIONAL DEL COSTA RICA, DEL 2011 AL 2050 (CON DATOS DE INEC, 2023) .....	18
<b>FIGURA 5.</b>	PROYECCIÓN DEL CRECIMIENTO POBLACIONAL DEL GAM Y DEL AM DE SAN JOSÉ HASTA EL 2030 (INEC, 2023) .....	19
<b>FIGURA 6.</b>	DENSIDAD POBLACIONAL DEL GAM EN 2011 (PLAN GAM 2013) .....	19
<b>FIGURA 7.</b>	RED DE NECESIDADES DE VIAJE EN VEHÍCULO PARTICULAR (PRUGAM, MIVAH 2008) .....	20
<b>FIGURA 8.</b>	TRÁNSITO PROMEDIO DIARIO ANUAL (TPDA) ALREDEDOR DEL CASCO METROPOLITANO DE SAN JOSÉ .....	23
<b>FIGURA 9.</b>	NECESIDAD DE FLUJOS VEHICULARES, PLAN NACIONAL DE TRANSPORTE 2011 - 2035 .....	24
<b>FIGURA 10.</b>	RED MAESTRA DEL METRO DE PANAMÁ (FUENTE: METRO DE PANAMÁ, 2023) .....	26
<b>FIGURA 11.</b>	FALLAS GEOLÓGICAS EN EL TERRITORIO NACIONAL (DENYER ET AL., 2003) .....	30
<b>FIGURA 12.</b>	ESTUDIO DE DAÑOS EN OBRAS SUBTERRÁNEAS (MODIFICADO DE POWER ET AL., 1998B) .....	31
<b>FIGURA 13.</b>	CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES HIDROELÉCTRICOS (1958 - 2014) .....	40
<b>FIGURA 14.</b>	DIVERSOS TIPOS DE OBRAS PARA APROVECHAR EL ESPACIO SUBTERRÁNEO .....	56
<b>FIGURA 15.</b>	CICLO DE VIDA DE PROYECTOS DE INVERSIÓN PÚBLICA (MIDEPLAN, 2022) .....	57
<b>FIGURA 16.</b>	ETAPAS USUALES DEL CICLO DE VIDA DE PROYECTOS DE OBRAS SUBTERRÁNEAS .....	58
<b>FIGURA 17.</b>	SUBPROCESOS PARA LA GESTIÓN DEL RIESGO EN LA VIDA ÚTIL DE LA OBRA .....	68
<b>FIGURA 18.</b>	COMPONENTES DEL SISTEMA DE GESTIÓN DEL RIESGO .....	69
<b>FIGURA 19.</b>	ETAPAS PARA LA EVALUACIÓN DEL RIESGO .....	70
<b>FIGURA 20.</b>	EJEMPLO DE REGISTRO DE RIESGO DE UN TÚNEL EXCAVADO CON TUNELADORA (EXTRACTO) .....	75
<b>FIGURA 21.</b>	EJEMPLO DE DETALLE DEL RR (ADAPTADO DE GUGLIELMETTI ET AL. 2008) .....	76
<b>FIGURA 22.</b>	VARIACIÓN DEL NIVEL DE RIESGO .....	79
<b>FIGURA 23.</b>	MATRIZ DE ACEPTACIÓN DE RIESGOS .....	80
<b>FIGURA 24.</b>	MATRIZ DE RIESGOS .....	81
<b>FIGURA 25.</b>	DEFINICIÓN DE UMBRALES DE ATENCIÓN Y ALARMA .....	85
<b>FIGURA 26.</b>	ESTRUCTURA DE UN DISEÑO MULTIDIMENSIONAL (FUENTE: DAUB, 2021) .....	96
<b>FIGURA 27.</b>	SALIDAS DE MODELOS 2D Y 3D EL TÚNEL DE CACHÍ (NARANJO Y BONILLA, 2012) .....	100
<b>FIGURA 28.</b>	PROCESO DE DISEÑO DE OBRAS SUBTERRÁNEAS (ITA, 1998) .....	103
<b>FIGURA 29.</b>	MODELO GEOTÉCNICO DEL TÚNEL DE TRASVASE .....	107
<b>FIGURA 30.</b>	PERFIL GEOTÉCNICO DEL TÚNEL DE DESVÍO DE UN PROYECTO HIDROELÉCTRICO PRIVADO .....	107
<b>FIGURA 31.</b>	MAPA GEOLÓGICO Y MODELO GEOTÉCNICO DEL TÚNEL DE AMPLIACIÓN DEL P.H. CACHÍ .....	108
<b>FIGURA 32.</b>	FLUJOGRAMA DEL DISEÑO DE OBRAS SUBTERRÁNEAS CONSTRUIDAS POR EL MÉTODO CONVENCIONAL (ITA 2009) .....	112
<b>FIGURA 33.</b>	SECCIONES TRANSVERSALES TÍPICAS DE TÚNELES FERROVIARIOS (KOLYMBAS, 2005) .....	115
<b>FIGURA 34.</b>	SECCIONES TRANSVERSALES TÍPICAS DE TÚNELES VIALES (KOLYMBAS, 2005) .....	116
<b>FIGURA 35.</b>	RESPUESTA DEL TERRENO ANTE LA EXCAVACIÓN DEL TÚNEL (LUNARDI, 2000) .....	118
<b>FIGURA 36.</b>	MÉTODOS PARA EVALUAR EL DESARROLLO DEL TÚNEL (MODIFICADO DE MAIDL ET AL. (2014)) .....	119
<b>FIGURA 37.</b>	DEFORMACIONES Y DESPLAZAMIENTOS ALREDEDOR DE LA EXCAVACIÓN SIN SOPORTE .....	121
<b>FIGURA 38.</b>	DESARROLLO DE LA CURVA DE REACCIÓN DEL TERRENO GRC .....	122

<b>FIGURA 39.</b>	CONVERGENCIA – CONFINAMIENTO (PANET, 2023) COMPORTAMIENTO DE ..... OBRAS SUBTERRÁNEAS	123
<b>FIGURA 40.</b>	ANTE SISMOS (DOWDING Y ROZEN, 1978) .....	124
<b>FIGURA 41.</b>	PROCESO DE DISEÑO SÍSMICO DE OBRAS SUBTERRÁNEAS (HASHASH ET AL. 2001) .....	133
<b>FIGURA 42.</b>	MAPA DE ZONIFICACIÓN SÍSMICA DE COSTA RICA (CSCR 2010) .....	134
<b>FIGURA 43.</b>	INTERACCIÓN DE UN TÚNEL CON UNA FALLA ACTIVA CON DESPLAZAMIENTOS (ADAPTADO DE AFTES 2001B) .....	135
<b>FIGURA 44.</b>	DESPLAZAMIENTOS DEL TÚNEL CAUSADOS POR EL SISMO .....	141
<b>FIGURA 45.</b>	MÉTODOS DE EXCAVACIÓN DE TÚNELES Y OBRAS SUBTERRÁNEAS .....	142
<b>FIGURA 46.</b>	CICLO DE LA EXCAVACIÓN CONVENCIONAL .....	149
<b>FIGURA 47.</b>	SUBPROCESOS DEL CICLO DE EXCAVACIÓN EN EL MÉTODO CONVENCIONAL .....	150
<b>FIGURA 48.</b>	SECUENCIAS TÍPICAS DE EXCAVACIÓN EN EL MÉTODO CONVENCIONAL (ITA, 2009) .....	152
<b>FIGURA 49.</b>	TIPOS DE PERNOS DE ROCA USADOS EN OBRAS SUBTERRÁNEAS .....	155
<b>FIGURA 50.</b>	TIPOS DE PERFILES DE VIGAS DE ACERO .....	156
<b>FIGURA 51.</b>	ESQUEMA DEL PARAGUAS DE TUBOS .....	159
<b>FIGURA 52.</b>	EVOLUCIÓN DEL DIÁMETRO DE LAS TBM (VARDAKOS ET AL., 2023) .....	160
<b>FIGURA 53.</b>	ESQUEMA DE UNA TBM ABIERTA .....	170
<b>FIGURA 54.</b>	ESQUEMA DE UNA TBM DE ESCUDO SIMPLE .....	173
<b>FIGURA 55.</b>	ESQUEMA DE UNA TBM DE DOBLE ESCUDO .....	174
<b>FIGURA 56.</b>	ESQUEMA DE UNA TBM DE LODOS .....	175
<b>FIGURA 57.</b>	ESQUEMA DE UNA MÁQUINA EPB .....	176
<b>FIGURA 58.</b>	COMPONENTES DEL REVESTIMIENTO CON DOVELAS PREFABRICADAS .....	177
<b>FIGURA 59.</b>	FORMA TRIDIMENSIONAL DE LA CUENCA DE ASENTAMIENTOS .....	183
<b>FIGURA 60.</b>	SECUENCIA "DE ABAJO HACIA ARRIBA" (BOTTOM-UP) .....	189
<b>FIGURA 61.</b>	SECUENCIA "DE ARRIBA HACIA ABAJO" (TOP-DOWN) .....	190
<b>FIGURA 62.</b>	VISTA ESQUEMÁTICA DE UN TÚNEL SUMERGIDO (ITA, 2022) .....	191
<b>FIGURA 63.</b>	ESQUEMA DE SUJECIÓN DE TÚNEL FLOTANTE (ITA, 2023) .....	194
<b>FIGURA 64.</b>	SECCIÓN TRANSVERSAL ESQUEMÁTICA DE UN TÚNEL CON TUBERÍA HINCADA .....	196
<b>FIGURA 65.</b>	CLASIFICACIÓN DE LAS TÉCNICAS DE EXCAVACIÓN SIN ZANJA .....	197
<b>FIGURA 66.</b>	ESQUEMA DE INSTRUMENTACIÓN DENTRO DEL TÚNEL .....	198
<b>FIGURA 67.</b>	CLASIFICACIÓN DE LOS TÚNELES VIALES .....	202
<b>FIGURA 68.</b>	SECCIÓN TRANSVERSAL TÍPICA DE UN TÚNEL BIDIRECCIONAL .....	207
<b>FIGURA 69.</b>	CONFIGURACIÓN TÍPICA DEL REVESTIMIENTO DEFINITIVO .....	212
<b>FIGURA 70.</b>	BAHÍA DE PARQUEO DE EMERGENCIA (VISTA EN LA SECCIÓN TRANSVERSAL) .....	214
<b>FIGURA 71.</b>	BAHÍA DE PARQUEO DE EMERGENCIA (VISTA EN PLANTA) .....	215
<b>FIGURA 72.</b>	ESQUEMA (EN PLANTA) DE UBICACIÓN ENTRE BAHÍAS DE PARQUEO DE EMERGENCIAS .....	216
<b>FIGURA 73.</b>	SECCIÓN TRANSVERSAL TÍPICA TÚNEL DE EVACUACIÓN (IZQUIERDA: VEHICULAR, DERECHA:	
<b>FIGURA 74.</b>	PEATONAL) .....	217
<b>FIGURA 75.</b>	CONFIGURACIÓN Y ESQUEMA DE LOS NICHOS DE EMERGENCIA .....	218
<b>FIGURA 76.</b>	ESQUEMA DE LA CUBIERTA DE PROTECCIÓN CONTRA CAÍDOS (TÚNEL FALSO). FUENTE: SUÁREZ (2012)	239
<b>FIGURA 77.</b>	DISTRIBUCIÓN DE LA FUERZA DE IMPACTO. SUÁREZ (2012) .....	240
<b>FIGURA 78.</b>	ESQUEMA DE ESTRUCTURA ANCLADA .....	242

## Lista de Tablas

<b>TABLA 1.</b>	DESCRIPCIÓN DE LOS CRITERIOS DE ACEPTACIÓN DE RIESGOS .....	81
<b>TABLA 2.</b>	TIPOS DE INSTRUMENTOS USUALES SEGÚN LA VARIABLE A MONITOREAR .....	84
<b>TABLA 3.</b>	REQUERIMIENTOS FUNCIONALES DE DISTINTAS OBRAS SUBTERRÁNEAS .....	105
<b>TABLA 4.</b>	ÁREAS DE SECCIONES TRANSVERSALES USUALES EN TÚNELES DE DIVERSOS TIPOS .....	114
<b>TABLA 5.</b>	RAZÓN DE VELOCIDAD PICO (CM/S) SOBRE ACELERACIÓN PICO (G), EN SUPERFICIE (ROCA O SUELO) .....	137
<b>TABLA 6.</b>	RAZÓN DE DESPLAZAMIENTO PICO (CM) SOBRE ACELERACIÓN PICO (G), EN SUPERFICIE (ROCA O SUELO) .....	137
<b>TABLA 7.</b>	FACTORES DE REDUCCIÓN DEL PARÁMETRO DE MOVIMIENTO DEL TERRENO (HASHASH ET AL. 2001) .....	138
<b>TABLA 8.</b>	REQUISITOS MÍNIMOS PARA LA PROTECCIÓN CONTRA EL FUEGO .....	148
<b>TABLA 9.</b>	GUÍA PARA EL USO DE EQUIPOS CONVENCIONALES EN LA EXCAVACIÓN .....	153
<b>TABLA 10.</b>	FABRICANTES DE MÁQUINAS TUNELADORAS EN EL MUNDO .....	171
<b>TABLA 11.</b>	CLASIFICACIÓN DEL TIPO DE MÁQUINA (ADAPTADO DE DAUB, 2022) .....	172
<b>TABLA 12.</b>	CLASIFICACIÓN DE POZOS SEGÚN SU DIÁMETRO (ITA, 2021) .....	192
<b>TABLA 13.</b>	CLASIFICACIÓN DE POZOS SEGÚN SU PROFUNDIDAD .....	192
<b>TABLA 14.</b>	RANGOS DE DESEMPEÑO DE LAS MTBM .....	199
<b>TABLA 15.</b>	DIMENSIONES USUALES DE POZOS Y LONGITUDES DE TUBO DE LOS MICROTÚNELES (PIPE JACKING) .....	200
<b>TABLA 16.</b>	DISTANCIA DE PARADA (VALORES EN METROS) .....	209
<b>TABLA 17.</b>	CORRECCIÓN DE LA DISTANCIA DE PARADA POR LA PENDIENTE (VALORES EN METROS) .....	209
<b>TABLA 18.</b>	PENDIENTE MÁXIMA PERMITIDA .....	210
<b>TABLA 19.</b>	EQUIPAMIENTO REQUERIDO PARA LA OPERACIÓN SEGÚN LA CLASIFICACIÓN DEL TÚNEL .....	220
<b>TABLA 20.</b>	EQUIPAMIENTO REQUERIDO PARA LA GESTIÓN DE EMERGENCIAS SEGÚN LA CLASIFICACIÓN DEL TÚNEL .....	221

## Lista de fotografías

<b>FOTOGRAFÍA 1.</b>	GEOMATERIALES CARACTERÍSTICOS DEL VALLE CENTRAL (RUIZ & SOTO, 2014) .....	29
<b>FOTOGRAFÍA 2.</b>	TÚNELES DE LA LÍNEA FERROVIARIA HACIA EL PACÍFICO .....	32
<b>FOTOGRAFÍA 3.</b>	TÚNEL “CAMP”, FERROCARRIL AL ATLÁNTICO .....	32
<b>FOTOGRAFÍA 4.</b>	TÚNEL BAJO EL CERRO ZURQUÍ, PRIMER TÚNEL CARRETERO DEL PAÍS (1984) .....	33
<b>FOTOGRAFÍA 5.</b>	TÚNEL DE TAPANTÍ. CONDICIONES DE TRABAJO Y TIPO DE SOPORTE .....	34
<b>FOTOGRAFÍA 6.</b>	TBM DE DOBLE ESCUDO USADA EN EL TÚNEL DEL PH LA JOYA .....	35
<b>FOTOGRAFÍA 7.</b>	ENSAMBLAJE DE MÁQUINA TUNELADORA ABIERTA, FUERA DEL TÚNEL, P.H. LA JOYA .....	35
<b>FOTOGRAFÍA 8.</b>	CONDICIÓN DEL TERRENO AL INICIO DE LA EXCAVACIÓN .....	36
<b>FOTOGRAFÍA 9.</b>	TRAMO DE TÚNEL DEL PH TORITO YA REVESTIDO .....	36
<b>FOTOGRAFÍA 10.</b>	INTERIOR DE LA MÁQUINA TUNELADORA DURANTE LA CONSTRUCCIÓN .....	37
<b>FOTOGRAFÍA 11.</b>	DESCENSO DE LA EPB EN EL POZO DE LANZAMIENTO PARA INICIAR LA EXCAVACIÓN .....	37
<b>FOTOGRAFÍA 12.</b>	INTERIOR DEL TÚNEL DE TRASVASE, ÁREA METROPOLITANA .....	38
<b>FOTOGRAFÍA 13.</b>	SITIO DE OBRAS DURANTE EL PROCESO CONSTRUCTIVO DEL TÚNEL DE TRASVASE .....	38
<b>FOTOGRAFÍA 14.</b>	ROZADORA MARCA SANVIK, UTILIZADA EN EL PROYECTO DE AMPLIACIÓN DE LA PLANTA CACHÍ ...	39
<b>FOTOGRAFÍA 15.</b>	MICRO TUNELADORA TIPO “SLURRY” UTILIZADA EN MICRO TÚNELES DE SANEAMIENTO .....	39
<b>FOTOGRAFÍA 16.</b>	UNA DE LAS MICRO TUNELADORAS EN PROYECTO DE SANEAMIENTO DE SAN JOSÉ .....	39
<b>FOTOGRAFÍA 17.</b>	EXCAVACIÓN DE LA PLAZA DE LA CULTURA .....	41
<b>FOTOGRAFÍA 18.</b>	GALERÍA SUBTERRÁNEA EN ANFITEATRO DE VILLA .....	41
<b>FOTOGRAFÍA 19.</b>	IMAGEN DE UNA ROZADORA EN LA FÁBRICA (MT 721, SANDVIK) .....	154
<b>FOTOGRAFÍA 20.</b>	ALGUNOS TIPOS DE ANCLAJES METÁLICOS .....	157
<b>FOTOGRAFÍA 21.</b>	APLICACIÓN MANUAL DE CONCRETO LANZADO .....	157
<b>FOTOGRAFÍA 22.</b>	APLICACIÓN A CONTROL REMOTO DE CONCRETO LANZADO .....	158
<b>FOTOGRAFÍA 23.</b>	ARMADO DE ARCOS DE ACERO (PRUEBAS EN EXTERIOR) .....	158
<b>FOTOGRAFÍA 24.</b>	CERCHA RETICULADA .....	159
<b>FOTOGRAFÍA 25.</b>	PARAGUAS DE TUBOS EN EL PORTAL DEL TÚNEL .....	161
<b>FOTOGRAFÍA 26.</b>	INSTALACIÓN DE PERNOS DE FIBRA DE VIDRIO EN EL FRENTE DE EXCAVACIÓN .....	162
<b>FOTOGRAFÍA 27.</b>	ABANICO EXTERNO Y DUCTO FLEXIBLE .....	163
<b>FOTOGRAFÍA 28.</b>	SISTEMA DE VENTILACIÓN EN EL TÚNEL DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO CARIBLANCO .....	164
<b>FOTOGRAFÍA 29.</b>	JUMBO DE PERFORACIÓN UTILIZADO EN EL PROYECTO HIDROELÉCTRICO REVENTAZÓN .....	166
<b>FOTOGRAFÍA 30.</b>	CARGADOR DE PERFIL BAJO .....	167
<b>FOTOGRAFÍA 31.</b>	BANDA RECOLECTORA Y VAGÓN DE ESCOMBROS SOBRE VÍAS FÉRREAS .....	167
<b>FOTOGRAFÍA 32.</b>	VAGONETA ARTICULADA PARA LA EXTRACCIÓN DE ESCOMBROS .....	168
<b>FOTOGRAFÍA 33.</b>	LANZADOR DE CONCRETO .....	168
<b>FOTOGRAFÍA 34.</b>	PROCESO CONSTRUCTIVO DE UN TÚNEL CON TUBERÍA HINCADA .....	197
<b>FOTOGRAFÍA 35.</b>	SISTEMA BRT EN FASE DE SATURACIÓN (SISTEMA TRANSMILENIO, BOGOTÁ) .....	230
<b>FOTOGRAFÍA 36.</b>	AUTOPISTA DE PAGO EN CONCESIÓN (M12, BARAJAS - MADRID) .....	231
<b>FOTOGRAFÍA 37.</b>	AGLOMERACIÓN EN LA ENTRADA DE UNA ESTACIÓN DEL METROPOLITANO DE LIMA (SISTEMA BRT) .....	235

## Abreviaturas y acrónimos

<b>ACROS:</b>	Asociación Costarricense de Obras Subterráneas
<b>ALARP:</b>	“As low as reasonably practicable” (“Tan bajo como sea razonablemente posible”)
<b>ARESEP:</b>	Autoridad Reguladora de los Servicios Públicos
<b>AYA:</b>	Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados
<b>BIM:</b>	Modelado de información de construcción (BIM, “Building Information Modelling”)
<b>BOT:</b>	“Build-Operate-Transfer”, es decir, “Construir-Operar-Transferir”
<b>BOOT:</b>	“Build-Own-Operate-Transfer”, es decir, “Construir-Poseer-Operar-Transferir”
<b>CFIA:</b>	Colegio Federado de Ingenieros y de Arquitectos de Costa Rica
<b>CIC:</b>	Colegio de Ingenieros Civiles de Costa Rica
<b>EPB:</b>	Earth Pressure Balance (Máquina de Balance de Presión de Tierras)
<b>GAM:</b>	Gran Área Metropolitana
<b>GBR:</b>	Geotechnical Baseline Report (Reporte Geotécnico de Línea Base)
<b>GDOS-CR 2026:</b>	Guía para el Desarrollo de Obras Subterráneas de Costa Rica, versión 2026.
<b>ICE:</b>	Instituto Costarricense de Electricidad
<b>INCOFER:</b>	Instituto Costarricense de Ferrocarriles
<b>INEC:</b>	Instituto Nacional de Estadística y Censos
<b>INVIAS:</b>	Instituto Nacional de Vías de Colombia
<b>ITA: (=ITA-AITES):</b>	International Tunnelling and Underground Space Association (Asociación Internacional de Túneles y del Espacio Subterráneo)
<b>ITACUS:</b>	International Tunnel Association Committee on Underground Space (Comité de la Asociación
<b>ITATECH:</b>	Internacional de Túneles para el Espacio Subterráneo)
	International Tunnel Association Committee on New Technologies (Comité de la Asociación
	Internacional de Túneles sobre Nuevas Tecnologías)
<b>MIDEPLAN:</b>	Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica de Costa Rica
<b>MINAE:</b>	Ministerio de Ambiente y Energía de Costa Rica
<b>MOPT:</b>	Ministerio de Obras Públicas y Transportes de Costa Rica
<b>PEBIM:</b>	Plan de ejecución del BIM, elaborado conjuntamente entre el Propietario y el Contratista
<b>PGR:</b>	Plan de Gestión del Riesgo
<b>PIARC:</b>	Asociación Mundial de Carreteras (Permanent International Association of Road Congresses)
<b>PIM:</b>	Plan de Instrumentación y Monitoreo
<b>PNT:</b>	Plan Nacional de Transportes
<b>POTGAM:</b>	Plan de Ordenamiento Territorial de la Gran Área Metropolitana de Costa Rica
<b>PRUGAM:</b>	Plan Regional Urbano de la Gran Área Metropolitana de Costa Rica
<b>PSAM:</b>	Proyecto de Saneamiento Ambiental del Área Metropolitana
<b>PSSO:</b>	Plan de Salud y Seguridad Ocupacional
<b>RR:</b>	Registro de Riesgos
<b>SETENA:</b>	Secretaría Técnica Nacional Ambiental de Costa Rica
<b>SGR:</b>	Sistema de Gestión del Riesgo
<b>SNIP:</b>	Sistema Nacional de Inversión Pública
<b>TBM:</b>	Tunnel Boring Machine (Máquina excavadora de túneles)
<b>TEC:</b>	Instituto Tecnológico de Costa Rica
<b>TPDA:</b>	Tránsito Promedio Diario Anual



# 1. Prólogo

Un recurso fundamental para cualquier país es su subsuelo. En él se aloja no solo recurso material valioso (minerales, agua, fuentes energéticas, etc.), sino también el potencial espacio requerido para alojar infraestructura que facilite y mejore las condiciones de vida de sus habitantes. Así, numerosas obras subterráneas son construidas en los países desarrollados para el transporte (ferrovías, carreteras, sistemas de transporte masivo de personas), la energía (túneles y pozos hidroeléctricos, cavernas para casas de máquinas), la infraestructura sanitaria (aguas residuales) así como para otros importantes usos, según se muestra de forma esquemática en la Figura 1.

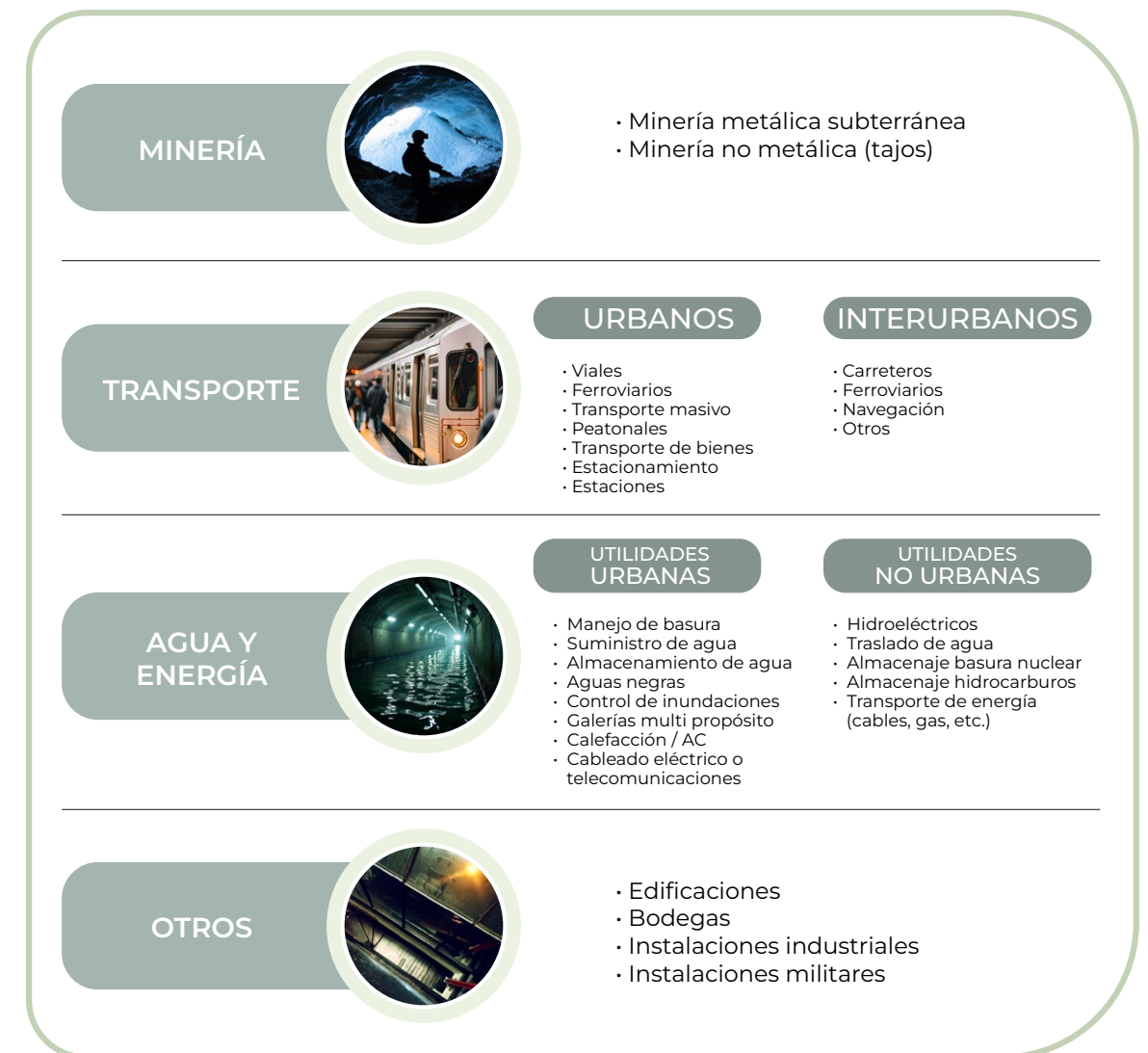


Figura 1. Usos del espacio subterráneo

De acuerdo con lo anterior y a partir de la experiencia de otros países donde se ha desarrollado de manera intensiva el espacio subterráneo, se verifica que hay diversos intereses que compiten entre sí por ese espacio. Cuando no se ha realizado una planificación oportuna, ocurre que el primero en desarrollar un proyecto define la ubicación de su infraestructura y, cuando posteriormente se intenta desarrollar una nueva para otro propósito, entra en conflicto con la primera, obligando a soluciones complejas o muy costosas.

Es relativamente sencillo verificar una coincidencia en todos los sectores de la opinión pública en cuanto al rezago de nuestro país en el desarrollo de su infraestructura vial (y de otros tipos). Si bien hasta ahora ha existido un pensamiento “bidimensional” (es decir, considerando únicamente el plano de la superficie del terreno) al realizar las evaluaciones de posibles soluciones para la infraestructura que se requiere, es claro que en el futuro cercano surgirán distintas necesidades que exigirán el uso del espacio subterráneo, como podría plantearse en la Figura 2.

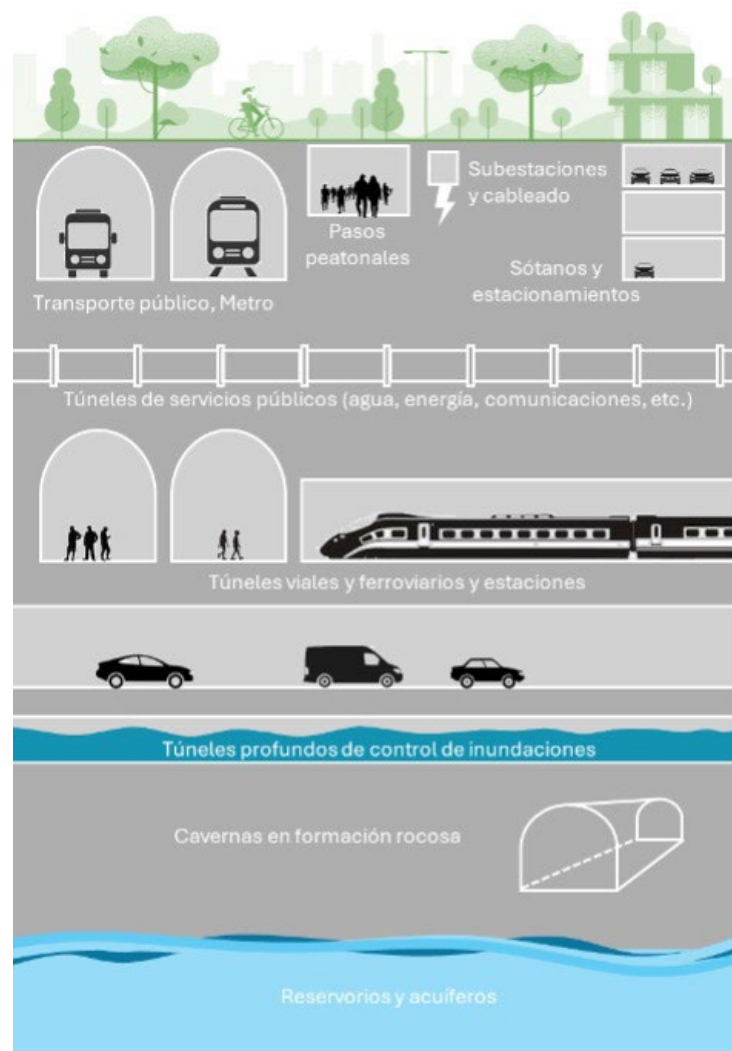


Figura 2. Usos del espacio subterráneo en el entorno urbano

El costo social de desarrollar solamente la superficie es mucho mayor en el largo plazo, por lo que Costa Rica no puede darse el lujo de postergar el aprovechamiento del subsuelo para desarrollar infraestructura. Sin embargo, también es claro que se debe planificar ese desarrollo subterráneo, definiendo algún modelo de planificación, como el que se muestra esquemáticamente en la Figura 3 (Itacus, 2011), utilizado en algunas ciudades de los Países Bajos.



Figura 3. Modelo de planificación del espacio subterráneo (modificado de ITACUS, 2011)

Ahora bien, la viabilidad de las estructuras en subterráneo está ligada a la valoración que la sociedad haga del espacio en superficie, en términos de degradación ambiental y social. Desafortunadamente, muchas de las ventajas de las estructuras subterráneas, especialmente las asociadas a la protección del ambiente no pueden ser expresadas fácilmente en términos monetarios, aunque existen técnicas para realizar dichas estimaciones.

Como consecuencia de las evaluaciones que se han realizado en nuestro país en relación con obras subterráneas, donde están muy claros los costos, pero no así los beneficios (especialmente los sociales y ambientales), el proceso de toma de decisiones se ha sesgado hacia las obras superficiales, bajo la falaz premisa de que la construcción en subterránea “es muy costosa”, sin entrar a valorar los beneficios.

Se puede citar como ejemplo el caso del túnel vial de Zapote en el cual, debido a los altos costos de esta obra estimados en el estudio de prefactibilidad realizado por el ICE (2010b), las autoridades del MOPT optaron por no acometerla, a pesar de que representa beneficios muy importantes para los usuarios de la ruta Florencio del Castillo y de los habitantes de Curridabat.

Los beneficios no fueron cuantificados en el estudio de prefactibilidad, pero el estudio y análisis detallado de los costos que se generan por el tiempo de espera de los usuarios de la vía y por el incremento del consumo de combustible, con el consecuente daño ambiental, por no contar con ese túnel vial, podría permitir una mejor definición de los beneficios que se obtendrían si los estudios, diseños finales y la construcción de ese túnel se llegaran a materializar.

Continuando con el postulado expresado arriba, sobre la valoración social de las obras subterráneas, es importante destacar uno de los principales problemas que da valor a las soluciones subterráneas, pues el uso de este recurso está estrechamente ligado con el crecimiento poblacional y la movilidad de dicha población.

En Costa Rica, de acuerdo con el pronóstico del INEC (2023), se espera que de los poco más de 5 millones de habitantes actuales, en el 2050 Costa Rica tendrá una población de entre 6.5 y 8 millones de habitantes o más, como se ilustra en la Figura 4.

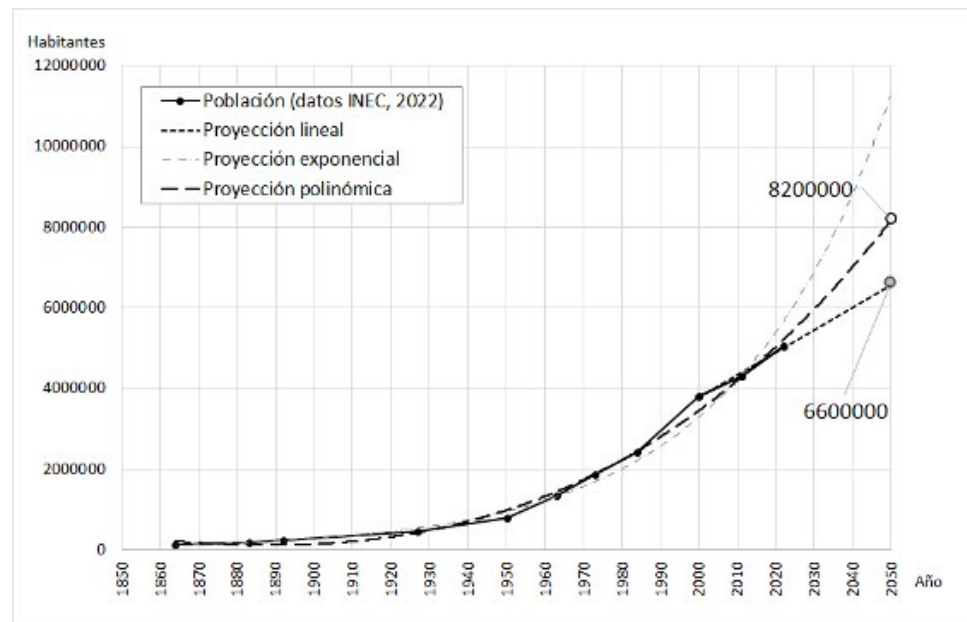


Figura 4. Proyección del crecimiento poblacional del Costa Rica, del 2011 al 2050 (con datos de INEC, 2023).

Para el año 2030 la estimación del INEC es que la población será aproximadamente de 5.5 millones, de los cuales más de 3.0 millones habitarán en el GAM y casi 2.0 millones en el área Metropolitana de San José, como puede observarse en la Figura 5. Esta proyección conduce a una densidad poblacional concéntrica que es mayor en la ciudad de San José y los cantones circunvecinos y que va reduciéndose hacia afuera. La situación actual es que la mitad de la población del país se concentra en el GAM, produciendo altas densidades poblacionales en esa región, según se puede apreciar en el mapa de la Figura 6.

El crecimiento de la población y de la cobertura urbana implica la necesidad de transporte hacia diferentes puntos de producción y de prestación de servicios dentro del GAM que presiona sobre la infraestructura vial existente, la cual no ha crecido al mismo ritmo en que lo ha hecho la población.

Al mismo tiempo, producto del deficiente sistema de transporte público, el parque vehicular sí ha crecido a un ritmo muy acelerado que ha generado serios problemas de saturación de la red vial, al punto que los habitantes del Área Metropolitana deben invertir horas adicionales de traslado en sus vehículos debido a las presas en todo el sistema vial.

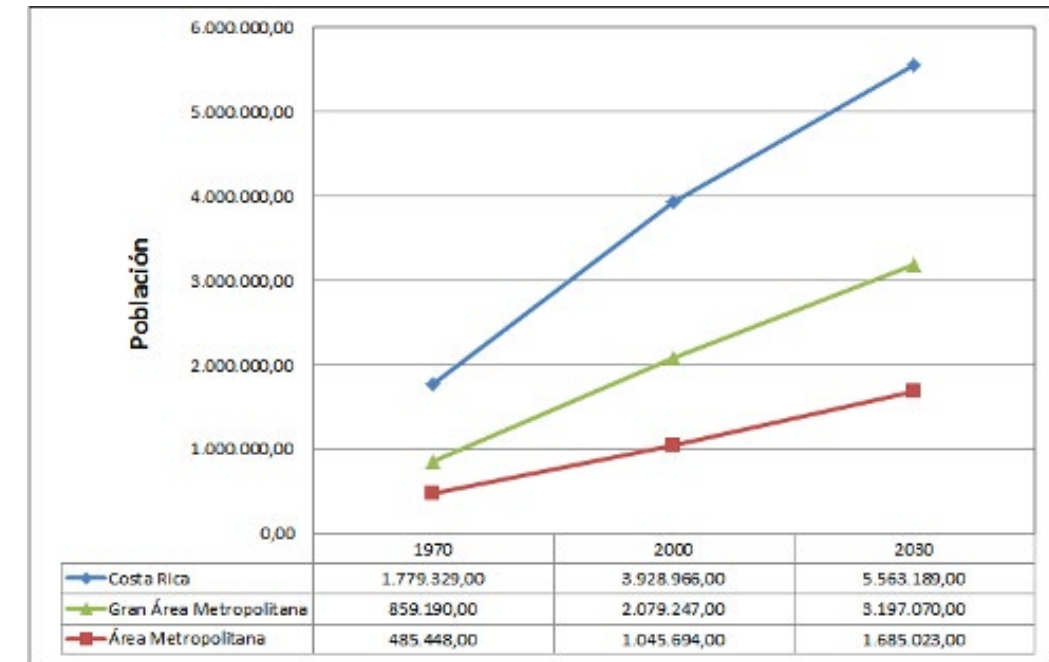


Figura 5. Proyección del crecimiento poblacional del GAM y del AM de San José hasta el 2030 (INEC, 2023).

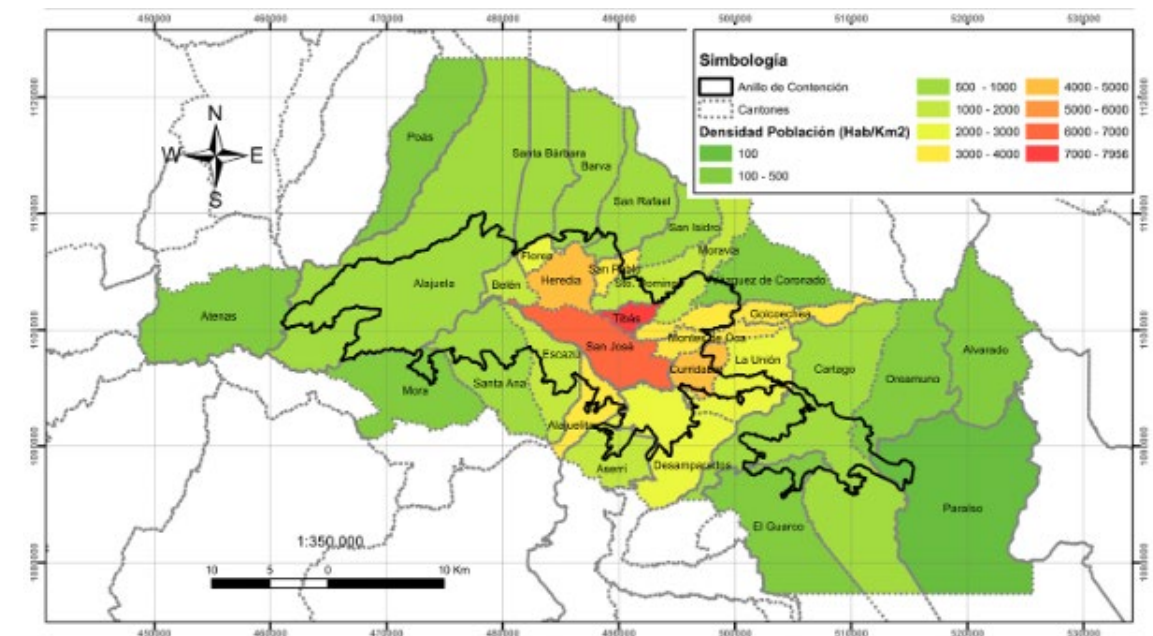
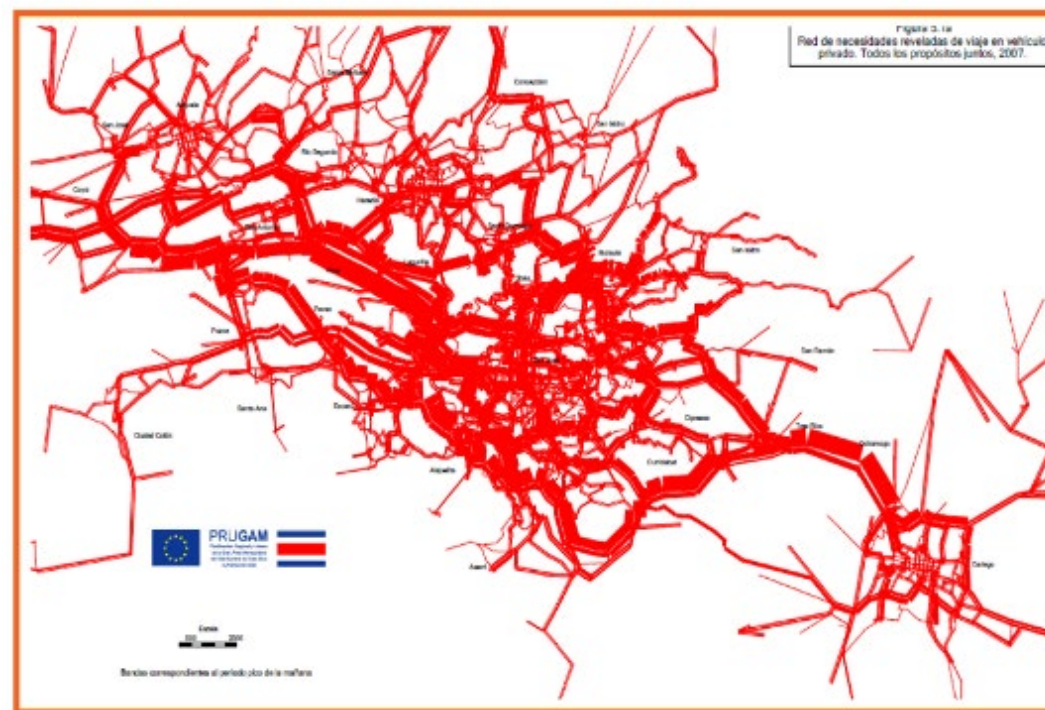


Figura 6. Densidad poblacional del GAM en 2011 (Plan GAM 2013).



**Figura 7.** Red de necesidades de viaje en vehículo particular (PRUGAM, MIVAH 2008).

El crecimiento de la cobertura urbana incide en el requerimiento de movilidad de la población que, al no ver resueltas sus necesidades por medio del transporte público, se ve compelida a preferir el uso del vehículo particular (evidentemente, se habla del sector de la población con la capacidad económica para tal opción).

Se ha podido evaluar la necesidad de viajes, tanto en sentido Este a Oeste como en el sentido Norte a Sur, concentrada en algunas vías que se ven saturadas (ver la Figura 6, considerar que, a mayor grosor de la línea, mayor es el uso del recorrido). Para poder mejorar la condición de flujo en ambos sentidos, el uso de obras subterráneas se convierte en una alternativa importante, en particular si se toma en cuenta que, para el desarrollo de la infraestructura vial en superficie, una de las grandes limitaciones para el Estado es la dificultad de realizar expropiaciones de forma rápida.

El futuro del desarrollo del espacio subterráneo del país es prometedor y tiene enormes potencialidades, pues son muchas las problemáticas que pueden resolverse aprovechando ese recurso. Ya hay numerosos proyectos en las carteras de diferentes desarrolladores, públicos y privados, pero la cantidad de obras que podrían o deberían plantearse es muy grande (ver Apéndice B).

Algunos proyectos subterráneos de gran impacto socio económico que pueden desarrollarse a futuro, incluyen: el túnel vial de Zapote (conexión entre el final de la autopista Florencio del Castillo y la rotonda de las Garantías Sociales en la ruta de circunvalación), túnel de San Pedro (por debajo de la ruta de circunvalación, en sentido oeste-este), túneles del acueducto metropolitano Orosi II, obras subterráneas del proyecto hidroeléctrico Forth Cliff en el Caribe, la ampliación del túnel Zurquí (túnel paralelo) en la Ruta Nacional 32, túnel del Tren Eléctrico Metropolitano, túnel ferroviario en Ochozogo (ruta San José-Cartago), túneles para un Canal Seco, túneles para el Metro de San José, sótanos profundos, parqueos subterráneos, pasos peatonales y muchas obras más.

Considerando esta realidad, el Colegio Federado de Ingenieros y de Arquitectos de Costa Rica, en colaboración con la Asociación Costarricense de Obras Subterráneas (ACROS), se complace en presentar la Guía para el desarrollo de obras subterráneas para la movilidad a la comunidad profesional del país y al público en general.

La elaboración de este documento estuvo a cargo de una Comisión de la Asociación Costarricense de Obras Subterráneas (ACROS), la cual ha trabajado con dedicación para alcanzar un producto acorde con las necesidades presentes y futuras del país.

El objetivo del documento es servir de referencia y respaldo a desarrolladores públicos y privados para impulsar estas obras vitales, con el fin de elevar el nivel de vida de los habitantes del país. Por ello, el lector encontrará un énfasis en los túneles viales, ferroviarios y de sistemas de transporte masivo de personas, así como en otras obras subterráneas asociadas a ellos (como pozos, galerías y estaciones).



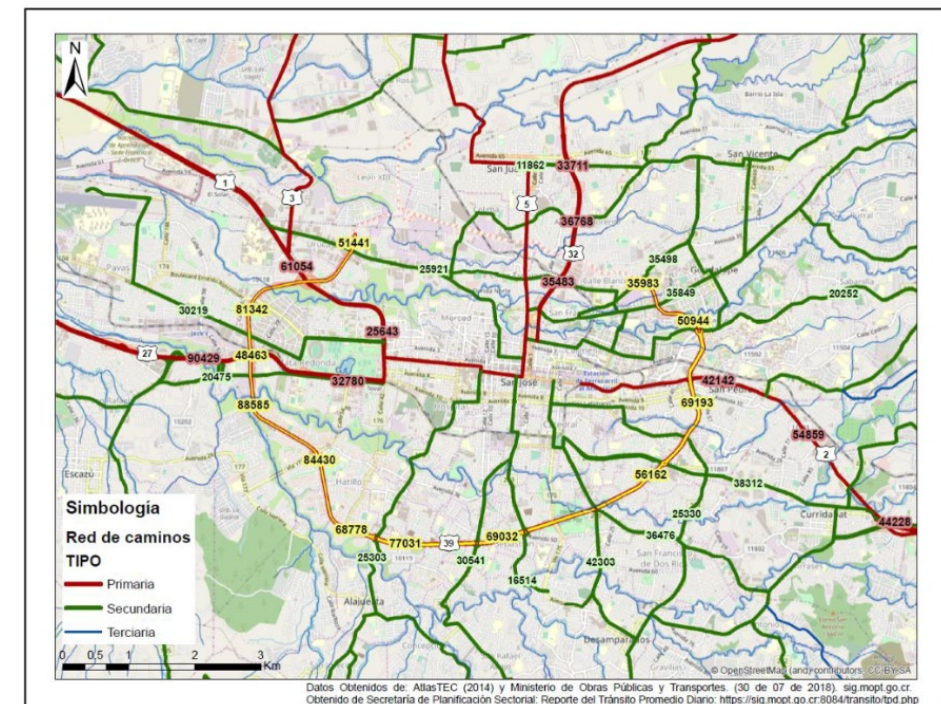
## 2. Introducción

Costa Rica está llena de retos y oportunidades para el uso de obras subterráneas. Existe un importante rezago en obras de infraestructura, especialmente para dar soluciones a las problemáticas en la movilidad: transporte vehicular, ferrocarriles de carga y pasajeros, transporte masivo de personas en San José. No son los únicos problemas que encuentran soluciones en el espacio subterráneo: también el traslado de energía, recursos hídricos y saneamiento ambiental se pueden resolver de esta manera. Sin embargo, esta guía se enfoca en el tema de la movilidad, por las razones que se explican a continuación.

De acuerdo con los últimos Informes sobre la Competitividad de los países en el mundo, elaborado por el Foro Económico Mundial (World Economic Forum, 2017, 2018 y 2019), Costa Rica aparece en la posición 110 de 137 países con respecto a su infraestructura de transporte en el 2017, pasando al lugar 78 de 140 en 2018 y cayendo al 88 de 141 en el 2019. Es decir, en comparación con el resto del mundo, nuestro país no se acerca a los países con buena calidad de su infraestructura de transporte.

Teniendo en cuenta esta desventaja competitiva, evidentemente Costa Rica requiere el desarrollo de infraestructura vial, la cual puede ser potenciada con el desarrollo de infraestructura subterránea.

En la Figura 8 se ejemplifica el tránsito promedio diario anual (TPDA) de las zonas más conflictivas en cuanto a congestión vehicular, en el Área Metropolitana, lo que obliga a pensar en la necesidad de buscar nuevas soluciones viales y claramente, lo obligatorio que se vuelve un replanteamiento de la planificación urbana.



**Figura 8.** Tránsito promedio diario anual (TPDA) alrededor del casco metropolitano de San José  
Fuente: Ministerio de Obras Públicas y Transportes (2018) y TEC (2014)

En el Plan Nacional de Transportes 2011-2035 (ver Figura 9) se establece que se requieren establecer flujos estratégicos (en color rojo) y flujos regionales (en color verde) que interconectan las diferentes zonas y que permiten conectar los flujos estratégicos.

Puede observarse que la red flujos estratégicos se alinea con las costas y atraviesa en forma de cruz al GAM. Sin embargo, la infraestructura vial capaz de mantener los niveles servicio requeridos, debería implicar la utilización de túneles viales que permitan hacer las interconexiones entre las zonas costeras y el GAM con el fin de evitar burocráticos trámites de expropiación (y sus altos costos), acortar las distancias, disminuir el impacto ambiental, disminuir los costos de estabilización de taludes y la necesidad de movilizar importantes volúmenes de materiales excavados.

En cuanto a los ferrocarriles, un proyecto concreto que se ha planteado desde hace varios años es el Tren Metropolitano, el cual en realidad es un tren interurbano que atraviesa la ciudad. El tren atravesaría la zona urbana en superficie y este trazado resulta inconveniente debido a la importante cantidad de accidentes (algunos mortales) que se presentan con vehículos y los costos que estos representan. Por ello, sería ideal que, cuando fuese construido, muchos de los tramos ferroviarios estuvieran colocados en subterráneo.

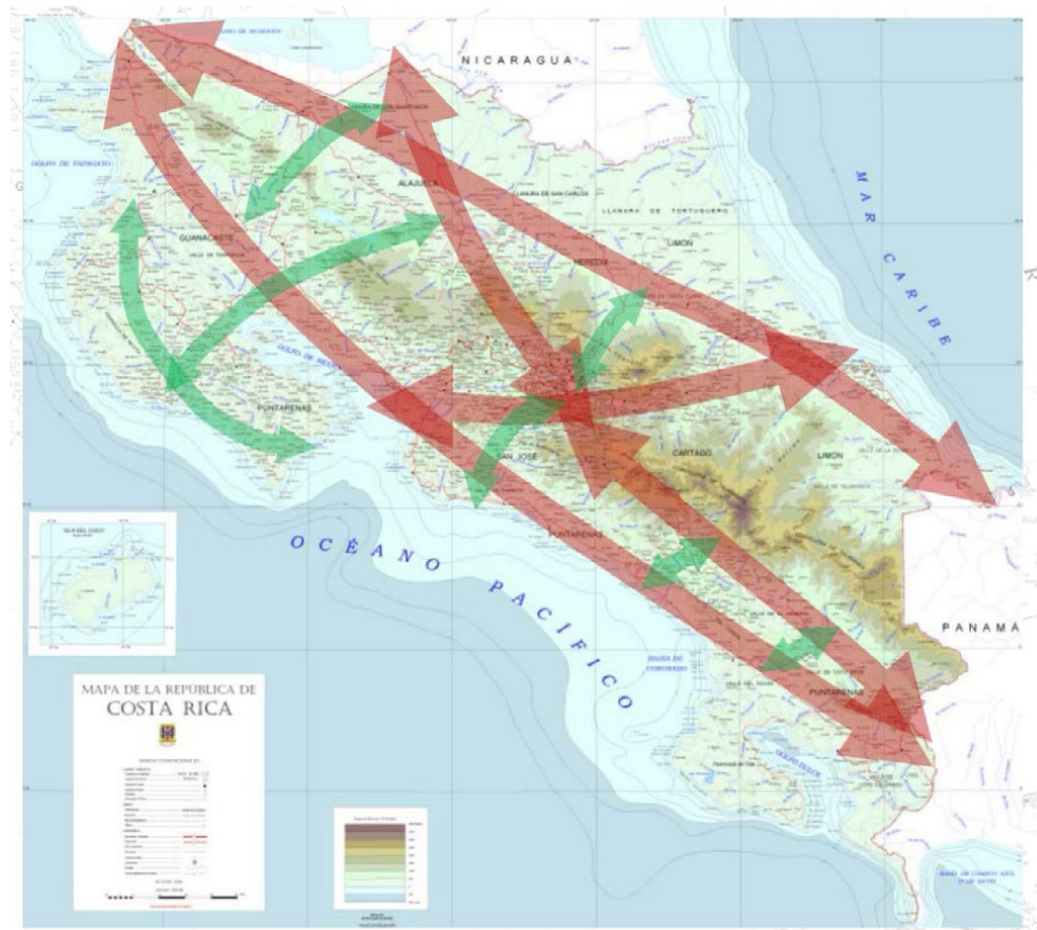


Figura 9. Necesidad de flujos vehiculares, Plan Nacional de Transporte 2011-2035

Para mejorar la condición actual (o pensar en elevar los niveles de servicio del tren metropolitano por medio de aumento de frecuencia de los trenes), debería hacerse una fuerte inversión en semaforización y en pasos subterráneos. Además, una serie de nuevos andenes y de intercambios serían requeridos para mejorar la calidad del servicio para los viajeros, así como la adquisición de nuevas máquinas y vagones. Inclusive sería necesario hacer la conversión a tren eléctrico para disminuir costos en combustible. No obstante, el trazado y las condiciones actuales del tren interurbano obedecen a una realidad del siglo XIX que no necesariamente responde a las necesidades de transporte masivo de personas del siglo XXI, según indica el Plan Nacional de Transportes 2011-2035.

El PNT deja por fuera la conexión entre el GAM y la zona Caribe, enfatizando los esfuerzos en la red vial. Aunque esta conexión ferroviaria fue cortada por la construcción de la Central Hidroeléctrica Reventazón, su funcionamiento es muy importante y es conveniente recuperarla como opción al transporte de carga hacia los puertos del Caribe desde el Valle Central. Una ruta alterna ya fue propuesta por el ICE al INCOFER, cuyo trazado de incluye la construcción de dos túneles ferroviarios.

Uno de los aspectos más importantes a discutir sobre el desarrollo del espacio subterráneo es el transporte masivo de personas, por el impacto positivo que podría generarse para mejorar la calidad de vida de los habitantes del Área Metropolitana.

Una justificación que se ha utilizado para argumentar que un sistema de transporte masivo tipo Metro no se requiere, tiene que ver con la cantidad de población actual de San

José. No obstante, este argumento no es válido si se considera que el sistema de Metro se basa principalmente en la necesidad de movilidad y no necesariamente en la cantidad de población. De hecho, existen más de 100 ciudades en el mundo con sistemas de metro y poblaciones similares a la del Área Metropolitana.

Como referencia cercana, el primer país en América Central que cuenta con sistema de Metro es Panamá (ver la red maestra del metro en la Figura 10). En efecto, las Líneas 1 y 2 son operativas y se trabaja en la línea 3, que a la fecha de publicación de este documento presenta un avance del 75% (según el medio de comunicación La Estrella de Panamá (García, 2025)).

Este sistema ofrece traslados rápidos y seguros a miles de personas que cada día se desplazan por la capital panameña. En los primeros dos días de operación del sistema de Metro, se movilizaron alrededor de 400 mil usuarios. La población de la Ciudad de Panamá es del orden de 900 mil personas.

Hasta ahora, en los planes de desarrollo del país ha predominado un pensamiento bidimensional, que consiste en mantener y mejorar lo que ya existe (a nivel de la superficie), pero no se percibe la importancia y los beneficios de las obras subterráneas. El desarrollo del país y la necesidad de tener un nivel de competitividad satisfactorio en el contexto de la economía globalizada obliga a que próximamente se deba recurrir al uso de obras subterráneas para satisfacer las necesidades de manera económica y adecuada funcionalmente.

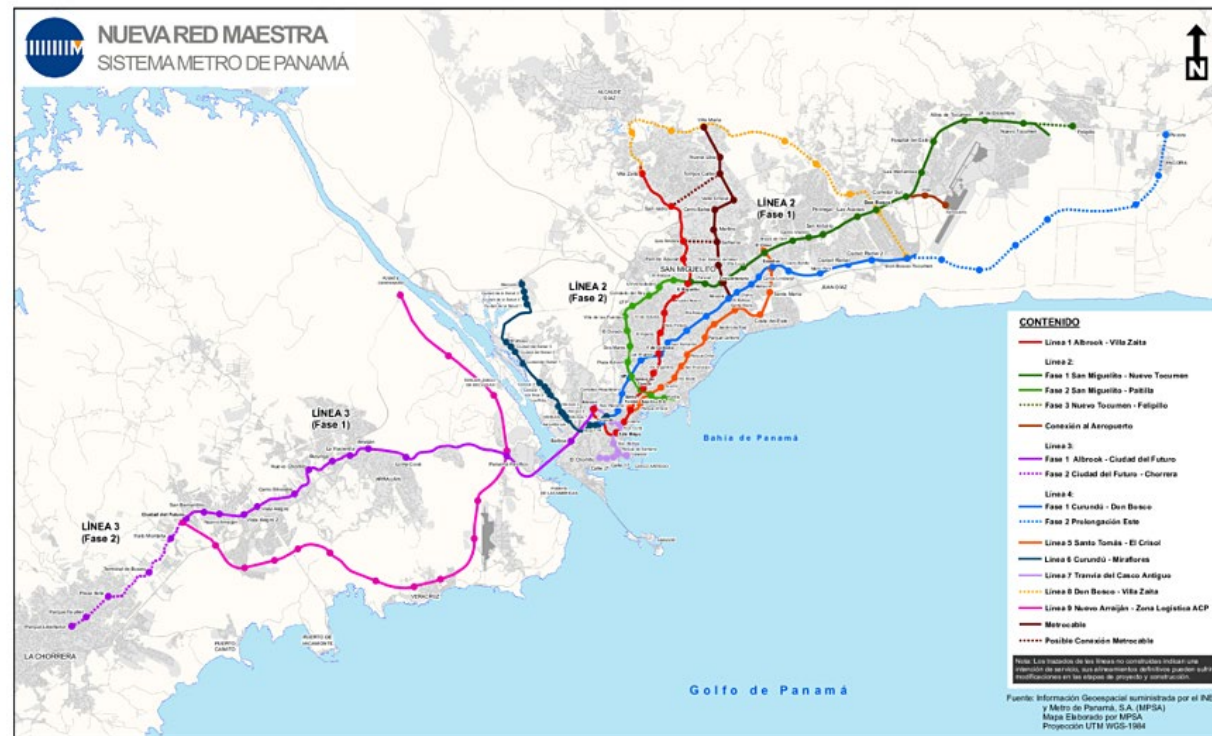


Figura 10. Red maestra del Metro de Panamá (fuente: Metro de Panamá, 2023)

En este contexto, resulta oportuno plantear un documento que sirva como guía para el desarrollo del espacio subterráneo de Costa Rica. Ese espacio, hasta ahora ignorado, es de vital importancia para que el país avance hacia niveles de mayor bienestar. La Asociación Costarricense de Obras Subterráneas, ACROS, en conjunto con el Colegio de Ingenieros Civiles de Costa Rica han tenido la iniciativa de presentar este documento a la comunidad nacional.

Este documento no es de carácter normativo. Es decir, no establece un reglamento o normas de cumplimiento obligatorio. Sin embargo, ofrece recomendaciones y consideraciones de buenas prácticas para realizar un desarrollo adecuado de las obras subterráneas, de manera que cumplan con los requisitos básicos de seguridad, eficiencia y calidad. Las obras que incluye esta guía son, esencialmente, públicas, desarrolladas por

instituciones estatales o por privados, mediante algún tipo de concesión legal.

Ahora bien, está claro que las obras subterráneas son complejas y su ejecución no compete solamente a los ingenieros civiles, sino que todas las disciplinas que se conjuntan en el Colegio Federado de Ingenieros y de Arquitectos de Costa Rica participan en el desarrollo de estas obras de infraestructura. Incluso, también los miembros de otros Colegios Profesionales requieren incorporarse en los equipos de estudio, diseño y construcción de los túneles, galerías, pozos, sótanos y cualquier obra subterránea que se realice en el territorio nacional.

La Guía Para el Desarrollo de Obras Subterráneas de Costa Rica (GDOS-CR 2026) está dirigida a todos esos profesionales, así como a los desarrolladores y al conjunto de instituciones estatales que tienen relación con las obras subterráneas.

Los primeros capítulos de la GDOS-CR 2026 tratan los aspectos introductorios y generales. En el Capítulo 3 se hace una revisión de antecedentes de la geología del país y de obras subterráneas realizadas. El objetivo de la guía se plantea en el Capítulo 4 y los alcances están descritos en el Capítulo 5. Posteriormente, se discuten aspectos de índole administrativa y contractual. Así, el Capítulo 6 presenta el contexto normativo e institucional para el desarrollo de obras subterráneas en el país y el Capítulo 7 describe aspectos contractuales, siguiendo la práctica actual a nivel internacional.

El Capítulo 8 inicia con los aspectos técnicos o ingenieriles de las obras subterráneas, explicando los tipos de obras subterráneas abarcados en esta Guía. El Capítulo 9 plantea el desarrollo por etapas de las obras subterráneas que, aunque es similar al de otros proyectos de infraestructura, presenta muchas particularidades que le son propias. En el Capítulo 10 se aborda un tema central del desarrollo de este tipo de proyectos, la Gestión del Riesgo, así como la gestión ambiental y social.

El Capítulo 11 desarrolla el tema de los Estudios Técnicos requeridos para el desarrollo de obras subterráneas. Los aspectos relacionados con el diseño de estas obras se discuten en el Capítulo 12 y los relacionados con su construcción, en el Capítulo 13. Los últimos tres capítulos presentan una serie de aspectos particulares o específicos de distintos tipos de obras subterráneas: los túneles viales son desarrollados en el Capítulo 14 y los sistemas de transporte masivo de personas en el Capítulo 15. Finalmente, los túneles falsos se tratan en el Capítulo 16. Estos son los capítulos centrales de la GDOS-CR 2026, la cual está enfocada en la movilidad. El Capítulo 17 presenta las referencias utilizadas en la GDOS-CR 2026.

Como se indicó arriba, la GDOS-CR 2026 está dirigida a todos los profesionales del Colegio Federado de Ingenieros y de Arquitectos de Costa Rica, pero no de manera exclusiva. Se insta a todos los profesionales involucrados en el desarrollo de obras subterráneas a utilizar la GDOS-CR 2026 como marco de referencia para su planificación y ejecución y, sobre todo, a los funcionarios de las instituciones, desarrolladores y propietarios de estas obras, así como a las personas interesadas, a utilizar este documento como complemento y guía para el largo y complejo, pero fascinante, proceso de desarrollo de las obras subterráneas.



### 3. Antecedentes

La formación geológica del país es muy “joven”, si se la compara con zonas del globo terráqueo que poseen una historia geológica más extensa. Sin embargo, esta característica no implica que no se puedan hacer túneles, pozos y otras obras subterráneas en nuestro subsuelo (Tapia, 2010 y 2013a). De hecho, en Costa Rica numerosos túneles y pozos se han construido en una amplia gama de litologías (la mayoría incluyendo rocas blandas), como los ambientes sedimentarios (areniscas, flysch, lodolitas, etc.) y ambientes volcánicos (lavas, brechas, tobas, lahares, etc.) (Hidalgo et al., 2004; Soto, 2009). En el Valle Central del país se encuentra una variedad de suelos y rocas blandas, mayoritariamente de origen volcánico, tales como las cenizas, lavinas, ignimbritas, brechas y lahares, según se pueden apreciar en la Fotografía 1. Para un uso del espacio subterráneo con túneles de poca profundidad (máximo 40 m) en esta región del país, las cenizas y las lavinas tendrían mucha importancia y deberían ser geotécnicamente caracterizadas para un diseño satisfactorio y una selección apropiada del método constructivo.



Fotografía 1. Geomateriales característicos del Valle Central (Ruiz & Soto, 2014).

Por otra parte, las condiciones sísmicas del país, altamente influenciadas por el proceso de subducción que ha producido una importante cantidad de estructuras geológicas o fallas en el territorio nacional (ver Figura 11) y que siempre resultan inquietantes para el desarrollo de obras de infraestructura, no han implicado efectos adversos sobre las obras subterráneas del país, como tampoco ha ocurrido en otros países localizados en zonas de alta sismicidad alrededor del mundo. Es decir, la fuerte sismicidad no limita el desarrollo de obras subterráneas y, en cambio, su comportamiento resulta más seguro que en la superficie, como se explica a continuación.

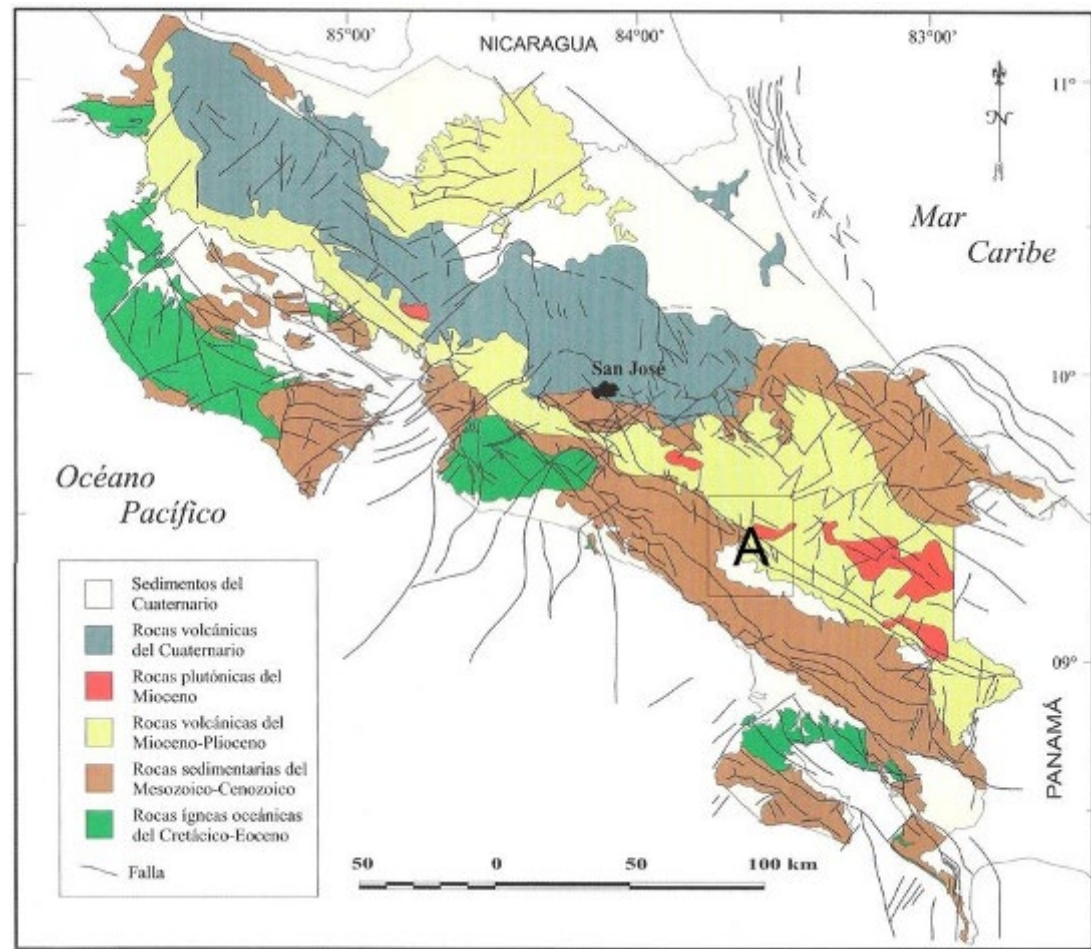


Figura 11. Fallas geológicas en el territorio nacional (Denyer et al., 2003)

Sobre el tema sísmico hay normativas bastante claras a nivel internacional para las obras subterráneas, entre las que se pueden mencionar las Guías para Análisis y Diseño Sísmico de Estructuras Subterráneas de la Asociación Internacional de Túneles (ITA, 2001) y las Guías sobre Diseño y Protección contra Terremotos de Estructuras Subterráneas de la Asociación Francesa de Túneles (AFTES, 2001), así como el Eurocódigo 8, EN 1998-5:2004 (CEN, 2004). Si bien es cierto que en Costa Rica aún no se ha generado un código sísmico específico para el diseño de las obras subterráneas, las mencionadas guías se pueden usar como referencia.

Como ejemplo del adecuado comportamiento sísmico de las obras subterráneas, se cita el estudio realizado por Power et al. (1998) en el que se verificó para varios túneles que, para niveles de aceleración pico de hasta 0,4 g, no se registraron daños en los túneles revestidos con concreto o acero. En la Figura 12 se ilustra el resultado del estudio citado, donde se verifica que los casos de daño están asociados solamente con aceleraciones extraordinarias, mayores a 0,5 g.

Este comportamiento se fundamenta en el hecho de que cuando ocurre el sismo, la estructura subterránea se desplaza de manera solidaria con el terreno, mientras que en superficie ocurren desplazamientos relativos entre las estructuras y el terreno de fundación.

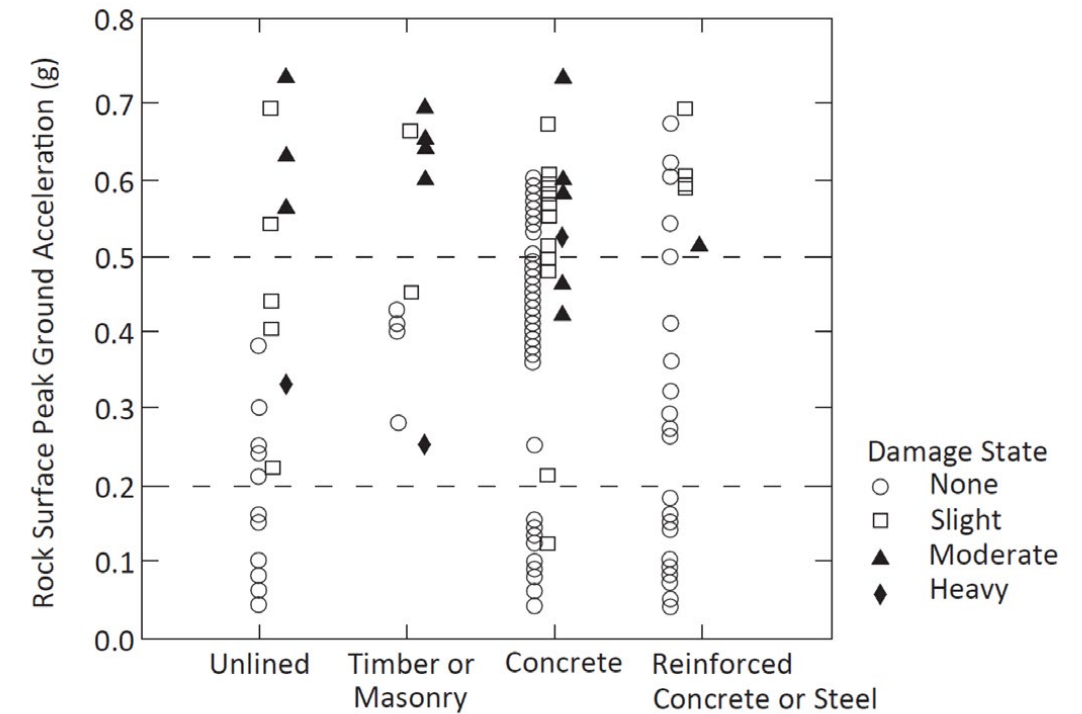
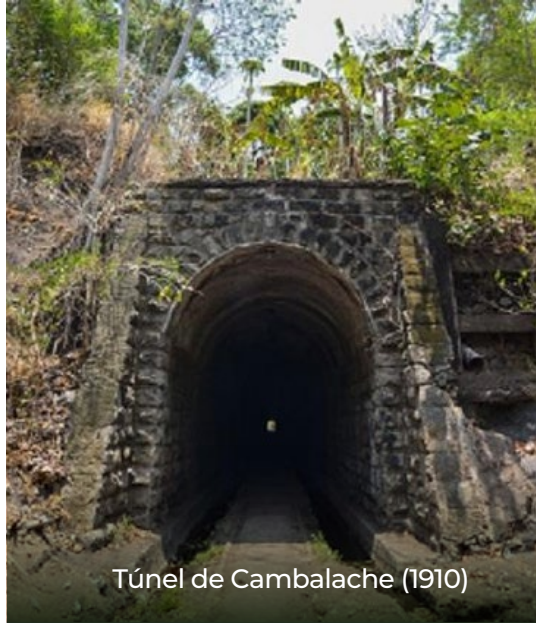


Figura 12. Estudio de daños en obras subterráneas (Modificado de Power et al., 1998b)

Hasta el momento, en Costa Rica no se ha llevado a cabo una evaluación detallada o sistemática de daños sufridos por túneles a causa de sismos, a excepción de la inspección realizada en el Túnel de la Planta Hidroeléctrica Cariblanco con motivo del terremoto de Cinchona de 2009, donde no se encontraron daños imputables a ese importante sismo. Sin embargo, se han realizado importantes inspecciones, que han evidenciado ausencia de daños a la infraestructura subterránea por condiciones sísmicas: en el Túnel del Proyecto Hidroeléctrico Toro 3, Túneles de las Plantas Hidroeléctricas Toro 1 y Toro 2, Túneles de Tapantí y Río Macho y Túnel de desvío de la Planta Hidroeléctrica Arenal. En la sección 12.10 se desarrolla con detalle el tema del diseño sísmico de las obras subterráneas.

De obras subterráneas en el país se tienen referencias desde hace más de 150 años. Los primeros túneles fueron mineros y militares, de tamaño pequeño (1,2m x 2,0m), artesanales, construidos a mitad del siglo XIX (Tapia, 2013b).

A finales del siglo XIX y principios XX, se construyeron los primeros túneles ferroviarios, como los del ferrocarril al Pacífico (ver Fotografía 2) (Municipalidad de Esparza, 2024).



Túnel de Cambalache (1910)



Túnel de Miraflores (1909)

**Fotografía 2.** Túneles de la línea ferroviaria hacia el Pacífico.

El Ferrocarril al Atlántico también requirió de túneles, el túnel Camp (Fotografía 3), el de Casorla y el de la Milla 48½, construidos en la primera mitad del siglo XX.



**Fotografía 3.** Túnel "Camp", ferrocarril al Atlántico.

El túnel del Zurquí es el primer túnel carretero (y único a la fecha) y data de 1984 (Fotografía 4). Durante su construcción se tuvieron diversos problemas que provocaron la suspensión de la construcción, hasta que la firma inglesa Kier Internacional retomó los trabajos en 1983 y los concluyó en agosto de 1984. Su sección transversal es de casi 11 metros de ancho y 8,5 de altura y fue el primer túnel donde se utilizó el concreto lanzado en Costa Rica.



**Fotografía 4.** Túnel bajo el cerro Zurquí, primer túnel carretero del país (1984)  
Arriba: durante el proceso constructivo. Abajo: operación actual.

Los túneles hidroeléctricos empezaron a construirse en 1953 y constituyen la inmensa mayoría de las obras subterráneas del país. Casi todos los túneles construidos en las últimas tres décadas son hidroeléctricos (se han construido en los últimos años algunos pasos a desnivel por debajo de algunas vías, como la ruta de circunvalación). Una imagen de uno de los primeros túneles hidroeléctricos (Tapantí) se muestra en la Fotografía 5.



**Fotografía 5.** Túnel de Tapantí. Condiciones de trabajo y tipo de soporte.

La razón de ello es que la mayor parte de la capacidad instalada del sistema eléctrico del país utiliza ese tipo de fuente de energía. La generación con plantas hidroeléctricas alcanza el 80% del total. Adicionalmente, para el diseño y construcción de las plantas hidroeléctricas, especialmente las de mayor envergadura, una serie de obras subterráneas son requeridas. Así, se construyen galerías de investigación, galerías de inyección y de drenaje en sitios de presa, galerías de acceso para los túneles de conducción principales, túneles de desvío, túneles de desfogue, pozos de acceso a túneles y pozos para las casas de máquinas.

En la mayoría de los túneles el método constructivo utilizado ha sido el convencional, es decir, barrenación y voladura (drill & blast method). Sin embargo, hay otras experiencias de construcción de obras subterráneas de forma mecanizada. Entre estas se puede mencionar los siguientes túneles excavados con máquina tuneladora (TBM):

- **Túnel de la Planta Hidroeléctrica La Joya (2004-2006), de Longitud: 8000 m, Diámetro: 5,2 m.** Fue construido en rocas volcánicas, utilizando una TBM doble escudo. Las principales dificultades fueron la afectación de acuíferos para agua potable y uso agrícola, que generó protestas de los vecinos y paradas producto de esas afectaciones, así como la necesidad de atravesar zonas de falla con túneles manuales auxiliares. A pesar de ello, el túnel pudo ser construido en su totalidad con la TBM, con una tasa de avance promedio muy aceptable. En la Fotografía 6 se puede apreciar la TBM utilizada para la perforación del túnel, durante el proceso de montaje en sitio.



**Fotografía 6.** TBM de doble escudo usada en el túnel del PH La Joya.

- **Túnel de la Planta Hidroeléctrica El Encanto (2007-2008) con las siguientes características:** Longitud: 3200 m, Diámetro: 3,6 m, Contexto geológico: rocas ígneas intrusivas duras, zonas de falla blandas en el intrusivo. Método constructivo: TBM abierta para roca dura y método convencional. Principales dificultades: afectación por zonas de falla que no permitieron la finalización del túnel con la TBM seleccionada. A pesar de que el terreno estaba constituido por rocas duras, las fallas constituidas por milonitas y materiales blandos no permitían el uso de las zapatas de apoyo (grippers) de la TBM, al punto de que tuvo que cambiarse el método constructivo a convencional, sobre la marcha. En las imágenes de la Fotografía 8 se aprecian dos aspectos de la construcción.



**Fotografía 7.** Ensamblaje de máquina tuneladora abierta, fuera del túnel, P.H. La Joya.



**Fotografía 8.** Condición del terreno al inicio de la excavación.

- **Túnel de la Planta Hidroeléctrica Torito (2013-2015), con las siguientes características: Longitud: 3500 m, Diámetro: 7,8 m, Contexto geológico:** rocas sedimentarias blandas, lutitas, brechas y limolitas. Huella de deslizamiento Pavones constituido por materiales de la formación Doán deslizado, bloques redondeados y subredondeados flotando en matriz limo arenosa, zonas de falla. Método constructivo: TBM tipo EPB marca Lovat. Principales dificultades: atravesar la huella del deslizamiento Pavones con altas infiltraciones, necesidad de hacer tratamientos del terreno (inyecciones de lechada) desde la superficie. A pesar de las dificultades mencionadas, se logró completar el túnel de manera muy exitosa con la EPB. En la Fotografía 9 se muestra un tramo del túnel del PH Torito con revestimiento prefabricado ya colocado. En la Fotografía 10 se puede apreciar el interior de la máquina tuneladora en el túnel, durante el proceso constructivo.



**Fotografía 9.** Tramo de túnel del PH Torito ya revestido.



**Fotografía 10.** Interior de la máquina tuneladora durante la construcción

- **Túnel de trasvase, Proyecto de Saneamiento Ambiental (2015-2016):** de 1750 m de longitud y 3,25 m de diámetro de excavación, se ejecutó exitosamente con una máquina tipo EPB, pasando por debajo de un tramo de la carretera de circunvalación. El comportamiento de la superficie fue monitoreado con tecnología de última generación y las estructuras no percibieron ninguna afectación. Se trata del primer túnel en el contexto urbano de San José, que demuestra ampliamente la factibilidad de realización de este tipo de obras. En la Fotografía 11 se observa la máquina tuneladora siendo instalada en el pozo de lanzamiento, mientras que en la Fotografía 12 se aprecia el interior del túnel y en la Fotografía 13 se muestra una imagen general del sitio de trabajo.



**Fotografía 11.** Descenso de la EPB en el pozo de lanzamiento para iniciar la excavación.



**Fotografía 12.** Interior del túnel de trasvase, área Metropolitana.



**Fotografía 13.** Sitio de obras durante el proceso constructivo del túnel de trasvase.

Un método de excavación de túneles utilizado en el país es por medio de una rozadora o “road header” (Fotografía 14). Esta técnica constructiva se usó por primera vez en un tramo de importante longitud del túnel del Proyecto de Ampliación de la Planta Hidroeléctrica Cachí (año 2014), por medio de una máquina Sandvik MT360, con una potencia del motor giratorio de 200 kW. En esa experiencia, la máquina excavó rocas con una resistencia a la compresión uniaxial máxima de 80 a 100 MPa, alcanzando rendimientos diarios de 4,8 m en promedio (Arguedas, 2014).

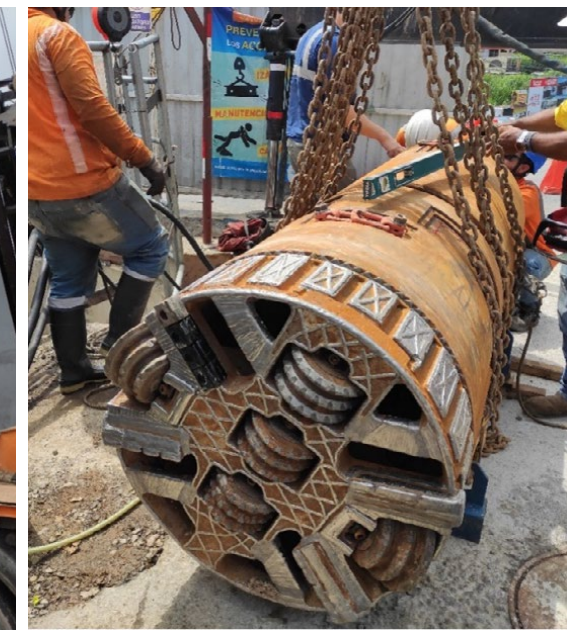


**Fotografía 14.** Rozadora marca Sanvik, utilizada en el proyecto de ampliación de la planta Cachí.

Otra metodología mecanizada de reciente aplicación en Costa Rica y que se ha estado empleando desde el 2012, es la perforación de colectores para drenaje de aguas residuales con microtuneladoras, para el Proyecto de Saneamiento Ambiental del Área Metropolitana (PSAM).

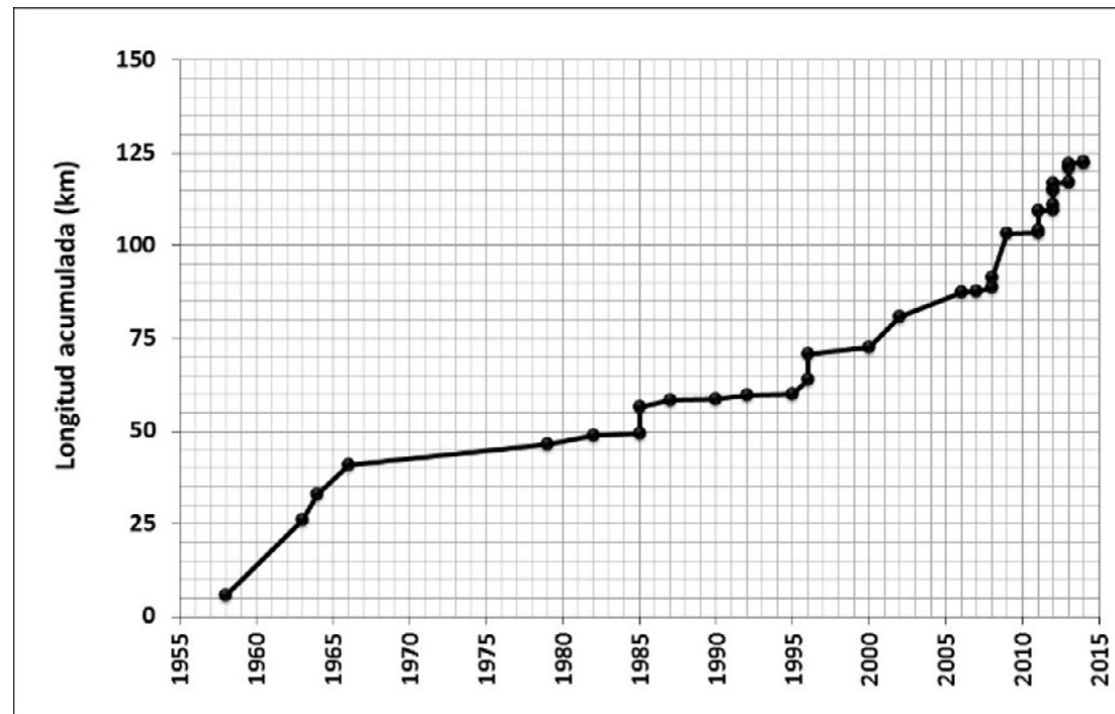


**Fotografía 15.** Micro tuneladora tipo “slurry” utilizada en micro túneles de saneamiento.



**Fotografía 16.** Una de las micro tuneladoras en Proyecto de Saneamiento de San José.

En la Figura 13 se muestra el comportamiento de la construcción de túneles hidroeléctricos en el país desde 1958 hasta 2014. Como se aprecia, hay una tasa de crecimiento sostenida en ese período, con un aumento en la última década. Actualmente, se continúan construyendo túneles en proyectos hidroeléctricos públicos y privados, como el del Proyecto Hidroeléctrico Los Negros 2, en la zona Norte, actualmente en ejecución.



**Figura 13.** Construcción de túneles hidroeléctricos (1958 – 2014).

Existe sin duda la factibilidad técnica y la capacidad de la ingeniería nacional para el desarrollo de túneles de gran tamaño en el Área Metropolitana. Las condiciones geológicas o sísmicas no representan un límite para su construcción, mientras que la tecnología actualmente disponible garantiza la realización segura de este tipo de obras en ambiente urbano. La última y más clara evidencia de ello, fue la conclusión del túnel de trasvase, a cargo de AyA, recientemente concluido en enero de 2016.

Un antecedente interesante es la construcción de la Plaza de la Cultura, en el centro de la ciudad de San José. Se trata de un complejo subterráneo, construido desde la superficie. Fue inaugurada en 1982 y aloja los museos del Banco Central, en

el espacio subterráneo, mientras que la plaza se ubica a nivel de la superficie. La construcción se desarrolló entre 1977 y 1982 y representó un hito de ingeniería y arquitectura para el país. Su propósito fue conformar un espacio o centro cívico para la ciudad, que incluye otros emplazamientos como el Parque Nacional, la Asamblea Legislativa, el Museo Nacional, la Plaza de la Democracia y la Plaza de la Justicia, en un recorrido de unos 800 metros en el centro urbano.

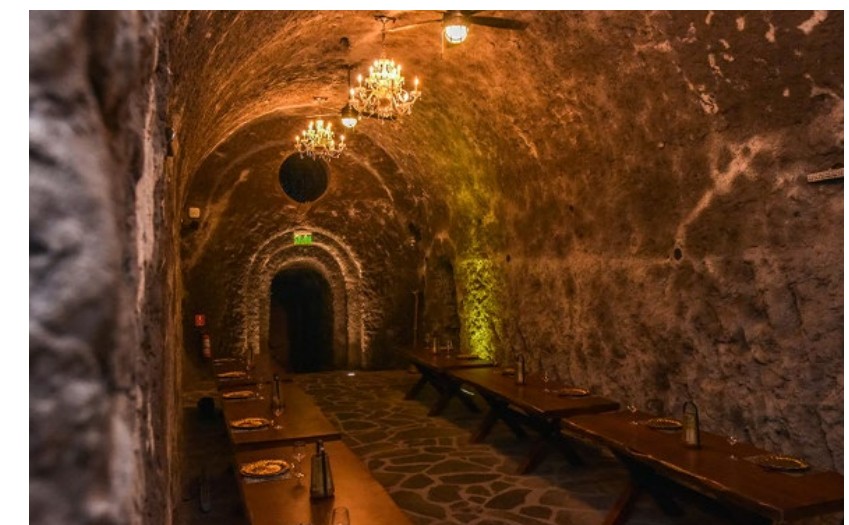
La construcción de esta estructura no estuvo exenta de dificultades. En la Fotografía 17 puede apreciarse una fase de la excavación, cuyas paredes fueron soportadas con vigas de concreto prefabricadas, ancladas al terreno en algunos sectores.

Esta estructura es la precursora de las excavaciones profundas para sótanos de edificaciones que en los últimos años han sido desarrolladas en gran número y con buen suceso en toda el Área Metropolitana.



**Fotografía 17.** Excavación de la Plaza de la Cultura.  
 Descargado de: [https://maritzacartin.files.wordpress.com/2022/03/img\\_0502.jpg](https://maritzacartin.files.wordpress.com/2022/03/img_0502.jpg)

Un último antecedente resulta obligado. Se trata del Proyecto Anfiteatro de Villa, que es un desarrollo privado con propósitos recreativos, que incluye la excavación de túneles y galerías en el macizo remanente de un antiguo tajo de ignimbritas, dentro de los cuales se ubican obras artísticas e instalaciones para eventos culturales y recreativos. El complejo alberga varias galerías y más de 500 m túneles, en tres niveles distintos. La excavación ha sido realizada por medios mecánicos y con equipo ligero. En la Fotografía 18 puede apreciarse el interior de una de las galerías principales.



**Fotografía 18.** Galería subterránea en Anfiteatro de Villa  
 Descargado de: <https://www.titicupon.com/sites/default/files/imagecache/coupon-slider-responsive/anfiteatro-de-villa2.jpg>



## 4. Objetivo de la Guía

La presente guía técnica no es un manual de diseño, construcción u operación de obras subterráneas, sino un documento de referencia que establece principios y criterios esenciales, así como recomendaciones específicas en casos como los túneles viales.

El documento busca impulsar obras seguras, eficientes y alineadas con las necesidades presentes y futuras del país.

Para algunas obras incluidas en la guía (por ejemplo, túneles viales), sí se ofrecen recomendaciones más detalladas para el dimensionamiento o equipamiento de los túneles.

En suma, el objetivo principal de esta guía es:

“Proveer un instrumento técnico orientativo para los propietarios, desarrolladores, diseñadores y constructores para la realización de obras subterráneas en Costa Rica, basada en las mejores prácticas internacionales y en la gestión del riesgo”.



## 5. Alcance

Como documento de guía, se discuten numerosos aspectos relacionados con el desarrollo del espacio subterráneo y de las obras subterráneas, incluyendo su planificación, aspectos organizacionales e institucionales, temas contractuales y normativos y los estudios técnicos necesarios para desarrollarlas, su diseño, construcción y operación, con un enfoque de gestión del riesgo.

La guía incluye aspectos específicos de los siguientes tipos de obras subterráneas, que forman parte de obras públicas (en general) que se construyen para mejorar la movilidad:

- Túneles viales,
- Túneles para el transporte masivo de personas,
- Túneles falsos.

Los túneles falsos se han incorporado en este documento por la relevancia de esas obras como una alternativa válida en carreteras de montaña, que posiblemente se aplicará en el país próximamente.

Se mencionan solamente aspectos básicos, generales, de los siguientes tipos de obras subterráneas, con la expectativa de profundizarlos en futuras ediciones de la Guía.

- Micro túneles.
- Sótanos.
- Pozos.
- Galerías.



## CAPÍTULO

# 6

## CONTEXTO NORMATIVO E INSTITUCIONAL

## 6. Contexto normativo e institucional

Este capítulo presenta un panorama general del marco normativo e institucional vinculado al uso del espacio subterráneo. Incluye una revisión resumida de la legislación, la jurisprudencia y de las instituciones con posible participación en el desarrollo de obras de este tipo. Debe enfatizarse que el contenido no constituye recomendación legal ni contractual. Las figuras jurídicas y su aplicación dependen de las circunstancias específicas de cada caso, y las normas pueden modificarse con el tiempo.

El propósito es únicamente ofrecer un contexto de referencia, subrayando la importancia de disponer de un marco normativo claro y adaptado al desarrollo del espacio subterráneo en Costa Rica.

### 6.1 El contexto normativo para desarrollar el espacio subterráneo

La Constitución Política de Costa Rica, en su artículo 6, establece que “El Estado (...) Ejerce, además, una jurisdicción especial sobre los mares adyacentes a su territorio en una extensión de doscientas millas a partir de la misma línea, a fin de proteger, conservar y explotar con exclusividad todos los recursos y riquezas naturales existentes en las aguas, el suelo y el subsuelo de esas zonas, de conformidad con aquellos principios.”

Por su parte el Código Civil, en su artículo 505, establece que la propiedad del suelo comprende también lo que se encuentra sobre y bajo la superficie, aunque sujeto a los límites que la ley fije. Esta disposición constituye la base general, pero su aplicación práctica se ha visto matizada por la jurisprudencia. Dice la citada norma lo siguiente: “El derecho de propiedad no se limita a la superficie de la tierra, sino que se extiende por accesión a lo que está sobre la superficie y a lo que está debajo. Salvadas las excepciones establecidas por la ley o la convención, el propietario puede hacer arriba todas las construcciones o plantaciones que le convenga, y hacer debajo todas las construcciones que juzgue a propósito y sacar de esas excavaciones todos los productos que puedan darle. En los casos de propiedad en condominio, lo anterior solo será aplicable con las limitaciones establecidas en la respectiva ley.”

El Código de Minería, en su artículo 4, establece una reserva expresa de los recursos del subsuelo considerados de interés nacional, los cuales son de dominio público y solo pueden ser aprovechados mediante concesión o autorización estatal, aun cuando se encuentren bajo terrenos de propiedad privada: “Artículo 4º.- Los yacimientos de carbón, gas natural, petróleo o de cualquier sustancia hidrocarburada; los minerales radioactivos, fuentes termales, fuentes de energía geotérmica u oceanotérmica, fuentes de energía hidroeléctrica; las fuentes y aguas minerales y las aguas subterráneas y superficiales, se reservan para el Estado y sólo podrán ser explotados por éste, por particulares de acuerdo con la ley, o mediante una concesión especial otorgada por tiempo limitado y con arreglo a las condiciones y estipulaciones que establezca la Asamblea Legislativa.

Los recursos naturales existentes en el suelo, en el subsuelo y en las aguas de los mares adyacentes al territorio nacional, en una extensión de hasta doscientas millas a partir de la línea de baja mar, a lo largo de las costas, sólo podrán ser explotados de conformidad con lo que establece el inciso 14) (último párrafo) del artículo 121 de la Constitución Política.”

Dice el artículo 121 de la Constitución Política en su artículo 14 lo siguiente: “Además de las otras atribuciones que le confiere esta Constitución, corresponde exclusivamente a la Asamblea Legislativa: (...) 14) Decretar la enajenación o la aplicación a usos públicos de los bienes propios de la Nación. No podrán salir definitivamente del dominio del Estado: a) Las fuerzas que puedan obtenerse de las aguas del dominio público en el territorio nacional; b) Los yacimientos de carbón, las fuentes y depósitos de petróleo, y cualesquiera otras sustancias hidrocarbурadas, así como los depósitos de minerales radioactivos existentes en el territorio nacional; c) Los servicios inalámbricos; Los bienes mencionados en los apartes a), b) y c) anteriores sólo podrán ser explotados por la administración pública o por particulares, de acuerdo con la ley o mediante concesión especial otorgada por tiempo limitado y con arreglo a las condiciones y estipulaciones que establezca la Asamblea Legislativa. Los ferrocarriles, muelles y aeropuertos nacionales - éstos últimos mientras se encuentren en servicio- no podrán ser enajenados, arrendados ni gravados, directa o indirectamente, ni salir en forma del dominio y control del Estado.” El artículo 121 inciso 14 permite concluir que, en Costa Rica, los recursos estratégicos del subsuelo son de dominio público inalienable, y su explotación está sujeta a un régimen de autorización excepcional (ley o concesión). De esta forma, el Estado conserva control soberano sobre dichos recursos, aun cuando se ubiquen bajo propiedad privada.

En consecuencia, el marco normativo costarricense delimita con relativa claridad dos esferas: por un lado, el ejercicio privado del subsuelo para usos razonables vinculados a la propiedad, como construcciones o desarrollos funcionales; y, por otro, la tutela estatal exclusiva sobre los recursos de interés nacional, cuyo aprovechamiento responde a un régimen de control soberano. Sin embargo, a pesar de que la legislación y la jurisprudencia reconocen que el subsuelo constituye en esencia un patrimonio del Estado, subsisten vacíos legales en cuanto a la definición precisa de los alcances de la propiedad subterránea y de sus límites verticales. Estos vacíos han motivado la presentación de iniciativas, como el expediente legislativo N° 17.938, que buscaba establecer un régimen jurídico más equilibrado y claro sobre el subsuelo, considerando también su posible utilización en el desarrollo de infraestructura necesaria para la prestación efectiva y eficiente de servicios públicos. No obstante, a la fecha tales propuestas no han prosperado en una reforma sustantiva, lo que mantiene abierta la discusión sobre la regulación integral de este espacio.

La ausencia de regulación detallada no ha impedido que la jurisprudencia costarricense trace líneas de interpretación. Existen casos en los que particulares han cuestionado judicialmente el uso del espacio subterráneo por parte de instituciones públicas o empresas estatales. Los tribunales han rechazado reclamos, sosteniendo que, conforme a la legislación vigente, incluida la Ley Forestal, el subsuelo pertenece al Estado. Un ejemplo emblemático es el del proyecto hidroeléctrico Toro III, desarrollado por el Instituto Costarricense de Electricidad. En este caso, la Sala Primera de la Corte Suprema de Justicia, mediante resolución N.º 1309-2013, concluyó que el subsuelo corresponde al dominio público estatal y, en consecuencia, desestimó las pretensiones de los propietarios superficiales: “(...) para esta Cámara, la teoría del interés del propietario de la superficie citada en la sentencia, resulta aplicable al caso concreto, incluso debe ser analizada conjuntamente con lo dispuesto en el artículo 505 del CC y 45 Constitucional. (...) En este postulado, los principios de razonabilidad y proporcionalidad, indican que el derecho de propiedad no se extiende para arriba o abajo a niveles que normalmente no pueden ser utilizados por el propietario. Se trata de un límite natural o sustancial del derecho de propiedad (...). En otros términos, puede el dueño del suelo, explotar el subsuelo, siempre y cuando se atenga a los límites que establecen las normas legales (minas, aguas, planificación urbana, etc.) y la propia constitución (razonabilidad y proporcionalidad). Aquí es donde converge la teoría del interés real de uso que debe ser acreditado por el propietario de la superficie, ya que no es suficiente alegar que el subsuelo le pertenece, debe demostrar que hacia abajo es propietario por acesión de otras construcciones o al menos, que tiene un interés real de uso de ese espacio (por ejemplo, que dispone alguna concesión minera o de cantera). (...) Explicado de otra forma, la extensión del dominio sobre el subsuelo que tiene el propietario de la superficie, está delimitada por el

interés que tenga sobre ese espacio físico, sea la posibilidad real y actual de su utilización; de lo contrario, y en caso de ser requerido ese espacio por la Administración para el desarrollo de obras de interés público, indudablemente tendrá preferencia sobre el dueño de la superficie, sin necesidad de precio alguno ni de servidumbre. (...) En el sub exámine, no han demostrado los demandantes ese interés real de uso y disfrute del subsuelo, no existen ni siquiera indicios de su aprovechamiento futuro, por lo cual, desde este punto de vista, no se puede determinar que había lugar para la imposición de servidumbre, para el justiprecio, ni para otra exigencia de responsabilidad. (...)”

Ante este panorama, resulta indispensable que los profesionales y el desarrollador del proyecto, sea público o privado, conozca las limitaciones establecidas por el marco normativo nacional, de manera que pueda adecuar el diseño y los alcances de la obra, reduciendo los riesgos asociados a las normativas técnicas y legales vigentes. En particular, para aquellas partes de la infraestructura que interactúen directamente con la superficie, deben cumplirse rigurosamente las disposiciones del Código Sísmico de Costa Rica, del Código Geotécnico de Costa Rica, entre otros instrumentos normativos aplicables.

## 6.2 Instituciones que participan en el desarrollo del espacio subterráneo

En el caso de Costa Rica, el desarrollo de obras subterráneas se encuentra condicionado por un entorno institucional complejo y multisectorial, en el que participan entidades con competencias diversas en materia de infraestructura, ambiente, planificación urbana, transporte, energía y agua, entre otros ámbitos.

Por ello, resulta fundamental evaluar dicho entorno desde las etapas iniciales del proyecto, con el propósito de coordinar y facilitar el desarrollo integral de todas las fases de la obra subterránea. Esta evaluación debe permitir identificar los marcos regulatorios aplicables, las instituciones competentes, los procesos de autorización y control, así como los mecanismos de coordinación entre las distintas entidades públicas y privadas involucradas.

En Costa Rica, la gestión de este tipo de proyectos puede involucrar, entre otras, a instituciones como el Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT), el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), el Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA), la Secretaría Técnica Nacional Ambiental (SETENA), el Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE), el Colegio Federado de Ingenieros y de Arquitectos de Costa Rica (CFIA) y las municipalidades correspondientes, según la localización y el alcance del proyecto.

Una comprensión temprana del entorno institucional facilita la identificación de tiempos, requisitos, y contribuye a una planificación más coherente y coordinada. Ello permite integrar de forma efectiva los aspectos técnicos, ambientales, sociales y contractuales, reduciendo riesgos de gestión y optimizando los tiempos de ejecución.

El propósito de esta evaluación no es establecer una estructura institucional única, sino proporcionar un marco de análisis técnico que apoye la toma de decisiones informada y la coordinación interinstitucional, factores esenciales para el éxito de los proyectos subterráneos en el contexto costarricense.

### 6.3 Actores en la ejecución de obras subterráneas

Al referirse a las obras públicas subterráneas, es posible identificar un conjunto de actores clave en su desarrollo. No se aborda aquí el análisis de las formas contractuales ni de los esquemas de financiamiento, sino el modo en que, por lo general, se organiza un proyecto para su diseño y ejecución. Cada actor asume responsabilidades, funciones y riesgos específicos, que pueden variar según el tipo de contrato utilizado.

A continuación, se presentan definiciones generales sobre el rol y el alcance de los diferentes actores que suelen participar en proyectos subterráneos a nivel internacional. Estas definiciones no siempre coinciden con las establecidas en la normativa nacional, como los reglamentos del CFIA o la Ley General de Concesión de Obras Públicas, y se incluyen únicamente como marco de referencia y comparación internacional. En todo caso, la aplicación práctica en Costa Rica debe atender siempre a las disposiciones legales y reglamentarias vigentes.

Dentro de los actores que generalmente participan en el desarrollo de una obra subterránea, a nivel internacional, se pueden destacar los siguientes:

**a) El Propietario, Contratante o Cliente.** Se trata de la instancia que desarrolla el proyecto, generalmente una institución pública o estatal. En Costa Rica, podrían citarse, por ejemplo: el Ministerio de Obras Públicas y Transportes o alguno de sus consejos, el Instituto Costarricense de Electricidad, el Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados, las empresas de servicios públicos, entre otros. El Propietario, generalmente, ha desarrollado el proyecto desde la identificación de la necesidad, la definición de anteproyectos, los estudios preliminares, la selección de la ruta definitiva y el diseño conceptual, la gestión de permisos, la viabilidad social, legal y ambiental y la búsqueda de financiamiento, así como de la definición de la estrategia adecuada para la ejecución del proyecto. El "Cliente" desempeña el mismo rol que el Propietario, pero cuando el proyecto se desarrolla en un ámbito privado. En el contexto de esta guía, se utilizará el término genérico "el propietario".

**b) El Concesionario de obra pública.** Persona jurídica que resulta adjudicatario de la concesión de la obra subterránea. Tal concesión puede incluir varias etapas del proyecto, como el financiamiento, el diseño, la construcción y la operación. Los proyectos por concesión corresponden a esquemas tipo BOT ("Build-Operate-Transfer", "Construir-Operar-Transferir") o BOOT ("Build-Own-Operate-Transfer", "Construir-Propiedad-Operar-Transferir") donde, al final de la concesión, hay una transferencia de la infraestructura al Estado, que a partir de ese momento es el responsable de la operación.

**c) El Ingeniero o Diseñador.** Es el profesional responsable o, más específicamente, la empresa responsable del diseño de la obra subterránea. Normalmente, es contratado por el propietario para realizar el diseño y, por lo tanto, se encarga también de establecer las especificaciones técnicas del proyecto y de preparar la documentación técnica que se incluye en los procesos licitatorios. Sin embargo, no es poco usual que sea contratado por el Contratista, en particular en el caso de contratos que incluyen el diseño final y la construcción. Durante el proceso constructivo, el Diseñador es responsable de la verificación de los modelos y realiza los análisis y ajustes al diseño necesarios para la adaptación a las condiciones reales de la excavación. Desarrolla los estudios iniciales y llega hasta la ingeniería de referencia, así como la ingeniería de detalles. El Diseñador puede hacerse ayudar de Consultores expertos para sus procesos de

verificación y seguimiento. Múltiples actores pueden tener el rol de diseñador en un proyecto, trabajando para el Propietario o para el Contratista, en las distintas etapas del proyecto.

**d) El Supervisor o Interventor.** Además del Diseñador, el Propietario normalmente contrata los servicios de un Supervisor, independiente, que lo representa en todos los procesos técnicos relacionados con el Diseñador o con el Contratista. Se encarga de verificar que los procesos constructivos y de diseño sean optimizados y que la relación entre Diseñador y Contratista derive en soluciones efectivas para el desarrollo del proyecto. Este rol es relevante sobre todo si el Propietario no posee las capacidades técnicas para el desarrollo de la obra subterránea.

**e) El Director de Obra.** Se encarga de planificar, organizar, dirigir, controlar y evaluar la ejecución de la obra subterránea hasta su término, responsabilizándose del normal desarrollo de la construcción, según los requerimientos de los documentos de contratación, respetando los planos y las especificaciones técnicas. Coordina los contratos y subcontratos para la ejecución exitosa del túnel.

**f) El Contratista o Ejecutor.** Es la empresa responsable de la ejecución del proceso constructivo, que resulta contratada por el Propietario tras un proceso licitatorio. Para la magnitud de las obras públicas que incluyen Obras Subterráneas, normalmente el proceso licitatorio es de carácter internacional, siguiendo lineamientos que muchas veces son establecidos por las entidades financieras. El Contratista debe poseer las capacidades técnicas para el desarrollo completo de la obra, pero también las capacidades organizacionales, legales y financieras para realizar la gestión del proyecto. En numerosas ocasiones, el Contratista es un consorcio de empresas y, además, comúnmente realiza subcontratos para la ejecución de tareas específicas, por lo que desempeña un rol de gerente del proyecto, aunque este puede estar delegado específicamente a una empresa independiente, especialista en la gestión de proyectos.

**g) Operador.** Entidad responsable de la operación y mantenimiento de la obra subterránea, sea que se trate de una entidad pública o un Concesionario de obra pública.

**h) Otros actores.** Existen muchos otros actores en el desarrollo de una obra subterránea, que incluyen a las entidades públicas y estatales, entidades financieras, instituciones de control (legales y técnicas), entes interesados, "stakeholders" y personas o agrupaciones sociales posiblemente afectadas por la obra o interesadas en ella, entre los principales. Para los efectos de esta guía, se han definido solamente a aquellos que tienen responsabilidades directas en la ejecución de tareas necesarias para completar la obra.



## CAPÍTULO

# 7

## ASPECTOS CONTRACTUALES

## 7. Aspectos contractuales

La relación entre los distintos actores del proyecto se formalizará mediante un contrato, como expresión de los acuerdos libremente pactados entre las partes. Este documento reflejará las condiciones específicas que regirán la ejecución del proyecto, las responsabilidades, los riesgos asumidos y los mecanismos de gestión correspondientes.

En el ámbito internacional se han desarrollado diversos contratos “modelo”, que abordan distintos enfoques de gestión colaborativa, asignación de riesgos y gobernanza de proyectos, tales como NEC4, NEC4 + Project 13 y los modelos de la Federación Internacional de Ingenieros Consultores (FIDIC). Su mención en esta guía tiene carácter exclusivamente informativo y técnico, sin constituir recomendación ni criterio normativo.

De manera particular, se hará una breve referencia al modelo FIDIC en algunos aspectos de interés para la presente guía, dado que esta Federación, en colaboración con la Asociación Internacional de Túneles y del Espacio Subterráneo (ITA-AITES), ha desarrollado un contrato modelo específico para obras subterráneas, denominado “FIDIC Underground Works Contract (Emerald Book) Guide”, correspondiente a una reimpresión de la versión del 2019, con enmiendas incorporadas en 2023. Su propósito es cubrir obras subterráneas con características y riesgos particulares que no están del todo tratados por los contratos generales, por lo que resulta especialmente relevante en el contexto de esta guía.

Es importante destacar que, independientemente del tipo de contrato utilizado, deben considerarse las particularidades y riesgos inherentes a este tipo de obras, donde existe un alto grado de incertidumbre asociado a las condiciones del terreno. Por ello, es importante contar con mecanismos adecuados de gestión y distribución de riesgos (ver capítulo 10).

Uno de los conceptos fundamentales para la gestión contractual, es la distribución de los riesgos. El modelo FIDIC del libro Esmeralda, considera los riesgos específicos relacionados con las condiciones físicas del espacio subterráneo, las cuales son difíciles de determinar con suficiente precisión antes de la ejecución del contrato y, por lo tanto, no pueden ser asignadas completamente al Contratista.

Entre los aspectos esenciales que deben ser considerados en la relación contractual, el libro Esmeralda destaca los siguientes:

- a. **El uso del Reporte Geotécnico de Línea Base, GBR** (Geotechnical Baseline Report, según su denominación en inglés, ASCE (2022)) es considerado indispensable en los contratos de construcción de obras subterráneas. Este documento se define como la fuente contractual única para la distribución de riesgos entre las partes del contrato, en lo que se refiere a las condiciones físicas del terreno. Así, cualquier condición del terreno que no sea incorporada en el GBR podrá ser considerada como “imprevista”. Los riesgos derivados de las propiedades previstas del terreno (y, por tanto, incluidas en el GBR), obstáculos y reacciones adversas a los procesos de excavación y sostenimiento del terreno, así como los ritmos de producción y coste de ejecución de las Obras en las mismas condiciones son asignados al Contratista. Por el contrario, los riesgos derivados de las condiciones físicas imprevistas del terreno, los obstáculos y las reacciones adversas a los procesos de excavación y sostenimiento del suelo se asignan al Propietario, lo que permite justificar prórrogas del plazo o el reembolso de los costos de atención del riesgo al Contratista.

**b. El riesgo asociado a la variación del plazo de ejecución** de los trabajos por causa de variaciones en las condiciones del terreno, no identificadas en el GBR, es asignado al Propietario. Entonces, es necesario ajustar el plazo de ejecución cuando tal situación ocurre, dentro de los límites definidos por el GBR, en la medida que se afecte la ruta crítica del proyecto. La Oferta del Contratista debe incluir las tasas de producción para cada unidad geotécnica o zona de excavación, con base en las condiciones descritas en el GBR. Las cantidades estimadas de la excavación, el soporte del terreno, las medidas auxiliares y el revestimiento, así como las tasas de producción correspondientes, se deben incluir en el cronograma de línea base.

**c. El costo de la excavación y del revestimiento** también depende de las condiciones del terreno. El libro Esmeralda establece que esas actividades sean medidas y pagadas utilizando las tarifas y precios establecidos en el Presupuesto de la oferta del Contratista. Por lo tanto, es el Contratista quien mide las cantidades finales y éstas son acordadas con el Supervisor.

**d.** El plazo de ejecución de las obras subterráneas suele ser extenso y dado que, por otra parte, hay un alto costo de la inversión en equipos, hay también un costo asociado a la depreciación de tales equipos, intereses, gastos generales, entre otros, es decir, **son costos asociados al tiempo** (no a la cantidad). Por tal razón, en caso de haber ajustes de tiempo provocados por la variación de las condiciones del terreno, es necesario también reconocer esos costos al Contratista. Consecuentemente, el presupuesto del Contratista en su oferta debe distinguir los ítemes de costo asociados al tiempo de aquellos asociados al volumen de trabajo.

El resumen anterior no pretende dar una explicación exhaustiva sobre el modelo contractual, sino solamente llamar la atención sobre la importancia de utilizar las mejores herramientas disponibles para la gestión de contratos. Se escapa del alcance de esta guía una explicación pormenorizada del tema.

## 8. Tipos de obras subterráneas

De acuerdo con lo señalado en el capítulo 5, esta guía incluye recomendaciones para los siguientes tipos de obras subterráneas:

- Túneles de transporte (viales y metro).
- Túneles falsos (en carreteras de montaña).

En lo sucesivo y en el contexto de esta guía, aplican las siguientes definiciones:

**a. Túnel:** espacio subterráneo, de carácter lineal, abierto en ambos extremos para permitir el paso de bienes, productos o personas. La dimensión de su diámetro o ancho de la sección transversal es mucho más pequeña que la longitud.

**b. Pozo:** excavación o abertura vertical o casi vertical para proporcionar acceso a una instalación subterránea u operación de construcción.

**c. Galería:** espacio subterráneo cuyas dimensiones de ancho, altura y longitud son similares en orden de magnitud, utilizado para almacenamiento o diversos usos.

**d. Túnel vial:** túnel destinado al paso de vehículos.

**e. Túnel ferroviario:** túnel destinado al paso de equipo rodante sobre líneas férreas.

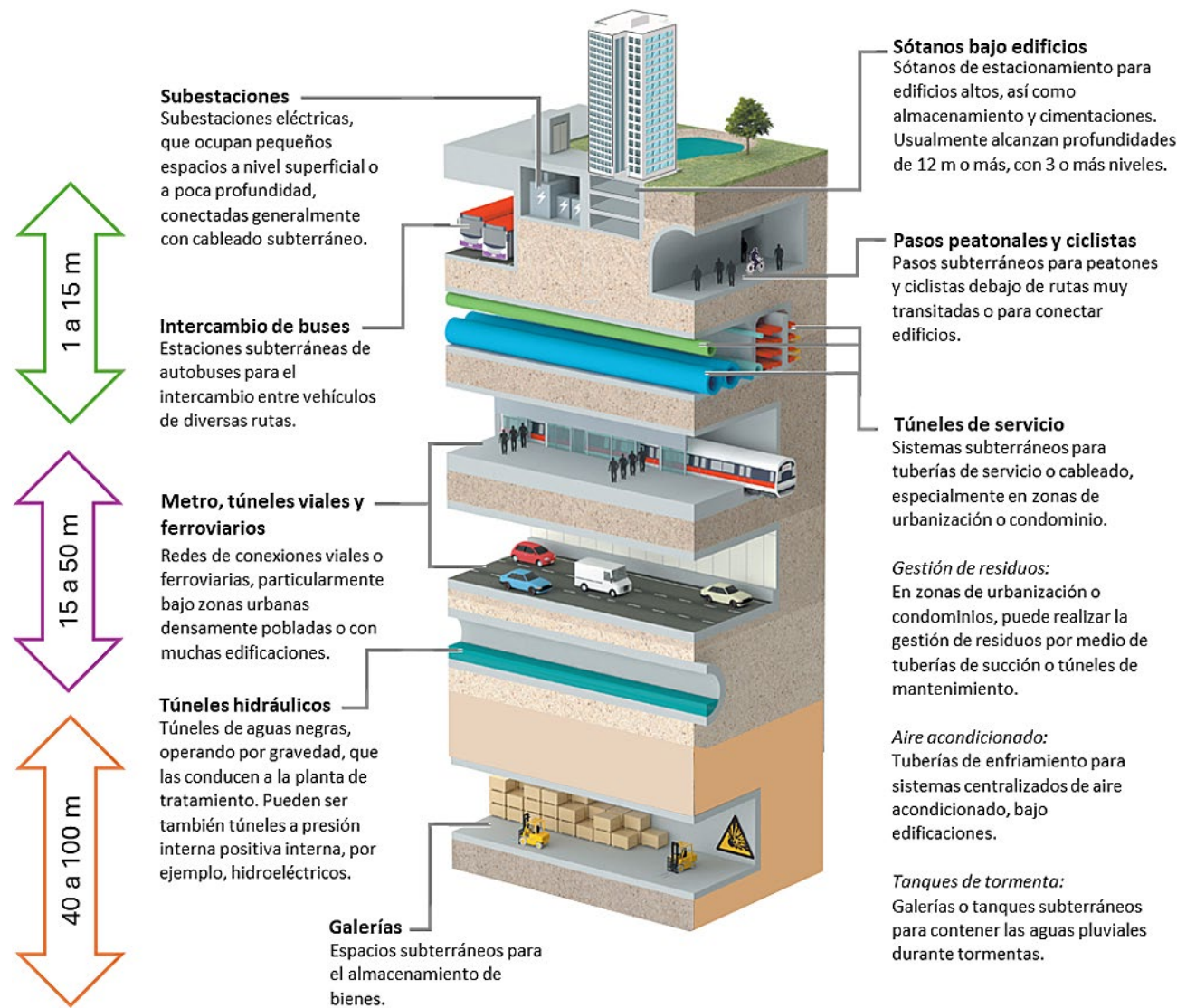
**f. Túnel de metro:** túnel destinado al transporte masivo de personas en zonas urbanas. Generalmente utiliza equipo rodante sobre líneas férreas, aunque también se utiliza equipo sobre llantas.

**g. Túnel falso:** paso vial o ferroviario protegido por un techo estructural, fabricado en la superficie y anclado al terreno, con el propósito de dar abrigo y paso seguro a los vehículos y personas que transitan por carreteras o líneas férreas afectadas por terrenos inestables.

**h. Micro túnel:** túnel de pequeño diámetro (menores a 3 m), donde no es posible (o es sumamente difícil) el acceso de personas al frente de excavación durante el proceso constructivo.

**i. Sótano:** espacio subterráneo localizado debajo de una edificación, construido desde la superficie, destinado a diversos usos.

En la Figura 14 se ilustran usos potenciales y usos actuales del espacio subterráneo en Costa Rica.



**Figura 14.** Diversos tipos de obras para aprovechar el espacio subterráneo (Modificado de: Create Digital, 2023)

No existen límites claramente definidos para el tipo de obra que puede desarrollarse según la profundidad, en tanto el marco normativo costarricense actualmente no regula de manera explícita el uso planificado del espacio subterráneo. Por ahora, es posible plantear cualquier tipo de obra subterránea a cualquier profundidad, en tanto se consideren las obras existentes para asegurar su viabilidad técnica.

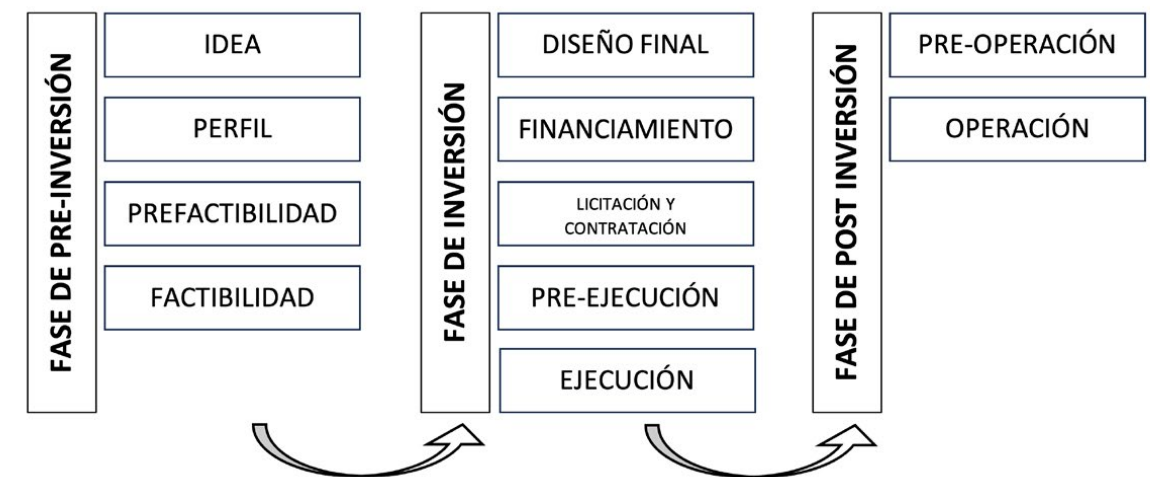
Será importante, de cara al futuro, establecer también a nivel de la planificación urbana los corredores subterráneos más importantes (por ejemplo: metro, tren subterráneo, etc.), así como áreas de servidumbre y áreas públicas para accesos y los espacios para los servicios públicos.

## 9. Desarrollo de las obras subterráneas

En general, las obras subterráneas son grandes obras. Por tanto, deben ser desarrolladas por etapas, sin importar si se ha catalogado como una obra pública o un proyecto privado. En este capítulo se comentan algunas particularidades de cada etapa.

### 9.1 Ciclo de vida de proyectos de inversión pública

De acuerdo con la Ley del Sistema Nacional de Inversión Pública (SNIP), No. 22470, de 13 de marzo de 2024, el ciclo de vida del proyecto corresponde al proceso de maduración de un proyecto de inversión, desde la expresión de la idea del proyecto hasta su aprovechamiento. De acuerdo con esta ley, el ciclo de vida del proyecto se estructura en fases y etapas, según se explica en la Figura 15.



**Figura 15.** Ciclo de vida de proyectos de inversión pública (Mideplan, 2022).

La distribución de etapas puede variar, según las normas de cada país. En muchos casos, en la fase de inversión, por ejemplo, el diseño básico se identifica como la etapa previa a la consecución del financiamiento, mientras que el diseño final se incluye en la ejecución.

Los proyectos de obras subterráneas, por lo general, son proyectos de inversión pública (o forman parte de uno). Así, cuando se desarrollen en ese contexto, deben cumplir con lo dispuesto en la Ley del Sistema Nacional de Inversión Pública (SNIP), siguiendo el ciclo de vida mostrado en la Figura 15, salvo las excepciones previstas en la misma ley (ver artículo 3: Entes públicos no estatales y empresas e instituciones públicas en competencia). Sin embargo, las obras subterráneas también pueden desarrollarse por medio

de inversión privada. En tal caso, el ciclo de vida puede seguir una secuencia o agrupación de etapas distintas de la mostrada en la Figura.

Para efectos de esta guía, y con el fin de incorporar la práctica internacional, se utiliza un ciclo de Vida del proyecto dividido en cinco etapas, similares a las fases ya descritas. Si bien no existe una normativa internacional que defina de manera uniforme el ciclo de vida de un proyecto, esta subdivisión coincide con la práctica usual a nivel internacional, donde se utiliza un esquema simplificado de las etapas, como se aprecia en la Figura 16.

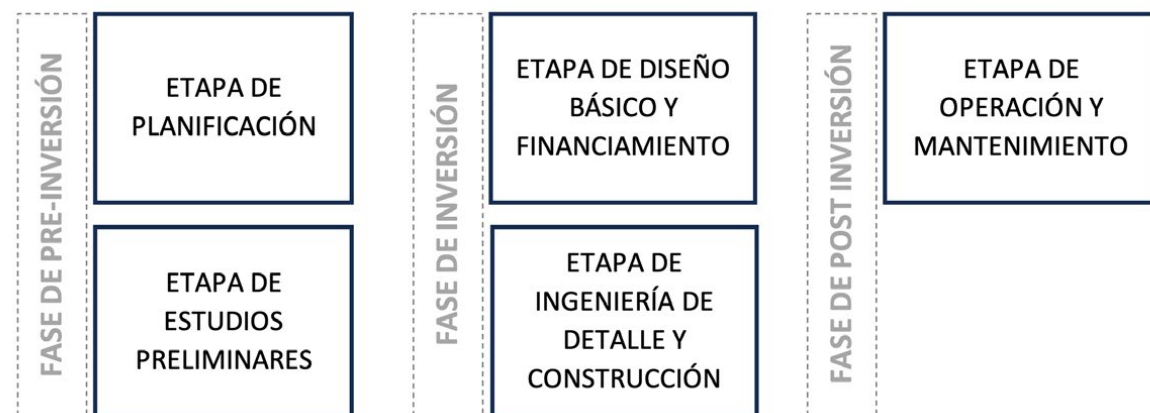


Figura 16. Etapas usuales del ciclo de vida de proyectos de obras subterráneas.

A continuación, se explican los alcances de estas etapas, de acuerdo con la propuesta de la ITA (2016). Se han omitido las etapas de financiamiento y de licitación y contratación, que están fuera del enfoque de esta guía.

## 9.2 Etapa de planificación

Es la etapa donde se identifican las necesidades y los recursos disponibles para el desarrollo de la obra subterránea bajo consideración. No difiere significativamente de lo que se realiza para otro tipo de proyectos de infraestructura cuando se plantea la solución a un problema o la respuesta a una oportunidad de mercado.

La principal característica de esta etapa es la conceptualización general de la solución y la definición de posibles rutas para el trazado de la obra subterránea.

En primera instancia, debe considerarse el impacto que puede provocar la obra que se planifica, en relación con las regulaciones en cuanto al uso del espacio subterráneo en general. Además, debe considerarse cuidadosamente el entorno donde se emplazará la obra. En el caso de túneles urbanos, debe verificarse si será necesario trasladar instalaciones existentes, cómo son las condiciones geológicas donde se emplazará el túnel y cómo ocurrirán todas las interacciones con ese entorno, generalmente complejas. En túneles fuera del ámbito urbano, los impactos ambientales pueden ser relevantes y deben ser analizados cuidadosamente.

### 9.2.1 Objetivos de la etapa de planificación

- Definir el propósito del proyecto y sus alternativas conceptuales
- Identificar posibles trazados (o corredores), estudio de alternativas
- Realizar los Estudios ambientales preliminares
- Evaluar a nivel preliminar la viabilidad del proyecto

### 9.2.2 Productos esperados de la etapa de planificación

- Definición de los requerimientos funcionales y de calidad
- Alineamiento de posibles rutas del túnel
- Evaluación inicial del riesgo de cada ruta
- Estimación preliminar del costo de cada ruta
- Evaluación de experiencias anteriores de proyectos similares
- Establecimiento del esquema de desarrollo del proyecto
- Recomendación de las rutas por estudiar en la siguiente etapa

### 9.2.3 Métodos y herramientas aplicados en la etapa de planificación

- Mapas existentes
- Imágenes remotas
- Interpretación de gabinete
- Recorridos por los posibles trazos
- Informes de proyectos similares o cercanos
- Criterio experto del grupo interdisciplinario

## 9.3 Etapa de estudios preliminares (factibilidad)

La etapa de estudios preliminares se enfoca en la ejecución de estudios técnicos que permitan determinar la factibilidad técnica de cada ruta que se evalúe. Tienen especial relevancia los estudios geológicos y la evaluación de riesgos. El propósito final de esta etapa es la selección de la ruta definitiva, aquella que es factible y óptima, para lo cual es fundamental el proceso de la evaluación de riesgos y de costo de cada una de las alternativas.

En esta etapa se debe realizar una importante inversión en la investigación geológica y geotécnica de todos los trazos que están siendo evaluados. Por lo tanto, se supone que deben realizarse perforaciones, sondeos geofísicos, estudios geológicos detallados, identificación de obstáculos y restricciones, aspectos logísticos, legales, ambientales, entre otros.

### 9.3.1 Objetivos de la etapa de estudios preliminares

- Determinar la factibilidad técnica, económica, financiera, ambiental y legal del proyecto
- Definir el trazado o corredor definitivo del proyecto
- Establecer los criterios de diseño y de desempeño de la obra
- Realizar el Estudio de Impacto Ambiental
- Obtener los permisos ambientales y las aprobaciones legales
- Iniciar la adquisición del derecho de vía y terrenos necesarios para el proyecto

- Desarrollar el modelo geológico y geotécnico del terreno con base en información disponible y en la investigación realizada en esta etapa
- Identificar los riesgos mayores sobre el trazado seleccionado
- Hacer estimaciones de los costos y el cronograma de ejecución.

### 9.3.2 Productos de la etapa de estudios preliminares

Al final de esta etapa, se esperarían los siguientes productos:

- Alineamiento de la alternativa óptima del túnel
- Análisis de los accesos
- Identificación de las restricciones en los plazos de desarrollo del proyecto
- Estimación preliminar del costo y del plazo
- Identificación de las restricciones ambientales
- Comunicación e información a las partes interesadas
- Estimación de las condiciones de mercado
- Evaluación de experiencias anteriores de proyectos similares
- Perfeccionamiento del esquema de desarrollo del proyecto.
- Confección de mapas geológico e hidrogeológico a una escala aceptable y en función de la información disponible.
- Confección de un mapa de riesgos naturales en el área del proyecto.
- Confeccionar el modelo geológico (perfil longitudinal) de las obras subterráneas a una escala mínima de 1:5000 o más detallada, en función de la información disponible.
- Modelo geotécnico (perfil longitudinal) con la identificación de las unidades geotécnicas basadas en el comportamiento del terreno y la identificación de amenazas naturales mayores
- Preparación inicial del Plan de Gestión de Riesgo.

### 9.3.3 Métodos y herramientas aplicados en la etapa preliminar

- Disponibilidad de mapas topográficos regionales, geológicos, hidrogeológicos/agua subterránea, geotécnicos, amenaza sísmica, etc.
- Levantamiento geológico de campo general y la recopilación de información de proyectos adyacentes similares.
- Prospección geofísica local, donde se considere indispensable.
- Limitada exploración de campo para confirmar condiciones geológicas/hidrogeológicas extremadamente críticas (p.e. fallas geológicas, existencia de karst, acuíferos confinados, asentamientos, etc.).
- Exploración con calicatas y perforaciones.

## 9.4 Etapa de diseño

La ruta finalmente seleccionada en las etapas preliminares debe ahora ser diseñada. Esta etapa puede subdividirse en diseño básico y diseño final o ejecutivo.

El diseño básico se realiza para poder hacer estimaciones realistas del costo y el plazo de ejecución del proyecto, elementos indispensables para realizar la gestión del financiamiento y la preparación de los

documentos contractuales. La tendencia a nivel internacional es que el Propietario realice el diseño básico.

El diseño final se realiza en ocasiones directamente por el Propietario del proyecto para luego realizar la contratación de la construcción. Sin embargo, es muy usual mantener esta subetapa dentro de los alcances de la contratación que, en tal caso, se realiza bajo la modalidad de diseño + construcción. En algunos casos también se puede contratar bajo la modalidad de “diseño + financiamiento + construcción”. En cualquiera de los casos referidos, es importante precisar los alcances, productos y métodos de estas dos subetapas del diseño.

### 9.4.1 Objetivos del diseño básico

- Completar la investigación de campo del trazado de la etapa preliminar
- Perfeccionar el modelo geológico, el cual debe permitir cuantificar o definir las unidades geológicas (suelo/roca) y el régimen de aguas subterráneas para:
  - Adoptar el alineamiento de túnel u obra subterránea más conveniente desde el punto de vista técnico.
  - Definir el método de construcción más adecuado bajo un análisis de riesgo, incluida la predicción del comportamiento geotécnico del terreno (suelo/roca) vs método de construcción, determinar las diferentes clases de soporte temporal y su distribución a lo largo del alineamiento del túnel, junto con un posible rango de variación, el diseño de obras auxiliares y portales.
  - Preparar un adecuado diseño técnico y económico que permita establecer una estimación preliminar de su costo.
- Elaborar el GBR (Geotechnical Baseline Report, Reporte Geotécnico de Línea Base), que será incluido en los documentos de contratación.
- Definir la zona de influencia y estimar el impacto que podría tener sobre estructuras o terrenos adyacentes, particularmente si se trata un desarrollo en obras urbanas como Líneas de Metro, acueductos, etc.
- Proveer información para el Estudio de Impacto Ambiental.
- Identificar cuantitativamente los riesgos, evaluar su impacto en el costo y el cronograma de construcción, y decidir en el diseño las medidas que deben ser tomadas para reducir el riesgo.
- Evaluar el nivel de incertidumbre residual para poder definir una campaña adicional de investigación que será ejecutada durante la etapa de diseño de detalle.
- Desarrollar el concepto logístico para la ejecución del proyecto
- Escribir las especificaciones técnicas del proyecto
- Definir el esquema general del proyecto
- Estructurar claramente el cronograma del proyecto
- Preparar la estimación de costos para la gestión de financiamiento
- Preparar la documentación para la gestión de financiamiento
- Definir los niveles de seguridad ocupacional requeridos
- Definir el Plan de Gestión Ambiental
- Realizar los procesos de información y discusión públicos
- Verificar la condición del mercado para la inserción del proyecto
- Obtener los permisos de construcción

- Preparar la documentación para los procesos licitatorios
- Realizar la modelación en BIM (ver sección 11.3).

#### 9.4.2 Productos del diseño básico

- Modelo geológico longitudinal a escala 1:1000 (o más detallada) para el caso de obras subterráneas en el contexto urbano y 1:2000 (o más detallada) para las que se ubican en entorno rural.
- Modelo geotécnico longitudinal a escala 1:1000 (o más detallada) para el caso de obras subterráneas en el contexto urbano y 1:2000 (o más detallada) para las que se ubican en entorno rural. El modelo geotécnico debe incluir la caracterización cuantitativa de los tipos de comportamiento de las unidades geotécnicas, así como la identificación de amenazas.
- Secciones geológicas y geotécnicas transversales de los portales, pozos de ventilación o acceso a una escala de 1:500 (o menor).
- Caracterización del régimen hidrogeológico.
- Ubicación clara de interacciones, rampas, accesos.
- Actualización del Plan de Gestión de Riesgo establecido en la etapa de factibilidad.
- Planos y documentos para la gestión del financiamiento
- Permisos y aprobaciones para la ejecución
- Documentos de licitación, carteles y términos de referencia, incluyendo el GBR actualizado para la etapa de contratación.

#### 9.4.3 Métodos y herramientas para el diseño básico

- Levantamiento geológico de superficie en detalle.
- Perforaciones exploratorias (con recuperación de núcleo) y prospección geofísica en los portales y pozos.
- Perforaciones exploratorias y prospección geofísica a todo lo largo del alineamiento de la obra.
- Monitoreo continuo de las fuentes de agua y niveles freáticos.
- Recolección de muestras para la ejecución de ensayos de laboratorio (suelo y roca).
- Medición del estado de esfuerzos in situ y ensayos de permeabilidad (ensayos de hidrofracturación, overcoring, etc.).
- Galerías y pozos exploratorios.
- Ensayos in situ para determinar módulos de deformación, permeabilidad, etc. (ensayos presiométricos, ensayos Lugeon, pruebas de placa rígida, etc).
- Análisis detallado y diseño mediante el uso de software especializado

#### 9.4.4 Objetivos del diseño final

- Planear y ejecutar las investigaciones de campo y laboratorio para confirmar las propiedades geotécnicas e hidrogeológicas de las unidades (suelo/roca) definidas en la etapa previa
- Desarrollar el modelo Geotécnico e Hidrogeológico confiable de tal manera que se puede validar el método de construcción por medio de cálculo y detalle en términos de especificaciones técnicas.
- Obtener el conjunto completo de los parámetros de diseño (incluyendo su rango

potencial de variabilidad), y con ello finalizar el dimensionamiento estructural de todos los componentes de la obra.

- Identificar los sitios de escombrera y el uso potencial del material excavado.
- Reducir las incertidumbres residuales a un nivel razonablemente práctico.
- Alcanzar finalmente una evaluación precisa de su costo y duración.
- Actualizar el PGR, reevaluar el nivel de riesgo residual, y confirmar las medidas de mitigación con el fin de minimizar su riesgo a su nivel más bajo razonablemente aceptable.
- Definir los requerimientos para la recolección de información geológica adicional, hidrogeológica y geotécnica durante la fase de construcción, incluyendo ensayos de campo a escala natural.
- Seleccionar el método constructivo
- Evaluar detalladamente la logística y el proceso constructivo completo.
- Actualizar el GBR de la etapa anterior.

#### 9.4.5 Productos del diseño final

- Modelo geológico longitudinal a escala 1:2000 (o menor)
- Modelo geotécnico detallado a escala 1:2000 (o menor). Este debe incluir una caracterización de las unidades geotécnicas, clases de soporte temporal, identificación de las amenazas, distribución de las secciones de soporte y controles que deben de ejecutar durante la construcción. Parámetros geotécnicos para el diseño (estimar su variabilidad)
- Modelos geológicos y geotécnicos de los portales y pozos a una escala 1:200 (o menor).
- Caracterización detallada del régimen hidrogeológico (cantidad de acuíferos, tipo de acuíferos, niveles freáticos o piezométricos).
- Actualización del Plan de Gestión de Riesgo.
- Diseño del Plan de Auscultación y Monitoreo.
- Definición geométrica, funcional y estructural de todas las obras, incluyendo las obras complementarias.
- Actualización de las Especificaciones Técnicas.
- Plan de construcción
- Documento actualizado del GBR.
- Sistema BIM actualizado (ver sección 11.3)

#### 9.4.6 Métodos y herramientas del diseño final

- Perforaciones exploratorias con recuperación de núcleo adicionales a lo largo del alineamiento del túnel y en ambos portales, adicionales a las realizadas en el diseño básico.
- Desarrollar ensayos de laboratorio e in situ donde se considere necesario, adicionales a los realizados en el diseño básico.
- Desarrollar prospección geofísica para sitios específicos o casos especiales, adicionales a la realizada en el diseño básico.
- De requerirse, realizar excavaciones experimentales de secciones seleccionadas a lo largo del túnel.
- Monitoreo continuo de las fuentes de agua y niveles freáticos (o piezométricos).
- Análisis detallado y diseño mediante el uso de software especializado
- Equipo interdisciplinario de consultores expertos
- Herramientas BIM

## 9.5 Etapa de construcción

### 9.5.1 Objetivos de la construcción

- Validar el modelo geotécnico e hidrogeológico por medio de mapeo, investigaciones en el frente de excavación del túnel, datos de rendimiento de excavación, etc.
- Ejecutar el Plan de Auscultación y Monitoreo del terreno con base en la instrumentación correspondiente, evaluación del soporte del terreno y comportamiento de los acuíferos.
- Actualizar sistemáticamente el modelo del terreno con el fin de predecir el comportamiento del terreno y el agua subterránea para la subsecuente sección que será excavada y así ajustar el diseño/método de construcción (sección de soporte por utilizar).
- Analizar el material excavado y evaluar su potencial uso o su destino final, características de los escombros en función de las restricciones ambientales.
- Registrar las condiciones de las estructuras/edificios que podrían ser afectados por las excavaciones, y monitorear los movimientos del terreno y asentamientos.
- Ejecutar todos los procesos logísticos de manera controlada
- Verificar el cumplimiento de los requerimientos de calidad
- Gestionar los tiempos de ejecución y programa de trabajo
- Aplicar el control de costos según el presupuesto aprobado
- Aplicar el Plan de Gestión Ambiental
- Aplicar el Plan de Gestión de Riesgo, interviniendo rápidamente con acciones de respuesta de emergencia en el caso de afectaciones no deseadas hacia el entorno.
- Cumplir los compromisos adquiridos con las partes interesadas
- Ejecutar el Plan de Construcción de las obras
- Entregar al Propietario un producto que cumpla en calidad, de acuerdo con las especificaciones.
- Entregar un modelo BIM para el seguimiento de la obra en la etapa de operación y mantenimiento.

### 9.5.2 Monitoreo durante la etapa de construcción

La instrumentación y el monitoreo de la etapa constructiva son esenciales, sobre todo en el contexto urbano. Forman parte del Plan de Gestión de Riesgo (ver Capítulo 9) y estrictamente necesarios para que el proyecto pueda ajustarse y controlarse durante la etapa de construcción. Los sistemas modernos de instrumentación y monitoreo tienden a ser automatizados, con generación de datos en tiempo real. Sin embargo, todavía son muy usuales las mediciones manuales. Por otra parte, una parte esencial de este proceso, cual es la interpretación de los datos, recae en un equipo específicamente responsable de dicha tarea durante el proceso constructivo. No se discuten aquí los aspectos tecnológicos de la instrumentación, que evolucionan muy rápido, pero sí se presentan los objetivos y alcances de la actividad de monitoreo durante la ejecución, según lo propuesto por ITA (2011).

#### Objetivos del monitoreo

- Obtener información sobre la respuesta del terreno ante la excavación
- Controlar el proceso constructivo
- Verificar los modelos y parámetros del diseño
- Medir el desempeño del revestimiento del túnel durante la construcción
- Identificar impactos en el entorno
- Optimizar el diseño y garantizar la seguridad del proceso constructivo

- Alertar sobre tendencias hacia la falla de cualquiera de los componentes del túnel o bien, sobre la necesidad de implementar medidas correctivas, sea en superficie como en subterráneo

## 9.6 Etapa de operación y mantenimiento

Las obras subterráneas requieren ser operadas y mantenidas. Como ejemplo de lo contrario, se puede citar el único túnel vial del país, el del Zurquí. Se discute de la necesidad y los requerimientos para realizar las tareas de operación y mantenimiento de las obras subterráneas, también con un enfoque de gestión del riesgo.

De acuerdo con el PIARC (2024), las actividades de operación y mantenimiento de túneles viales se pueden clasificar en tres líneas principales:

- a. Gestión diaria:** supervisión del tráfico y verificación de funcionamiento eficiente de todos los equipamientos, en condiciones normales de operación y durante las emergencias.
- b. Formación del personal:** Se requiere formación básica, ejercicios y simulacros, no sólo del personal de operación, sino también del personal de otros servicios de respuesta, como la policía de tránsito, bomberos y ambulancias.
- c. Mejora continua de la seguridad:** planes y análisis para garantizar la seguridad y que esta mejore con el tiempo. Incluye planes de emergencia, sustitución de equipos, evaluación de riesgo, etc.)

### 9.6.1 Objetivos del mantenimiento

- Reducir los costos de operación
- Reducir el número de cierres no deseados del túnel
- Aumentar la seguridad de los usuarios
- Asegurar niveles de servicio adecuados
- Reducir los riesgos de operación

### 9.6.2 Actividades de mantenimiento

Las actividades de mantenimiento pueden variar desde tareas simples hasta intervenciones desafiantes. En términos generales, se pueden mencionar los siguientes tipos de actividades de mantenimiento:

- Remoción de escombros, basura, etc.
- Lavado de las estructuras del túnel
- Limpieza de drenajes, ajuste de pernos, cambios de luminarias
- Mantenimiento de equipos, pintura, restauración de pavimento
- Mantenimiento de los sistemas hidráulicos, eléctricos y señalización
- Ensayos, verificaciones, mediciones y calibraciones de los equipos
- Intervenciones mayores, planificadas
- Intervenciones mayores, no planificadas
- Rehabilitación
- Medición periódica de convergencias dentro del túnel
- Medición de esfuerzos estructurales en el revestimiento
- Medición de caudales de ingreso y egreso de la obra
- Mantener actualizado el modelo BIM
- Pruebas periódicas de la funcionalidad de los equipos de emergencia



## 10 Gestión del riesgo

Se discuten en este capítulo, aspectos generales sobre la gestión del riesgo en las obras subterráneas. Se trata de un tema central en la práctica actual en este tipo de obras a nivel internacional. El objetivo de este capítulo es ofrecer algunos conceptos importantes sobre la gestión del riesgo y cómo se desarrolla o evoluciona a lo largo del desarrollo del proyecto, sin pretender ser exhaustivos en el tema.

Se podrá entender que cada actor involucrado tiene una participación mayor o menor en la gestión del riesgo, según la etapa del proyecto. No es posible desarrollar en este espacio, de manera detallada, las actividades propias de cada uno, e incluso algunos términos pueden resultar un tanto “técnicos” a algún lector que esté poco familiarizado. En tal caso, se recomienda recurrir a una asesoría específica de una persona calificada en el tema de gestión del riesgo.

Lo relevante es entender, al final de cuentas, que la gestión del riesgo no sólo es fundamental en los proyectos subterráneos, sino que, además, la práctica internacional actual exige una definición clara de la distribución de riesgos entre los participantes del proyecto, incluso a nivel contractual. Por ello, una comprensión del tema es fundamental.

### 10.1 Gestión del riesgo en obras subterráneas

La gestión del riesgo debe darse en todas las etapas de desarrollo de la obra subterránea. Es necesario realizar un Plan de gestión del Riesgo (PGR) para cada una de esas etapas. Esta es una responsabilidad conjunta de diversos actores en el proyecto, pero la tarea de liderar la gestión del riesgo recae sobre el principal responsable de la etapa. Así, en los estudios preliminares, la gestión del riesgo será liderada por el Propietario de la obra. En la etapa de diseño, por el Diseñador y, en la fase constructiva, por el Contratista. Finalmente, será el Gestor u Operador quien se responsabilice por el PGR en la etapa de operación y mantenimiento.

A pesar de que exista un responsable de la gestión del riesgo, los otros actores participan y colaboran en la aplicación y en el perfeccionamiento del PGR, en todos los ámbitos del proyecto. A continuación, se presentan los conceptos principales para el desarrollo del PGR.

La gestión del riesgo es un proceso continuo y cíclico a lo largo de la vida del proyecto. En cada etapa hay cuatro subprocesos principales para realizar la gestión del riesgo:

1. Identificar las amenazas (sección 10.1.4)
2. Evaluar el riesgo asociado a esas amenazas (sección 10.1.5)
3. Establecer acciones de respuesta ante el riesgo (sección 10.1.6)
4. Monitorear el comportamiento de la obra (sección 10.1.7)

Estos subprocesos constituyen un ciclo que se repite en cada etapa del proyecto, como se indica en la Figura 17.

Lógicamente, cada etapa tendrá un alcance y un propósito diferente en cuanto a la gestión del riesgo, de ahí que deban ajustarse esos subprocesos según el momento en que se encuentre el proyecto. Sin embargo, es claro que la Gestión del Riesgo es una actividad estructurada a lo largo de toda la vida útil del proyecto y forma parte de un subsistema del proyecto: el sistema de gestión del riesgo.



Figura 17. Subprocesos para la gestión del riesgo en la vida útil de la obra.

### 10.1.1 El sistema de gestión del riesgo

El Sistema de Gestión del Riesgo (SGR) se refiere a todos los procesos, criterios y definiciones que, en conjunto, permiten guiar y operativizar esa gestión. Es el “ecosistema” de la gestión del riesgo y el PGR es la herramienta operativa fundamental en el SGR.

El SGR contiene las políticas de gestión del riesgo (establecidas por el dueño de la obra) y la definición del sistema, el análisis del riesgo (proceso de estimación del riesgo), los criterios de aceptación de riesgo (¿hasta dónde es aceptable un riesgo?) y las respuestas ante el riesgo (el conjunto de acciones que buscan reducir el nivel de riesgo), tal como se describe en la Figura 18. Así mismo, se requiere una organización y distribución de responsabilidades, aspectos que también forman parte del SGR.

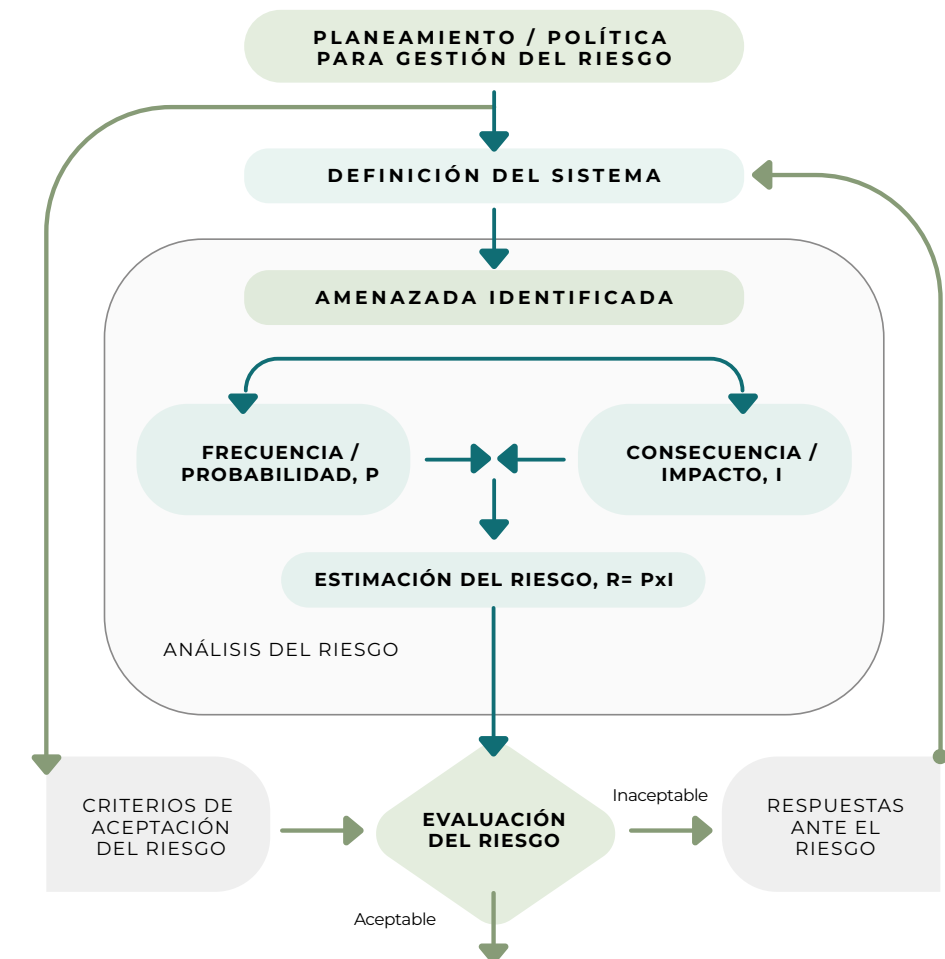


Figura 18. Componentes del Sistema de Gestión del Riesgo.

El SGR deberá estar debidamente explicado y documentado en el Plan de Gestión del Riesgo, según se describe en la sección 10.1.3.

### 10.1.2 Etapas del proceso de evaluación del riesgo

Haciendo una clasificación arbitraria, pero de acuerdo con las etapas que normalmente se reconocen a nivel internacional se muestran, en la Figura 19, las diversas etapas del proyecto. El proceso de evaluación del riesgo debe realizarse en cada una de las etapas de desarrollo de la obra subterránea.

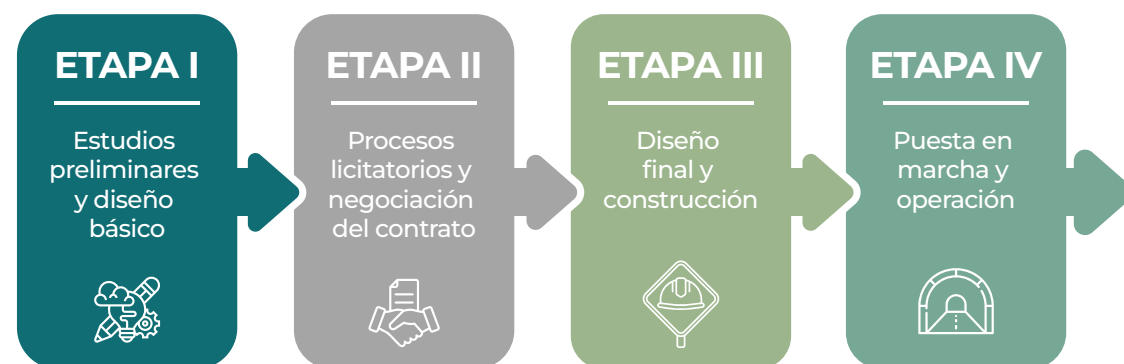


Figura 19. Etapas para la evaluación del riesgo.

#### 10.1.2.1 Etapa 1: Estudios preliminares del proyecto

En las etapas preliminares del proyecto (identificación, estudios preliminares, prefactibilidad y factibilidad), será tarea fundamental el establecimiento del sistema de gestión del riesgo. En esta etapa se establece la política de manejo de riesgos por parte del propietario, incluyendo: el enfoque, los objetivos y la estrategia para la gestión del riesgo. Además, en esta etapa se elabora el GBR (Geotechnical Baseline Report), herramienta esencial en el proceso de evaluación del riesgo, que ya identifica amenazas y define responsabilidades en relación con riesgos geológicos y geotécnicos.

Dado que en las fases iniciales del proyecto se realiza, normalmente, un análisis de alternativas, la evaluación del riesgo resulta fundamental para comparar opciones o variaciones del proyecto, de manera que se pueda seleccionar la de menor nivel de riesgo, ya que no debe olvidarse que la mitigación o eliminación de riesgos generalmente requiere recursos adicionales. Por ello, al identificarse las acciones de mitigación, es posible también tener una mejor idea de lo que podrían ser los costos finales del proyecto.

Por lo general, para estas etapas, basta con realizar un análisis cualitativo de riesgos, puesto que normalmente no existe información suficiente para proceder con un análisis cuantitativo.

#### 10.1.2.2 Etapa 2: Procesos licitatorios y negociación del contrato

La etapa de procesos licitatorios y negociación del contrato es relevante para el desarrollo del proyecto, por lo que la realización de un adecuado análisis y evaluación de riesgos es fundamental.

Es necesario incluir en los términos de referencia de los documentos de licitación, una especificación del análisis de riesgo que debe hacer el oferente, el cual deberá ser aportado como parte de la oferta. El objetivo es evaluar la capacidad del oferente para administrar el riesgo en el proyecto.

Una vez que las ofertas son recibidas, se requiere evaluar las propuestas de los oferentes para realizar la gestión del riesgo del proyecto. Así, las ofertas deben incluir el análisis de riesgo realizado por el oferente, el cual será utilizado tanto para asignar el puntaje o calificación de la capacidad técnica del oferente, así como para asegurarse de que ese elemento de costo esté debidamente considerado en la oferta económica.

Por otra parte, como parte de la negociación del contrato, será imprescindible deslindar claramente las responsabilidades de cada parte en cuanto a la gestión del riesgo. Cada actor deberá asumir determinados riesgos, para lo cual, en principio, la responsabilidad se asigna en función de la mejor capacidad de una parte u otra de responder ante un determinado riesgo.

#### 10.1.2.3 Etapa 3: Diseño final y construcción del proyecto

Antes de iniciar la ejecución del proyecto y, con los diseños finales (diseño de construcción o diseño ejecutivo) listos, es necesario realizar un análisis detallado de los riesgos, a cargo del contratista, sobre su propuesta de construcción de la obra, que estará basado en el análisis incluido en su oferta.

El PGR para la etapa constructiva deberá ser acordado entre el propietario y el contratista, como parte de la negociación contractual, de manera que sea aplicado un único y sólido sistema de gestión del riesgo en el proyecto, que incluye los riesgos identificados en el GBR y todos los otros tipos de riesgo asociados a la ejecución de la obra.

Un aspecto que debe tenerse presente es que la gestión de los riesgos durante la construcción del túnel requiere de un sistema de instrumentación y monitoreo (se detalla este tema en la sección 10.1.7).

#### 10.1.2.4 Etapa 4: Puesta en marcha y operación del proyecto

Los riesgos operativos pueden ser significativamente diversos de los constructivos. En un túnel, siempre existirán condiciones de interés durante la operación, como la posibilidad de ocurrencia de incendios, accidentes, caídos de bloques, obstrucción de la entrada o salida del túnel, generación de gases o emisiones, infiltraciones, entre otros. Sin embargo, los mismos corresponden a condiciones muy distintas a las obtenidas durante la construcción. Teóricamente, las condiciones de corto plazo ocurren durante la construcción o en el período inmediatamente después de finalizada esta etapa, pero hay condiciones de mediano y largo plazo que se manifestarán solamente después de años de operación.

Se requiere también un sistema de instrumentación y monitoreo permanente, el cual por principio es distinto del utilizado durante la construcción, aunque parte de la instrumentación utilizada durante la fase de ejecución seguirá siendo monitoreada durante la fase de operación. Por lo general, la actividad de monitoreo en la etapa de operación corresponde al operador del túnel.

#### 10.1.2.5 Actividades del propietario en la evaluación de riesgos

En primer lugar, el propietario es el responsable de establecer una política de administración de riesgo, congruente con sus políticas y los objetivos funcionales del túnel. Esto se debe realizar en las etapas preliminares.

Durante la etapa de procesos licitatorios y negociación del contrato, el propietario elaborará estudios que incluirá en los documentos de contratación y que incluyan: descripción de riesgos técnicos significativos, requerimientos técnicos para mitigar el riesgo y requerimientos de competencias para administrar el riesgo. Estos tienen por objetivo permitir al contratista preparar su oferta y demostrar sus competencias para la gestión del riesgo, aspectos ambos a ser evaluados durante el proceso licitatorio.

Con base en la documentación de la oferta, el propietario realiza la selección del contratista, evalúa su habilidad para administrar el riesgo y puede establecer cuáles son los riesgos de la propuesta del contratista. Esta valoración sentará las bases para un trabajo conjunto entre el propietario y el contratista en la gestión del riesgo.

Finalmente, durante la etapa de ejecución de las obras, el Propietario o la Dirección de Obra llevará adelante la supervisión y apoyará el sistema del Contratista para la gestión del riesgo. Además, realizará una determinación y mitigación de los riesgos propios (del Propietario) y aprobará o desaprobará las acciones del Contratista para la mitigación de riesgo.

### 10.1.2.6 Actividades del contratista en la evaluación de riesgos

Por su parte, el contratista también participa en la gestión de riesgo a partir de la etapa de licitación y negociación de contrato. Su primera tarea será la evaluación de riesgo durante la preparación de su oferta. En ella, idealmente deberá desarrollar los siguientes aspectos:

- Sistema propuesto para la administración del riesgo (ver sección 10.1.3.2)
- Descripción de su experiencia y competencias en la gestión del riesgo
- Identificación y descripción de riesgos del proyecto
- Identificación y descripción de acciones de respuesta para la gestión del riesgo
- Costos de la gestión del riesgo

Una vez adjudicado el contrato, durante la etapa de ejecución de las obras, al contratista le corresponderá implantar el sistema de gestión del riesgo de manera efectiva. Conforme avance el proyecto, deberá evaluar en forma detallada los riesgos, con participación del propietario y de expertos convocados para tal fin. Deberá realizar la propuesta de mitigación de riesgos y ejecutar acciones de respuesta o acciones de emergencia si fueran necesarias, según lo establecido en el Plan de gestión del riesgo.

## 10.1.3 El plan de gestión del riesgo

El Plan de gestión del riesgo (PGR) se compone de un conjunto de documentos que contiene la descripción detallada del SGR y donde se establecen las acciones a seguir para concretizar la gestión del riesgo. El PGR forma parte de la documentación oficial del proyecto y deberá ser aprobado y aceptado por todos los actores del proyecto al inicio de cada etapa.

### 10.1.3.1 Requerimientos del PGR

Por supuesto, el PGR requiere de la integración de todas las partes involucradas en el desarrollo del proyecto. Debe cumplir los siguientes requerimientos:

- Debe implementarse lo antes posible en el inicio de cada etapa del proyecto. Se debe tener claro, sin embargo, que los niveles de detalle y las herramientas utilizadas para la valoración de los riesgos, van a variar según el grado de conocimiento que se tenga del proyecto y su entorno. Por lo tanto, en las etapas preliminares la precisión del análisis será menor y esta tenderá a ser más precisa y detallada en la etapa de ejecución.

- Debe estar integrado en todas las fases del proyecto. Tanto las etapas preliminares de investigación, los procesos licitatorios, la ingeniería de detalle, así como la construcción y operación del proyecto, deberán estar integradas en el proceso de gestión del riesgo. Esto quiere decir que el PGR en una etapa, está basado y da continuidad al PGR de la etapa anterior.

- Requiere continua actualización. El PGR es dinámico: debe manejarse, actualizarse, integrarse con todas las actividades y comunicarse entre todos los actores del proyecto. Así, no se trata de generar documentos con los listados de amenazas o acciones correctivas. Es necesario dedicar recursos al proceso de gestión del riesgo.

- Todos los involucrados en el proyecto deben participar. El PGR debe establecer los roles y alcances de la participación de cada actor del proyecto: propietario, gerente del proyecto, contratista, expertos consultores, supervisores, diseñadores y otros involucrados. Cada uno de estos actores tiene diferentes roles y responsabilidades, pero todos deben intervenir de una manera comprometida, según sus alcances, en la gestión del riesgo.

### 10.1.3.2 Contenido del PGR

El PGR documenta el sistema de gestión del riesgo (SGR). Por lo tanto, debe contener los siguientes aspectos:

- a. Política para la gestión del riesgo
- b. Objetivos y requerimientos del SGR
- c. Limitaciones o restricciones para la gestión del riesgo
- d. Organización para la gestión del riesgo
- e. Distribución de responsabilidades en la gestión del riesgo
- f. Criterios para la aceptación del riesgo
- g. Método de análisis del riesgo
- h. Evaluación del riesgo
- i. Registro del riesgo (incluyendo el GBR)
- j. Acciones de respuesta ante el riesgo
- k. Plan de instrumentación y monitoreo
- l. Sistema de comunicación del riesgo y toma de decisiones
- m. Evaluación y seguimiento de la aplicación del PGR

En primer lugar, es necesario definir la política, los objetivos y requerimientos y las limitaciones o restricciones desde la perspectiva de la gestión del riesgo. Estas definiciones vendrán dadas, en general, por el propietario del proyecto. Otro aspecto que debe ser establecido por el propietario, tiene que ver con su tolerancia al riesgo, tanto sobre el grado de incertidumbre como sobre los niveles de riesgo.

La definición de la organización para la gestión del riesgo es tarea del líder de la etapa. Como se indicó, será el mismo propietario o contratante durante las fases preliminares, el ingeniero o diseñador en la etapa de diseño, el contratista o ejecutor durante la construcción de las obras y el operador en la fase de operación y mantenimiento. Por su naturaleza, tanto la organización como la distribución de responsabilidades en la gestión del riesgo, sin embargo, son temas de carácter contractual, que deberán ser incluidos de manera formal en los documentos contractuales.

Un aspecto medular del PGR es la evaluación del riesgo. Por eso, uno de los documentos fundamentales del PGR, que debe elaborarse y ponerse a disposición de todos los actores del proyecto, es el Registro del Riesgo, el cual documenta el proceso de evaluación del riesgo y forma parte integral del PGR. A continuación, en la sección 10.1.3.3, se explica con detalle el contenido del Registro del Riesgo, pues se trata de una herramienta medular en la gestión del riesgo.

**10.1.3.3 El registro del riesgo**

El Registro del Riesgo (RR), usualmente, se presenta de manera tabular, pues tal formato es compacto y directo. Comprende un listado completo y detallado de las amenazas, junto con sus respectivas valoraciones: la valoración inicial del riesgo, las acciones correctivas o medidas de reducción y mitigación, junto con la valoración del riesgo residual y las contramedidas (acciones de emergencia) que serán ejecutadas en caso de que se materialice cualquiera de las amenazas identificadas.

La Figura 20 muestra un ejemplo del RR para un túnel sanitario urbano ejecutado con TBM. La tabla, en este extracto, corresponde a una lista parcial de una de las familias de riesgos (condiciones geológico – geotécnicas), pero deben elaborarse otras tablas para cada familia de riesgos que se defina.

Como se deduce, el RR muestra un listado, categorizado, de las diversas amenazas identificadas y su riesgo asociado. Para cada amenaza, se muestra el Nivel inicial de Riesgo, así como las acciones de respuesta, cuyo efecto es reducir la probabilidad de ocurrencia o aminorar los impactos que la amenaza pudiese provocar. Luego de evaluar la aplicación de las medidas de mitigación, se muestran los riesgos residuales, que serán administrados durante la ejecución del proyecto y, finalmente, se agregan acciones de emergencia, que se aplican en caso de que sean alcanzados ciertos valores predeterminados en alguna de las variables registradas por medio del sistema de monitoreo (por ejemplo: deformaciones, presiones, caudales, etc.).

Además de la lista en el RR, que resume todas las amenazas identificadas, se debe detallar las acciones planteadas para cada una de ellas. Ese detalle puede mostrarse en fichas específicos, como el mostrado, a manera de ejemplo, en la Figura 21.

El RR es una herramienta útil y dinámica, que debe ser actualizada con frecuencia. Entre sus principales aspectos, está el facilitar la comunicación entre todas las partes involucradas respecto al manejo de los riesgos del proyecto.

C-GEO-00	AMENAZAS POR CONDICIONES GEOLÓGICAS GEOTÉCNICAS	RIESGO INICIAL			Acciones de respuesta	RIESGO RESIDUAL			Acciones de emergencia
		I	P	R		I	P	R	
C-GEO-01	Presencia de fallas geológicas o zonas de cortante no previstas	7	4	28	Más investigación; Pretratamientos; TBM cerrada	6	3	18	Inyección desde superficie
C-GEO-02	Presencia de rocas muy blandas en zonas no previstas	7	5	35	Más investigación; Pretratamientos; TBM cerrada	6	4	24	Inyección desde superficie
C-GEO-03	Presencia de zonas muy fracturadas no previstas	6	4	24	Más investigación; Pretratamientos; TBM cerrada	5	3	15	Inyección desde superficie
C-GEO-04	Presencia de masas rocosas plegadas no previstas	6	1	6		6	1	6	
C-GEO-05	Presencia de terrenos "desplazables" ("running ground") - arenas saturadas	8	1	8		8	1	8	
C-GEO-06	Presencia de terreno plastificable ("squeezing ground") no previsto	8	1	8		8	1	8	
C-GEO-07	Presencia de terreno expansivo ("swelling ground") no previsto	8	4	32	Inyección; Considerar en diseño; TBM cerrada	4	2	8	
C-GEO-08	Spalling o rockburst por concentraciones de esfuerzos in situ muy altos	4	1	4		4	1	4	
C-GEO-09	Buckling por anisotropía importante entre los esfuerzos principales	4	1	4		4	1	4	
C-GEO-10	Contracción del terreno ("shrinking ground") por Infiltración	4	1	4		4	1	4	
C-GEO-11	Terreno suelto, no confinado, esfuerzos in situ muy bajos no previstos	4	2	8		4	2	8	
C-GEO-12	Presencia de zonas blocosas, cuyas fracturas tienen orientación desfavorable	3	2	6		3	2	6	
C-GEO-13	Presencia de rocas muy duras, masivas en ubicación no prevista	4	2	8		4	2	8	
C-GEO-14	Presencia de rocas muy abrasivas en ubicación no prevista	4	1	4		4	1	4	

**Figura 20.** Ejemplo de Registro de Riesgo de un túnel excavado con tuneladora (extracto).

REGISTRO DE RIESGO – CONSTRUCCIÓN CON TBM PRESURIZADA	
CÓDIGO: PH-T-001	AMENAZA: Pérdida de terreno
DESCRIPCIÓN: Pérdida de volumen de terreno, provocando sobre excavación y asentamientos en la superficie	
CAUSAS	CONSECUENCIAS (IMPACTOS)
<ul style="list-style-type: none"> <li>Sobre excavación</li> <li>Poca presión de soporte al frente</li> <li>Velocidad de rotación de rueda de corte</li> <li>Condiciones inesperadas del terreno</li> <li>Lenta respuesta del operador</li> </ul>	<p>C1 – Construcción (programa, salud y seguridad): Problemas mayores asociados a detenciones de larga duración y daño a terceros</p> <p>C2 – Comercial (costos): Impacto medio al costo para reparaciones; Impactos severos en caso de evacuación, fatalidades o daños en los edificios</p> <p>C3 – Operación (Largo plazo): Impactos despreciables durante la fase de operación</p>
EVALUACIÓN DEL RIESGO INICIAL	
<p>C1=3 I=C1+C2+C3=8</p> <p>C2=4 P=5</p> <p>C3=1 R=I×P=8×5=40</p>	<p>Evaluación: RIESGO INICIAL INACEPTABLE</p> <p>Responsable: Contratista</p>
MEDIDAS DE MITIGACIÓN	
FASE DE DISEÑO	FASE DE CONSTRUCCIÓN
<ul style="list-style-type: none"> <li>Calcular los rangos apropiados de operación de la TBM a lo largo del perfil del túnel</li> <li>Definir los procedimientos de utilización de la TBM</li> <li>Predecir los asentamientos y daños a edificios</li> <li>Diseñar un sistema de monitoreo adecuado (obras, terreno y edificios)</li> <li>Actualizar las predicciones de diseño</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Implementación de los procedimientos definidos</li> <li>Personal de la TBM entrenado</li> <li>Sistemas de alarma automáticos instalados</li> <li>Sistemas automáticos para mantener presión</li> <li>Monitoreo remoto de la TBM en tiempo real</li> <li>Implementar sistema SIG y controles cruzados</li> <li>Interpretación sistemática de los datos</li> </ul>
EVALUACIÓN DEL RIESGO RESIDUAL	
<p>C1=1 I=C1+C2+C3=3</p> <p>C2=1 P=3</p> <p>C3=1 R=I×P=3×3=9</p>	<p>Evaluación: RIESGO RESIDUAL ACEPTABLE</p> <p>Responsable: Contratista</p>
<p>Contramedidas: Preparar plan de emergencia</p> <p>Responsable: Contratista</p>	<p>Costo del impacto residual: &lt; US\$ 1,000,000</p> <p>Costo residual adicional: US\$100,000 (estimación para máxima incertidumbre en costos)</p> <p>Probabilidad residual: &lt; 10%</p>

Figura 21. Ejemplo de detalle del RR (Adaptado de Guglielmetti et al. 2008).

### 10.1.4 Identificación de las amenazas

La primera tarea para la elaboración del RR es la identificación de las amenazas. Sin embargo, para iniciar esta labor, será necesario, de previo, tener la definición del Escenario de diseño de referencia. Tal escenario es el que será evaluado en todo el proceso.

La identificación de amenazas implica la elaboración de una lista exhaustiva de aquellas condiciones que representen una amenaza para el proyecto (lista de amenazas). Durante la elaboración de la lista, no se debe omitir ninguna condición que pudiera darse, dado que cada una será posteriormente evaluada en términos del riesgo asociado. Es posible utilizar listas de chequeo o referencias de otros proyectos, pero en general, se requiere la participación de personas con experiencia y, ojalá, de varias disciplinas, de modo tal que se logre la lista más detallada posible.

Generalmente, las amenazas identificadas en un proyecto pueden agruparse en “familias”. Esto es importante porque esta clasificación facilitará la organización del conjunto de acciones de mitigación de los riesgos, toda vez que las familias de amenazas muchas veces encuentran su origen en causas comunes.

La lista de las amenazas y sus familias puede hacerse desde distintos enfoques. Por ejemplo, Chiriotti et al. (2003), sugieren cuatro grupos:

- Amenazas geológicas
- Amenazas de diseño
- Amenazas de construcción
- Amenazas financieras, sociales y ambientales

Un enfoque alternativo es el propuesto por Eskesen et al. (2004), quienes sugieren la siguiente lista de familias de amenazas, separadas en generales y específicas:

**Amenazas generales:**

- Disputas contractuales
- Insolvencia financiera y problemas institucionales
- Interferencia de las autoridades
- Interferencia de terceras partes
- Disputas laborales

**Amenazas específicas:**

- Accidentes
- Condiciones adversas inesperadas
- Diseños, especificaciones y programas inadecuados
- Fallas de equipos mayores
- Obras defectuosas, lento avance de construcción o incumplimiento de especificaciones

### 10.1.5 Evaluación del riesgo

La evaluación del riesgo se realiza por medio de un proceso estructurado, mediante el cual se identifica tanto la probabilidad de ocurrencia como el impacto de las consecuencias adversas generadas cuando una amenaza se materializa.

La valoración del riesgo asociado a cada amenaza de la lista puede realizarse siguiendo un enfoque cualitativo o uno cuantitativo. En el primero, las probabilidades y los impactos se definen por medio de una escala cualitativa, asignando valores que pueden considerarse “subjetivos”, establecidos en forma relativa. Por ejemplo, “muy probable” o “poco probable” o, bien “impacto bajo” o “impacto alto”.

En el enfoque cuantitativo, la probabilidad es establecida en forma numérica, a partir de levantamientos estadísticos o información secundaria que permita definir valores de probabilidad acordes con el tipo de variable. Así mismo, los impactos o consecuencias son valorados a partir de estudios y análisis de detalle, utilizando información actual y específica atinente al proyecto.

Una vez que se han establecido los valores de riesgo para cada una de las amenazas identificadas, es posible categorizarlos de acuerdo con ciertos criterios preestablecidos. Según la valoración asignada, podrá considerarse que un riesgo es “inaceptable” o bien “despreciable”. Esta categorización definirá el tratamiento sucesivo a ese riesgo particular.

El criterio general será el de tratar de reducir el riesgo a niveles aceptables o, si fuese viable, eliminarlos completamente. Pero este criterio general no es suficiente para realizar el trabajo de clasificación, por lo que se deben establecer criterios formales, que pueden ser de tres tipos:

- Reducir el riesgo hasta un valor determinado. Es posible establecer valores numéricos o cualitativos de los riesgos que serán considerados “aceptables” o, bien, aun siendo riesgos no deseados, se ubican en un nivel tal que es posible tomar acciones de mitigación o contra – medidas en el caso de que ellos ocurran durante la ejecución de la obra.
- Criterios Costo/Beneficio. En caso de tener la información disponible, será un análisis tipo costo/beneficio el que determinará la aceptación de los riesgos. Los costos de las acciones de mitigación o supresión de los riesgos, comparados con los beneficios obtenidos en el proyecto, permitirán definir si un riesgo es aceptable o no. El propietario debe establecer tales criterios.
- ALARP: “As low as reasonably practicable”. Según este concepto, las acciones de mitigación, supresión o las contramedidas son aceptables en el tanto puedan ser “ejecutadas dentro de un marco razonable de costos y de tiempo”, esto es, en la medida en que sus costos no saquen de viabilidad económica y financiera el proyecto o que lo lleve a una condición de inoportunidad por la extensión de los plazos. La definición de lo que es “razonable” puede ser, de alguna manera, influenciada por aspectos culturales y por la experiencia particular del propietario y el contratista, por lo que no es posible ofrecer una definición generalizada. Debe ser establecida sobre una base casuística para las condiciones específicas del proyecto.

De la discusión precedente y considerando lo expresado en la sección anterior, se deduce que los niveles de riesgo pueden ser modificados. Esto se representa en la Figura 22. Según se muestra, los riesgos pueden ser clasificados como inaceptables, en cuyo caso es necesario tomar decisiones o acciones tales que el riesgo sea reducido a niveles inferiores. Riesgos en la “región ALARP” pueden ser gestionados, por ejemplo, disponiendo recursos (humanos, equipos, materiales) que puedan ser utilizados de manera efectiva y rápida si se presenta la situación, esto es, aplicando “contra medidas” o acciones de emergencia para la mitigación del riesgo. Finalmente, hay también una región de riesgos “aceptables”, los cuales no requieren mayores consideraciones, debido a su baja probabilidad o a su bajo impacto en el proyecto.

La reducción del nivel de riesgo de una condición de inaceptable (rojo en la Figura 22), a una condición aceptable o despreciable se logra, como se indicó, por medio del establecimiento de medidas cuyo efecto final es la reducción de su probabilidad de ocurrencia o de su impacto. Por ejemplo, si se define un proceso de investigación geotécnica adicional o se realiza algún tratamiento del terreno, se podría reducir la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno amenazante. En otras palabras, por medio de acciones de respuesta o acciones preventivas se reduce la probabilidad de ocurrencia o la magnitud de los impactos y, por ende, el nivel de riesgo. Sin embargo, una obra con riesgo nulo o despreciable sería demasiado costosa, por lo cual debe establecerse un nivel aceptable para gestionar el riesgo.

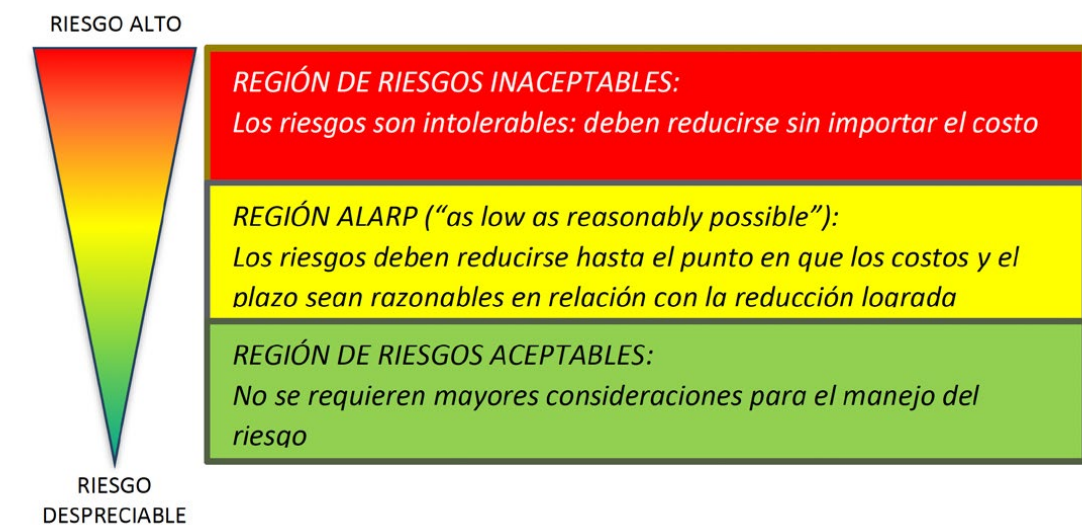


Figura 22. Variación del nivel de riesgo.

La posibilidad de variación del nivel de riesgo es fundamental en el proceso de evaluación. Este proceso, que es cíclico y permanente a lo largo de la vida del proyecto, inicia con la determinación del nivel inicial de riesgo (antes de iniciar la ejecución del proyecto). Esta determinación permite identificar las amenazas que requieren acciones de mitigación, contramedidas, sistemas de prevención, instrumentación, monitoreo y otras acciones, las cuales se constituyen en las “medidas de mitigación”. Una vez que se ha establecido la aplicación de tales medidas, se realiza una nueva valoración de riesgos (habiéndose modificado la probabilidad de ocurrencia o la magnitud de los impactos), que permitirá establecer el nivel residual de riesgos. Este nivel deberá ser congruente con la política de aceptación de riesgos establecida por el propietario, de manera que el proyecto pueda realizarse dentro de las expectativas de todas las

partes involucradas. En general, el proyecto avanza cuando los niveles de riesgo residual son aceptables o despreciables y, adicionalmente, se han tomado las acciones y previsiones definidas en la evaluación del riesgo. De esa manera, el proyecto tendrá la capacidad de gestionar medidas apropiadas en el momento oportuno para gestionar los riesgos.

Para realizar una adecuada valoración de los niveles de riesgo, es necesario establecer algún tipo de escala, que permita discriminar entre riesgos elevados o despreciables a partir de los criterios establecidos. La manera más común de aplicar la evaluación es mediante la utilización de la “matriz de aceptación de riesgos”. Esta permite establecer, de acuerdo con las posibles combinaciones de probabilidades e impactos, cuáles riesgos serán aceptados, rechazados o gestionados por el propietario.

Un ejemplo de la matriz de aceptación de riesgos se presenta en la Figura 23, en este caso, por medio de definiciones cualitativas. La escala de colores es importante pues es indicativa de la importancia asociada a los diversos niveles de riesgo. La matriz utiliza escalas cualitativas de probabilidad y de impacto; sin embargo, es también posible definir una matriz similar con escalas cuantitativas, por ejemplo, con rangos numéricos de probabilidad de ocurrencia y magnitudes del impacto en términos de costos, tiempo, número de accidentes u otra variable significativa.

PROBABILIDAD	IMPACTO				
	Desastroso	Severo	Serio	Considerable	Insignificante
Muy probable	Inaceptable	Inaceptable	Inaceptable	No deseado	No deseado
Probable	Inaceptable	Inaceptable	No deseado	No deseado	Aceptable
Ocasional	Inaceptable	No deseado	No deseado	No deseado	Aceptable
Improbable	No deseado	No deseado	No deseado	Aceptable	Despreciable
Muy improbable	No deseado	Aceptable	Aceptable	Despreciable	Despreciable

Figura 23. Matriz de aceptación de riesgos

Ahora, puede definirse la “matriz de riesgos”, mostrada en la Figura 24, que contiene la combinación numérica del riesgo, que se puede calcular como el producto de la probabilidad de ocurrencia y la magnitud de los impactos,  $R=PxI$ . La matriz mostrada en la figura corresponde a una valoración cualitativa, en la cual se ha definido una escala de 1 a 5 para la probabilidad y de 1 a 10 para los impactos. La matriz de riesgo es una expresión numérica de la matriz de aceptación de riesgos. La escala se define de manera específica según las características del proyecto.

		IMPACTO				
		Desastroso	Severo	Serio	Considerable	Insignificante
PROBABILIDAD		9 a 10	7 a 8	5 a 6	3 a 4	≤ 2
Muy probable	5	45 a 50	35 a 40	25 a 30	15 a 20	< 10
Probable	4	36 a 40	28 a 32	20 a 24	12 a 16	< 8
Ocasional	3	27 a 30	21 a 24	15 a 18	9 a 12	< 6
Improbable	2	18 a 10	14 a 16	10 a 12	6 a 8	< 4
Muy improbable	1	9 a 10	7 a 8	5 a 6	3 a 4	≤ 2

Figura 24. Matriz de Riesgos.

Los términos indicados en la matriz de aceptación de riesgos se explican en la Tabla 1.

Tabla 1. Descripción de los criterios de aceptación de riesgos.

Tipo de riesgo	Acciones ante el tipo de riesgo	Simbología de colores
Inaceptable	El riesgo debe ser reducido al menos a "no deseado", sin importar los costos de las medidas de mitigación	Rojo
No deseado	Se deben identificar medidas de mitigación de riesgos, las cuales deben ser implementadas en tanto los costos asociados no sean desproporcionados en relación con la reducción de riesgo lograda (concepto ALARP- "as low as reasonably possible")	Amarillo
Aceptable	El riesgo deberá ser administrado a lo largo del proyecto. No se requieren consideraciones especiales de mitigación	Verde
Despreciable	No se requiere ninguna acción al respecto de esta amenaza.	Gris

En la valoración de los riesgos, deberá comenzarse por determinar el nivel inicial de riesgo, esto es el nivel de riesgo antes de emprender cualquier acción. En general, para los riesgos de nivel inicial despreciable, no se deberá prever ninguna acción, mientras que aquellos denominados inaceptables, requieren necesariamente y sin importar el costo asociado, ser llevados a un nivel de riesgo inferior. Suponiendo la aplicación de las acciones de respuesta (suponiendo, por lo tanto, que son viables y su costo se puede asumir), se realiza una nueva evaluación del nivel de impactos o probabilidad de ocurrencia de cada amenaza identificada. Ello permite definir un nuevo nivel de riesgos, denominado “Nivel de riesgos residuales”. Solamente cuando el nivel de riesgos residuales se ha reducido de manera que no existan más “riesgos inaceptables”, se puede proseguir con el planteamiento seguro del proyecto.

Debe quedar claro, sin embargo, que aquellas amenazas señaladas como “no deseadas” luego de ser analizado el nivel de riesgos residuales, deben ser sujetas de un análisis más detallado e incluidas en el Plan de gestión del riesgo, a la vez que deben establecerse variables de control que, por medio de un sistema de monitoreo, permitan generar acciones que eviten o mitiguen cualquier situación de riesgo.

Las definiciones de la probabilidad y del impacto correspondientes a una amenaza, no son siempre fáciles de establecer. Se requiere entonces el criterio experto para determinar las condiciones en que pueden materializarse las amenazas y utilizar algún método cualitativo o cuantitativo para realizar la correcta evaluación.

### 10.1.6 Respuesta ante los riesgos

Es necesario establecer acciones de respuesta ante una amenaza que se materializa. Esta, por supuesto, dependerá de si el riesgo es alto o bajo, inaceptable o despreciable.

Si el riesgo es inevitable, se deben identificar y ejecutar medidas de mitigación para reducir el nivel inicial de riesgos hacia niveles manejables. Se debe reevaluar el nivel de riesgo después de establecer las medidas de mitigación, para conocer el nivel de riesgo residual, esto es, el nivel de riesgo que remane después de considerar la ejecución de las medidas de mitigación. Finalmente, la definición de responsables de administrar los riesgos en el nuevo nivel residual, de manera formal y documentada, permitirá que exista la organización y los procedimientos adecuados para responder ante cualquier situación. El objetivo, será conseguir que ninguna situación sea totalmente “imprevista” y que, en caso de concretarse, encuentre al proyecto preparado para hacerle frente.

Con relación a los tipos de respuesta, pueden señalarse cuatro tipos de acciones: mitigación, prevención, emergencia (contramedidas) y compensación. Las que se definan específicamente para el proyecto, deben estar claramente explicadas y documentadas en el PGR.

### 10.1.7 Monitoreo de la respuesta a los riesgos

#### 10.1.7.1 Plan de instrumentación y monitoreo

El PGR incluirá un documento que detalle el Plan de instrumentación y monitoreo (PIM) (ver sección 10.1.3.2), el cual detallará cuáles son las variables que deberán ser monitoreadas (generalmente deformaciones, asentamientos, desplazamientos, presiones, calidad de los materiales, presencia de gases, entre otros).

Además, para cada variable incluida en el PIM, se deberá indicar la ubicación de los instrumentos que le darán seguimiento, la frecuencia de lecturas y los umbrales de atención y de alarma que servirán para llamar la atención y “disparar” las contramedidas o acciones de emergencia. La actividad de instrumentación y monitoreo requiere, por lo general, ser realizada por un subcontratista especializado, pero el sistema integra las respuestas de todas las partes por medio de un adecuado sistema de comunicación y toma de decisiones.

Los resultados de la aplicación del PIM permitirán tomar las acciones establecidas en el Registro de Riesgos. Deberá ser acorde a las exigencias del proyecto y a las restricciones impuestas durante su construcción, de manera que se pueda dar un seguimiento correcto al comportamiento real del terreno, de las estructuras en el área de influencia de la obra y de los equipos o máquinas utilizados en la construcción del túnel.

Se definirá un equipo humano responsable de la labor de seguimiento del PIM, el cual será el encargado de dar las primeras voces de alerta cuando se aprecie una tendencia o eventos no deseados en el comportamiento de la excavación.

Se requiere también diseñar y ejecutar un plan de control de la ejecución de las acciones, definir parámetros clave y valores umbrales de atención y alarma. De forma congruente, las acciones se deberán ir generando como respuesta al comportamiento de las variables que están siendo monitoreadas. Se debe tener claro cuál es el valor de un parámetro de control que genera un llamado de atención (“umbral de atención”) y cuál el valor que dispara la ejecución de las contramedidas (“umbral de alarma”). Estos valores no son antojadizos y será necesario realizar un análisis detallado en la fase de diseño para evaluar cuáles valores del parámetro de control corresponden a comportamientos no deseados y cuáles, en cambio, quedan dentro de un comportamiento normal.

Un elemento importante, casi se diría vital, es el proceso de comunicación entre las partes involucradas. De poco sirve un excelente sistema de instrumentación y monitoreo, si los resultados no son evaluados oportunamente por personas capaces de reconocer situaciones anómalas y si los mismos no son comunicados en forma inmediata y eficaz. Es importante, en este sentido, que se tenga claro en el proyecto, por todas las partes, cuáles son los canales de comunicación y la estructura de comunicación para la toma de decisiones.

En el caso de obras subterráneas, uno de los principales aspectos que deben ser monitoreados, tiene que ver con las deformaciones y asentamientos en la superficie. Tratándose de túneles urbanos y someros, existe el riesgo de afectación a edificaciones, estructuras o bienes, que se ubican en el área de influencia del túnel. En el caso de túneles profundos fuera del contexto urbano, los riesgos principales se relacionan con la estabilidad propia del túnel, por lo que es de importancia monitorear las condiciones del agua subterránea, deformaciones internas (convergencias) y los esfuerzos in situ.

El PIM debe contener, al menos, los siguientes componentes (adaptado de Chiriotti et al., 2006):

- Métodos para predecir los asentamientos inducidos por el túnel y las deformaciones en el terreno y en las edificaciones.
- Métodos para la determinación del riesgo de daños a las estructuras
- Definición de la tecnología de monitoreo y control
- Selección y ubicación de los instrumentos de monitoreo
- Establecimiento de límites de atención y de alarma
- Frecuencia de las lecturas
- Definición de las acciones de respuesta y de las acciones de emergencia
- Interpretación de los datos, lecturas en tiempo real y retro análisis
- Organización y recursos
- Comunicación y protocolo de toma de decisiones

#### 10.1.7.2 Parámetros mínimos que deben ser monitoreados

En el caso del terreno es necesario monitorear, al menos, los esfuerzos y, particularmente, las deformaciones:

- La variación de deformaciones del terreno según la profundidad
- Asentamientos verticales y desplazamientos horizontales en la superficie
- Niveles piezométricos y variaciones del agua subterránea
- Esfuerzos actuando sobre el revestimiento
- Deformaciones, desplazamientos, fisuras, grietas, reventaduras o daños del revestimiento

En cuanto a las edificaciones, es de interés evaluar los desplazamientos horizontales o verticales de la estructura, basculamientos, pérdidas de nivel, así como cualquier fisura, grieta o daño apreciable en cualquiera de sus elementos funcionales u ornamentales. Se debe monitorear al menos:

- Asentamientos (o levantamientos) en superficie
- Asentamientos diferenciales
- Deflexiones, rotaciones o volcamientos
- Apertura de fisuras o grietas
- Vibraciones

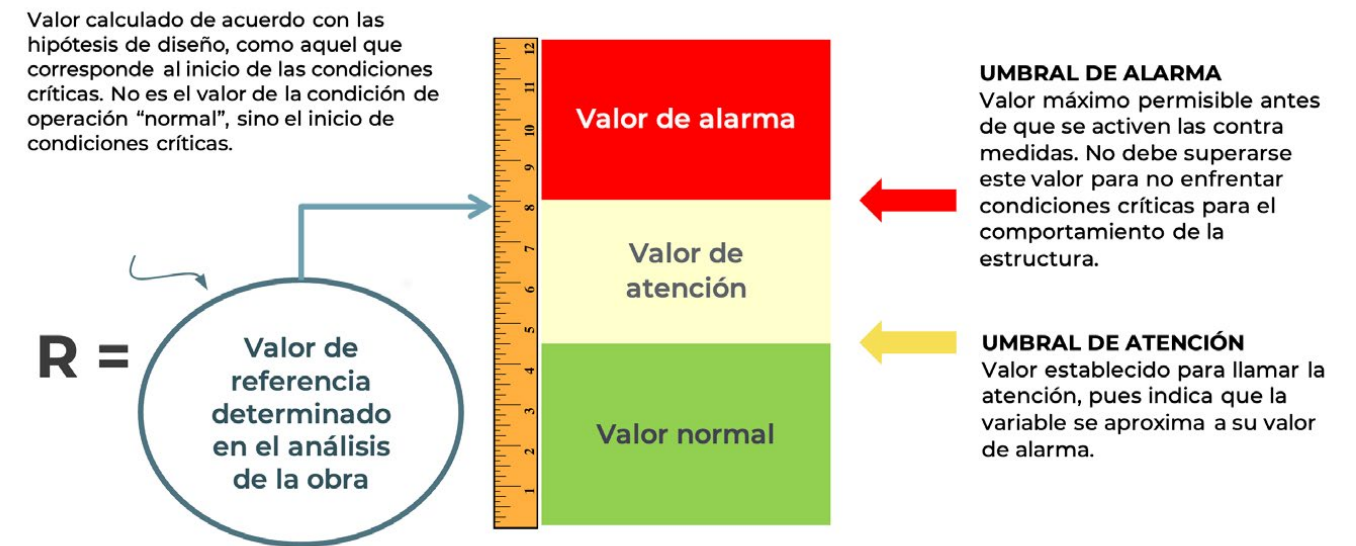
Conociendo las variables por monitorear, además de los rangos de valores que se espera que sean medidos, es necesario realizar una selección de la instrumentación apropiada. En la Tabla 2 se muestra un resumen del tipo de instrumentos más frecuentemente utilizados para el monitoreo (sin ser exhaustiva).

**10.1.7.3 Definición de umbrales de atención y de alarma**

Todas y cada una de las variables que serán monitoreadas en el terreno o en edificaciones, requieren la definición de umbrales de atención y alarma. Los umbrales de atención y de alarma deben ser establecidos según la variable que se esté evaluando y de acuerdo con el objetivo de la medición. Los umbrales de atención y alarma se definen de acuerdo con lo mostrado en la Figura 25.

**Tabla 2.** Tipos de instrumentos usuales según la variable a monitorear

Objeto del monitoreo	Variable	Tipo de instrumento
Comportamiento del Terreno	Deformación en función de la profundidad	Inclinómetros Extensómetros múltiples Inclino-extensómetros
	Asentamientos y desplazamientos horizontales en la superficie del terreno	Nivelación topográfica Asentómetros automatizados
	Niveles piezométricos	Piezómetros eléctricos Piezómetros abiertos
	Esfuerzos actuando sobre el revestimiento	Celdas de carga
	Deformaciones del revestimiento	Transductores de deformación Strain gauges
Comportamiento de las edificaciones	Asentamientos o levantamientos	Nivelación topográfica
	Asentamientos diferenciales	Objetivos ópticos 3D
	Deflexiones	Medidor deformaciones 3D Nivelación hidráulica
	Rotaciones o volcamientos	Clinómetros
	Apertura de fisuras o grietas	Medidores de grietas
	Vibraciones	Acelerógrafos o sismógrafos



**Figura 25.** Definición de umbrales de atención y alarma.

El valor esperado de referencia, en el caso de los asentamientos superficiales del terreno, por ejemplo, se establece para cada variable de interés, por ejemplo: asentamientos de terreno libre ("greenfield settlements"), deformaciones dentro del terreno, las convergencias de las paredes del túnel, los esfuerzos in situ estimados a partir de modelos numéricos o bien soluciones cerradas. Es un dato que proviene de los resultados del análisis del escenario de referencia evaluado con las hipótesis de diseño correspondiente.

El umbral de atención puede definirse como un porcentaje del valor de referencia, por ejemplo, un 70% o 75%, mientras que el umbral de alarma corresponde al valor de referencia, pues es el identificado como el valor que inicia las condiciones críticas.

Sin embargo, estos valores se definen de una manera diferente para el caso de las edificaciones. En tal caso, el valor de referencia se establece para variables como: asentamiento máximo, asentamiento diferencial, rotaciones y deformaciones. Estas son calculadas para cada edificación particular, considerando también cuáles serán sus valores esperados si se han definido medidas o tratamientos preventivos. Debe considerarse, a tal efecto, lo establecido en el Código Sísmico de Costa Rica y en el Código Geotécnico de Costa Rica, ambos en su versión oficial más recientemente publicada.

El umbral de atención en el caso de edificaciones es un valor independiente del valor de referencia de las variables de deformación o desplazamiento y está más bien ligado a los valores que provoquen un daño estético (fisuras, grietas). En tanto, el umbral de alarma corresponde a los valores capaces de provocar daños estructurales.

Estos umbrales deben ser definidos específicamente para cada una de las edificaciones o estructuras presentes en el área de influencia del túnel, considerando, por lo tanto, las condiciones particulares de la misma y del túnel en esa sección.

#### 10.1.7.4 Línea base y frecuencia de lecturas

Una vez que se han establecido las variables por ser monitoreadas, así como el tipo y ubicación de los instrumentos de medición, será necesario establecer una línea base de medición y una frecuencia de lecturas.

La lectura de línea base debe realizarse en la zona estimada de influencia del túnel, antes de que el mismo se aproxime. Corresponde, por lo tanto, a una medición sin la afectación de la obra. Esta lectura servirá como referencia para poder discriminar los valores medidos atribuibles a la excavación del túnel. En ocasiones, será importante realizar las medidas de línea base con suficiente antelación, para registrar oscilaciones naturales en los valores. Un ejemplo claro es el nivel freático, que cambia de posición entre las estaciones secas y húmedas.

Las mediciones de línea base pueden ser realizadas con una frecuencia baja, por ejemplo, una vez al mes, mientras que, cuando la excavación se aproxima a la zona analizada, debe intensificarse la frecuencia de las lecturas. En la zona cercana al frente del túnel, las lecturas deben mantener una frecuencia alta, pero cuando la obra ha avanzado hasta una distancia tal que no se aprecien modificaciones en las lecturas, es posible reducir la frecuencia de lecturas. Estas deben continuar hasta que pueda asegurarse que no existen más variaciones y el valor monitoreado se ha estabilizado.

La ITAtech (2015) ofrece una guía importante para la definición de la frecuencia de lecturas de la instrumentación en el caso de túneles excavados en el contexto urbano. La ITA (2011) ha desarrollado importantes recomendaciones para diseñar adecuadamente el Plan de Instrumentación y Monitoreo.

## 10.2 Gestión ambiental y social del proceso constructivo

En Costa Rica, los procesos de gestión ambiental durante el proceso constructivo de obras de infraestructura están determinados por la Secretaría Técnica Nacional Ambiental (SETENA). Por lo tanto, en el desarrollo específico de la obra, deben aplicarse todos los alcances de las resoluciones emitidas por dicho ente. Las obras subterráneas requieren de Estudios de Impacto Ambiental, de manera que deben incluirse todos los procesos para esa gestión que, además, debe ser debidamente descrita en los documentos de los procesos de contratación y el Oferente para la construcción de la Obra Subterránea, debe incluir los costos de la Gestión Ambiental y de la Gestión Social.

El INVIAS (2021) ha identificado algunos desafíos de la gestión social en la construcción de túneles en Colombia, que coinciden en buena medida con los retos de Costa Rica para el desarrollo de estas obras. Por ejemplo:

- Desarrollo de protocolos para la participación ciudadana, por medio del cual los interesados puedan establecer comunicación con el Consultor o Contratista y plantear sus inquietudes.
- Socialización oportuna del proyecto hacia la comunidad al inicio, avance y cierre de los estudios y del proceso constructivo. Las socializaciones deben incluir a todos los actores sociales implicados en el proyecto.
- Dar respuesta oportuna a las inquietudes ciudadanas.
- El Contratista debe realizar un levantamiento de actas sobre el estado estructural de las edificaciones e infraestructuras en el área de influencia del proyecto, al inicio y al cierre del proceso constructivo, cuando el proyecto se ubique por debajo de tales estructuras.

- Incorporar en el Plan de Gestión Ambiental y Social medidas de manejo tendientes a evitar los conflictos sociales y ambientales asociados al proyecto.
- Garantizar una gestión armónica entre organizaciones sociales y los desarrolladores del proyecto.

Si bien no existe una legislación específica para la gestión social de estos proyectos, es importante que todos los involucrados en su desarrollo tengan la conciencia de la necesidad de involucrar a los ciudadanos potencialmente afectados o interesados en el proceso constructivo de la obra.

Claramente, hay impactos ambientales, tanto como encadenamientos positivos, a lo largo de toda la vida útil de las obras de ingeniería. Por lo tanto, es necesario comprender cómo integrar los aspectos de la gestión ambiental y social, con la gestión del riesgo en el desarrollo de túneles y de otras obras subterráneas.



# CAPÍTULO

# 11

## ESTUDIOS TÉCNICOS DE OBRAS SUBTERRÁNEAS

## 11. Estudios técnicos de obras subterráneas

Cualquier obra subterránea puede considerarse como una obra de ingeniería compleja, que requiere el aporte de diversas disciplinas, integradas, para su exitoso desarrollo. Los estudios técnicos tienen como objetivo conocer de la manera más precisa posible cuáles son las condiciones geológicas, geomorfológicas, hidrogeológicas y geotécnicas que deberá afrontar la excavación de la obra, con el propósito de reducir los riesgos asociados al desarrollo de la obra. Por lo tanto, resulta fundamental establecer, en cualquier etapa, el modelo geológico – geotécnico del trazado de la obra subterránea.

La exploración geológico-geotécnica, así como toda la investigación, se realiza en etapas, con una intensidad creciente conforme avanza el proyecto. La información de cada etapa sirve de insumo y de guía para la investigación de la etapa sucesiva y, a medida que se avanza, se busca ir reduciendo las incertidumbre o dudas específicas.

Inicialmente, para la etapa de planificación, los estudios se basarán en información existente, proveniente de fuentes formales (mapas oficiales, estudios públicos, informes de instituciones públicas o privadas, investigaciones académicas, entre otros). Sin embargo, a partir de las etapas preliminares, deberán generarse datos específicos a partir de levantamiento directos de campo (levantamientos topográficos, cartografiado geológico, información hidrológica e hidrogeológica, sondeos de investigación geotécnica, etc.). El detalle y profundidad de los estudios aumenta hasta la etapa de diseño, de manera que se consideren todos los aspectos necesarios para conseguir una obra segura, resiliente, adaptable y óptima, con el menor riesgo posible.

Los estudios durante la etapa de construcción se enfocan en la verificación de las condiciones geológico-geotécnicas supuestas en los modelos de las etapas anteriores, por medio de instrumentación y monitoreo y, para la etapa de operación y mantenimiento, se enfocan en el monitoreo detallado del comportamiento de las variables de control o en la investigación de causas de malos funcionamientos para realizar una debida reparación.

### 11.1 Estudios requeridos

Son múltiples los estudios técnicos requeridos para el desarrollo de las obras subterráneas. Los alcances y el nivel de detalle van aumentando conforme se avanza desde la etapa de planificación hasta la etapa de construcción, e incluso durante la etapa de operación y mantenimiento. Sin pretender presentar una lista exhaustiva, a continuación, se comentan los principales tipos de estudio requeridos para el desarrollo de una obra subterránea.

#### 11.1.1 Estudios topográficos y cartográficos

Durante la primera fase de investigaciones, se recomienda partir de cartografía existente o de imágenes satelitales recientes u hojas topográficas de la zona. En esta fase, esta información será suficiente para realizar el trazado preliminar de las rutas que serán evaluadas, así como los puntos de inicio y de finalización de la obra. Mapas con escalas de 1:10,000 o más precisos serán necesarios para plantear estos trazados.

En las etapas preliminares, se deberá procurar mapas con una escala no mayor a 1:5000 para el trazado del túnel y de 1:1000 para los portales o sitios de acceso a la Obra Subterránea. Se requieren levantamientos

directos de campo para asegurar la precisión del mapa topográfico en toda el área superficial de la Obra Subterránea. Se debe considerar que el trazado puede variar, según las condiciones geológicas y que la topografía deberá abarcar todas las alternativas consideradas para el análisis.

Para la etapa de diseño, la topografía deberá tener la precisión suficiente para definir todos los elementos de la Obra Subterránea, en toda su área de influencia. En esta fase, se ha fijado ya el trazado o posición de la Obra Subterránea. El perfil topográfico de ese trazado debe quedar establecido con gran precisión. De igual forma cubrir el área alrededor del alineamiento, por lo cual se requiere definir el área de interés del túnel en la superficie, usualmente definiendo un ancho a cada lado del eje del túnel, de mínimo 100 m. La información topográfica de esta etapa no tendrá una escala menos precisa que 1:1000, con curvas de nivel a cada 1 m, pero para los sitios de acceso a la Obra Subterránea (portales, galerías de escape, sótanos) la escala no deberá ser menos precisa que 1:250, con curvas de nivel a cada 0,50 m.

### 11.1.2 Estudios geológicos e hidrogeológicos

El objetivo de los estudios geológicos e hidrogeológicos es obtener el modelo geológico del túnel en todo su trazado. Este modelo se expresa por medio de un mapa geológico que contiene el trazado del eje del túnel en planta, junto con un perfil longitudinal, vertical, que permite identificar las condiciones geológicas e hidrogeológicas a lo largo del trazado. El dibujo del mapa geológico se colocará por encima del perfil longitudinal, de manera que se pueda hacer coincidir el estacionamiento horizontal entre la vista en planta y el perfil. En el modelo se deberán representar las unidades geológicas, los acuíferos (en cantidad y tipo), la ubicación de los niveles freáticos y piezométricos, las estructuras geológicas y, en general, cualquier aspecto considerado importante desde la perspectiva de la gestión del riesgo.

El detalle del modelo geológico irá aumentando conforme se progresa en las etapas de desarrollo de la Obra Subterránea. Para la etapa de diseño, deberá obtenerse el detalle necesario para realizar con precisión el análisis de riesgo, así como el diseño geométrico, geotécnico y estructural de todas las obras del túnel.

En todos los casos, deberá estudiarse el marco geológico a nivel regional y local, identificando claramente las amenazas geológicas para el desarrollo de la Obra Subterránea. En la etapa de planificación y en las etapas preliminares, debe incluirse la información asociada a cada una de las alternativas de trazado, con el detalle adecuado para permitir la comparación entre las rutas. En la etapa de diseño y sucesivas, el nivel de detalle es mucho mayor, pero se refiere exclusivamente a la alternativa seleccionada.

La escala de la información geológica coincidirá, de ser posible, con la escala de la información topográfica.

Algunos aspectos por incluir en la información geológica incluyen los siguientes:

- Reconocimiento y mapeo de áreas geológicas y geotécnicas de cada alternativa de alineamiento del túnel u obra subterránea.
- Definición geométrica y caracterización de las unidades geológicas.
- Documentación de afloramientos, con tipo y condición de la roca.
- Identificación y caracterización de fallas geológicas y su evidencia tectónica.
- Identificación de estructuras geológicas.
- Identificación de zonas inestables.
- Identificación de amenazas naturales.
- Evaluación preliminar de las condiciones hidrogeológicas.

En particular, con respecto a los estudios hidrogeológicos, se recomienda determinar como mínimo los siguientes puntos:

- Localización de los niveles freáticos y piezométricos a lo largo del túnel, así como su variación estacional.
- Existencia y delimitación de fuentes superficiales, acuíferos, manantiales, zonas de recarga y captaciones de consumo de agua que puedan influir o verse afectadas por el túnel.
- Localización de barreras de flujo subterráneo, permeabilidad, transmisividad y la capacidad de almacenamiento que puedan ejercer un influjo en los aportes de agua al interior del túnel. O bien, la posibilidad de que el túnel suponga una barrera parcial o total al flujo de agua subterráneo.
- Estimación del eventual drenaje del túnel y su posible variación en los niveles freáticos, afloramientos y aprovechamientos del recurso hídrico.
- Localización de zonas cársticas.

### 11.1.3 Estudios geotécnicos

El estudio geotécnico agrega al modelo geológico la información de los parámetros geomecánicos de cada unidad geotécnica, así como la posición del túnel y las interacciones entre la obra y el terreno, estableciendo posibles escenarios de diseño.

Tras cada etapa, se deberá producir un Informe Geotécnico, que integra toda la información topográfica, geológica e hidrogeológica, así como todos los sondeos geotécnicos de campo y laboratorio. Este informe contendrá, además, el Modelo Geotécnico, que se expresa en un formato similar al Modelo Geológico.

La escala de la información geotécnica coincidirá con la escala de la información topográfica. Ambas están en función de la etapa de desarrollo del proyecto. En general, conforme se avanza en la investigación, la escala utilizada deberá permitir mayor detalle en el análisis de las obras.

En la etapa de planificación, la información geotécnica proviene generalmente de fuentes secundarias e información existente. El objetivo será obtener un modelo geotécnico estimado para todas las rutas que se estén evaluando, de manera que sea posible establecer comparaciones entre ellas.

Durante las etapas preliminares (prefactibilidad y factibilidad), se debe realizar investigación directa e indirecta, de campo y de laboratorio. Al final de esta fase, el Informe Geotécnico corresponderá al GBR (Reporte Geotécnico de Línea Base) de Factibilidad, cuyo detalle se explica en la sección 11.2.

Entre los objetivos de los estudios geotécnicos para las etapas preliminares, pueden indicarse los siguientes:

- Realizar la caracterización geomecánica de cada unidad geotécnica en el trazado del túnel.
- Confirmar el alineamiento del túnel para la fase de diseño Definir el modelo geotécnico de factibilidad de la alternativa seleccionada.
- Recomendar el método constructivo.
- Elaborar el plan de investigación para la fase de diseño, que permita dar respuesta a todos los cuestionamientos e interrogantes no resueltos de las etapas preliminares.

Entre los objetivos de los estudios geotécnicos para la etapa de diseño, pueden indicarse los siguientes:

- Completar y actualizar el GBR, que será incluido en los documentos contractuales para la etapa de licitación y contratación.
- Refinar la caracterización de cada unidad geotécnica en el trazado del túnel de manera que se puedan realizar análisis y diseños seguros y precisos, con el detalle suficiente para la ejecución de la obra.
- Ajustar el alineamiento del túnel para la etapa de construcción.
- Realizar el diseño de las zonas de acceso a la Obra Subterránea.
- Realizar el análisis de riesgo detallado para la alternativa seleccionada (ver Capítulo 10).
- Realizar el diseño geotécnico y estructural del soporte de la excavación.
- Establecer el Plan de Instrumentación y Monitoreo para la etapa de construcción y para la etapa de operación.

Los métodos de exploración geotécnica utilizados en cada etapa del proyecto también varían en función del detalle y precisión requeridos para cumplir los objetivos de cada etapa. En términos generales, se puede indicar lo siguientes:

- a. Métodos de investigación para la etapa de planificación: No se realizan investigaciones directas en esta etapa. Se recurre a investigación confiable de fuentes indirectas y a información relevante, existente.
- b. Métodos de investigación para las etapas preliminares: Conforme se avanza en la selección de la ruta del túnel, se aumenta el detalle y la cantidad de la investigación. Es fundamental el cartografiado geológico a partir de levantamientos directos, especialmente de afloramientos y el uso de imágenes remotas. La exploración por métodos geofísicos es también de gran valor y no puede prescindirse de su aplicación. Las técnicas geofísicas por utilizar varían según las variables que se quiere estudiar y según la profundidad de la Obra Subterránea. Las perforaciones son imprescindibles en esta etapa, de manera que se obtenga la precisión requerida para el Modelo, pero también muestras de material extraídas cerca de la posición del túnel. Ensayos de campo, así como el muestreo y ensayos de laboratorio también son necesarios en estas etapas, para completar el modelo geotécnico.
- c. Métodos de investigación para la etapa de diseño: Se aplican los mismos métodos de las etapas preliminares, pero en mayor número y precisión. Se realizan más ensayos de campo directos e indirectos, más perforaciones y más muestreos, así como ensayos de laboratorio más precisos, a fin de obtener los datos necesarios para el diseño geotécnico.

El especialista en geotecnia será el responsable de diseñar la investigación geotécnica en cada etapa, así como de realizar el Modelo Geotécnico y elaborar el GBR.

El número y profundidad de las perforaciones forman parte de la investigación geotécnica que deberá establecer el especialista. Sin embargo, se debe procurar que éstas alcancen la profundidad del túnel e, idealmente, al menos sobrepasar ese nivel hasta una profundidad equivalente a dos diámetros por debajo de la elevación del túnel. Todas las perforaciones deberán quedar equipadas con piezómetros u otra instrumentación requerida para el diseño.

Como parte de la investigación geotécnica, es conveniente considerar la instalación de instrumentos de medición y realizar un monitoreo del comportamiento del terreno desde las etapas iniciales. De esa manera se puede tener una idea más precisa sobre lo que se debe esperar en la etapa de construcción y de operación. La instrumentación requiere la intervención de personal especializado, con el propósito de realizar la interpretación de los datos del monitoreo de manera adecuada.

#### 11.1.4 Estudios ambientales

El proyecto la Obra Subterránea deberá dar cumplimiento a las disposiciones ambientales vigentes a nivel nacional, según lo establezca la Secretaría Técnica Nacional Ambiental (SETENA) y el Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE), en particular el Reglamento de evaluación, control y seguimiento ambiental, Decreto Ejecutivo No. 43898 del 21 de diciembre de 2022.

Los estudios ambientales integran toda la información relacionada con las interacciones naturales, humanas y sociales.

Se deberá evaluar el impacto ambiental producido por la construcción y operación del proyecto para establecer las medidas correctivas pertinentes y así prevenir, reducir, eliminar o mitigar sus impactos negativos. En particular, el proyecto deberá examinar y justificar las afecciones que puede sufrir el medio ambiente, relacionadas con:

- ruidos, vibraciones, efectos dinámicos y térmicos debido a la construcción,
- contaminación de gases, tanto en el interior como el exterior,
- contaminación de aguas subterráneas y superficiales,
- afectación de caudal a pozos y tomas de agua en acueductos,
- modificación del comportamiento de los acuíferos,
- zonas con evidencia de restos arqueológicos,
- modificación del paisaje y afectación sobre la flora y fauna,
- asentamientos humanos
- sitios de disposición final de los residuos propios de la construcción.

Además, deberá incorporarse claramente la variable social, involucrando a las personas e instancias sociales en el área de influencia del proyecto, de manera que se garanticen los derechos legales y ambientales de la población afectada.

#### 11.1.5 Estudio del Riesgo

En la sección 10.1.3 se explicó con detalle el alcance y los requerimientos del Plan de Gestión del Riesgo, PGR. Este documento debe ser actualizado antes del inicio de cada etapa. Por lo tanto, será necesaria su primera versión al final de la etapa de planificación y, de manera especial, antes de la etapa de construcción, donde es crucial la gestión del riesgo. Además, se requiere el PGR realizado por el Propietario o Contratante para incluirlo en los documentos de licitación. Así mismo, el Oferente deberá plantear cómo realizará la gestión del riesgo del proceso constructivo, para lo cual deberá actualizar y documentar su propio PGR.

#### 11.1.6 Otros estudios técnicos

En función del tipo de Obra Subterránea, se podrán requerir estudios técnicos específicos, correspondiente a ámbitos diferentes al del contexto geológico o geotécnico.

Así, por ejemplo, para una solución de paso vehicular o de transporte en general, será necesario un estudio de demanda. Según el resultado, esto puede determinar las dimensiones del túnel vial, en función del número de carriles que se derive de dicho estudio.

También los proyectos de movilidad en el contexto urbano requieren estudios de trazado, geometrías, profundidades, radios de curvatura, distancias de visibilidad, interferencias superficiales y subterráneas y análisis logístico para los procesos constructivos. En estos casos, además, el estudio y levantamiento de infraestructura localizada en la superficie dentro del área de interés del túnel también es una necesidad.

El desarrollo de sótanos requiere también el análisis legal y de catastro, sobre todo si se requiere el uso de anclajes temporales que se deban instalar en las propiedades aledañas.

Los estudios técnicos dependerán de cada caso particular, y será el equipo diseñador contratado por el Propietario el responsable de realizarlos según sea necesario.

## 11.2 Documentación de los estudios técnicos

Todos los estudios realizados deberán ser adecuadamente documentados mediante Informes técnicos, firmados por el profesional responsable de su ejecución. En cada caso y, en función de la etapa de desarrollo de la Obra Subterránea, el Informe contendrá la descripción de la metodología utilizada y los resultados de la investigación, así como las discusiones e interpretaciones derivadas de tales resultados. También se incluirán los planos y mapas que se elaboren y todos los datos y registros de ensayos y pruebas obtenidos durante las investigaciones.

Una consideración especial requiere el Reporte Geotécnico de Línea Base (GBR), que forma parte de los documentos contractuales. En este informe se integra toda la investigación topográfica, geológica, geomorfológica, hidrogeológica y geotécnica. Un aspecto central del GBR es el Modelo Geotécnico, que deberá incluir todos los detalles necesarios para el diseño del túnel y para su planificación y construcción. El GBR debería contener al menos la siguiente información:

- Introducción, datos generales.
- Descripción del proyecto.
- Fuentes de información utilizadas.
- Entorno geológico a nivel regional y local.
- Modelo geológico.
- Descripción de las condiciones hidrogeológicas.
- Identificación de amenazas naturales.
- Descripción de la investigación realizada.
- Descripción de las unidades geotécnicas.
- Caracterización de las unidades geotécnicas.
- Modelo geotécnico del túnel y de otros componentes relevantes del proyecto.
- Escenarios y consideraciones de diseño.
- Régimen de esfuerzos in situ.
- Amenaza sísmica.
- Análisis y evaluación del proceso constructivo.
- Evaluación de riesgos y PGR para la etapa de construcción.

La elaboración del GBR es responsabilidad del Propietario o Contratante del proyecto. Todos los estudios técnicos formarán parte de la documentación contractual que se pondrá a disposición de los potenciales oferentes en el proceso de licitación para la ejecución de la obra.

Por otra parte, la documentación requerida para los procesos ambientales será aquella establecida por el marco normativo ya mencionado arriba.

## 11.3 Modelaje BIM

Esta sección está basada en las recomendaciones del DAUB (2021). Las recomendaciones se limitan a aquellos aspectos básicos requeridos para la implantación del BIM, pero no se incluyen en esta guía detalles sobre la utilización específica del BIM en las actividades de diseño, construcción u operación y mantenimiento.

### 11.3.1 Generalidades

El BIM, en términos simples, es una forma de modelaje de las obras, digitalmente, antes de su construcción, para identificar fallos o errores lo antes posible. Pero no es el único objetivo de la aplicación de esta tecnología. Por ejemplo, permite una documentación muy precisa y detallada de las obras después de su construcción, con modelos “as-built” (como fueron construidos) que facilitan también las tareas de operación y mantenimiento. Aunque en Costa Rica no está oficializado el uso de esta herramienta, ni es obligatorio por ley (como sí ocurre en otros países), su aplicación en obras subterráneas es altamente recomendada, por los beneficios que contempla.

Como principio general, el modelo digital de la obra debe iniciarse lo antes posible en el ciclo de vida del proyecto, ampliándose y detallándose conforme avanza en sus etapas. Claro está, siendo que las obras subterráneas son obras de larga vida útil, es importante que la estructura de datos tenga un formato abierto, con el fin de incorporar tecnologías futuras, conforme se van desarrollando.

Desde un punto de vista contractual, el Propietario del proyecto determina (al menos en el momento presente) cómo será la incorporación de la metodología BIM en el proyecto. No existe un marco legal establecido en el país que determine los alcances o la documentación requerida en este caso. Por ello, esta Guía sugiere que el Propietario establezca de manera clara los requisitos del “método de trabajo digital”, de manera clara y exhaustiva. Así, se sugiere la elaboración de un documento con las especificaciones de los requisitos de información que deberán aplicarse en el proyecto (“Especificaciones BIM”). En tal documentación, debe incluirse con claridad el objetivo que se pretende alcanzar con la aplicación del método y los modelos requeridos, para cada etapa de desarrollo de la obra.

El Contratista, por su parte, deberá consecuentemente preparar un “Plan de construcción BIM” (“Especificaciones BIM del Contratista”). Estas actualizarán, detallarán o complementarán las del Propietario, idealmente de manera conjunta con éste.

De acuerdo con lo anterior, es necesario asignar recursos específicos al equipo BIM, por parte del Contratista y por parte del Propietario, para mantener el sistema de información actualizado y detallado a lo largo de todo el desarrollo del proyecto.

Toda la información del modelo BIM deberá ser consistente con la “Ley de Protección de la Persona frente al tratamiento de sus datos personales”, No. 8968, a la “Ley sobre Derechos de Autor y Derechos Conexos”, No.6683, los Reglamentos del Colegio Federado de Ingenieros y de Arquitectos de Costa Rica atinentes a la Responsabilidad Profesional y a la privacidad y alcances establecidos a nivel contractual.

### 11.3.2 Implantación del BIM

Para la implantación del BIM en el proyecto se deben considerar los siguientes elementos básicos:

- Definir los objetivos específicos del BIM para el proyecto, de los cuales se derivarán los modelos digitales.
- Crear solicitudes de información (“Especificaciones BIM del Propietario”)
- Crear conjuntamente (Propietario-Contratista) el Plan de Ejecución del BIM (“PEBIM”)
- Realizar una planificación multidimensional

#### 11.3.2.1 Diseño multidimensional

En cuanto al diseño multidimensional, se procurará establecer modelos en las dimensiones 3D (geometría), 4D (tiempo) y 5D (costos) o más, si fuese requerido en el futuro, según se deriva de la Figura 26.

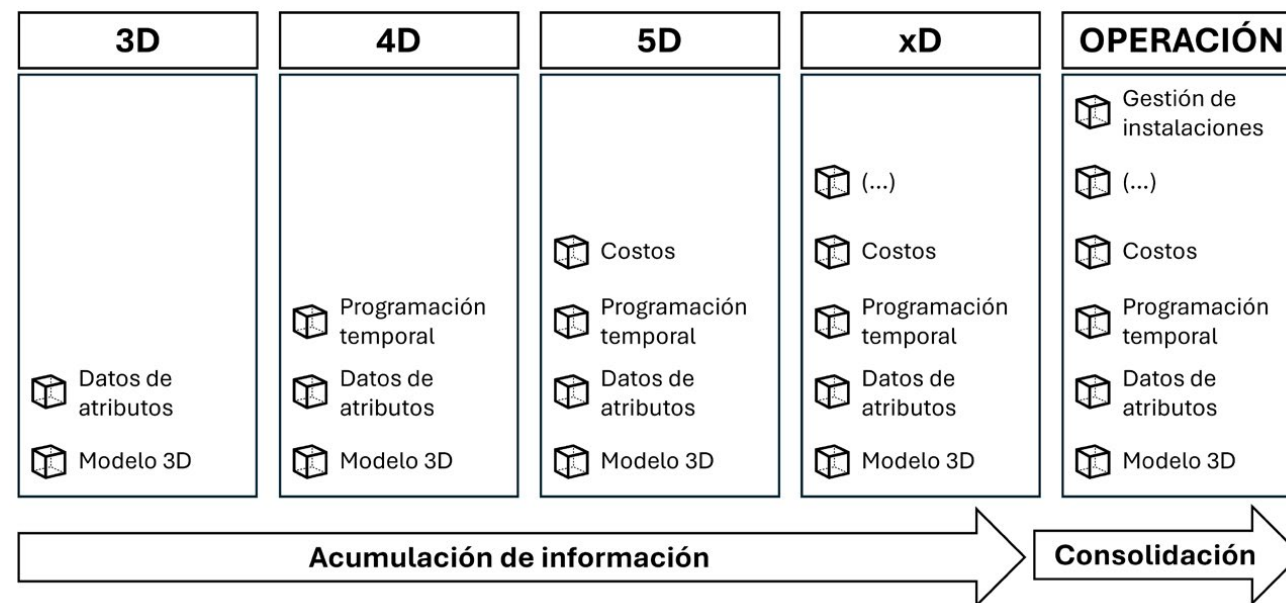


Figura 26. Estructura de un diseño multidimensional (fuente: DAUB, 2021)

#### 11.3.2.2 Estructura del proyecto

La estructura del proyecto usualmente deberá estar basada en la Estructura de División del Trabajo (EDT), obtenida de la programación de las actividades del proyecto, durante la planificación de cada etapa del proyecto. Suelen haber varios niveles en la EDT, incluyendo: mercantil, construcción, grupo de componentes, componente, ubicación, identificador. Estos se almacenan como atributos en los elementos del modelo. Para cada objeto, se generará un código único, que servirá para vincular unos objetos con otros.

#### 11.3.2.3 Modelos digitales

Otro aspecto por considerar es la creación de los modelos y submodelos que componen toda la representación en el sistema. Los modelos se compondrán de los submodelos, que son representaciones parciales. Por ejemplo, pueden ser submodelos una galería de conexión, un pozo de acceso o un tipo de soporte. Al conjuntarse estos submodelos, se puede constituir un modelo.

Los modelos establecidos según cada disciplina deben ser compatibles entre sí, por lo cual es importante que utilicen la misma base geométrica. Son ejemplos de modelos: las estructuras existentes, el terreno, el túnel, la excavación, las clases de soporte, las carreteras, las instalaciones eléctricas, las instalaciones mecánicas, entre otros.

#### 11.3.2.4 Gestión de datos e interfaces

El BIM requiere un suministro y gestión centralizada de la información, para asegurar la calidad y veracidad de dicha información. Entonces, se requiere utilizar un entorno de datos común para el proyecto. Por otra parte, la necesidad de intercambiar información y datos entre distintas aplicaciones informáticas conduce a establecer formatos de datos abiertos y neutros, que puedan ser interpretados por esas aplicaciones.

#### 11.3.2.5 Nivel de detalle de cada modelo o submodelo

El nivel de detalle de cada modelo en el proyecto puede variar significativamente, por lo que se debe establecer claramente, en función de los objetivos del proyecto, desde el comienzo. Así, se deben describir al menos los siguientes niveles:

- Nivel de definición geométrica (LoG)
- Nivel de información (LoI)
- Nivel de detalle (LoD), fusión de los dos anteriores.
- Nivel de desarrollo (LOD)

#### 11.3.2.6 Requerimientos de intercambio de información

Una parte de las Especificaciones del BIM se debe referir específicamente a la información requerida, lo cual debe ser comunicado oportunamente al Diseñador y al Contratista. Como mínimo, se debería incluir lo siguiente:

- Objetivos (estrategia del BIM y requerimientos del proyecto)
- Descripción de los requerimientos y del proyecto (estructura del proyecto, fases, modelos BIM y sus grados de detalle, entregables, estructura del modelo)
- Requerimientos técnicos (software y hardware requeridos, formatos de datos, plataformas de gestión de datos)
- Procesos y aseguramiento de la calidad (procesos del BIM y gestión de calidad)
- Funciones y responsabilidades (competencias y responsabilidades)
- Glosario de términos

### 11.3.2.7 Reglas para el modelaje

Debe existir una clara directriz, dictada por el Propietario, para la realización de todos los modelos y submodelos del BIM. La directriz debe regular, al menos, los siguientes aspectos:

- Estructura del modelo
- Origen de coordenadas
- Composición de elementos y sus atributos
- Nombres de componentes y modelos
- Códigos de identificación de los componentes
- Especificaciones del nivel de detalle geométrico para cada componente
- Esquemas de color
- Escenarios que deben modelarse
- Tolerancias
- Elementos de referencia

### 11.3.3 Funciones y responsabilidades

El BIM se entenderá como uno de los sistemas o áreas del proyecto. Por lo tanto, requiere organización y recursos. El Propietario del proyecto deberá establecer los roles, responsabilidades e interfases entre los distintos participantes del proyecto. Generalmente deberían establecerse, al menos, los siguientes roles:

- Gerente de BIM
- Coordinador del equipo BIM
- Coordinadores por disciplina
- Creador del modelo por cada disciplina
- Revisor(es) del modelo por cada disciplina

### 11.3.4 El Plan de Ejecución del BIM (PEBIM)

El PEBIM contiene toda la documentación necesaria para la correcta implantación del BIM en el proyecto y se entiende como la Especificación del BIM. Es un acuerdo vinculante en el desarrollo del proyecto y, por lo tanto, forma parte de los documentos contractuales. El PEBIM se crea desde las etapas iniciales del proyecto, por el Propietario o sus consultores, pero luego es ampliado, mejorado y enriquecido en conjunto con el Contratista.

### 11.3.5 Modelo del terreno con el BIM

Modelar estructuras antrópicas con el BIM, si bien implica algunas complejidades, resulta mucho más preciso que modelar el terreno, por cuanto se trata de un medio cuya principal característica es la variabilidad. Incluso la mejor investigación geológica y geotécnica no permite eliminar las fuertes incertidumbres del modelo del terreno. Ahora bien, en el caso de las excavaciones subterráneas este modelo resulta fundamental, por lo que es de vital importancia invertir los esfuerzos necesarios para otorgarle el mejor detalle posible.

Erharter et al. (2023) proponen la construcción del modelo del terreno a partir de varios submodelos, a saber: el “modelo de datos fácticos”, el “modelo geotécnico” y el “modelo geotécnico sintetizado”. Otros submodelos podrían realizarse, según los requerimientos del proyecto, como el “modelo geológico”, un “modelo hidrogeológico”, un “modelo de material reciclado” u otros. El trabajo de estos autores se basa en la publicación del DAUB (2022).

El modelo de datos fácticos se refiere a información no interpretada de los resultados de la investigación. Por lo tanto, agrupa los resultados de perforaciones, ensayos de campo y laboratorio, investigación geofísica y levantamiento de afloramientos). En la etapa de construcción, se agrega a este modelo información como el mapeo del frente del túnel, muestras obtenidas para ensayos, etc.

Por su parte, el modelo geotécnico es un modelo interpretado y, por tanto, contiene información procesada a partir del modelo de datos fácticos y datos interpolados entre puntos con información confirmada. Esto es, contiene la caracterización obtenida después de integrar e interpretar la información fáctica. Integra entonces el modelo geológico, los parámetros geomecánicos de cada unidad geotécnica, o los escenarios de diseño. También la incertidumbre de la información debe ser incluida en el modelo.

El modelo geotécnico sintetizado, finalmente, contiene toda la información a lo largo del túnel (la “sección longitudinal” del túnel). La geometría del modelo corresponde entonces con el perfil del túnel, mostrando además la información de cada unidad geotécnica esperada a lo largo de la excavación, así como las expectativas del soporte por utilizar, tratamientos, etc.

### 11.3.6 Experiencias en Costa Rica

Aunque las obras subterráneas desarrolladas en el país no han sido sujetas a una gestión con la metodología BIM (como tampoco lo han sido la mayoría de las edificaciones o infraestructuras desarrolladas en Costa Rica), este enfoque es de mucha importancia para un desarrollo óptimo en el futuro.

Sin embargo, hay una experiencia precursora en este campo que, aunque no puede catalogarse como BIM, sí representa un primer esfuerzo de digitalización del proceso de excavación de un túnel. Se trata del túnel de ampliación de la Central Hidroeléctrica de Cachí. Naranjo y Bonilla (2012) explicaron cómo se realizó la aplicación de bases de datos y sistemas de información geográfica en el seguimiento geológico y geotécnico del túnel. En este caso, se desarrollaron modelos en 2D y 3D, permitiendo registrar y consultar la información en tiempo real. En la Figura 27 se muestran ejemplos de consultas a nivel de computador de secciones del túnel.

Las dimensiones 4D y 5D que completarían el BIM no fueron aplicadas en este caso, pero sin duda representa un valioso aporte como experiencia para futuros desarrollos.

Algunos casos interesantes para el desarrollo del modelo del terreno han sido presentados por Jeon et al. (2015), Pizzarotti et al. (2022) y Hacker y Zeindl (2023).

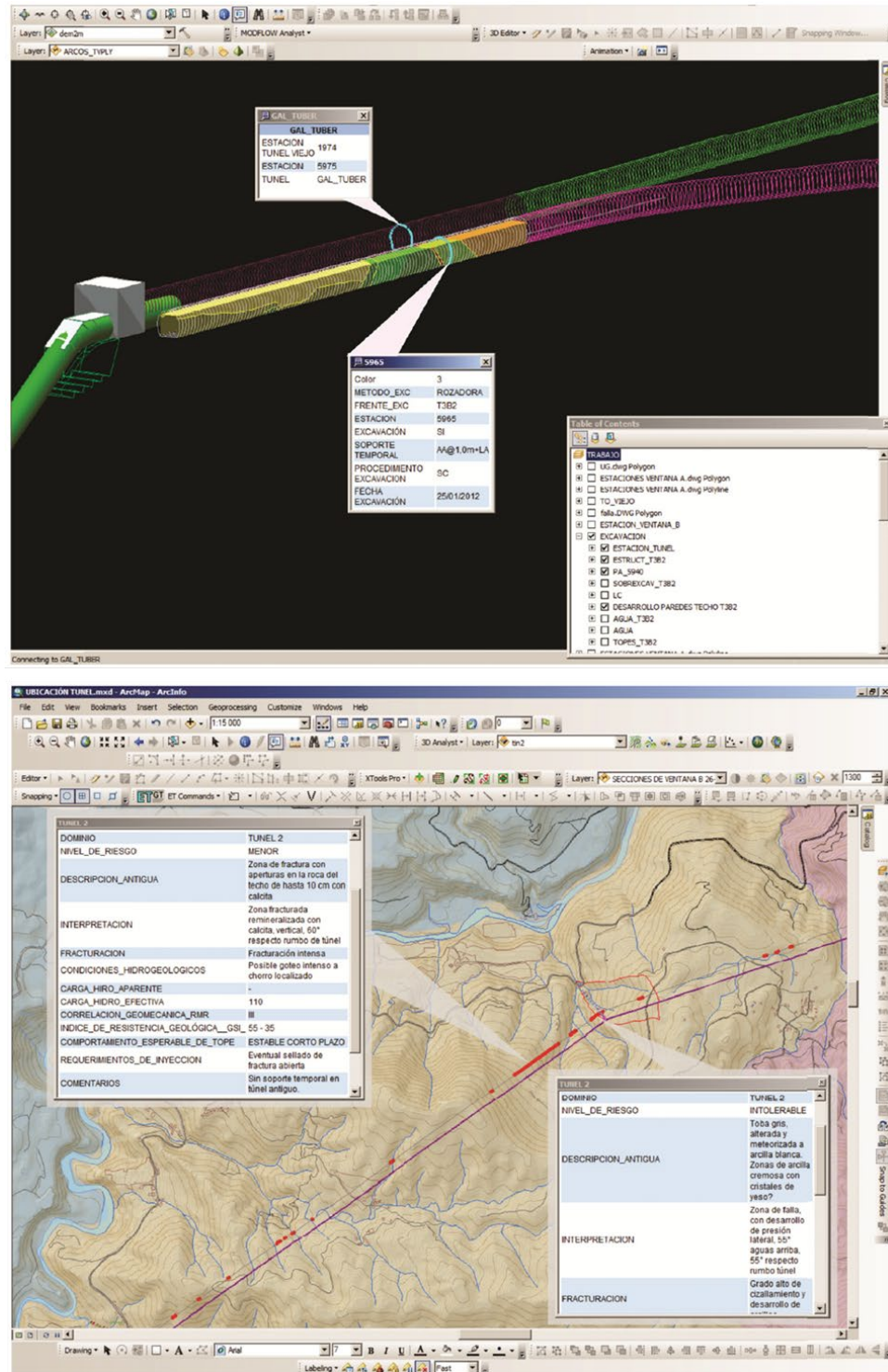


Figura 27. Salidas de modelos 2D y 3D el túnel de Cachí (Naranjo y Bonilla, 2012).

## 12. Diseño de obras subterráneas

Las obras subterráneas son complejas. Y como cualquier obra de ingeniería, requieren de un proceso de diseño, mediante el cual se garantice su operación duradera y segura, pero, además, sostenible y resiliente, según las demandas actuales de las obras de infraestructura. En este capítulo se discuten, de manera general, aspectos del diseño de las obras subterráneas.

### 12.1 Características del diseño de obras subterráneas

El diseño de obras subterráneas es particular y posee una serie de características esenciales distintivas, por ejemplo, las siguientes (Muir Wood y Duffy, 1996):

- **CREATIVO:** requiere imaginación y análisis, ambos aspectos necesarios para que la obra responda a los requerimientos específicos de cada caso.
- **HOLÍSTICO:** Todos los aspectos relevantes son tomados en cuenta, incluyendo la viabilidad y las consecuencias sociales y ambientales y los aspectos “no-técnicos”.
- **INTEGRADOR:** Sintetiza e integra las contribuciones de todos los que estudian distintos aspectos de la obra.
- **INTERACTIVO:** la comunicación es esencial, tanto dentro de los equipos de diseño del proyecto, como hacia el entorno, considerando las interacciones sociales, políticas, ambientales y legales.
- **ITERATIVO:** las soluciones óptimas requieren varias etapas, conforme se va reduciendo la incertidumbre del problema y la solución.
- **INTERDISCIPLINARIO:** Los participantes en el diseño necesitan combinar el conocimiento de su propia disciplina y las contribuciones de los otros miembros del equipo.
- **SISTEMÁTICO:** responde a un determinado plan, que sea bien concebido y detallado. La habilidad principal es gestionar el plan de acción en el proceso de diseño, conforme este va evolucionando hacia la solución óptima.
- **ÉTICO:** reconoce los intereses y los valores sociales y culturales de la comunidad donde se desarrolla la obra que, en todos los casos, forma parte de las acciones que buscan el bien común. Respeto los condicionantes sociales y ambientales.
- **JERÁRQUICO:** con flujos en distintos sentidos entre los niveles de la jerarquía del equipo, para contribuir a la evolución efectiva del diseño.

Al referirse al “diseño” de las obras subterráneas, se hace alusión a distintos aspectos por considerar, por ejemplo:

- Definición de los objetivos funcionales
- Definición del trazado de la obra subterránea (alineamiento en planta)
- Diseño de la sección transversal
- Diseño del trazado en la sección vertical (alineamiento vertical)
- Diseño y selección del método constructivo
- Diseño del soporte temporal
- Diseño del revestimiento definitivo
- Diseño de las instalaciones para la operación

Estos aspectos se adaptan según el tipo de obra subterránea y según el método constructivo que se

utilice. Ahora bien, el elemento fundamental y crítico en el diseño es el terreno donde se excavará la obra subterránea, así como su entorno y la superficie, en particular en ambientes urbanos. Mejor dicho, los terrenos por donde atravesará la obra, pues, normalmente, deberá excavar en distintas calidades y comportamientos del terreno y esto hace que cada obra subterránea sea única y particular.

La Asociación Internacional de Túneles (ITA, 1998) plantea un proceso para el diseño de túneles según el cual resulta fundamental el trabajo interdisciplinario para el diseño de la obra subterránea. Además, recomienda que la documentación del diseño debería incluir o abarcar los siguientes aspectos:

- a. El reporte geológico con los resultados de la investigación geológica y geofísica,
- b. El reporte hidro geológico,
- c. El reporte geotécnico, con las investigaciones de campo y la interpretación de los resultados de todos los ensayos para la determinación de los parámetros geomecánicos de todas las unidades geotécnicas presentes en el trazado,
- d. Información de alineamiento, sección transversal, drenaje y elementos estructurales que definan el uso del túnel,
- e. Descripción del procedimiento o método constructivo, incluyendo las diferentes secciones transversales asociadas a diferentes condiciones del terreno (cuando se utiliza el método de excavación convencional),
- f. Documentos con los tipos de procedimientos para el avance de la excavación, incluyendo la cantidad y tipo de soporte por utilizar,
- g. El programa de auscultación y monitoreo (tanto en superficie como en subterráneo)
- h. El análisis de esfuerzos y deformaciones y el diseño del soporte temporal y el revestimiento permanente,
- i. El diseño del sistema de impermeabilización y drenaje,
- j. La memoria de cálculo estructural,
- k. Reportes del diseño de la instrumentación y monitoreo (el PIM), junto con la correspondiente interpretación sobre la respuesta esperada del terreno, durante y después de la excavación.

Este conjunto de documentos describe aproximadamente la metodología de diseño propuesta por la ITA (1998), que puede expresarse también en el flujograma de la Figura 28.

Como se puede derivar del proceso propuesto, el diseño es una actividad iterativa que se desarrolla desde las etapas preliminares hasta la construcción y operación de la obra y, además, se acompaña de la continua gestión del riesgo.

En las fases iniciales del diseño se hace énfasis en los estudios geológicos, hidrogeológicos y geotécnicos. Con base en los resultados de estas fases, basados en la experiencia y en la normativa vigente, es posible plantear los esquemas básicos del túnel, incluyendo la sección transversal, el alineamiento (trazado) y el método de excavación. Es posible que se planteen diferentes opciones, para cada una de las cuales es necesario realizar una evaluación del riesgo, de manera que la opción que progrese en el diseño corresponda a la de menor riesgo. Claro está, no sólo el análisis de riesgo determina la opción por diseñar, sino también el conjunto de aspectos que condicionan el desarrollo de una obra de infraestructura, incluyendo los condicionantes legales, impactos ambientales, entorno social y político y, por supuesto, los aspectos económicos y financieros.

A partir de ese punto, el análisis ingenieril profundiza en las técnicas de análisis geotécnico y estructural para alcanzar un diseño detallado de todos los aspectos de la obra subterránea. A continuación, se desarrollan los aspectos de financiación, etapa de contratación, el desarrollo constructivo, monitoreo, entrada en operación y seguimiento durante la fase de operación y mantenimiento.

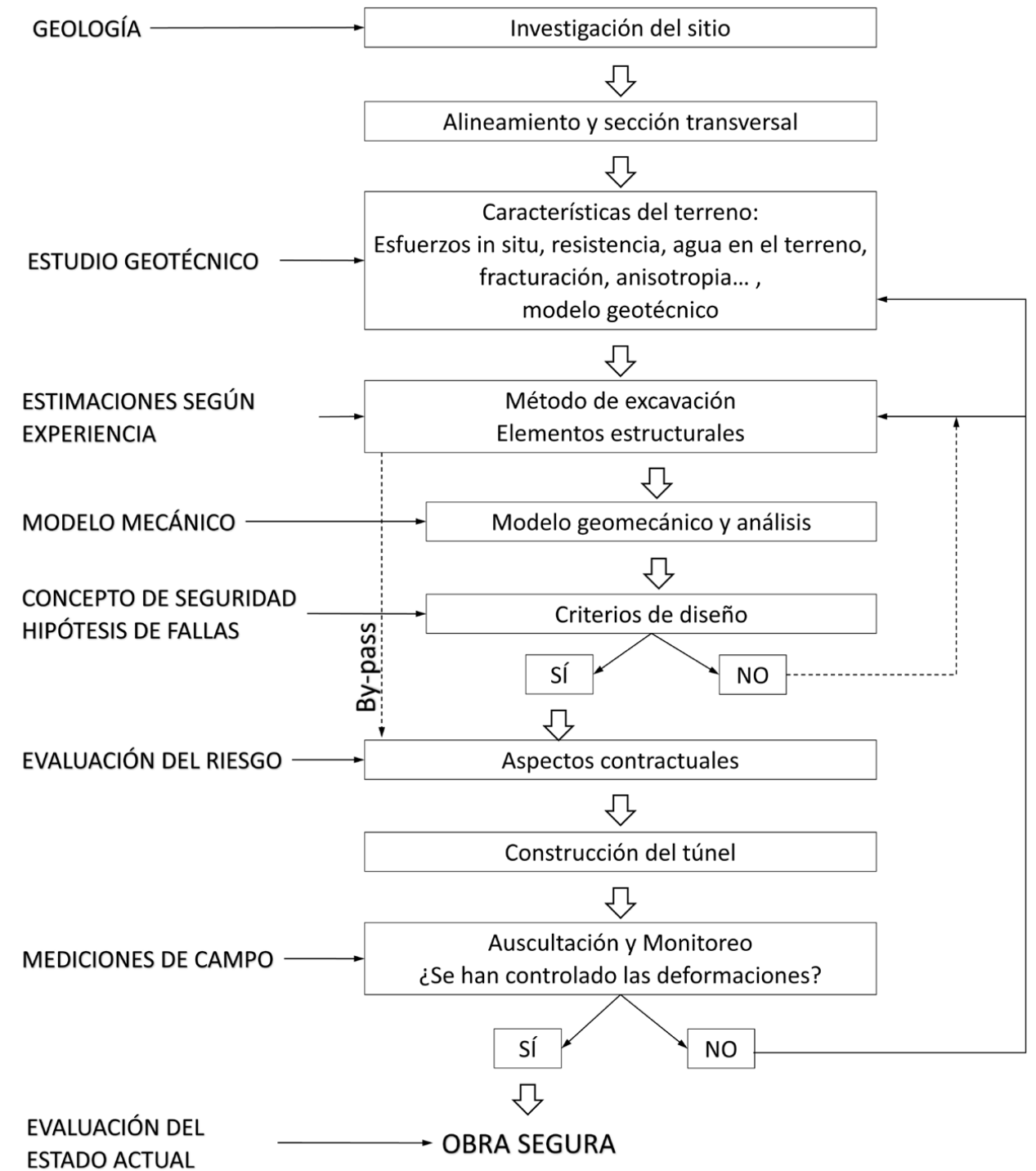


Figura 28. Proceso de diseño de obras subterráneas (ITA, 1998)

## 12.2 Participantes en el proceso de diseño

El objetivo último del diseño es satisfacer los objetivos del Propietario (o Contratante) del proyecto. Para lograrlo, se requiere de un equipo interdisciplinario de diseño, liderado por el Ingeniero o Diseñador. El primer paso es establecer los requerimientos funcionales y los objetivos del proyecto, derivando en el “concepto del proyecto”. A partir de ahí, el equipo de diseño desarrolla, de manera iterativa, todos los aspectos del diseño, hasta alcanzar la solución óptima.

En el proceso de diseño se incorporan también los aspectos constructivos, siendo que la definición del método constructivo hace parte del proceso de diseño, por lo cual es necesaria la participación de especialistas en ese aspecto. Participan también los especialistas de las áreas sociales y ambientales que aportan los intereses de los interesados o de los perjudicados por la ejecución del proyecto.

## 12.3 Requerimientos funcionales y concepto del proyecto

La idea que conduce en primera instancia a diseñar y construir una obra subterránea es la necesidad de cumplir con una determinada función, diríase, una “función social”. En términos generales, la función de cualquier túnel es la conexión y el transporte. Es decir, cualquier túnel es requerido para conectar dos puntos (utilizando el espacio subterráneo para eludir determinados obstáculos) para transportar bienes o personas a través de dicha conexión. En algunos casos, también se requieren para el propósito de almacenamiento.

Por su parte, un sótano, una estación, un pozo y otras obras profundas excavadas desde la superficie tienen, en general, la función de acceso e intercambio. Estas obras tienen también, en ciertos casos, la función de almacenamiento.

El objetivo general de cada obra debe cumplirse dentro de los criterios acordados de calidad y vida útil requerida, además de los requisitos funcionales y, por supuesto, en el plazo y en el costo convenidos.

Ahora bien, específicamente, los requerimientos funcionales provienen, como se indicó en la Figura 1, del propósito o necesidad que la obra viene a satisfacer. En la Tabla 3 se presenta una lista de requerimientos funcionales de distintas obras subterráneas.

Tabla 3. Requerimientos funcionales de distintas obras subterráneas

Tipo de obra	Requisitos funcionales
Túnel vial o de carretera	Permitir el paso de vehículos (con un determinado número de carriles) según un determinado nivel de servicio.
Túnel hidráulico	Trasladar agua a presión atmosférica para abastecimiento de agua potable, usos industriales o de saneamiento. Pueden también funcionar como drenaje, con el objetivo de reducir el nivel freático o realizar una explotación para aprovisionar de agua potable.
Túnel hidráulico a presión	Trasladar agua a presión para producción de energía
Túnel de aguas negras	Trasladar aguas negras para su saneamiento o disposición final.
Galerías para control de inundaciones	Eliminar el riesgo de inundación de una zona urbana y gestionar las avenidas o crecientes.
Facilidades para gestión de desechos	Proveer espacio para la gestión de desechos sólidos.
Galerías o cavernas de almacenamiento de sustancias peligrosas	Proveer espacio para el almacenamiento temporal o permanente de sustancias peligrosas o residuos tóxicos.
Galerías de almacenamiento	Proveer espacio para el almacenamiento temporal o permanente de bienes.
Galería de espectáculos	Proveer espacio para la instalación de facilidades culturales (conciertos, teatro, etc.)
Túneles para tuberías (gas, vapor)	Permitir el paso de tuberías de servicio eludiendo los obstáculos de la superficie
Túneles para cableado	Permitir el paso de cables eléctricos o de telecomunicaciones y fibra óptica, eludiendo los obstáculos de la superficie
Sótanos de parqueo	Proveer espacio para el aparcamiento de vehículos, debajo de edificaciones o espacios públicos.
Sótanos de servicio	Proveer espacio para equipamientos y maquinaria de servicios, debajo de edificaciones.
Pozo de ventilación	Permitir la entrada de aire fresco para la operación de sistemas de transporte.
Estación ferroviaria	Permitir el intercambio de pasajeros de trenes, desde y hacia la superficie.
Túnel ferroviario	Permitir el tránsito de trenes sin interferencias con los obstáculos de la superficie.
Estación de metro	Permitir el intercambio de pasajeros de sistemas de transporte masivo de personas, desde y hacia la superficie.
Túnel de metro	Permitir el tránsito de trenes de sistemas de transporte masivo de personas sin interferencias con los obstáculos de la superficie.
Túnel peatonal	Permitir el tránsito de personas a pie entre distintos puntos de acceso a la superficie eludiendo carreteras u otros obstáculos
Refugio subterráneo	Proveer refugio y protección a las personas contra amenazas en la superficie.
Túneles y galerías mineras	Permitir la extracción segura y sostenible de recursos minerales del subsuelo.

### 12.4 Modelo geológico-geotécnico

Una gran cantidad de decisiones respecto de la obra, como por ejemplo su trazado, su profundidad, la cantidad de soporte o el método constructivo, se basan en el modelo geológico-geotécnico del túnel o la obra subterránea. En particular, el trazado más seguro y económico, es aquel al que se le pueden asociar los menores riesgos de origen geológico.

Así, el diseño del túnel empieza por el diseño geotécnico. Y la herramienta fundamental es precisamente el modelo geotécnico.

Los modelos geotécnicos incluyen diferente tipo de información: topografía, litología, estructuras geológicas, clasificación geomecánica de cada unidad geotécnica (UG) en el macizo, propiedades físicas y mecánicas, anisotropía de los materiales, etc.

Toda la información recogida durante las fases de caracterización y clasificación debe volcarse, en términos cartográficos, en un mapa, a fin de poder realizar los análisis correspondientes al diseño. Además, es necesario expresar el modelo geotécnico en una sección longitudinal, vertical, que contenga al túnel en toda su longitud.

En las siguientes imágenes se ilustran los modelos geotécnicos de tres obras subterráneas desarrolladas en Costa Rica. En la Figura 29 se presenta el modelo geotécnico del túnel de trasvase del Proyecto de Mejoramiento Ambiental del Área Metropolitana, desarrollado por el Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados, año 2014. Como se observa, debajo del perfil geotécnico, se dispone una tabla con los valores de los parámetros geomecánicos obtenidos de la investigación geotécnica. Este túnel fue construido por medio de una máquina tuneladora.

En el caso de la Figura 30, se muestra el modelo geotécnico (perfil) del túnel de desvío de un proyecto hidroeléctrico privado, proyectado con el método convencional para su excavación.

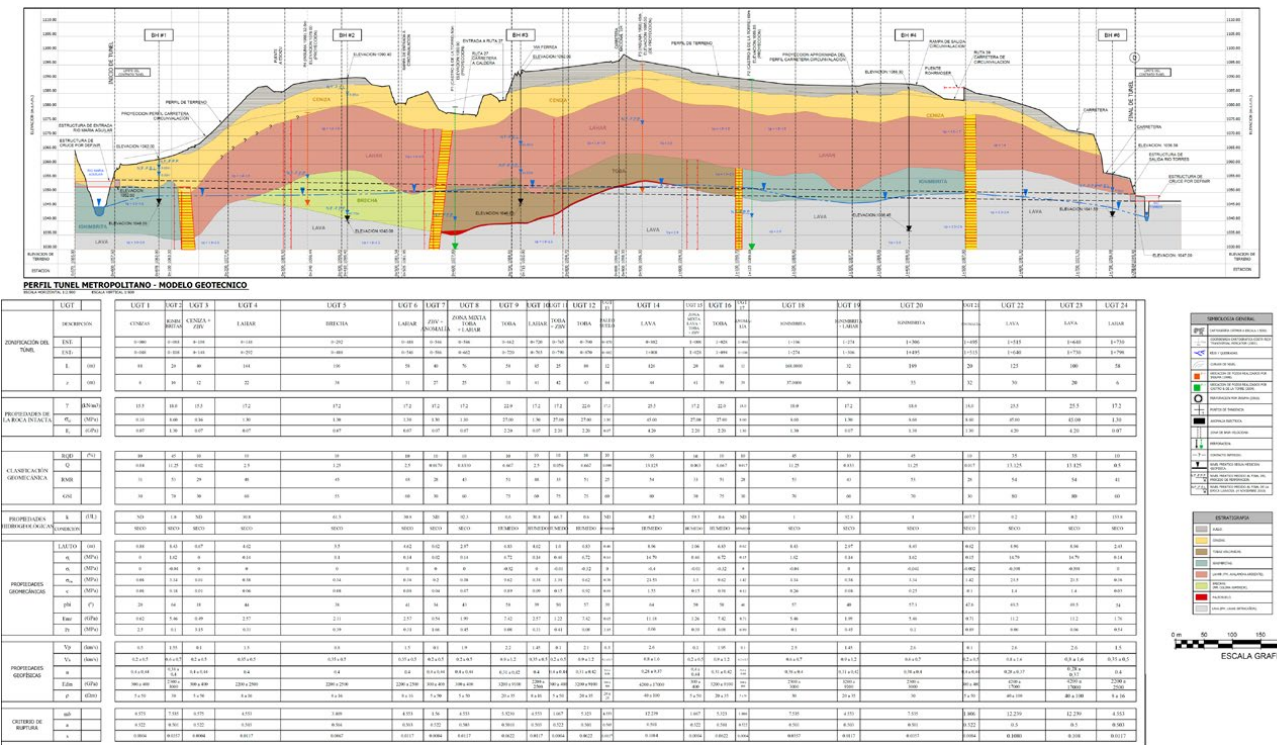


Figura 29. Modelo geotécnico del túnel de trasvase, Proyecto de Saneamiento Ambiental del Área Metropolitana de San José, desarrollado por AyA (Geomekca Ingeniería, 2016)

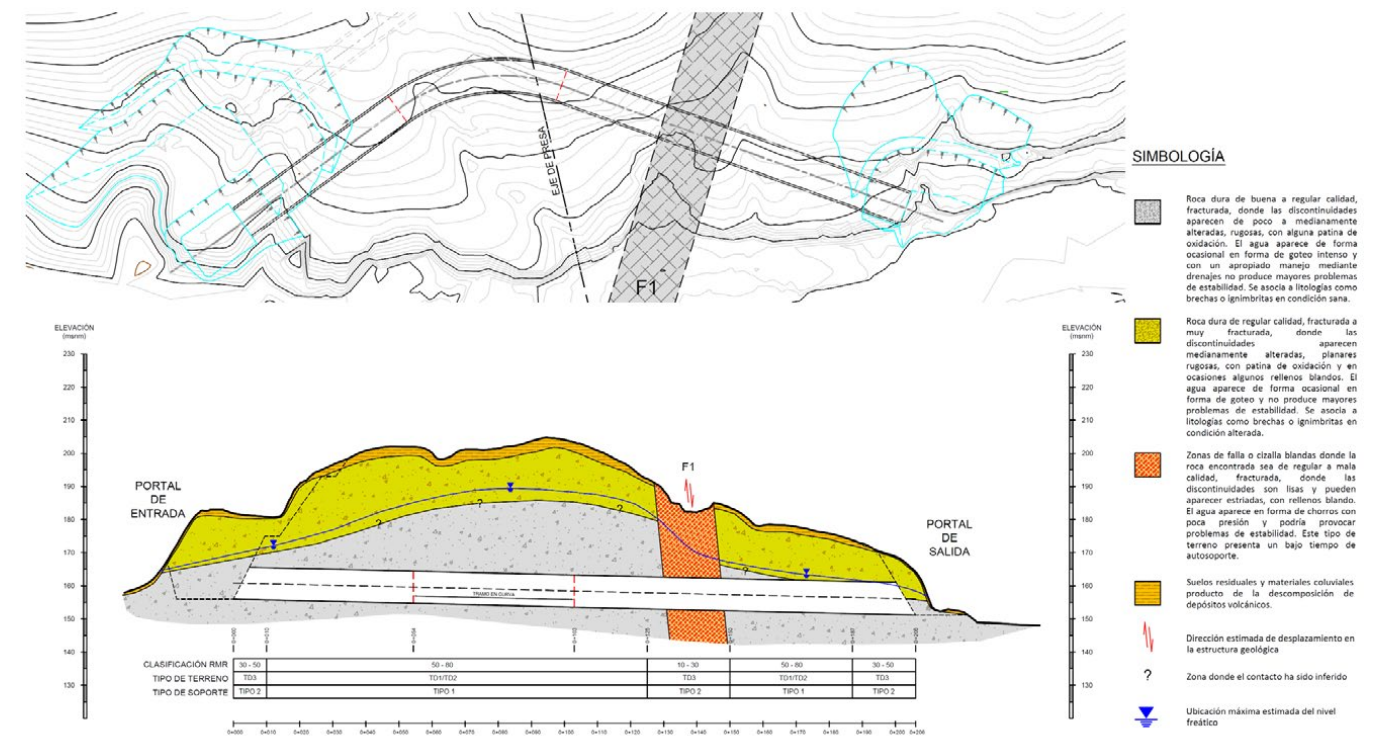


Figura 30. Perfil geotécnico del túnel de desvío de un proyecto hidroeléctrico privado.

Fuente: Geomekca Ingeniería, 2013.

En la Figura 31 se muestra la planta del mapa geológico donde se observa el trazado del túnel y el perfil del modelo geotécnico del túnel de ampliación del Proyecto Hidroeléctrico Cachí, construido por el Instituto Costarricense de Electricidad, utilizando una rozadora en buena parte de la excavación.

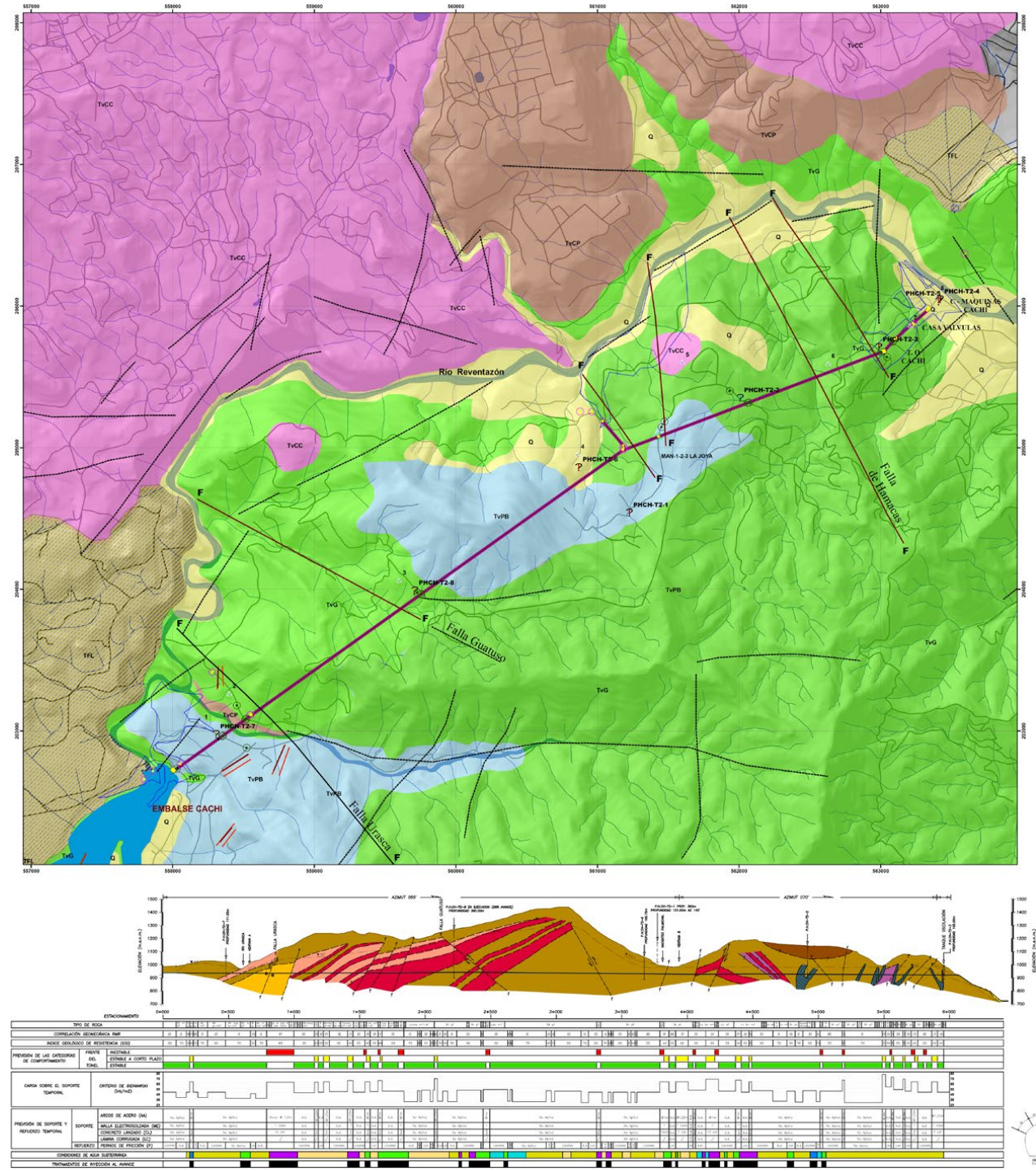


Figura 31. Mapa geológico y modelo geotécnico del túnel de ampliación del P.H. Cachí. (Fuente: ICE, 2010)

El modelo geotécnico debería incluir, como mínimo, la siguiente información:

- Topografía
- Litología o unidades geotécnicas, en general, clasificación geotécnica o geomecánica
- Espesor de suelos, formaciones de roca
- Datos estructurales (discontinuidades, fallas, etc.)
- Condición del agua subterránea (mapa específico)
- Ubicación de las investigaciones (mapa específico)
- Identificación de riesgos geológicos (deslizamientos, avalanchas, fuentes sísmicas)
- Ubicación de la obra subterránea

El responsable de realizar la investigación y de desarrollar el modelo geotécnico del túnel, es el Contratante o Propietario. Este modelo debe ser incluido en los documentos de contratación, en el GBR.

## 12.5 Métodos de diseño

El diseño de una obra subterránea depende en gran medida de la interacción entre la estructura y el terreno circundante. De acuerdo con AFTES (2001), hay cuatro enfoques básicos para el diseño de obras subterráneas, a saber:

- Métodos completamente empíricos (por ejemplo, los métodos de clasificación geomecánica), que permiten estimar una cantidad de soporte en función de las características del terreno. No consideran explícitamente la interacción entre el terreno y la estructura.
- Métodos que calculan la carga sobre el soporte, sin considerar el tipo de soporte o las deformaciones (por ejemplo, el método de Terzaghi, el método de Protodiakonof o el de Caquot, que permiten estimar la extensión de la superficie de falla), los cuales son válidos cuando el mecanismo de falla es considerado de manera independiente del tipo de soporte.
- Métodos que calculan la carga del terreno como dato de entrada, pero consideran también la rigidez y las deformaciones del terreno y las reacciones del material circundante a la excavación. El método de las reacciones hiperestáticas (bedded beam spring model) es un ejemplo de este grupo.
- Métodos que consideran la interacción terreno estructura, en particular los que se aplican por métodos numéricos en dos o en tres dimensiones (elementos finitos o diferencias finitas), y que consideran las leyes constitutivas de los materiales. También se incluye en este grupo el método de convergencia-confinamiento.

Conforme progresa el desarrollo de la obra subterránea, así también se requiere la aplicación de los métodos mencionados. Así, en la etapa de planificación y al inicio de las etapas preliminares, se podrán aplicar los métodos de diseño del primer grupo (empíricos). En las etapas preliminares, sin embargo, ya deben agregarse los del segundo grupo (aquellos que calculan las cargas sin considerar interacción entre el terreno y la estructura). En la etapa de diseño, los cuatro métodos deberán ser aplicados al diseño de la obra subterránea.

El proceso de diseño del túnel depende en gran medida del método constructivo, por lo que es recomendable tratar de definir cuál será el enfoque para la construcción lo antes posible en el desarrollo del proyecto. En caso de que el método no pueda ser establecido de manera temprana (por ejemplo, en el diseño conceptual), deben considerarse las opciones de excavación mecanizada con máquina tuneladora o la excavación convencional con barrenación y voladura o con métodos mecánicos (rozadora, excavadora, martillo hidráulico). Así, si los métodos pudiesen considerarse aplicables, entonces en el proceso de licitación será el Oferente el que proponga la manera de construir la obra, según su propia experticia.

Ahora bien, en cualquiera de estas etapas y con cualquiera de los enfoques de diseño que se utilice, es siempre necesario plantear un escenario de diseño y un concepto estructural. La ITA (1998) propone cuatro escenarios principales para el diseño del túnel:

- a. Túneles excavados mediante la técnica de “cortar y cubrir” (sección 13.4.1).** En la mayoría de los casos se modela el terreno cargando a la estructura de manera pasiva como una carga muerta, con las correspondientes combinaciones con las cargas vivas, actuando sobre una estructura que se diseña de manera similar a una estructura en la superficie.
- b. Túneles en terrenos blandos,** que requieren un soporte propio o inmediato para evitar asentamientos o colapso. Es el caso de túneles en suelo, excavados con escudo en modo cerrado (sección 0). El terreno participa activamente aportando resistencia contra la deformación del revestimiento.
- c. Túneles en terrenos medios (rocas de resistencia media o suelo muy cohesivos).** El terreno debe disponer de suficiente resistencia (tiempo auto soportado) para que la excavación se pueda realizar en modo abierto (sección 13.2) en el frente del túnel. En este caso, ocurre una cierta relajación de esfuerzos en el terreno, en virtud de la deformación que experimenta el medio hacia dentro de la excavación, antes de que se pueda colocar cualquier elemento de soporte y que este empiece a desarrollar resistencia. De esta manera, solamente una fracción de la presión del terreno requiere ser soportada por el soporte o el revestimiento.
- d. Túneles en roca dura.** En este caso el terreno por sí solo es capaz de preservar la estabilidad de la excavación. El revestimiento puede ser innecesario o, bien, requerirse por aspectos funcionales o estéticos. El modelo de diseño debe considerar el aporte de la roca en cuanto a deformaciones y soporte de las presiones.

## 12.6 Diseño de obras construidas por el método convencional

De acuerdo con la ITA-AITES (2009), el proceso general del diseño de obras subterráneas, cuando son excavadas mediante el método convencional (sección 13.2), sigue el camino descrito en el flujograma de la Figura 32. Debe notarse, en esa figura, la mención a dos documentos que sugiere la ITA, el GDR y el GDSR. Tales documentos no son requeridos usualmente en Costa Rica, por lo que, para los efectos de esta Guía, deben considerarse únicamente como documentos sugeridos.

En general, el trabajo de diseño debería incluir los siguientes tres pasos:

- a.** Definición de las características geométricas del túnel (alineamiento vertical y horizontal, o definición de la ubicación de una galería, un sótano o un pozo)
- b.** Definición del tamaño y la forma de la sección transversal
- c.** Definición del tipo de excavación (sección completa o secciones parciales), secuencia de las fases de excavación y de la instalación del soporte, así como las medidas auxiliares de soporte.

Para acometer el diseño, el elemento básico es el modelo geotécnico. Según se deriva de la discusión de la sección 12.4, es necesaria una clasificación del terreno según unidades geotécnicas, es decir, zonas donde se estima que el terreno responde de manera uniforme u homogénea durante la excavación. A partir de tal clasificación, para cada uno de los tramos donde se puede asumir una condición de excavación uniforme, con base en la experiencia y en cálculos (inicialmente simplificados), se realiza una evaluación de las condiciones de excavación, riesgos y acciones de respuesta a ellos. Así, se define inicialmente la sección transversal y la secuencia de excavación para cada tramo.

Para zonas de roca firme, sin presión de agua, la sección suele tener forma de herradura o de baúl, pues estas permiten el tránsito de los equipos de excavación de manera eficiente. En zonas de terreno menos resistente, las cargas del terreno aumentan y se requiere el uso de secciones de soporte con cierre en el piso o base. Tal cierre puede ser horizontal si las cargas no son muy grandes, pero debe tenderse a un cierre curvo conforme las cargas son mayores. Así, en terrenos blandos o con altas presiones de agua, la sección transversal ideal será un círculo.

El ejercicio anterior conduce a la definición de clases o categorías de secuencia de excavación y soporte, establecidas para cada tramo de la excavación, según las condiciones del terreno y del agua.

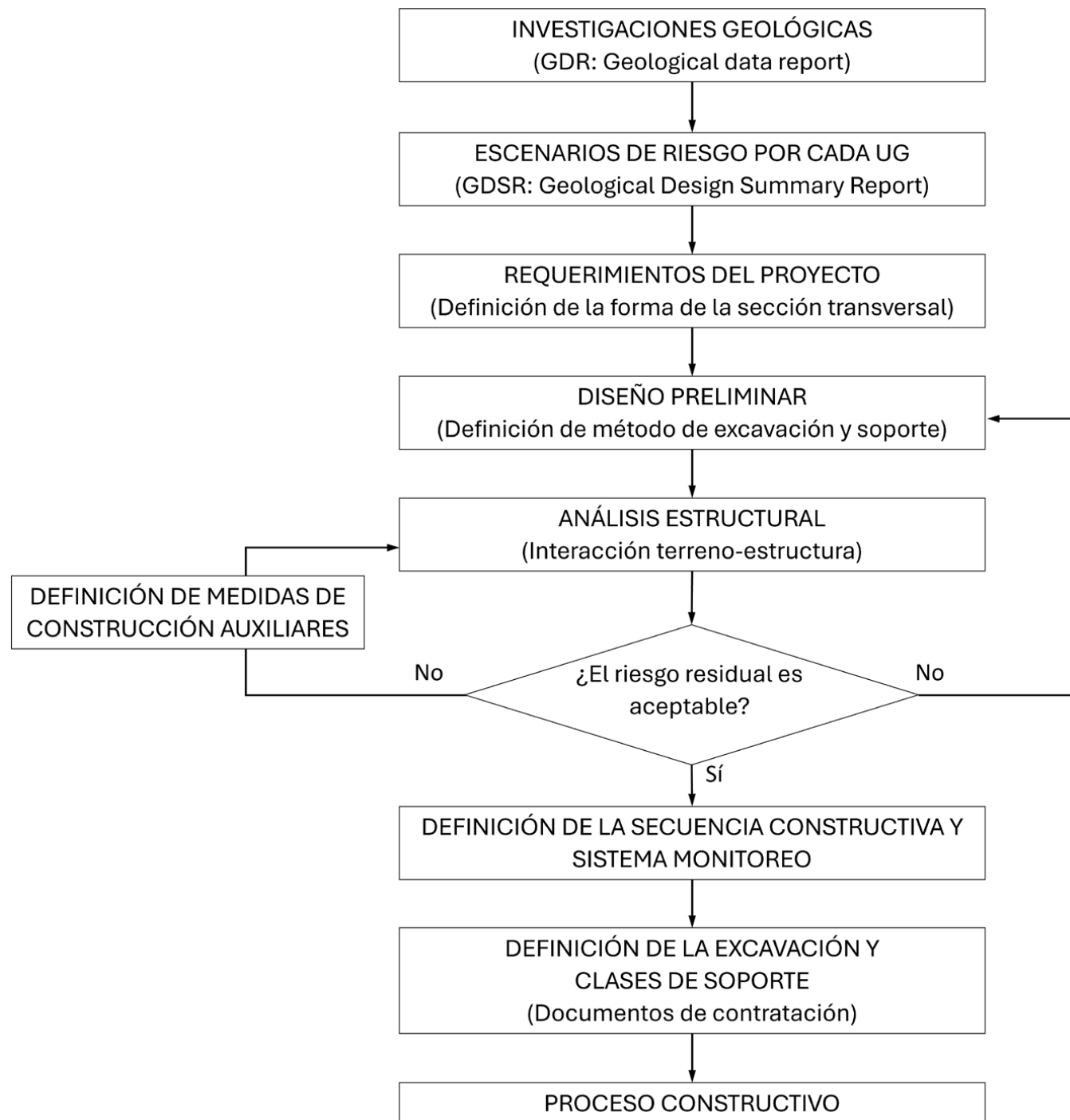


Figura 32. Flujograma del diseño de Obras Subterráneas construidas por el método convencional (ITA 2009)

Las clases de excavación describen la secuencia constructiva y de instalación del soporte. Esta secuencia incluye definiciones del tiempo permitido entre la excavación y la instalación del soporte, la necesidad de subdividir la sección transversal, la necesidad de instalar medidas de soporte hacia adelante (medidas auxiliares de tratamiento previo del frente) y si se requiere o no instalar soportes en el frente de excavación.

Es importante seguir el Plan de Gestión de Riesgo, de manera que, a partir del resultado del monitoreo, se tenga claridad de las acciones de respuesta y se tengan a disposición los recursos para responder según el comportamiento de la excavación. Estas respuestas pueden variar desde intensificar la cantidad de soporte hasta cambiar la secuencia de excavación.

El final del proceso de diseño implica, como es lógico, realizar una evaluación de los costos y los tiempos constructivos, a fin de estimar los requerimientos para el proceso de licitación. En el proceso de licitación y contratación, las clases de soporte y las secuencias de la excavación deben establecerse en los documentos contractuales, ya que pueden formar la base para los pagos y compensaciones para el proceso constructivo.

El proceso de diseño descrito no incluye el revestimiento. Sin embargo, en la mayoría de los túneles excavados convencionalmente, se requiere la instalación del revestimiento definitivo. Esta estructura se encarga de soportar todas las cargas permanentes, provee impermeabilización y garantiza la durabilidad de la infraestructura durante toda su vida útil. Debe ser debidamente diseñado estructuralmente para soportar las cargas a corto y largo plazo. Para su instalación, se puede utilizar concreto lanzado o, como es lo usual, concreto colado en sitio, para lo cual se utilizan formaleas deslizantes. En algunos casos el revestimiento puede ser sin refuerzo, pero normalmente es reforzado con barras de acero o con fibras metálicas o sintéticas. Existe también la alternativa de agregar capas de concreto lanzado como revestimiento definitivo. La selección del revestimiento depende de las condiciones particulares de cada proyecto.

## 12.7 Diseño de obras construidas por máquinas tuneladoras

Cuando se realiza la excavación del túnel por medio de máquinas tuneladoras, hay aspectos que deben considerarse adicionalmente a los ya comentados de la excavación convencional. Por ejemplo, la selección del tipo de máquina depende de muchos factores, según se comenta en la sección 13.3.4. Pero no sólo es necesario realizar una adecuada selección de la máquina y del equipo complementario, sino que se requiere un diseño completo de las características de la máquina en función del terreno que se excavará, en especial en túneles largos y profundos. Entre otros aspectos que requieren de verificación estructural, mecánica, eléctrica o electrónica, se pueden mencionar los siguientes (no es una lista exhaustiva):

- a. Tipo y geometría de la rueda de corte
- b. Tipo y capacidad de las herramientas de corte instaladas en la rueda
- c. Diseño del sistema de soporte al frente (EPB, Lodos, Densidad Variable)
- d. En el caso de las máquinas de lodos, diseño del sistema hidráulico de inyección de bentonita, extracción del terreno excavado y de la planta de separación
- e. En el caso de las máquinas EPB, diseño del sistema de inyección de espumas y de extracción del material excavado (tornillo de Arquímedes, banda de extracción)
- f. Diseño del sistema de zapatas de empuje y de los sistemas de instalación de soporte (en el caso de máquinas para roca: arcos, anclajes, mallas, concreto lanzado)
- g. Diseño del sistema de empuje de la máquina, así como los sistemas de fijación y capacidad de torque

- h. Diseño del sistema de potencia de la rueda de corte
- i. Diseño del erector de dovelas y del sistema de alimentación de las dovelas
- j. Diseño del sistema de inyección de mortero o inyección de grava
- k. Diseño de los cilindros de empuje principales y auxiliares (máquina de doble escudo)
- l. Diseño de los sistemas de iluminación, ventilación, eléctricos e hidráulicos
- m. Diseño del sistema electrónico de control, sistemas de comunicaciones y guiado de la máquina
- n. Diseño estructural del revestimiento con dovelas
- o. Diseño del tren de apoyo y de los trenes de servicio (sistemas de transporte)

La máquina tuneladora es, básicamente, una fábrica, donde los sistemas y procesos están integrados y los insumos deben ser transportados de manera oportuna hacia el interior del túnel, donde son utilizados para el proceso de excavación.

Por otra parte, la interacción entre el terreno y la estructura no es muy distinta entre un túnel con revestimiento construido por el método convencional y uno excavado de forma mecanizada, aunque la historia de deformaciones sí puede variar significativamente, especialmente cuando se compara un túnel con método convencional en roca de mediana resistencia (o suelo competente), donde se permite una relajación de los esfuerzos y hay deformaciones, con un túnel excavado con máquina tuneladora en suelo blando, donde las deformaciones se limitan significativamente durante el proceso constructivo. La condición de "squeezing" o fluencia de rocas es un caso especial que debe ser considerado de manera particular.

### 12.8 Diseño geométrico

El diseño geométrico hace referencia a la definición de la forma del túnel, su trazado en planta y en elevación, es decir, su "alineamiento" y, sobre todo, la geometría de la sección transversal, que define la capacidad del túnel para cumplir su función. El tamaño de los vehículos, el tamaño del equipo rodante o el caudal definen los requerimientos geométricos de la sección transversal.

Tabla 4. Áreas de secciones transversales usuales en túneles de diversos tipos

Tipo de túnel	Área (m <sup>2</sup> )	Diámetro equivalente (m)
Saneamiento	0,8 – 12,6	1,0 – 4,0
Hidroeléctricos (conducción)	10 – 30	3,6 – 6,2
Hidroeléctricos (desvío)	20 – 120	5,0 – 12,4
Carreteras (un carril)	71 – 87	9,5 – 10,5
Ferrocarril (una vía)	44 – 54	7,5 – 8,3
Metro (una vía)	35 – 39	6,7 – 7,0
Metro (doble vía)	48 – 64	7,8 – 9,0
Tren alta velocidad (dos vías)	80 – 100	10,1 – 11,3

En ocasiones, además, la sección transversal de la excavación puede quedar determinada en función del método constructivo, por ejemplo, si se realiza con máquina tuneladora, la sección sería probablemente circular y si se hace con método convencional, probablemente una sección con forma de herradura o de baúl sería utilizada (en este caso, la sección interna podría tener una forma diferente, por ejemplo, circular, situación usual en túneles hidráulicos a presión revestidos con concreto).

Los criterios para la definición de la sección transversal se establecen en los Apéndices, según el tipo de obra correspondiente. En la Figura 33 se pueden apreciar algunas secciones transversales típicas de túneles ferroviarios, mientras que en la Figura 34, la de túneles viales.

En cuanto al trazado horizontal y vertical del túnel, hay vastas posibilidades. La tecnología actual con máquinas tuneladoras permite realizar curvas horizontales y verticales con radios mínimos de giro del orden de 250 m o 300 m sin mayores dificultades (dependiendo del diámetro de la máquina). Algunos casos, poco usuales, utilizando máquinas especialmente diseñadas, es posible realizar curvas todavía más cerradas, por medio de articulaciones especiales. En el caso de la excavación convencional, es aún más amplio el espectro, pues se puede excavar con cambios de dirección de hasta 90° (lo cual, en todo caso, es poco usual).

En el caso de túneles de carretera, el trazado horizontal y vertical debe seguir los mismos criterios de diseño vial de la ruta donde se ubica el túnel, respetando radios de giro y distancias de visibilidad. En el capítulo 14 se comentan los criterios específicos para túneles viales y de carreteras.

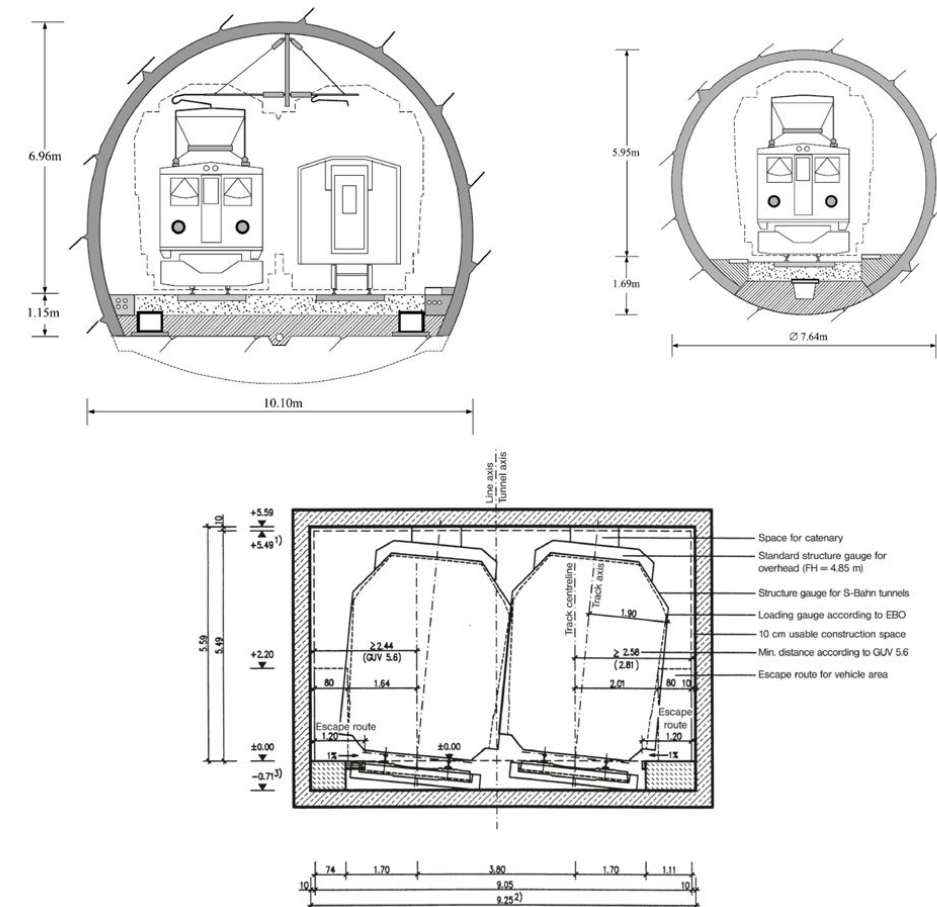
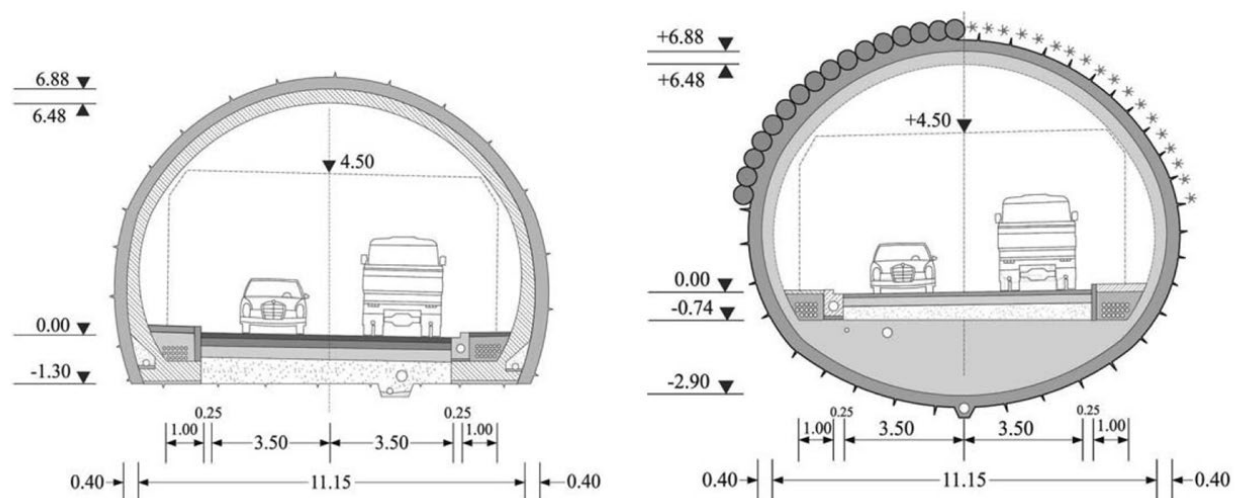


Figura 33. Secciones transversales típicas de túneles ferroviarios (Kolymbas, 2005)



**Figura 34.** Secciones transversales típicas de túneles viales (Kolymbas, 2005).

Los túneles de transporte ferroviario y los metros deben ajustarse en su trazado a la ubicación de las estaciones, pues estas se definen con base en la demanda de transporte. Por otra parte, se busca que las estaciones sean lo menos profundas posible, para gestionar mejor los aspectos de acceso, iluminación, ventilación y salidas de emergencia y, al mismo tiempo, se procura que el túnel entre las estaciones se localice un poco más profundo, procurando mejores condiciones geológicas para favorecer la estabilidad y el proceso de excavación. Además, en el contexto urbano, es necesario evitar posibles obstáculos, como tuberías, cimentaciones profundas con pilotes, pozos, otras excavaciones, etc. También se procura ubicar el trazado, cuando es posible, debajo de las áreas de vialidad de la superficie, para evitar afectaciones a edificaciones o estructuras o para evitar afectaciones de tipo legal. Como resultado, estos túneles presentan un trazado horizontal con bastantes curvas, pero también en el trazado vertical. Todas las restricciones legales, físicas, geométricas, tecnológicas y geológicas deben considerarse para realizar el trazado óptimo de la ruta. En este tipo de obras es también esencial definir un área de interés por las posibles afectaciones durante el proceso constructivo. En el capítulo 15 se comentan algunos criterios específicos para túneles de metro.

## 12.9 Diseño estructural

### 12.9.1 Particularidades del diseño estructural de obras subterráneas

El diseño estructural de un túnel es distinto del que se realiza sobre una obra en la superficie. Pero, igualmente, es necesario realizar una verificación estructural de la obra, con el fin de garantizar su seguridad operativa durante toda su vida útil, así como verificar su capacidad de responder a las situaciones de riesgo y, además, proveerla de resiliencia.

Una de las principales razones por las cuales el diseño estructural es particular en las obras subterráneas, es por la dificultad de establecer con toda claridad cuáles serán las cargas del terreno sobre la estructura. Ya se mencionó (sección 12.9.2) que hay una clara interacción entre el terreno y la estructura y que la

excavación de ésta provoca una alteración en el estado de esfuerzos. Esta interacción debe considerarse para el establecimiento de las cargas más probables sobre la estructura.

De acuerdo con Maidl et al. (2014), algunos aspectos relevantes son los siguientes:

La masa rocosa es un elemento que, al mismo tiempo que carga sobre el revestimiento, aporta resistencia para auto-sostenerse. Esta condición claramente representa una incertidumbre, puesto que el conocimiento que se tiene del terreno es limitado. Además, el medio tiene gran variabilidad.

La forma y el tamaño de la sección transversal (ver sección 12.8) influyen en la respuesta del terreno, así como la metodología constructiva que se utilice.

Los elementos de soporte en la excavación con método convencional (arcos de acero, vigas reticuladas) tienen contacto en puntos determinados del terreno, mientras que el concreto lanzado cubre amplias áreas. Ambos interactúan con el terreno con su acción estructural. Por otra parte, el desarrollo de la resistencia del concreto también afecta la respuesta del terreno, controlando la variación de las presiones a lo largo del tiempo.

La gestión contractual y los recursos disponibles en obra también influyen, toda vez que determinan el proceso de colocación del soporte (de nuevo, en la excavación convencional) y, en consecuencia, inciden en el desarrollo de las cargas y deformaciones del terreno y del soporte.

### 12.9.2 Interacción entre el terreno y la estructura

Es claro que existe una interacción entre el terreno y la estructura en una obra subterránea. El terreno contribuye a cargar la estructura y es también cargado por ella. Además, se genera alrededor del túnel un área de influencia que puede afectar obras existentes (o verse afectado por obras nuevas construidas en esa zona de influencia).

El problema de la interacción entre el túnel y el terreno es, básicamente, un problema en tres dimensiones. Las condiciones que se presentan en las inmediaciones del frente de la excavación son distintas de las que ocurren a cierta distancia en la zona ya excavada. También es distinto el comportamiento en las cercanías de los accesos (emboquilles, entradas o salidas).

El agua es otro factor en la interacción, así como el tiempo. Finalmente, también el proceso constructivo determina en gran medida la interacción entre el terreno y la estructura. Cuando se excava un túnel, la primera reacción del terreno es la de cerrar la cavidad hasta alcanzar una nueva condición de equilibrio (en corto tiempo si el terreno es blando o en un largo plazo si es roca competente). Por lo tanto, se requiere la instalación del soporte y, posteriormente, del revestimiento. Si la excavación es mecanizada, el soporte y revestimiento permanente pueden instalarse en una sola operación.

En la Figura 35 se puede apreciar la influencia de la excavación del túnel sobre el terreno circundante. La excavación produce desplazamientos adelante del frente, hasta aproximadamente una distancia equivalente a dos diámetros. Al aumentar la distancia del frente hacia atrás, las deformaciones rotan y son más bien orientadas en la dirección radial. A unos tres diámetros por detrás del frente, los desplazamientos radiales ya no se incrementan, y se alcanza la condición de deformaciones planas en la sección transversal. Cuando se instala un soporte o revestimiento en todo el perímetro, la redistribución de esfuerzos y las deformaciones son menores con respecto al túnel sin soporte.

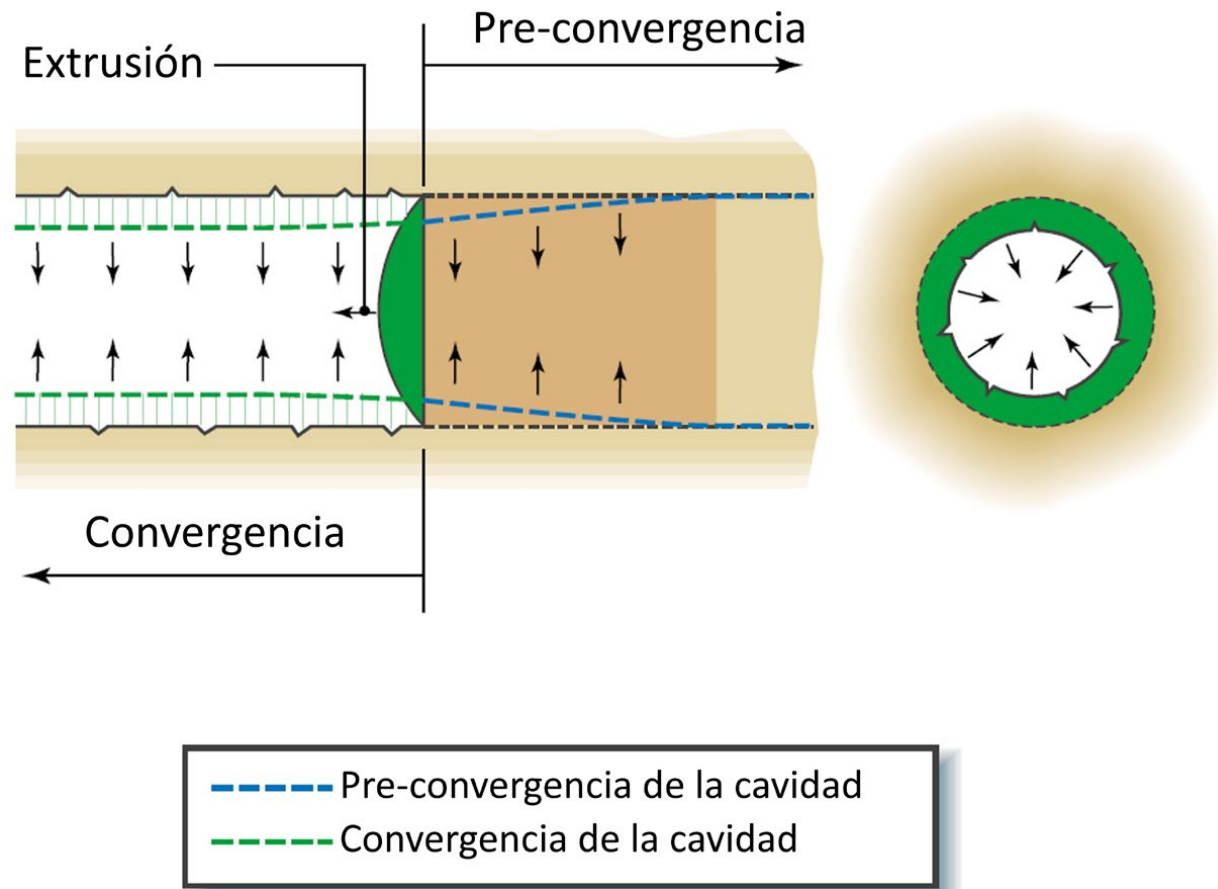


Figura 35. Respuesta del terreno ante la excavación del túnel (Lunardi, 2000)

Las presiones alrededor del túnel dependen del estado inicial de esfuerzos en el terreno donde se produce la excavación y cómo ese estado se modifica por causa de la excavación. Es decir, debe considerarse un estado primario de los esfuerzos antes de la perturbación provocada por la excavación y un estado secundario de esfuerzos, una vez que el terreno se ve afectado por la interacción con la cavidad.

Existen diferentes métodos para realizar la estimación de las presiones alrededor del túnel, desde métodos empíricos hasta métodos numéricos (cf. Sección 12.5).

### 12.9.3 Modelo para el análisis estructural

En virtud de las complejidades del problema de la interacción entre el terreno y la estructura, actualmente es recomendable recurrir a métodos computacionales para el análisis y diseño estructural del túnel. Maidl et al. (2014) proponen el esquema de la Figura 36 para la aplicación del modelo y su análisis estructural.

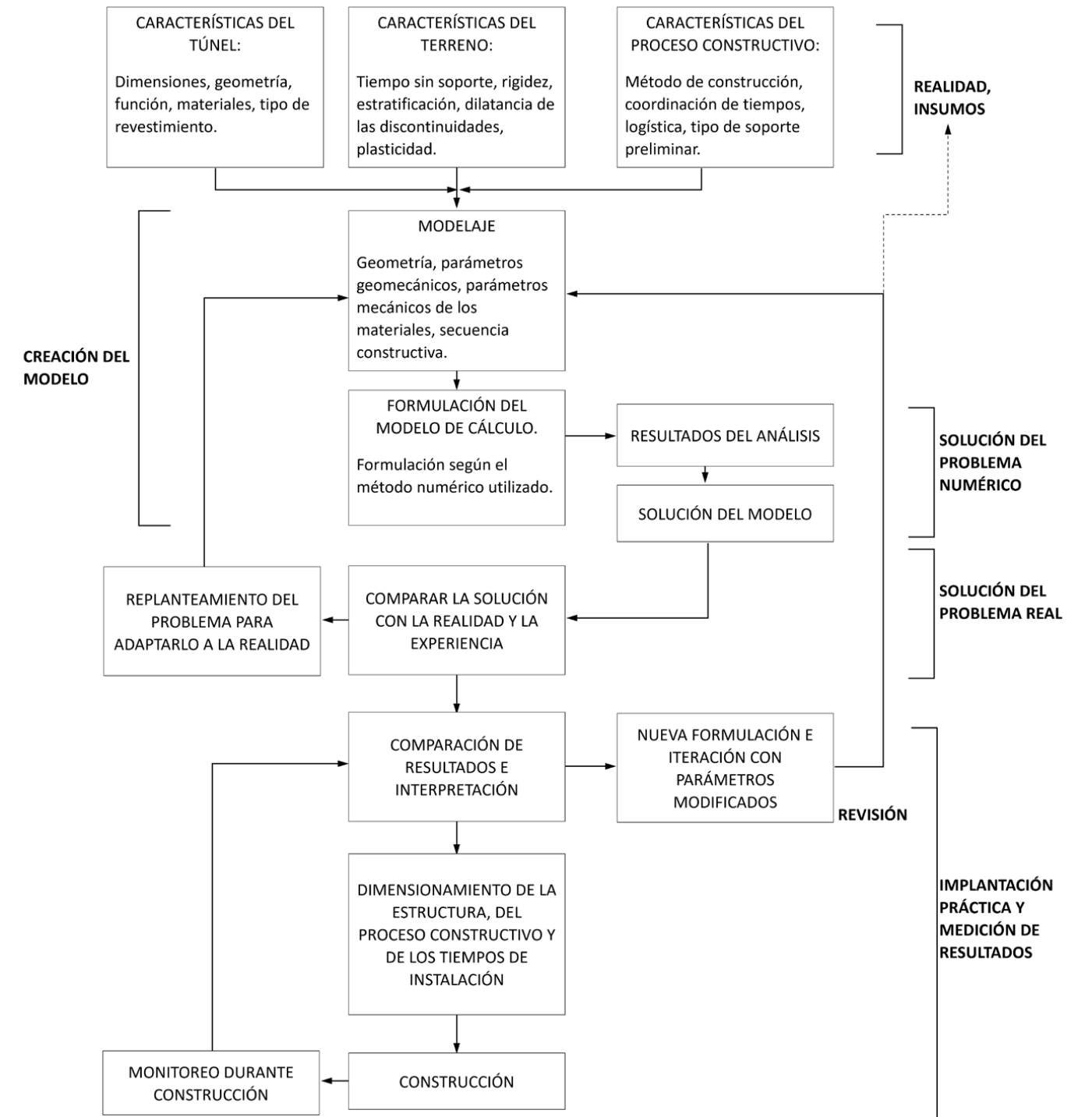


Figura 36. Métodos para evaluar el desarrollo del túnel (Modificado de Maidl et al. (2014)).

El modelo analítico puede ser distinto entre suelos y rocas, en cuanto a la distribución de las cargas. Los análisis suelen realizarse en modelos bidimensionales, aunque cada vez es más sencillo realizarlos en tres dimensiones, gracias a los avances computacionales. Se distinguen, básicamente, cuatro escenarios de análisis (ITA, 1988), según el tipo de terreno que se excave:

- a. Túneles someros en terreno blando (túneles excavados por el método de Cortar y Cubrir). Se modelan en forma similar a una tubería. Se supone que el túnel debe resistir las cargas completas del terreno. Este modelo aplica para túneles a una profundidad menor a dos diámetros (por encima del techo del túnel).
- b. Túneles profundos en terreno blando. Se supone que la carga del terreno no depende de la cobertura sino del estado de esfuerzos. Se requiere proveer un soporte inmediato por medio de elementos rígidos (por ejemplo, por medio de una máquina tuneladora tipo EPB, de Lodos o mixta (híbrido)).
- c. Túneles en roca media o suelos competentes. El terreno presenta cierta resistencia, que le permite una estabilidad sin necesidad de soporte por un tiempo ("Stand-up Time"). En este caso, ocurre una relajación de esfuerzos antes de que se logren instalar los elementos de soporte y de que empiecen a actuar. Solamente una fracción de la presión del terreno actúa en ese caso sobre el soporte.
- d. Túneles en roca dura. El terreno es capaz de mantener su condición de estabilidad con poco o ningún soporte. Es necesario incorporar en el modelo a la roca para las estimaciones de seguridad y deformaciones.

A manera de ejemplo y para proveer una mejor comprensión de la interacción entre el terreno y la estructura cuando se realiza la excavación del túnel, se presenta, a continuación, una breve explicación del Método de Convergencia y Confinamiento. Este método es aplicable a túneles profundos (a más de 2 diámetros de profundidad).

El método se basa en el análisis de esfuerzos y deformaciones que se desarrollan alrededor del túnel. Por lo tanto, considera la interacción entre el terreno y la estructura. En la literatura, también se le menciona como el "Método de la curva característica". Muchos autores han desarrollado el método, incluyendo Peck (1969), Lombardi (1973) o Panet y Guellec (1974).

El método utiliza las siguientes hipótesis:

- El túnel es de sección circular y se ubica a más de 2 diámetros (espacio infinito)
- El esfuerzo alrededor del túnel es litostático (y uniforme en las cercanías del túnel). No toma en cuenta la variación de los esfuerzos en profundidad por causa de la formación del radio plástico.
- La masa rocosa es continua, homogénea e isotrópica.
- Se trata de un problema bidimensional de esfuerzos en un plano.

Como se podrá entender, este es un método analítico simplificado que, sin embargo, aporta una buena comprensión de las condiciones en que trabaja la estructura. Puede entonces ser un insumo importante para el uso de los modelos numéricos. Se requiere conocer las características de deformabilidad del terreno y del soporte para realizar el análisis.

Dentro de los principales usos del método, se pueden mencionar los siguientes (AFTES, 2001):

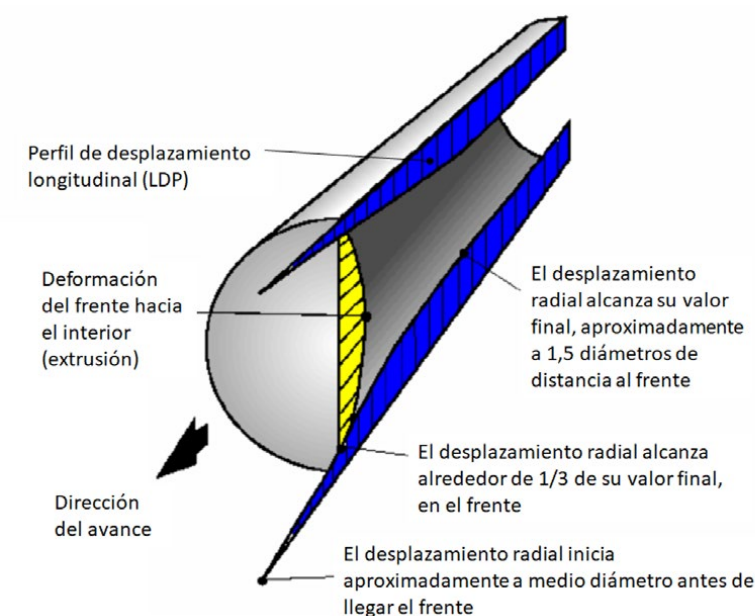
- Estimación preliminar o definitiva del soporte
- Estimación de cargas sobre la estructura
- Estimación de la zona plástica alrededor del túnel
- Estimación de las convergencias
- Estimación de parámetros geomecánicos (a partir de retro análisis, cuando hay mediciones in situ)

El método se basa en la estimación de las presiones y las deformaciones radiales, calculadas en el perímetro de la excavación circular que representa el túnel. La ecuación que define esta relación,  $p-|u|$ , es denominada curva de Convergencia – Confinamiento (o bien curva de reacción del terreno).

Según explica Panet (2023), se requiere considerar tres curvas:

- a. La curva de reacción del terreno, GRC ("Ground Reaction Curve, GRC"). Describe la convergencia del túnel sin soporte.
- b. La curva de confinamiento del soporte, SCC ("Support Confining Curve, SCC"). Describe el desarrollo de la presión en el soporte en función del desplazamiento radial o convergencia.
- c. El perfil de desplazamiento longitudinal, LDP ("Longitudinal Displacement Profile, LDP"). Representa el desplazamiento radial de la pared del túnel en función de su distancia al frente. Depende del comportamiento del terreno en el frente, de la distancia sin soporte detrás del frente y de la rigidez del soporte.

La perturbación de los esfuerzos por la excavación del túnel provoca deformaciones en las paredes y techo del túnel, así como en el frente del túnel e, incluso, en el terreno cercano al frente aún antes de ser excavado, como se describe en la Figura 37, cuando la excavación no tiene ningún soporte.



**Figura 37.** Deformaciones y desplazamientos alrededor de la excavación sin soporte (Modificado de Hoek, 2023)

Según se aprecia en la Figura 38, con relación a una determinada sección de análisis, cuando el túnel está todavía lejano (caso (a), arriba a la izquierda), no hay perturbación de los esfuerzos y el terreno está en equilibrio ( $p = p_0$ ). No hay deformaciones todavía. Conforme se aproxima el frente del túnel (caso (b)), empiezan a percibirse deformaciones en el rango elástico ( $p < p_0$  y  $|u| > 0$ ). En cierto momento, cuando el frente está muy cerca o coincide con la sección analizada, se alcanza una presión crítica, que determina el final del comportamiento elástico del terreno ( $p = p_{cr} < p_0$  y  $|u| > 0$ ). Finalmente, cuando el frente del túnel se aleja nuevamente, el terreno ya no percibe el beneficio del material que no se ha excavado y, por lo tanto, la sección transversal experimenta su máxima convergencia y la presión interna es cero ( $p = 0$  y  $|u| = |u|_{m\acute{a}x}$ ).

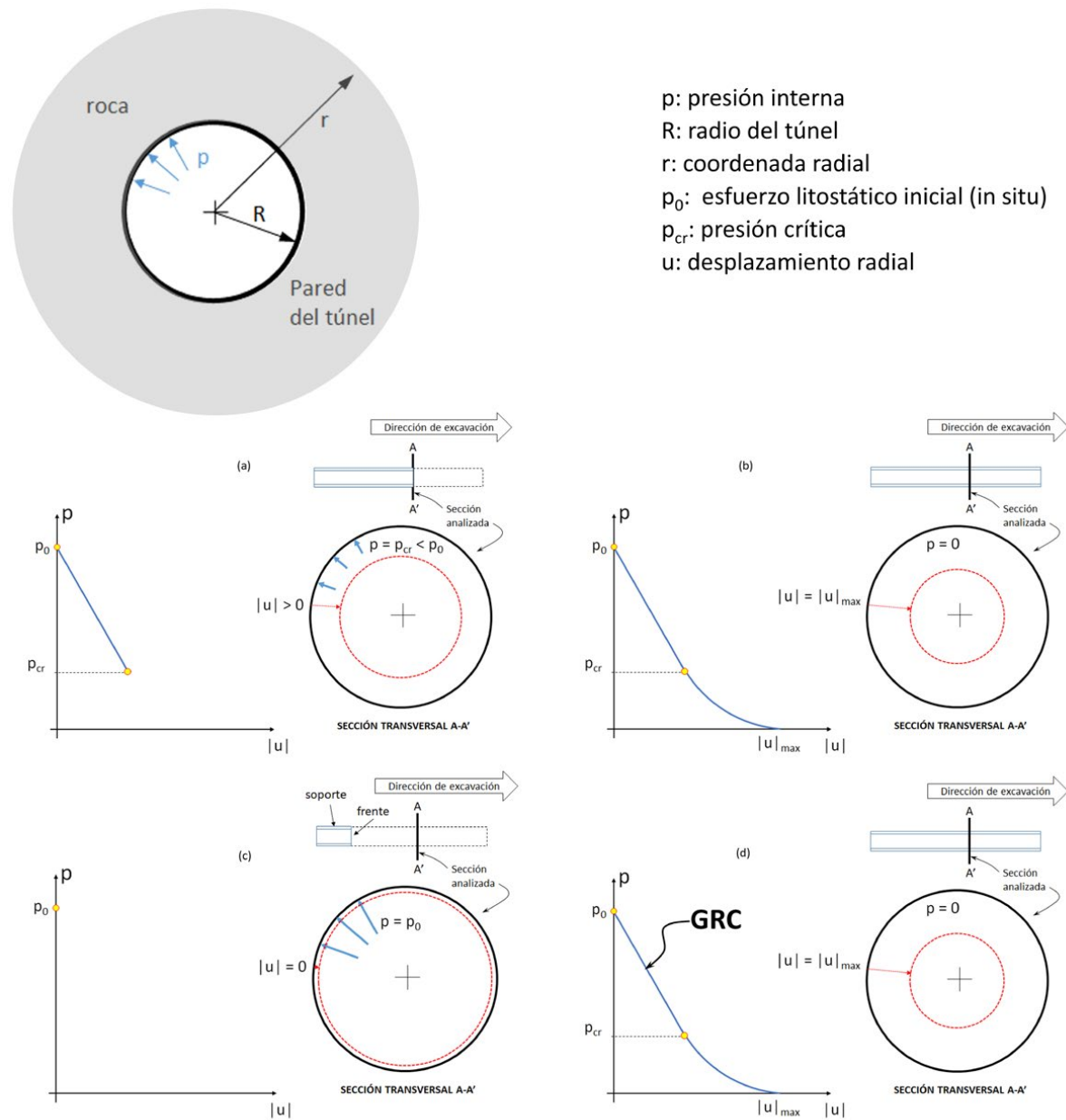


Figura 38. Desarrollo de la curva de reacción del terreno GRC.

Cuando una sección de soporte es instalada en las cercanías del frente del túnel, la sección no soporta la carga completa a la cual estará eventualmente sometida. Una parte de la carga que es redistribuida al terreno alrededor de la excavación es soportada por el terreno al frente. Conforme el túnel avanza, alejándose de la sección ya soportada, este "efecto del frente" decrece y el soporte debe tomar una porción mayor de la carga total. Cuando el frente se ha alejado lo suficiente, la sección soporta la carga completa de diseño.

Con relación al soporte, entonces, se puede indicar lo siguiente:

- Se opone o resiste la convergencia del terreno
- Esto lo hace mediante el desarrollo de la «presión del soporte»,  $p_s$ , la cual va aumentando conforme la convergencia aumenta, hasta desarrollar su capacidad completa
- $p_s$  aumenta con la rigidez del soporte y está limitada según la resistencia del material
- Para un túnel circular de radio  $R$ , se puede definir el módulo de rigidez normal,  $KSN$

En realidad, el soporte no puede instalarse inmediatamente después de que se realiza la excavación. Por ello, inevitablemente hay una convergencia que ya ha ocurrido cuando el soporte alcanza a ser colocado ( $|u|_{in}$ ). El desarrollo de la carga en los soportes sigue una relación lineal, caracterizada por su rigidez  $k$  y ocurre conforme las convergencias del túnel están en progreso. Eventualmente, el equilibrio se alcanza cuando la reacción del soporte coincide con las convergencias del terreno. Esto se muestra en la Figura 39.

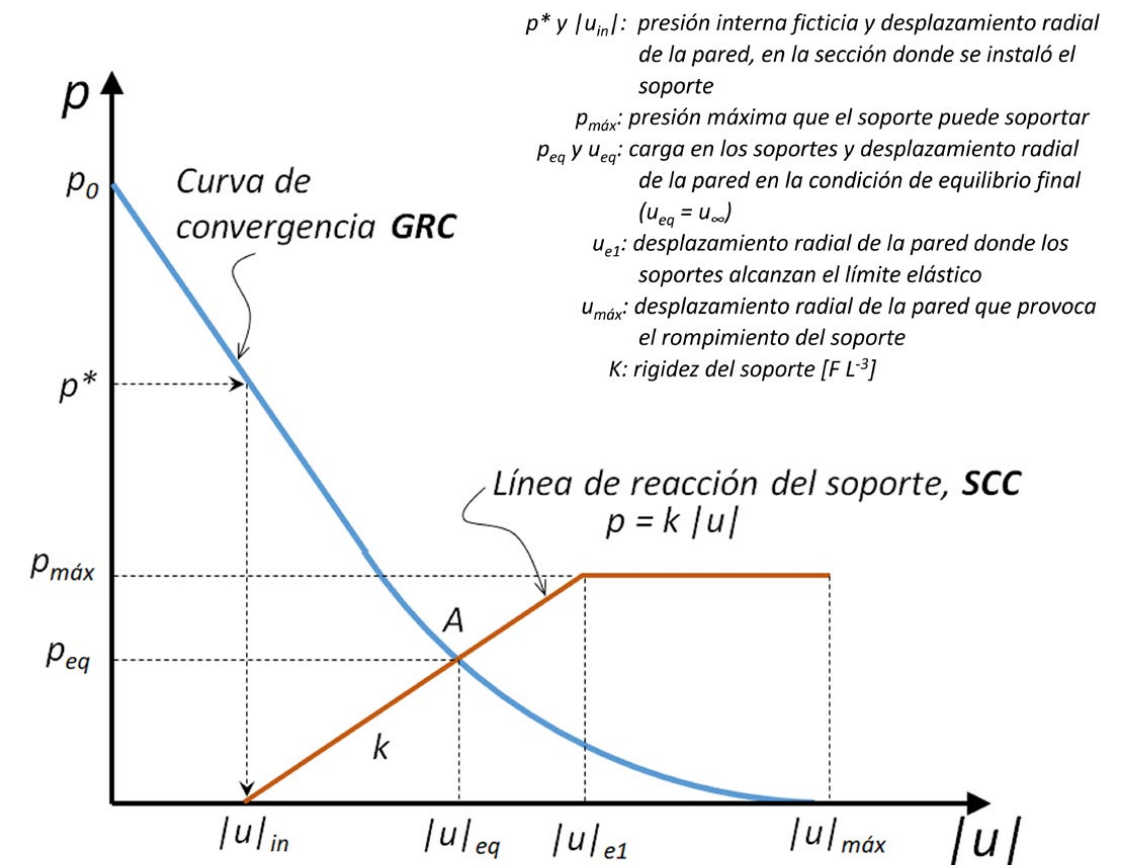
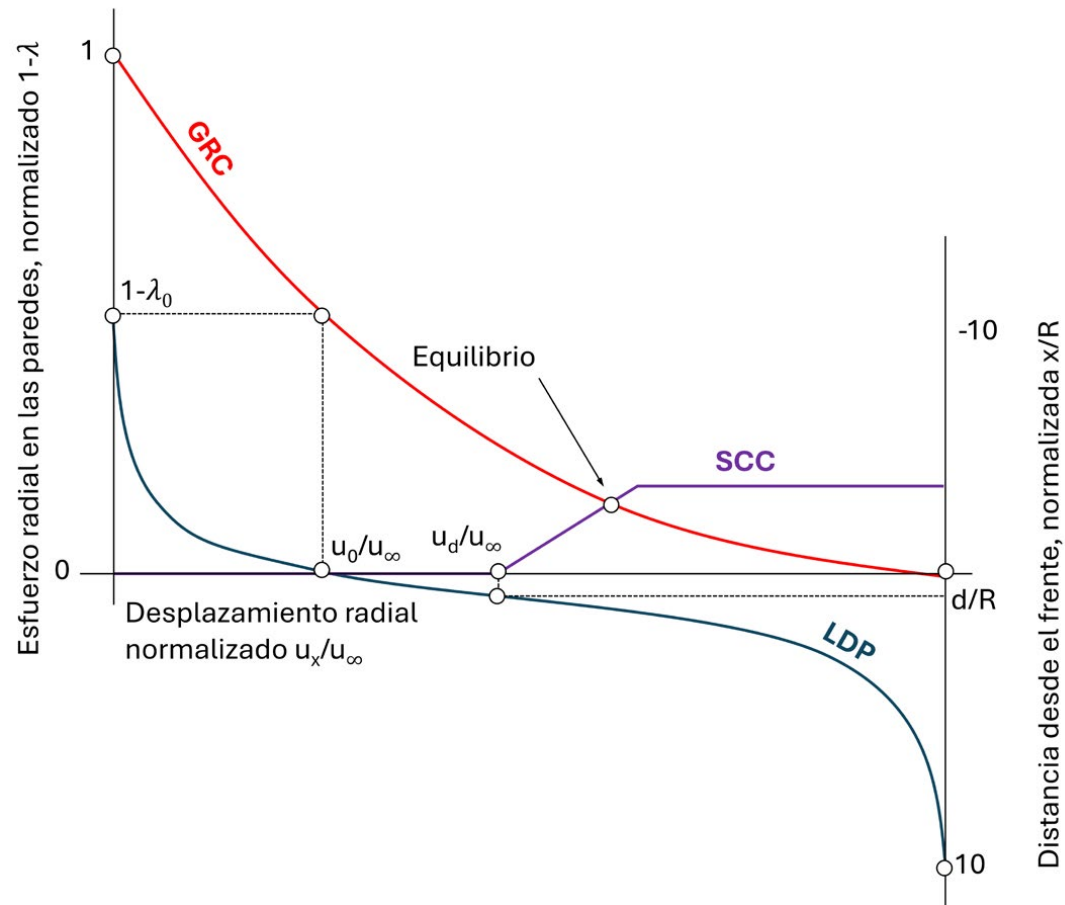


Figura 39. Equilibrio alcanzado con la instalación del soporte.

En la práctica actual, se grafican las curvas con valores normalizados, como se muestra en la Figura 40. El perfil de desplazamiento longitudinal, que depende del comportamiento del terreno, se grafica junto con la GRC y la SCC, para obtener los valores de la pre-convergencia (convergencia ya ocurrida cuando el frente alcanza la sección de análisis,  $u_0$ ) y la convergencia adicional que ya ha ocurrido cuando se realiza la colocación y cierre del soporte ( $u_d$ ).



**Figura 40.** Gráfico del método Convergencia – Confinamiento (Panet, 2023).

La secuencia del diseño con este método es la siguiente:

1. Construir la curva característica del terreno (CURVA DE CONVERGENCIA, GRC)
2. Decidir la distancia entre el frente y la colocación del soporte ( $d/R$ )
3. Determinar el porcentaje de relajación que ha ocurrido en el terreno al momento de instalar el soporte  $d$  (PERFIL DE DEFORMACIÓN LONGITUDINAL, LDP)
4. Determinar el valor de  $u_d$ , asociado al valor del porcentaje de relajación
5. Considerar la «brecha»,  $s_u$ , entre la roca y el soporte, si la hubiera
6. Dibujar la curva del soporte (CURVA DE CONFINAMIENTO, SCC)

Es importante considerar que no es posible calcular momentos o esfuerzos cortantes sobre el soporte, por lo tanto, no puede ser utilizado directamente en el diseño de los soportes. No permite evaluar la subsidencia superficial para túneles urbanos a poca profundidad.

Se puede indicar que, aunque es útil principalmente como método preliminar y complementario a los métodos numéricos, que permiten considerar mejor las etapas constructivas, también permite tener una mejor comprensión de las deformaciones provocadas por la excavación del túnel. Es, además, un medio ágil para realizar retro análisis y análisis de sensibilidad.

#### 12.9.4 Métodos empíricos

Los modelos empíricos describen el terreno de manera cualitativa o cuantitativa y, con base en tal descripción, determinan las necesidades de soporte del túnel y, en ocasiones, también determinan cómo realizar el proceso constructivo. Como se indicó en la sección 12.5, no consideran la interacción entre la estructura y el terreno.

En estos métodos, basados en el análisis de numerosos casos anteriores de éxito o fracaso, se realiza una clasificación del tipo de terreno y se determina el soporte correspondiente para tal clasificación. Su utilización como método único de diseño se limita a etapas muy preliminares, cuando la información es escasa. Para las etapas de factibilidad y diseño, no deben utilizarse como único método de análisis y diseño, aunque sí pueden usarse para realizar una estimación inicial del soporte requerido, para luego refinar el diseño con métodos más detallados y precisos y, sobre todo, con suficiente información geotécnica.

Bobet y Einstein (2024) proponen una organización de los métodos de clasificación geomecánica para el diseño de túneles, con base en los criterios del tipo de caracterización (cualitativa o cuantitativa) y el tipo de relación empírica utilizada (análisis estructural, relación directa o análisis geotécnico-estructural), definiendo cinco clases de métodos:

- a. Métodos tipo A: aquellos que se basan en una descripción cualitativa de la masa rocosa y la transforman en una determinación de la “carga de roca” como fuerzas externas que cargan la estructura. El método de Terzaghi (1946) es el más característico de esta categoría.
- b. Métodos tipo B: basados también en descripción cualitativa de las condiciones del terreno para clasificarlo en 3 o 5 clases. Estas clases se relacionan directamente con el soporte preliminar requerido y con la secuencia constructiva recomendada. En general, estos métodos son aplicables a casos específicos.
- c. Métodos tipo C: desarrollan modelos analíticos simplificados, que son evaluados con parámetros geomecánicos derivados de descripciones cualitativas o cuantitativas de la condición del terreno, como el módulo de elasticidad, el ángulo de fricción interna y la cohesión (cuando se usa el modelo de resistencia de Coulomb) o la curva de resistencia de Mohr obtenida a través de relaciones con las propiedades del terreno. Aquí se incluyen métodos con el de Deere et al. (1967) o el de Hoek y Brown (Hoek y Brown, 2019).
- d. Métodos tipo D: Basados en descripción cuantitativa del terreno, normalmente los parámetros geométricos de las discontinuidades, para categorizarlo en un cierto

número de clases, las cuales a su vez se relacionan con las cargas que se incluirán en el análisis estructural. Ejemplo: el método de Deere et al. (1969)

- e. Métodos tipo E: Análogos a los métodos tipo B, es decir, determinan los requerimientos de soporte directamente a partir de las características del terreno, pero en este caso hay una transformación cuantitativa de esas características para ser representadas por un número. En este grupo se incluyen métodos como el de Lauffer (1958), el Q de Barton et al. (1974), el RMR de Bieniawski (1989) y el RSR de Wickham et al. (1974).

Para la utilización de los métodos empíricos, se recomienda aplicar los siguientes criterios:

- Deben promover diseños económicos, pero seguros.
- Deben ser de aplicación general. Se debe indicar claramente los límites de aplicabilidad del método evaluado en el caso específico. No todos los métodos aplican a todas las condiciones o tipos de terreno.
- Los parámetros requeridos deben ser fácilmente determinables sin restricciones de tiempo, equipo o accesibilidad.
- El modelo de análisis que respalde al método empírico, sea explícito o implícito, debe ser correcto. Por lo tanto, debe considerar todos los factores relevantes y diferenciar entre varios tipos de comportamiento de la estructura del suelo.

Si el método por utilizar cumple con estos criterios, puede aplicarse al diseño en la etapa preliminar, aunque nunca como único método de diseño. La valoración de estos criterios debe ser realizada por un especialista en geotecnia.

### 12.9.5 Métodos analíticos

Según Bobet y Einstein (2024), dos grandes grupos, según su enfoque, pueden mencionarse dentro de estos métodos: métodos del continuo y métodos del discontinuo.

Los métodos del primer grupo suponen que el terreno es continuo. Es decir, que los esfuerzos y las deformaciones en el medio también son continuas. En principio, los suelos y las rocas meteorizadas o fuertemente fracturadas (que pueden considerarse con “pseudo continuos”) se analizan con estos métodos.

Dentro de los métodos continuos, por otra parte, se pueden identificar dos enfoques: aquellos que se basan en condiciones elásticas y aquellos que consideran las deformaciones plásticas.

Los principales supuestos en los métodos analíticos del medio continuo son los siguientes:

- Condiciones de deformación plana en la dirección perpendicular a la sección transversal del túnel.
- El terreno está seco o completamente saturado, es homogéneo, isotrópico.
- Las deformaciones del terreno y el revestimiento se mantienen en el rango elástico.

Los métodos elásticos analíticos, a pesar de las restricciones que le imponen estos supuestos, proveen un medio rápido para realizar estimaciones en etapas preliminares del proyecto.

Los métodos analíticos que consideran la plasticidad analizan las deformaciones provocadas por la redistribución de esfuerzos alrededor de la excavación, no sólo en el rango elástico sino también más allá de la fluencia del material. Por lo tanto, implican deformaciones de mayor magnitud. También son aplicables a casos de terreno homogéneo e isotrópico.

En cuanto a los métodos del discontinuo, estos consideran el movimiento potencial de cuñas o bloques, que pueden desprenderse de la superficie de la cavidad. Aquellos terrenos de rocas duras con discontinuidades (rocas moderadamente fracturadas) sometidas a un campo de esfuerzos medios a leves son modeladas con estos métodos, esto es, medios donde el comportamiento está claramente controlado por las discontinuidades.

Los desplazamientos de los bloques se clasifican en deslizamientos a lo largo de las discontinuidades, desprendimientos o volcamientos. Este tipo de inestabilidades son repentinas, por lo general, por lo que es necesario enfocarse en proveer un soporte efectivo y rápido a la excavación.

Dado que la conformación de los bloques depende de las características de las discontinuidades, es necesario realizar un levantamiento geomecánico detallado en las unidades geotécnicas con comportamiento discontinuo.

### 12.9.6 Métodos numéricos

Los métodos analíticos descritos en la sección 12.9.5 resuelven de manera cerrada un conjunto de ecuaciones, pero son útiles solamente para aplicarse a casos relativamente simples. Por su parte, los métodos numéricos permiten resolver situaciones mucho más complejas, en virtud de sus capacidades, por lo cual su utilización es recomendada y de práctica común en el diseño de túneles. Estos métodos muestran su eficacia sobre todo cuando se trata de analizar situaciones con geometría compleja, como los cambios de sección, la interacción con otras estructuras, los entronques, etc.

En los métodos numéricos, el medio es discretizado por medio de elementos de un determinado tamaño. Los elementos, sus nodos o sus bordes son definidos de manera tal que cumplen una determinada ley de esfuerzos y deformaciones. Cuando se introduce un cambio en la condición de esfuerzos, el sistema encuentra una nueva condición de equilibrio, siguiendo la ley de comportamiento establecida o, bien, no logra una convergencia numérica, indicando un colapso en el área analizada.

La solución que se alcanza con estos métodos, si bien no es exacta (pues se hacen algunas simplificaciones en el conjunto de ecuaciones diferenciales que definen el sistema), permite alcanzar una solución muy cercana a la solución exacta, para lo cual se requiere una cantidad grande de iteraciones. Por esta razón, se requiere de capacidad de cómputo para resolver los problemas complejos.

La precisión de la solución depende del tamaño de los elementos. Así, a menor tamaño de los elementos, mayor precisión en los resultados del análisis, aunque también, mayor demanda de recurso computacional.

Los métodos numéricos se utilizan para resolver problemas en dos y en tres dimensiones y pueden ser aplicados a medios continuos y a medios discontinuos. Por lo tanto, son útiles para resolver problemas de excavaciones en suelos y rocas muy fracturadas (considerados como continuos o pseudo continuos) y también en rocas duras fracturadas (medios discontinuos). La diferencia es que, en estos últimos, las discontinuidades deben ser definidas de manera explícita.

Aunque no existen definiciones precisas para decidir si aplicar un enfoque de medio continuo o discontinuo, pero es práctica aceptada que “si el tamaño de los bloques es de un orden de magnitud similar al tamaño de la obra, el enfoque es discontinuo”.

Maidl et al. (2014) mencionan cuatro tipos de métodos numéricos para el diseño de las obras subterráneas, con enfoque de medio continuo:

- Método de elementos finitos (FEM)
- Método de diferencias finitas (FDM)
- Método de elementos de frontera (BEM)
- Método híbrido (combinación de los anteriores)

Bobet y Einstein (2024) agregan, para el enfoque de medio discontinuo, los siguientes:

- Método de elementos discretos
- Análisis de deformación discontinuo
- Modelo de partícula ligada

Hay otros métodos, pero se mencionan solamente los más relevantes. A continuación, se mencionan algunas de las principales características de estos métodos de análisis.

#### 12.9.6.1 Método de diferencias finitas

Se basa en el planteamiento de ecuaciones diferenciales representadas por diferencias finitas, como lo indica su nombre. El área analizada se discretiza en elementos rectangulares y el conjunto de ecuaciones diferenciales es reducido a un sistema de ecuaciones lineales, que pueden resolverse por métodos matemáticos clásicos. Es un método muy utilizado para problemas en el rango elastoplástico y para problemas dinámicos.

#### 12.9.6.2 Método de elementos finitos

En este método se aplica una discretización de elementos pequeños que se intersecan en sus nodos. En general, se utilizan elementos triangulares de tres o seis nodos, aunque se pueden usar elementos con otras configuraciones. Para su aplicación es necesario establecer funciones de interpolación, de manera que es posible obtener los desplazamientos en cualquier punto dentro del elemento a partir de los desplazamientos calculados en sus nodos. La función que describe la relación entre esfuerzos y deformaciones en cada punto del terreno (nodos) se define matemáticamente para cada elemento.

La suposición básica del método es que, para un cuerpo que está en equilibrio, deben cumplirse las condiciones de compatibilidad, esto es, el trabajo interno asociado a un pequeño desplazamiento que se aplica al cuerpo debe ser igual al trabajo externo total. Así, se pueden establecer las ecuaciones diferenciales que gobiernan el problema.

En el método de elementos finitos se puede simular tanto el comportamiento del suelo como el del soporte. Puede aplicarse a condiciones elásticas o considerar la plasticidad y resolver problemas estáticos y dinámicos y considerar completamente la interacción entre el terreno y la estructura.

#### 12.9.6.3 Método de elementos de frontera

En este método, ya casi en desuso, se discretizan solamente las fronteras del medio continuo. La solución es aproximada en esas fronteras discretizadas, mientras que, en el interior del dominio analizado, se requiere que se cumplan las condiciones de equilibrio y compatibilidad de deformaciones.

La técnica matemática consiste en la transformación de las ecuaciones diferenciales que aplican a todo el medio, a ecuaciones integrales, que consideran solamente los valores en la frontera. El método se aplica muy bien a problemas de medio continuo, estáticos, con comportamiento elástico y con esfuerzos o desplazamientos aplicados en las fronteras.

#### 12.9.6.4 Método de elementos discretos

También denominado Método de elementos distintos, es un modelo específicamente enfocado a simular grandes desplazamientos en medios de roca fracturada. Se aplica al análisis de medios discontinuos.

El método permite desplazamientos y rotaciones de cuerpos discretos y reconoce automáticamente nuevos contactos entre los cuerpos durante los cálculos. Requiere, por lo tanto, de una adecuada representación de los contactos, de los materiales sólidos y de la detección y revisión de los contactos durante la ejecución del cálculo, que inicia con una variación de los esfuerzos y fuerzas para determinar los desplazamientos.

Se supone que el medio está compuesto de discontinuidades persistentes, que delimitan bloques, puesto que se intersecan entre sí.

#### 12.9.6.5 Análisis de deformación discontinua

Forma parte del grupo de métodos de elementos discretos. El medio es discretizado en elementos o bloques, en contacto entre sí, a través de las discontinuidades. Mientras que en el método del elemento distinto cada bloque recibe un análisis separado, en este caso se realiza una minimización de la energía potencial total del sistema completo, hasta llegar a una solución.

#### 12.9.6.6 Método de las partículas cementadas

Se origina a partir de la aplicación del método de elementos discretos a un medio discontinuo modelado como discos en dos dimensiones o esferas en tres dimensiones, según explican Wessling et al. (2023). De esta forma, se representa el medio como un aglomerado de partículas cementadas, enlazadas, a través de ligámenes que pueden transmitir cargas de tracción, cortante, torsión y flexión. Estos vínculos o ligámenes se rompen cuando el estado de esfuerzos supera un determinado valor.

La aplicación de este método es muy amplia, en distintos campos, no sólo la ingeniería de túneles. Puede ser útil, por ejemplo, para determinar la onza de daño alrededor de una excavación, en forma de grietas de tracción y cortante.

### 12.9.7 Elementos estructurales

En las secciones anteriores se han discutido distintos conceptos del análisis estructural aplicados al diseño de túneles y obras subterráneas. Sin embargo, es importante destacar que hay varios elementos del sistema estructural que requieren consideración específica, en particular, los siguientes:

- a. Revestimiento de concreto colado en sitio
- b. Revestimiento con dovelas de concreto prefabricadas
- c. Arcos de acero
- d. Sistemas de refuerzo del terreno (inyecciones, pernos y anclajes)
- e. Concreto lanzado
- f. Revestimientos compuestos (combinaciones de los anteriores)

Todos los elementos deben soportar las cargas que la estructura experimentará durante su vida útil. Estas cargas se obtienen con los métodos descritos en las secciones anteriores.

### 12.9.8 Cargas sobre el revestimiento

La determinación de las cargas para el diseño estructural del revestimiento del túnel no resulta simple. Su magnitud depende en gran medida de la interacción entre el terreno y el revestimiento. Para el diseño del revestimiento final, se recomienda no considerar el aporte del soporte preliminar o temporal colocado en el túnel para sostener la excavación durante el proceso constructivo. Es decir, se debe considerar que el revestimiento final deberá soportar todas las cargas que impone el terreno, sin incluir ninguna reducción de dichas cargas por contribución del soporte temporal.

Deben considerarse, de acuerdo con la ITA (2000), los siguientes tipos de carga:

#### 12.9.8.1 Cargas Permanentes (CP)

Presión del terreno (CEX): Puede ser asignada con una dirección radial hacia el centro del túnel o, alternativamente, separarla en una carga vertical y una horizontal.

La carga vertical sobre la corona del túnel (CE1) se considerará uniforme y equivalente al esfuerzo vertical por la sobrecarga del terreno (esfuerzo geostático), en el caso de túneles someros (con profundidades menores a 2 diámetros). Para túneles profundos, se requiere un análisis de esfuerzos alrededor de la excavación para determinar las cargas verticales (CEX1).

La carga horizontal (CE2) se considerará variable con la profundidad. Su magnitud corresponderá al esfuerzo vertical por el coeficiente de empuje horizontal. El coeficiente de empuje horizontal podrá considerarse entre los límites del coeficiente de empuje lateral en reposo y el coeficiente de empuje activo. Para túneles profundos, la carga horizontal (CEX2) también será determinada a partir del análisis de esfuerzos alrededor de la excavación.

Presión del agua en el terreno (CPH): Corresponde a la presión hidrostática alrededor del túnel, considerando una variación lineal con la profundidad.

Cargas verticales de los elementos estructurales (CPE): Son las cargas verticales, que actúan a lo largo del centroide de la sección transversal del túnel.

Sobrecargas (CSC): Su efecto es aumentar la presión del terreno. Incluye las siguientes acciones: cargas por el tráfico en la superficie (vehículos, trenes, etc.) y peso de las edificaciones.

Cargas por reacción del terreno (CRT): Para el cálculo de las fuerzas en los elementos del revestimiento, se debe determinar la magnitud y dirección de las cargas de reacción del terreno, que comprenden: la carga de reacción independiente del desplazamiento y la carga de reacción dependiente del desplazamiento del terreno. Esta última es una carga proporcional al desplazamiento del terreno, definida por el módulo de reacción, el cual depende de la rigidez del terreno y el radio del revestimiento.

#### 12.9.8.2 Cargas Temporales (CT)

**Cargas internas (CIN):** Corresponden a los elementos internos, suspendidos del revestimiento o acumulación de agua dentro del túnel.

**Cargas asociadas al proceso constructivo (CTE):** Por ejemplo, en el caso de túneles excavados con tuneladora y revestimiento con dovelas, los empujes de los pistones sobre el revestimiento, las cargas de transporte y manipulación de las dovelas, la presión del relleno de cola, cargas provocadas por el erector de las dovelas o cargas inusuales por la operación de la máquina.

#### 12.9.8.3 Cargas sísmicas (CS)

Cargas sísmicas (CSM, CSO), según se indica en la sección 12.10.

#### 12.9.8.4 Cargas especiales (CX)

Cargas por efecto de túneles adyacentes, cargas por efectos de los asentamientos, otras cargas particulares del proyecto, según el criterio del diseñador.

### 12.9.9 Condiciones por verificar

Como es usual, deben considerarse determinadas combinaciones de cargas en el diseño (ver sección 12.10.3.4). Deben verificarse, además de la capacidad estructural, las deformaciones, los asentamientos y la fisuración.

De acuerdo con la ITA (2000), la sección transversal del túnel debe verificarse para las siguientes condiciones críticas:

1. Sección con la mayor cobertura (donde el túnel es más profundo)
2. Sección con la menor cobertura (donde el túnel es más somero)
3. Sección con la máxima elevación del nivel freático
4. Sección con la mínima elevación del nivel freático
5. Sección con gran sobrecarga
6. Sección con las cargas de mayor excentricidad
7. Sección con superficies no horizontales o irregulares
8. Sección con túnel adyacente (en el presente o en el futuro)

Deben verificarse, además, otras secciones consideradas críticas por el diseñador para el proyecto particular como, por ejemplo:

9. Cruce de túneles
10. Sección en zona de falla geológica
11. Sección en área urbana con estructuras cercanas al túnel

### 12.10 Diseño sísmico

El comportamiento de las estructuras subterráneas ante sismos es distinto al de las estructuras sobre la superficie. Esto se debe, básicamente a que:

- a. Están completamente embebidas por el terreno,
- b. Tienen una longitud significativa (respecto de su diámetro).
- c. En la mayoría de las obras subterráneas, la inercia del terreno es alta comparada con la inercia de la estructura, por lo que es más importante el movimiento del terreno que el de la estructura en sí, lo cual es distinto en el caso de las obras superficiales.

Para el diseño de las edificaciones en superficie, el Código Sísmico de Costa Rica calcula lo que se reconoce como un coeficiente sísmico, en el cual incorpora variables como el factor de importancia, el factor espectral dinámico, además de la aceleración pico efectiva  $a_{ef}$ .

Sin embargo, el CSCR no es aplicable a estructuras subterráneas, según lo explica en su apartado 1.3. Por otra parte, las acciones sísmicas no son iguales para las obras en superficie que para las subterráneas. Por lo tanto, resulta necesario plantear algunos criterios específicos para la consideración sísmica en el diseño de las obras subterráneas, especialmente porque la amenaza sísmica en Costa Rica y Centro América es importante.

#### 12.10.1 Comportamiento ante sismos

Las estructuras subterráneas han sufrido históricamente menos daños que las superficiales, aunque en diversos casos también se han visto afectadas por las acciones sísmicas. En términos generales, Hashash et al. (2001) resumen el comportamiento de las obras subterráneas ante sismos de la siguiente manera:

- a. Las estructuras subterráneas más profundas sufren menos daños que las someras.
- b. Las estructuras subterráneas en suelo o rocas blandas sufren más daños que aquellas en roca competente.

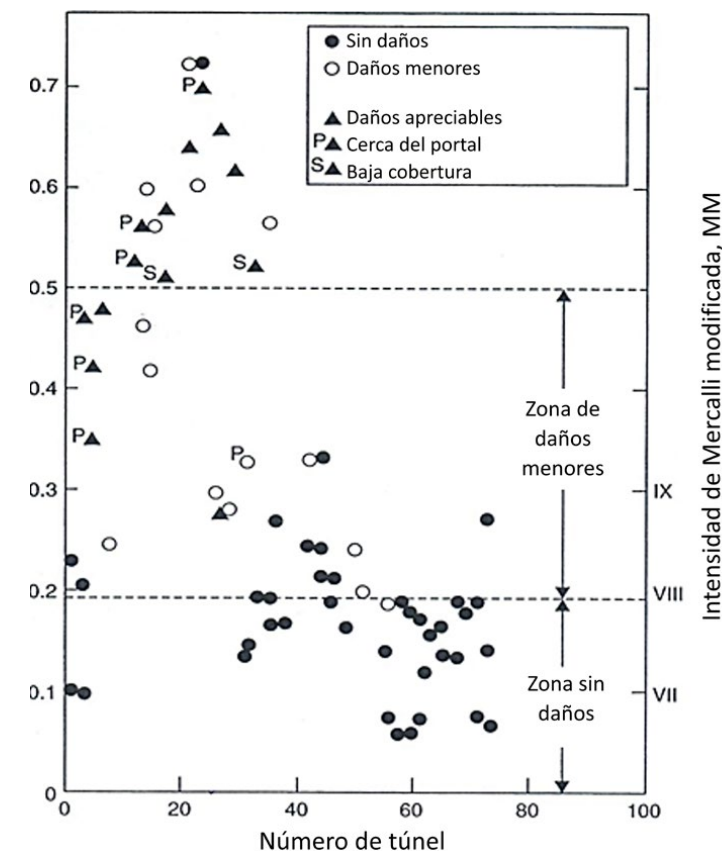
- c. Los túneles construidos mediante la técnica de cortar y cubrir ("cut & cover") son más vulnerables que los túneles circulares excavados.
- d. Los túneles revestidos e inyectados son más seguros que aquellos no revestidos.

Los túneles se comportan mejor ante cargas simétricas, lo cual favorece la interacción terreno-estructura. Siendo que ese no es el caso de las acciones sísmicas, es necesario tomar medidas que mejoren esa interacción (por ejemplo, no utilizar un revestimiento demasiado rígido en un terreno pobre sin tratamiento).

Los daños que se han presentado en algunas obras subterráneas se podrían relacionar con la velocidad pico y la aceleración pico del terreno, dependiendo de la magnitud y distancia epicentral del sismo. Para que ocurran daños significativos, la duración del movimiento fuerte del terreno es de extrema importancia, por su potencial de fatigar el terreno y producir grandes deformaciones.

Para sismos cuya fuente es cercana, podrían darse desprendimientos de bloques de concreto o de roca, causados por el contenido de altas frecuencias en la señal sísmica. Además, el movimiento del terreno podría resultar amplificado cuando el sismo incide sobre el túnel, si su longitud de onda está en el rango de uno a cuatro diámetros del túnel.

Los portales de entrada y salida son probablemente los elementos más expuestos a los efectos del sismo y podrían tener daños significativos por posibles inestabilidades de los taludes. De acuerdo con un estudio de Dowding y Rozen (1978), según se muestra en la Figura 41, hasta aceleraciones de 0,2g los daños reportados han sido mínimos. Sin embargo, para sismos entre 0,6g y 0,9g, solo se reportan daños para un túnel cuyo revestimiento era de concreto sin refuerzo.



**Figura 41.** Comportamiento de obras subterráneas ante sismos (Dowding y Rozen, 1978).

Hasta el momento, en Costa Rica no se ha llevado a cabo una evaluación detallada o sistemática de daños sufridos por túneles a causa de sismos. Sin embargo, sí se han realizado inspecciones en algunos túneles hidroeléctricos, después de sismos importantes, como el de Cinchona en 2009. Algunos de los túneles inspeccionados son:

- Túnel de la Planta Hidroeléctrica Cariblanco
- Túnel del Proyecto Hidroeléctrico Toro 3
- Túneles de Plantas Toro 1 y Toro 2
- Túneles de Tapantí y El Llano

En todos estos casos, no se reportaron daños en el revestimiento asociados a la ocurrencia de sismos.

### 12.10.2 Enfoque del diseño sísmico de la obra subterránea

Considerando lo expuesto hasta aquí, el foco del proceso de diseño está en las deformaciones del terreno y su interacción con la estructura. Hay tres tipos de deformaciones que ocurren como respuesta al sismo: la compresión y extensión axial, la flexión longitudinal y la ovalización o deformación por cortante. Estos se describen con detalle en la sección 12.10.4.2. Es necesario tener una comprensión de las características de movimiento del terreno para evaluar la respuesta del terreno y de la estructura ante la acción sísmica.

Así, el proceso de diseño sísmico de obras subterráneas, según lo propuesto por Hashash et al. (2001) y avalado por la ITA-AITES, se puede resumir en tres pasos, según se indica en la Figura 42.



Figura 42. Proceso de diseño sísmico de obras subterráneas (Hashash et al. 2001).

### 12.10.3 Definición de la amenaza sísmica

#### 12.10.3.1 Evaluación de la amenaza sísmica

Es necesario realizar una determinación de la amenaza sísmica sobre el sitio específico del proyecto, con el propósito de establecer las características de la sacudida sísmica y un “sismo de diseño”.

El estudio de amenaza sísmica se basa en el examen de las posibles fuentes de producción de sismos (fallas, zonas sísmicas, zonas de subducción) para determinar la magnitud de las sollicitaciones sísmicas, así como sus características (amplitud, frecuencia, etc.). Se busca caracterizar la carga sísmica sobre la estructura de una manera creíble y racional.

Hay dos enfoques para la determinación de la amenaza sísmica. El primero, determinístico, se enfoca en identificar el peor escenario de amenaza por sismo que podría enfrentar la estructura. El segundo, probabilístico, que, a diferencia del método determinístico, ofrece información sobre la probabilidad o frecuencia de ocurrencia del sismo de control.



Figura 43. Mapa de zonificación sísmica de Costa Rica (CSCR 2010).

En el caso de Costa Rica, la amenaza sísmica ha sido evaluada para el país y para la región centroamericana, e incorporada en el Código Sísmico de Costa Rica. Así, para las etapas preliminares puede realizarse la determinación de la amenaza mediante el mapa de zonificación del CSCR (en su versión vigente) para la determinación de la aceleración pico en superficie y luego ajustar el valor para la profundidad del túnel según se explica en la sección 12.10.3.3. En la Figura 43 se muestra la referencia para la aceleración efectiva con período de retorno de 500 años según aparece en la versión actual del CSCR.

### 12.10.3.2 Selección de las acciones sísmicas de diseño

A partir de la determinación de la curva de amenaza sísmica que caracteriza un determinado sitio, es necesario seleccionar un sismo de diseño. Por ejemplo, seleccionar la probabilidad de excedencia de un conjunto de parámetros del movimiento del terreno.

Deberán evaluarse dos condiciones:

- La primera es representada por el Sismo de Diseño Máximo (SDM), el cual busca asegurar la integridad de las personas y
- La otra condición, de menor exigencia, es representada por el Sismo de Diseño de Operación (SDO), enfocada a la reducción de pérdidas económicas

El SDM corresponde al nivel máximo de movimiento o, bien, a un evento con probabilidad de ocurrencia menor al 5% durante la vida útil de la estructura. El SDM considera el peor escenario de la combinación de cargas temporales y permanentes y cargas sísmicas.

El SDO corresponde a un sismo con probabilidad de ocurrencia de 40% a 50%. Es decir, un sismo que probablemente ocurra durante la vida útil de la obra. En este caso, la carga sísmica de diseño depende del desempeño estructural requerido, de manera que experimente pocos daños, por lo cual las deformaciones inelásticas deben ser mínimas y la estructura debe mantenerse en su rango elástico.

La acción sísmica en el CSCR 2010 es descrita en términos de la “sacudida sísmica” (Sección 2.3). Define un sismo fuerte como aquel cuya sacudida sísmica tiene un período de retorno de 475 años. Es decir, aquellos que tienen una probabilidad de excedencia de 10% para un período de operación de la obra de 50 años.

El CSCR 2010 define también sismos extremos como aquellos cuya aceleración pico efectiva de diseño es 25% mayor que la de los sismos fuertes para el mismo sitio. Sismos moderados serían aquellos cuya aceleración pico efectiva de diseño es 25% menor a la de los sismos fuertes. En los términos del CSCR 2010, el SDM podría asimilarse al sismo extremo y el SDO al sismo moderado.

### 12.10.3.3 Movimientos del terreno

La caracterización completa del movimiento del terreno se realiza en términos de la historia temporal de las aceleraciones, velocidades y desplazamientos del terreno durante el sismo, considerando tres parámetros fundamentales: la amplitud, el contenido de frecuencias y la duración del movimiento fuerte del terreno.

Se requiere utilizar parámetros efectivos y no valores pico, pues aquellos se relacionan mejor con el potencial de daños. La Tabla 5 permite relacionar la velocidad pico con la aceleración pico. La Tabla 6, los desplazamientos pico con la aceleración pico. Pueden utilizarse estos valores de relación también para los parámetros efectivos.

**Tabla 5.** Razón de velocidad pico (cm/s) sobre aceleración pico (g), en superficie (roca o suelo) (Adaptada de Power et al. 1996).

Tipo de terreno	Magnitud de momento ( $M_w$ )	Distancia entre la fuente y el sitio (km)		
		0 – 20	20 – 50	50 – 100
Roca ( $V_s > 750$ m/s)	6,5	66	76	86
	7,5	97	109	97
	8,5	127	140	152
Suelo rígido ( $V_s: 200-750$ m/s)	6,5	94	102	109
	7,5	140	127	155
	8,5	180	188	193
Suelo blando ( $V_s < 200$ m/s)	6,5	140	132	142
	7,5	208	165	201
	8,5	269	244	251

**Tabla 6.** Razón de desplazamiento pico (cm) sobre aceleración pico (g), en superficie (roca o suelo) (Adaptada de Power et al. 1996).

Tipo de terreno	Magnitud de momento ( $M_w$ )	Distancia entre la fuente y el sitio (km)		
		0 – 20	20 – 50	50 – 100
Roca ( $V_s > 750$ m/s)	6,5	18	23	30
	7,5	43	56	69
	8,5	81	99	119
Suelo rígido ( $V_s: 200-750$ m/s)	6,5	35	41	48
	7,5	89	99	112
	8,5	165	178	191
Suelo blando ( $V_s < 200$ m/s)	6,5	71	74	76
	7,5	178	178	178
	8,5	330	320	305

Un modo común de expresar los parámetros del movimiento para el diseño es por medio de espectros de respuesta de la aceleración (respuesta de un sistema amortiguado con un grado de libertad ante el movimiento del terreno). Una vez que el espectro de respuesta objetivo se ha seleccionado, es posible desarrollar una o varias historias de tiempo del movimiento del terreno que son congruentes con el espectro de respuesta de diseño. Estas historias de tiempo pueden ser sintéticas o de registros de sismos reales. Aunque esta es una herramienta útil, no debe utilizarse si la respuesta del sistema terreno-estructura es fuertemente no lineal o si la estructura es tan larga que el movimiento podría variar significativamente en amplitud y frecuencia a lo largo de la estructura. En estos casos es más útil combinar las historias de tiempo con análisis de respuesta de sitio a nivel local.

Para la estructura subterránea se requieren los parámetros del movimiento fuerte en profundidad y no en superficie. Así, es necesario considerar un efecto de atenuación del movimiento sísmico con el aumento de la profundidad.

Esto es posible a partir del espectro de respuesta en superficie, aplicando algún método de atenuación o de deconvolución para estimar los parámetros a una profundidad de interés o, bien, generar un análisis de propagación de ondas en el terreno, con métodos numéricos, para determinar los correspondientes factores de reducción con la profundidad.

Como aproximación, Hashash et al. (2001) proponen el uso de los resultados de la investigación de Power et al. (1996), utilizando factores de reducción, según se presenta en la Tabla 7, para obtener los datos de movimiento del terreno a profundidad a partir de los obtenidos en la superficie.

**Tabla 7.** Factores de reducción del parámetro de movimiento del terreno (Hashash et al. 2001).

Profundidad del túnel (m)	Razón entre el parámetro de movimiento del terreno a la profundidad del túnel sobre el que se obtuvo en la superficie
≤ 6	1,0
6 – 15	0,9
15 – 30	0,8
> 30	0,7

**12.10.3.4 Carga sísmica de diseño**

Una vez que se han obtenido los parámetros que definen el SDM y el SDO, es necesario establecer las combinaciones de carga para el diseño, las cuales se indican a continuación.

Túneles construidos por el método “Cut & Cover”

Utilizar la siguiente combinación de cargas para el SDM:

$$CU = CP + CT + CE1 + CE2 + CSM$$

- CU*: Carga última de diseño (capacidad requerida por la estructura)
- CP*: Carga permanente de los elementos estructurales
- CT*: Cargas temporales
- CE1*: Cargas verticales por empuje de tierra y agua
- CE2*: Cargas horizontales por empuje de tierra y agua
- CSM*: Carga sísmica máxima, que proviene directamente del estudio de amenaza sísmica, equivalente a la carga sísmica con una probabilidad de excedencia del 5% en 50 años.

Utilizar la siguiente combinación de cargas para el SDO:

$$CU = 1,05 CP + 1,3 CT + \beta_1 (CE1 + CE2) + CS_0$$

Las variables tienen la misma definición.  $\beta_1 = 1,05$  si se toman cargas extremas para *CE1* y *CE2*. En otros casos,  $\beta_1 = 1,3$ .  $CS_0$  es la carga sísmica de operación, equivalente a la carga sísmica con una probabilidad de excedencia del 10% en 50 años.

**Túneles de sección circular construidos por el método convencional o máquina tuneladora**

Utilizar la siguiente combinación de cargas para el SDM:

$$CU = CP + CT + CEX + CH + CSM$$

Donde

- CU*: Carga última de diseño (capacidad requerida por la estructura)
- CP*: Carga permanente de los elementos estructurales
- CT*: Cargas temporales
- CEX*: Cargas estáticas causadas por el proceso de excavación
- CH*: Cargas por la presión hidrostática
- CSM*: Carga sísmica máxima, que proviene directamente del estudio de amenaza sísmica, equivalente a la carga sísmica con una probabilidad de excedencia del 5% en 50 años.

Utilizar la siguiente combinación de cargas para el SDO:

$$CU = 1,05 CP + 1,3 CT + \beta_2(CEX + CH) + CS_0$$

Las variables tienen la misma definición.  $\beta_2 = 1,05$  si se toman cargas extremas para CEX y CH. En otros casos,  $\beta_2 = 1,3$  solamente para CEX.  $CS_0$  es la carga sísmica de operación, equivalente a la carga sísmica con una probabilidad de excedencia del 10% en 50 años.

Antes de la aplicación de las combinaciones de cargas indicadas para el SDM, la estructura debe haber sido diseñada con la capacidad de resistir las cargas estáticas. También debe ser revisada en términos de su ductilidad, así como la resistencia ante los efectos sísmicos.

En el caso de los túneles construidos con el método de "Cut & Cover", la evaluación de la capacidad debe considerar las incertidumbres asociadas con las cargas CE1 y CE2, y su peor combinación. Para túneles circulares, se debe dar una consideración similar a las cargas CEX y CH.

### 12.10.4 Evaluación de la respuesta del terreno

Es necesario evaluar la posible respuesta del terreno ante la ocurrencia del sismo, pues de ello depende el comportamiento de la estructura. Existen varias condiciones que deben ser verificadas, según se describe a continuación.

#### 12.10.4.1 Modos de falla del terreno

Entre los diversos modos de falla del terreno provocados por la ocurrencia de sismos, tres de los más relevantes son: la licuefacción, la inestabilidad de laderas y el desplazamiento de fallas activas. Por lo tanto, es importante considerar los siguientes aspectos durante la investigación geológica y geotécnica:

- Fallas activas o potencialmente activas cercanas o que el túnel deba atravesarlas.
- Deben identificarse las fallas geológicas y las zonas de fracturas (especialmente aquellas con una separación entre fracturas en el orden de magnitud de la longitud de onda del sismo esperado en el sitio), así como otras zonas que podrían comportarse como zonas de cortante ante la excitación sísmica.
- Es conveniente realizar estudios neotectónicos para identificar las fallas activas y realizar una estimación de la magnitud de los posibles desplazamientos.
- Cambios lito estratigráficos: materiales cuyas propiedades físicas o mecánicas son muy contrastantes con respecto a la unidad geotécnica vecina.
- Condiciones de los esfuerzos in situ, especialmente campos de esfuerzos fuertemente anisotrópicos.
- Presencia de suelos blandos y, en particular, suelos susceptibles de sufrir licuefacción.
- Presencia del nivel freático y condiciones hidrogeológicas adversas.
- Inestabilidad de laderas.

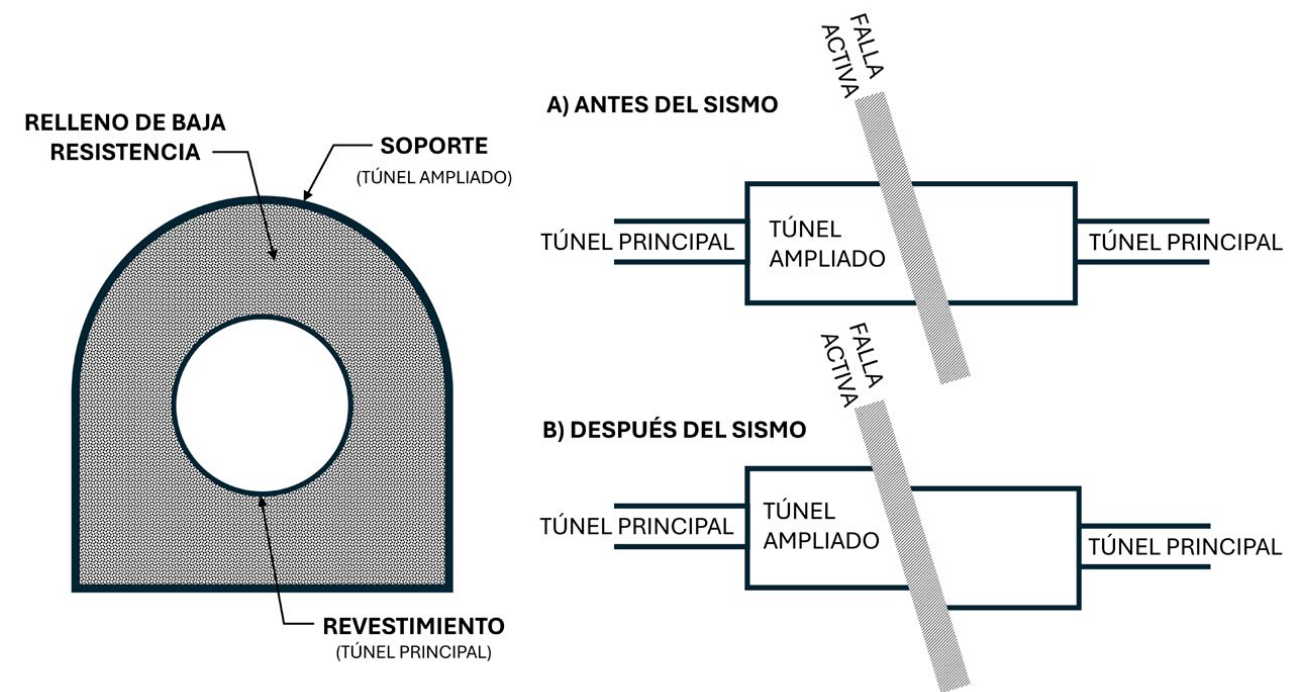


Figura 44. Interacción de un túnel con una falla activa con desplazamientos (Adaptado de AFTES 2001b).

En general, se busca que el túnel tenga la capacidad de absorber los desplazamientos que serían provocados por la falla en caso de que genere un sismo, en forma tal que se puedan realizar reparaciones después del evento.

Wells and Coppersmith (1994), proponen la correlación:

$$\log MD = -5,46 + 0,82 M_w$$

donde

$MD$  es el desplazamiento máximo, en metros.

Si los desplazamientos se prevén grandes y concentrados en una zona relativamente pequeña, es posible utilizar una sección más grande del túnel. Es adecuado también aumentar la ductilidad del tramo del túnel mediante la inclusión de blindaje de acero o arcos de acero embebidos en el concreto del revestimiento. Si en cambio, se prevén deformaciones pequeñas, pero distribuidas en una zona extensa, es posible entonces considerar la inserción de juntas dúctiles para proveer articulaciones al túnel, lo que le permitiría acomodarse a la distorsión, pero sin sufrir ruptura.

### 12.10.4.1 Desplazamientos del terreno

Aún si no se materializa alguno de los riesgos geotécnicos mencionados en la sección anterior, se debe considerar el movimiento del terreno y la magnitud de las deformaciones dinámicas y permanentes que podrían ser provocadas por la acción sísmica. Como se explicó arriba, hay tres tipos de deformaciones primarias que ocurren como respuesta al sismo (ver Figura 45):

- a). La compresión y la extensión axial,
- b). La flexión o pandeo longitudinal y
- c). La ovalización y la deformación por cortante.

Las deformaciones axiales que sufre la estructura son generadas por los componentes de las ondas sísmicas que producen movimientos paralelos al eje del túnel y provocan compresión y tensión de forma alterna. Por su parte, las deformaciones por flexión son causadas por los movimientos del terreno perpendiculares al eje longitudinal del túnel.

La ovalización o deformaciones por cortante se desarrollan cuando las ondas de corte se propagan normales o casi normales al eje del túnel, lo que resulta en una distorsión de la forma de la sección transversal del revestimiento del túnel.

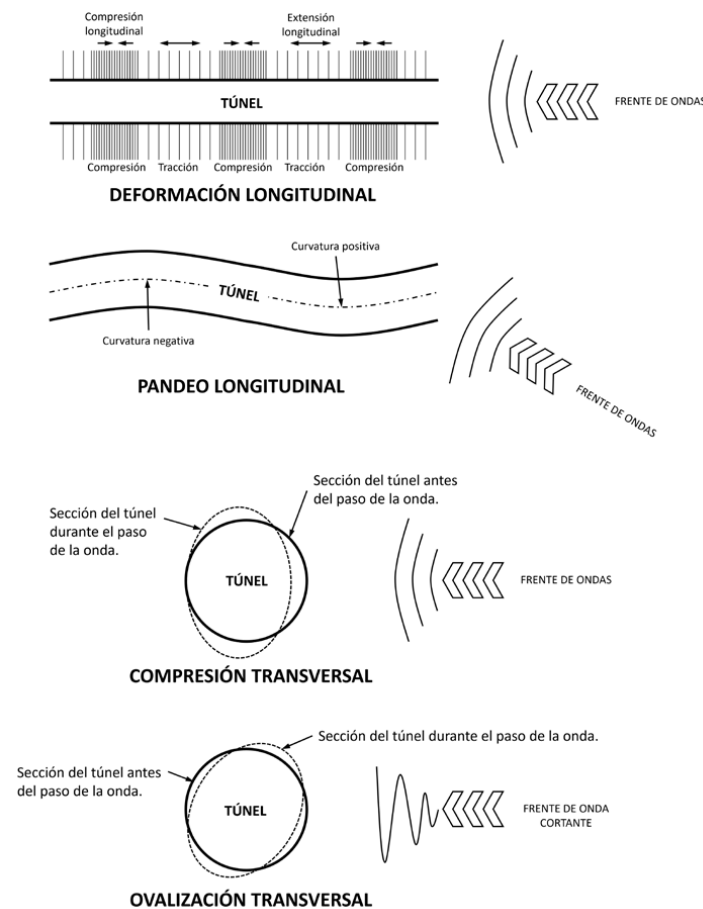


Figura 45. Desplazamientos del túnel causados por el sismo.

El comportamiento general del revestimiento puede simularse como una estructura enterrada sujeta a deformaciones del terreno bajo una condición de deformación plana bidimensional.

La importancia de determinar estos desplazamientos del terreno es precisamente que la estructura debe tener la capacidad de soportarlos, toda vez que se parte de la compatibilidad de deformaciones como modo de interacción entre la estructura y el terreno.

### 12.10.5 Determinación del comportamiento de la estructura

El último paso en la evaluación del efecto del sismo sobre la estructura corresponde a la determinación de su comportamiento ante la incidencia de las ondas sísmicas. Esto implica la definición de las cargas y la evaluación de la estructura, en términos de esfuerzos y deformaciones.

Se pueden aplicar diversos enfoques para la determinación de los desplazamientos y las fuerzas correspondientes a los tres modos de deformación explicados arriba, con el propósito de determinar el comportamiento de la estructura:

#### 12.10.5.1 Enfoque de la deformación de campo libre

En este enfoque se describen las deformaciones del terreno sin considerar la presencia de las estructuras subterráneas. Por lo tanto, se ignora la interacción entre el terreno y la estructura, pero permite tener una buena estimación de las deformaciones que la estructura podría sufrir.

Este enfoque podría sobreestimar o subestimar las deformaciones reales en la estructura, dependiendo de la rigidez relativa entre ella y el terreno.

El método de deformación de campo libre es una herramienta de diseño simple y efectiva cuando las distorsiones del suelo inducidas sísmicamente son pequeñas (por ejemplo, cuando la sacudida sísmica es leve, el terreno es muy rígido o la estructura es flexible en comparación con el medio). Sin embargo, en muchos casos, especialmente en suelos blandos, el método resulta demasiado conservador porque las distorsiones del suelo en campo libre en suelos blandos son generalmente grandes. Por ejemplo, las estructuras de cajas rectangulares en suelos blandos suelen estar diseñadas con configuraciones rígidas para resistir cargas estáticas y, por lo tanto, son menos tolerantes a las distorsiones. Los efectos de la interacción suelo-estructura deben incluirse para el diseño de dichas estructuras, según se establece en la sección 12.10.5.2.

- a. Soluciones elásticas con formulación cerrada: generalmente de formulación simple, útiles para estimaciones iniciales.
- b. Deformación por ovalización en túneles circulares: las deformaciones por ovalización se desarrollan cuando las ondas se propagan en una dirección perpendicular al eje del túnel y, por lo tanto, se diseñan en la dirección transversal, normalmente en condiciones bidimensionales de deformación plana.
- c. Deformación por cortante en túneles rectangulares: se estiman las deformaciones en la estructura a partir de las deformaciones por cortante.
- d. Métodos numéricos: de importancia cuando se tienen terrenos muy variables. Se basan generalmente en análisis de propagación de ondas en una dimensión.

### 12.10.5.2 Enfoque de la interacción entre el terreno y la estructura

Es evidente que la presencia de la estructura modifica las deformaciones de campo libre. Por ello, es importante considerar la interacción. Algunos de los métodos utilizados se resumen a continuación:

- a. Soluciones elásticas con formulación cerrada para túneles circulares, considerando fuerzas axiales y momentos: En esta clase de soluciones, el enfoque de viga sobre fundación elástica se utiliza para modelar los efectos de la interacción suelo-estructura (cuasi estáticos). Las soluciones ignoran los efectos de interacción dinámica (inercial).
- b. Deformación por ovalización en túneles circulares: La respuesta del revestimiento es función de la compresibilidad y la flexibilidad de la estructura, de la presión de sobrecarga in situ y del coeficiente de presión de tierra en reposo  $K_0$ . En este método, para adaptarse a las cargas sísmicas causadas por las ondas de corte, el esfuerzo cortante de campo libre reemplaza la presión de sobrecarga in situ y se le asigna un valor de -1 al coeficiente de presión de tierra en reposo para simular la condición de corte de campo. El esfuerzo cortante se expresa en función de la deformación cortante.
- c. Deformación por cortante en túneles rectangulares: Los túneles rectangulares tienen características sísmicas muy diferentes a los circulares. Un marco de caja no transmite cargas estáticas de manera tan eficiente como un revestimiento circular, por lo que las paredes y losas del marco de corte y cubierta deben ser más gruesas y, por lo tanto, más rígidas. El diseño requiere una cuidadosa consideración de los efectos de la interacción suelo-estructura debido a esta mayor rigidez estructural y al potencial de mayores deformaciones del suelo debido al enterramiento poco profundo.
- d. Presiones por el empuje dinámico: Las presiones dinámicas del terreno en las estructuras de túneles someros toman la forma de distribuciones complejas de cortantes y tensiones normales a lo largo de las superficies exteriores de la estructura. La cuantificación precisa de estas cargas externas requiere rigurosos análisis dinámicos de la estructura del suelo. Los métodos dinámicos de presión de la tierra suelen suponer que las cargas sísmicas son causadas por la fuerza de inercia de los suelos circundantes.
- e. Métodos numéricos: Los métodos de análisis numérico para estructuras subterráneas incluyen métodos de rigidez y de masa concentrada y métodos de elementos finitos y de diferencias finitas. Para analizar las deformaciones axiales y de flexión, lo más apropiado es utilizar modelos tridimensionales.

## 12.11 Diseño eléctrico y diseño mecánico

Los túneles de transporte (viales, carreteros, ferroviarios, metro) requieren de un diseño eléctrico y un diseño mecánico, los cuales abarcan un número muy grande de componentes en el sistema de transporte, para asegurar una operación segura de la infraestructura.

Entre otros, los aspectos más importantes por considerar incluyen los siguientes:

- a. Diseño del sistema de ventilación permanente
- b. Diseño del sistema de iluminación
- c. Diseño de los sistemas de generación de potencia (operación normal y emergencias)
- d. Diseño del sistema de aprovisionamiento de agua potable y agua industrial
- e. Diseño del sistema de canalización hidráulica
- f. Diseño de los sistemas de bombeo

- g. Diseño de las facilidades para la gestión operativa
- h. Diseño de plantas de energía de respaldo
- i. Diseño del sistema de comunicaciones
- j. Diseño del sistema de señalización
- k. Diseño de sistemas contra incendio
- l. Diseño del sistema de control y respuesta de emergencias
- m. Conexión a los sistemas eléctricos permanentes

Por otra parte, el proceso constructivo también requiere consideraciones de aspectos eléctricos y mecánicos. En particular, son importantes los siguientes aspectos:

- a. Diseño del sistema de ventilación
- b. Diseño del sistema de iluminación
- c. Diseño de los sistemas temporales de generación de potencia
- d. Diseño del sistema de extracción de material excavado (con máquina tuneladora)
- e. Diseño del sistema de agua potable y aguas industrial
- f. Diseño del sistema de agua para la construcción y extracción de aguas utilizadas
- g. Diseño de las facilidades constructivas
- h. Diseño de plantas de energía de respaldo
- i. Diseño del sistema de comunicaciones
- j. Diseño del sistema de señalización
- k. Diseño de sistemas contra incendio

El diseño de los sistemas eléctricos y mecánicos es complejo y requiere de la participación de profesionales debidamente autorizados por el CFIA, así como de técnicos capacitados para la instalación de todos los componentes. En la sección 14.5 se discute con mayor detalle sobre el equipamiento eléctrico y mecánico requerido para los túneles viales.

## 12.12 Diseño arquitectónico

El diseño arquitectónico es de gran importancia en los túneles de transporte (viales, carreteros, ferroviarios, metro), no sólo por el aspecto meramente estético, el cual es de suma importancia, puesto que los accesos a las estaciones o los propios túneles debe encajar dentro del contexto panorámico y socio cultural, sino también por las consideraciones funcionales desde el punto de vista del uso humano.

### 12.12.1 Consideraciones funcionales

Hay dos tipos de aspectos funcionales por considerar, ambos de gran importancia en el funcionamiento de los túneles de transporte: los aspectos psicológicos y fisiológicos, y los aspectos de seguridad.

#### 12.12.1.1 Aspectos psicológicos y fisiológicos

Dentro de los aspectos psicológicos, es importante reconocer que hay una aversión natural a los espacios oscuros y cerrados (excepto si se es amante de la espeleología), especialmente el miedo al colapso del túnel y la claustrofobia. Por tal razón, es necesario incluir en el diseño de las obras, en lo posible, medidas para que los usuarios experimenten el mayor confort y sensación de seguridad posibles. Para ello, es útil

el uso de iluminación y la señalización, así como la procura de maximizar los espacios donde transitan los usuarios.

Entre los aspectos fisiológicos, es importante considerar los siguientes aspectos:

- Crear espacios grandes y abiertos
- Proveer líneas de salida hacia la superficie
- Asegurar el contacto visual entre los usuarios
- Diseñar el espacio subterráneo como si fuera un diseño de interiores, más que un espacio exterior

En muchos aspectos, el espacio subterráneo debe cumplir los mismos requerimientos que las estructuras en superficie, incluyendo un adecuado control de clima (temperatura, ventilación), la iluminación y una muy fácil y rápida identificación de las salidas, así como los requerimientos ergonómicos y antropométricos aplicables.

El control climático requiere mantener un clima confortable en todas las circunstancias (temperatura y humedad constantes y aire fresco forzado, si no es posible la ventilación natural).

La luz es importante, pues influye grandemente en la experiencia del usuario. Por ello, debe proveerse suficiente luz para evitar áreas oscuras dentro de las estaciones e, incluso, dentro del túnel vial. La iluminación debe utilizarse para crear una atmósfera adecuada.

La señalización y la demarcación es uno de los aspectos más importantes al diseñar el espacio subterráneo. Los usuarios deben encontrar fácil y rápidamente las salidas normales y las salidas de emergencia y deben poder desplazarse en el espacio subterráneo tan fácilmente como en la superficie. En realidad, la gente raramente presta mucha atención a las señales, hasta que las necesitan para llegar a un lugar que no le es familiar. Una persona en la calle o en un edificio no estará interesado en cómo fueron diseñadas estas señales. Lo que es relevante es su efectividad y cuán fáciles son las instrucciones para interpretarlas, lo que tiene que ver con su claridad y simplicidad.

#### 12.12.1.2 Seguridad

En cuanto a los aspectos de seguridad, deben considerarse al menos tres conceptos: a) Seguridad física, b) Seguridad social y c) Seguridad externa.

En relación con la seguridad física, deben incluirse todas las medidas necesarias para asegurarse que las personas puedan salir de los espacios subterráneos de manera segura, en circunstancias que están fuera de la operación normal. Es necesario considerar situaciones de riesgo, como la ocurrencia de incendios, explosiones, disturbios o aglomeraciones. Así, la seguridad física incluye la consideración del control del humo, las salidas de emergencia y los servicios de emergencia.

El control del humo, para el caso de incendios o por el humo expelido por los vehículos a combustión, requiere la inclusión de compartimentos para conducir el humo, pantallas para evitar la propagación del humo, sistemas de ventilación activa y control de la pluma de humo (su comportamiento cuando se enfría), instalación de sistemas fijos contra incendios y detectores de humo. Es, por lo tanto, vital el diseño de un sistema integral para el control de incendios y del humo.

Las salidas de emergencia incluyen las salidas de operación normal, lógicamente, pero también vías de escape adicionales cuyo único propósito es dar una salida segura a los usuarios durante una emergencia. Las salidas de emergencia deben considerar que en el túnel la dirección del humo es la misma que la de evacuación, por ello, también deben considerarse en el diseño del sistema de control de humo. Por otra parte, estas vías de escape deben considerar las dificultades que puedan experimentar personas con movilidad reducida.

El acceso de los servicios de emergencia durante un evento crítico es fundamental. El diseño de la estructura, desde su conceptualización, debe incorporar las soluciones pertinentes y efectivas para asegurar que estos servicios puedan llegar de manera oportuna a cualquier parte del túnel donde pueda ocurrir una situación de emergencia.

Con respecto a la seguridad social, este es el requerimiento de asegurar que los usuarios del espacio subterráneo no se sientan amenazados por su utilización. Por ello, no es conveniente usar columnas en las estaciones ni crear corredores oscuros con posibilidad de que alguien se mantenga oculto y pueda así atacar a algún usuario. Los usuarios deben tener la posibilidad, en todo momento, de ver a los otros usuarios y ser visto por los demás. Por ello, no se deben instalar paredes sólidas separando plataformas, sino transparentes, o una pared con espacios vacío o huecos, de manera que se provea siempre una línea visual directa entre las personas. Debe considerarse, además, la instalación de cámaras para detectar movimiento como parte de los procedimientos de seguridad.

Finalmente, con respecto a la seguridad externa, se trata de considerar cualquier incidente en el túnel que pueda afectar la seguridad en la zona de afuera. Así, se debe proveer suficiente protección estructural contra el fuego para prevenir un colapso que genere efectos adversos en la superficie. Podría significar también que en ciertas situaciones el almacenamiento o transporte de sustancias peligrosas o explosivas deba ser limitada o prohibida. Incluso, es importante considerar la posibilidad de ataques terroristas o vandalismo.

#### 12.12.2 Consideraciones de integración estética

Es importante, como valor agregado social, que las entradas al espacio subterráneo, así como el espacio subterráneo como tal, se integre estéticamente con el entorno y considerando los valores sociales y culturales del país. Además, el diseño interno de las estaciones subterráneas representa un desafío y una oportunidad extraordinaria para exponer los valores culturales y artísticos del país. Hay numerosos ejemplos de estaciones de gran valor arquitectónico. Los espacios subterráneos deben diseñarse de tal forma que se creen espacios habitables y atractivos para conseguir mejores ciudades. Deben ser atractivos al punto de que, una vez dentro, no se quiera salir. El diseño arquitectónico es clave para la experiencia del usuario y determina la sensación que se tiene en el espacio subterráneo.

#### 12.13 Resistencia contra el fuego

En el caso de túneles viales y ferroviarios, túneles peatonales y ciclistas y cualquier obra subterránea de carácter permanente (con excepción de sótanos de edificaciones) donde ocurra tránsito de personas por cualquier medio, el revestimiento permanente debe ser diseñado de manera tal que tenga suficiente resistencia al fuego para garantizar que no ocurra el colapso de ninguno de los elementos estructurales durante la ocurrencia de una deflagración.

Los elementos estructurales deben estar adecuadamente protegidos contra el fuego, por lo que debe seguirse la norma NFPA 502 (2023, o su versión más reciente), numeral 7.3 para el diseño de tales elementos.

Los objetivos del diseño por resistencia contra el fuego son los siguientes:

- a. Garantizar el acceso de los servicios de primera respuesta hasta el sitio del fuego.
- b. Minimizar los impactos económicos.
- c. Minimizar los daños estructurales.

La estructura debe cumplir con los requisitos de transmisión de calor y desconchado de la aplicación de la curva de tiempo-temperatura establecida en la norma ASTM E3134, Especificación estándar para componentes estructurales de túneles de transporte y sistemas pasivos de protección contra incendios.

Los requisitos mínimos de protección contra el fuego para túneles viales son los que se indican a continuación en la Tabla 8 (categoría definida según la Figura 68):

**Tabla 8.** Requisitos mínimos para la protección contra el fuego

Categoría	Longitud (m)	Requisitos mínimos (Los numerales indicados se refieren a la norma NFPA 502 (2023))
A, B	Más de 1000	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Todos los alcances de la norma NFPA 502 (2023).</li> </ul>
A, B, C, D	250 a 1000	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Todos los alcances de la norma NFPA 502 (2023), con las excepciones señaladas en la misma.</li> </ul>
D, E	Menos de 250	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Análisis de ingeniería de acuerdo con 4.3.1,</li> <li>• Evaluación de la protección de los elementos estructurales de acuerdo con la Sección 7.3,</li> <li>• Instalación de un sistema de tuberías verticales y sistemas de control de tráfico de acuerdo con los requisitos del Capítulo 10 y la Sección 7.6.</li> </ul>

Los sistemas de alarma y control de incendios para túneles viales durante la fase de operación se describen en el apartado 14.5.6.

## 13 Aspectos constructivos

El enfoque principal es gestionar adecuadamente el riesgo de la etapa de realización de las obras subterráneas. Partiendo de ahí, se presenta una lista de los métodos de excavación disponibles actualmente para la construcción de diversos tipos de obras subterráneas, incluyendo sus ventajas y limitaciones, pero no se realiza una descripción profunda de cada método, sino más bien su planteamiento conceptual.

### 13.1 Selección del método de excavación

Los túneles requieren ser excavados en cualquier tipo de material, desde arcilla suave hasta roca dura. El método de excavación y soporte dependerá en gran medida de las condiciones del terreno, aunque hay muchos otros factores, como aspectos sociales, ambientales, tecnológicos, contractuales o normativos que pueden influir en la selección del método de excavación.

La excavación de un túnel se constituye de varios procesos, que se organizan de manera que se pueda excavar la mayor longitud de túnel en el menor tiempo posible, usando el menor número de elementos de soporte.

Lo anterior debe lograrse al mismo tiempo que:

- Se garantice la estabilidad permanente de la obra
- No existan condiciones peligrosas para los trabajadores
- No se den daños ambientales en el entorno del túnel.
- Se satisfagan los requisitos económicos – financieros

De acuerdo con los tipos de proceso y la forma en que se organizan, se definen los diversos métodos de construcción de túneles. Se acostumbra a diferenciar entre los grupos siguientes (Figura 46):



**Figura 46.** Métodos de excavación de túneles y obras subterráneas.

En general, el Propietario define, ya desde el diseño básico y para efectos de licitación, el método constructivo por utilizar. Sin embargo, puede resultar conveniente que el ingeniero responsable de la construcción del túnel sea el que proponga en su oferta el método constructivo, según las condiciones particulares del proyecto y del entorno contractual o normativo, lo cual es posible siempre que se haya establecido que los diferentes métodos constructivos considerados en el concurso sean viables técnicamente.

## 13.2 Excavación convencional

### 13.2.1 Principios de la excavación convencional

De acuerdo con la ITA (2009), la excavación por el método convencional permite realizar la construcción de excavaciones subterráneas de cualquier forma con un proceso cíclico compuesto por los siguientes pasos:

- a. Excavación (con explosivos o con excavadoras mecánicas)
- b. Remoción del material excavado
- c. Soporte de la excavación

A estos podría agregarse, antes de la excavación, el refuerzo previo del frente, si las condiciones del terreno lo requirieran.

En la Figura 47 se expresa el ciclo de manera gráfica. El llamado método convencional utiliza básicamente equipo estándar de construcción (sección 13.2.10) y permite acceder directamente al frente de la excavación, para evaluar la excavación. Resulta muy flexible en situaciones o áreas donde el terreno es variable y exige ajustes en el soporte o en el diseño del revestimiento.

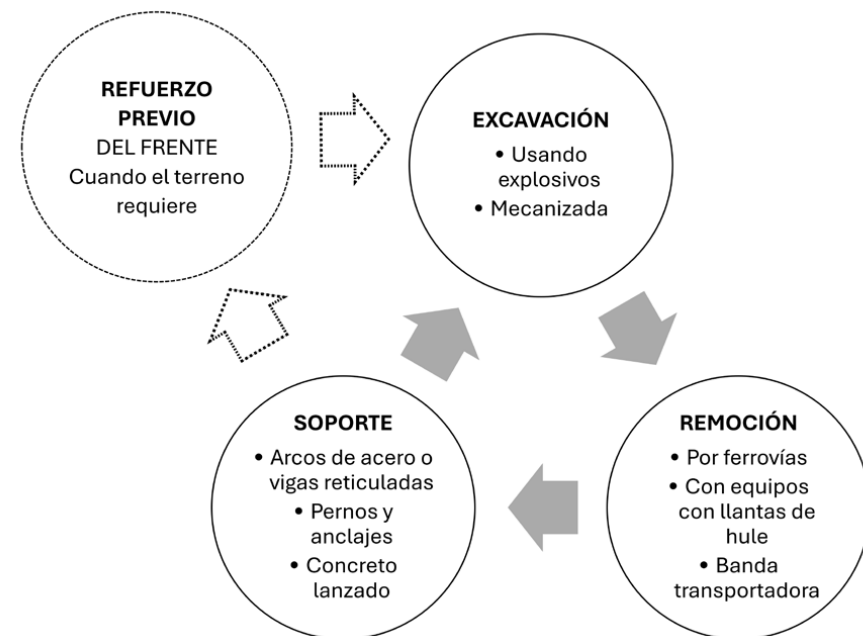


Figura 47. Ciclo de la excavación convencional.

Utilizando los equipos usuales de la excavación convencional, es posible realizar modificaciones en el proceso constructivo, como podrían ser las siguientes:

- Reducir o aumentar la cantidad de soporte (espesor del concreto lanzado, número o longitud de los anclajes, espaciamiento de los arcos, etc.)
- Introducir elementos de soporte primario para cerrar el perímetro de excavación
- Extender o reducir el tiempo en que se instala el refuerzo de la solera (piso o contra bóveda) para cerrar el perímetro (tiempo entre la excavación de una sección del túnel y la aplicación de soporte parcial o completo) o variar la distancia del cierre del perímetro de refuerzo respecto del frente de excavación.
- Modificar la cantidad de explosivos en cada ronda de voladura y modificar la secuencia de detonación.
- Aumentar o reducir la longitud de excavación (el “pase de excavación” o “longitud de avance”)
- Cambiar a excavación parcial en lugar de sección completa.
- Realizar inyecciones del terreno (inyección de consolidación, de relleno de fracturas, inyección a presión, inyección de compensación, inyección al avance en caso de presencia de caudales intensos o altas presiones en las infiltraciones)
- Aplicar métodos auxiliares de soporte hacia delante del frente (sombrias de tubos, anclajes, jet grouting, congelamiento).
- Realizar perforaciones sistemáticas de avance para obtener información más detallada del terreno por excavar.

En términos generales, el método convencional es más apropiado cuando el terreno por excavar es muy variable, o cuando se requieren secciones variables o el túnel es muy corto. También suele preferirse si hay un alto riesgo de encontrar inlfujos a altas presiones o si los accesos son muy difíciles.

Hay varias técnicas o métodos que se pueden incluir en el grupo de la excavación convencional, las cuales se comentan en las secciones siguientes.

### 13.2.2 Excavación secuencial

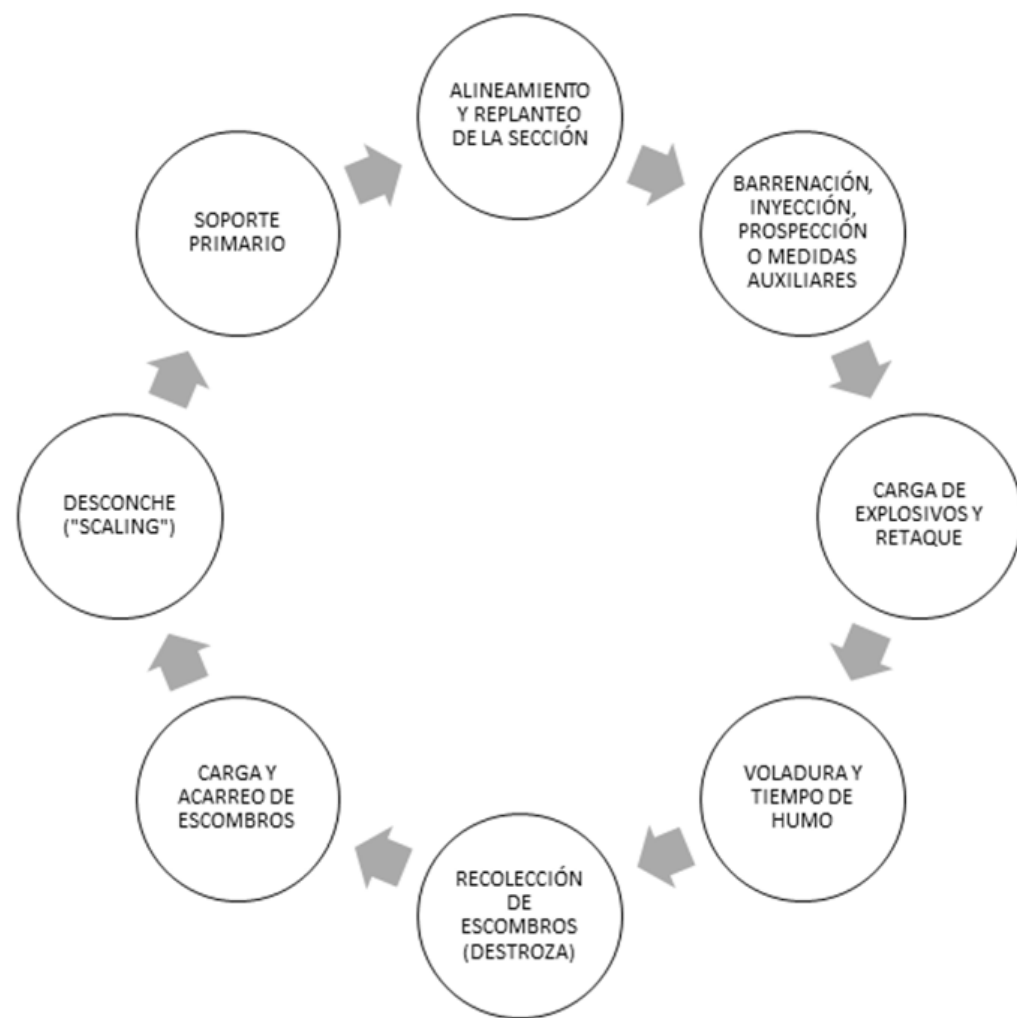
El método “convencional”, en sus más básicas definiciones, corresponde a un proceso de excavación secuencial, en el que los procesos se realizan de manera discontinua, iniciando con la destrucción del terreno mediante el uso de explosivos colocados dentro de perforaciones (barrenos) y luego volados (explotados) o, bien, mediante la excavación mecánica (con rozadoras, excavadoras convencionales o martillos hidráulicos) como mecanismo para destrozarse el terreno y avanzar.

Hay distintas concepciones de este método, incluyendo el NATM (“New Austrian Tunnelling Method”) o el SEM (“Sequential Excavation Method”), el método ADECO-RS, el método noruego y varias más. Cada una tiene sus particularidades según la forma y uso de los procesos de excavación y la instalación de los elementos de soporte, pero en general, todas ellas utilizan los mismos elementos para el soporte y cumplen el mismo ciclo de los procesos que las componen, según se ilustra en la Figura 48.

El ciclo empieza por el replanteo topográfico, con la máxima precisión posible. No sólo se trata de verificar un correcto alineamiento del trazado, sino también replantear sobre el frente de excavación la sección teórica del túnel y la plantilla de voladura (cuando se utilizan explosivos). Esta consiste en la ubicación

de cada barreno que deberá perforarse sobre el frente de excavación, que será posteriormente cargado con los materiales explosivos. De previo, será necesario realizar el diseño de la plantilla, incluyendo no sólo la ubicación de cada barreno, sino también su diámetro, longitud, orientación y carga (la cantidad de explosivos que se colocará en cada uno), así como la secuencia de la detonación.

Una vez realizado el replanteo, se procede con la barrenación, utilizando normalmente el jumbo de excavación. Cuando se ha realizado la barrenación, se realiza la carga de explosivos (en gel o en estado sólido), siguiendo el diseño de la plantilla de voladura. Se procede con la detonación, siguiendo una determinada secuencia (pues no todos los barrenos se hacen explotar al mismo tiempo, para favorecer una mejor destroza del terreno). La detonación provocará que los explosivos consigan destrozarse el terreno en bloques de tamaño manejable para su extracción. La voladura debe diseñarse cuidadosamente para evitar que el terreno que queda en la excavación no resulte muy deteriorado, pues cuánto más daño reciba, menor será su estabilidad. Se deben procurar algunos minutos para que el polvo y el humo producto de la explosión, pueda ser sacado del túnel por medio del sistema de ventilación.



**Figura 48.** Subprocesos del ciclo de excavación en el método convencional.

Inmediatamente después de la voladura, el material destrozado habrá quedado al pie del frente de la excavación. Por lo tanto, será el momento de la entrada de los equipos de carga y acarreo, que se encargarán de retirar los escombros hacia afuera del túnel. Se procederá ahora con el desconche, que es una tarea muy importante que consiste en eliminar cualquier bloque que haya quedado un poco suelto o inestable en el terreno recién excavado y que es necesario retirar para la seguridad de los trabajadores. Se requieren trabajadores experimentados e, idealmente, equipo específico con martillo hidráulico para realizar el desconche.

Estos procesos no son necesarios si la excavación se realiza por medios mecánicos, como excavadoras o rozadoras, pues son estos equipos los encargados de destrozarse el material que se excava (ver sección 13.2.3).

Una vez que la sección ha quedado limpia, se procederá con la inspección del frente por parte del geólogo de obra para confirmar cuál sección tipo de soporte establecida en el proyecto será la que se debe instalar, en concordancia con las condiciones reales del terreno.

### 13.2.3 Excavación convencional mecanizada

Cuando se utilizan equipos de excavación (excavadoras o rozadoras), debido a que no es viable o no resulta económico el uso de explosivos o, bien, porque el terreno es blando y los explosivos no son efectivos, se aplica el método llamado de excavación convencional mecanizada. Este no es el método de excavación con tuneladora descrito en la sección 13.3.

A manera de una guía general, se hace alusión a la resistencia a la compresión uniaxial media del macizo rocoso para establecer preliminarmente la posibilidad de realizar la excavación con equipo convencional. La Tabla 9 presenta una guía.

**Tabla 9.** Guía para el uso de equipos convencionales en la excavación

Descripción del terreno	Resistencia a la compresión uniaxial (MPa)	Equipo utilizable
Muy suave	< 1,25	Excavadora
Suave	1,25 – 5,0	Excavadora / Rozadora
Moderadamente suave	5,0 – 12,5	Rozadora
Moderadamente duro	12,5 – 50	Rozadora
Duro	50 – 100	Rozadora y explosivos
Muy duro	100 – 200	Explosivos
Extremadamente duro	> 200	Explosivos

La rozadora es un equipo muy versátil, que está equipado con un tambor giratorio que posee picas que, aplicadas sobre el frente de excavación, van consiguiendo desprender partículas. Estas son recolectadas por algún sistema de aspas giratorias que introducen el material por el centro del equipo, trasladándolo hacia atrás, donde una banda transportadora se encarga de levantarlo y depositarlo en los equipos de extracción (trenes o vagonetes). En la Fotografía 19 se aprecia, a manera de ejemplo, un modelo de rozadora de la marca Sandvik, aunque existen, por supuesto, diversas marcas en el mercado.

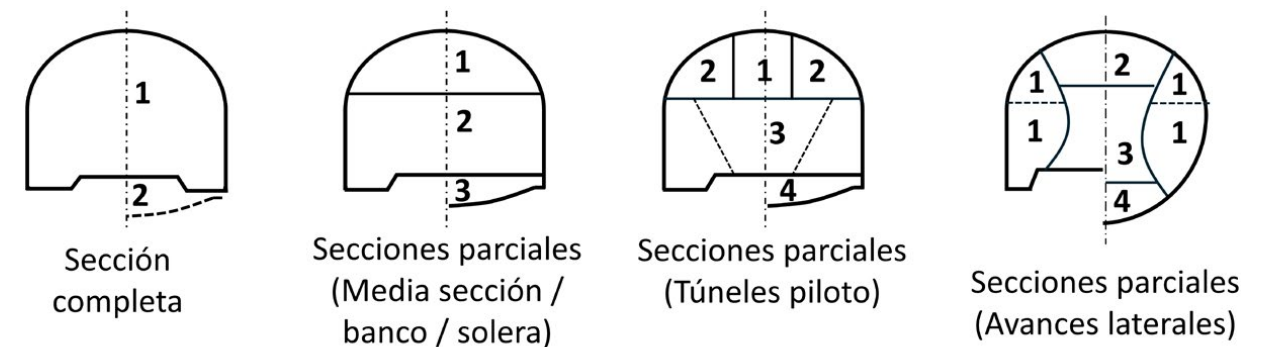


**Fotografía 19.** Imagen de una rozadora en la fábrica (MT 721, Sandvik)

En :<https://www.rocktechnology.sandvik/es-la/productos/equipo/corte-mec%C3%A1nico/rozadora-para-tunelizacion%C3%B3n-mt721/>

### 13.2.4 Secuencia de la excavación

El método convencional permite la excavación en sección completa o parcial. La definición de la secuencia depende de la calidad del terreno, es decir, del tiempo que puede mantenerse sin la instalación de soportes. Cuando la condición del terreno es buena, se pueden hacer avances a sección completa (generalmente en longitudes de alrededor de 4 m), para evitar daños excesivos al terreno por cargas de explosivos demasiado elevadas.



**Figura 49.** Secuencias típicas de excavación en el método convencional (ITA, 2009).

La sección completa es utilizada cuando la sección transversal no es tan grande y cuando el terreno tiene calidad suficiente para mantenerse estable sin soporte por períodos largos. Sin embargo, con la tecnología disponible actualmente y los métodos de presoste (medidas auxiliares, ver sección 13.2.6), es posible excavar secciones completas grandes (incluso mayores a 100 m<sup>2</sup>), incluso en terrenos difíciles. Para ello, debe asegurarse la estabilidad del frente de excavación, por lo cual la metodología debe proveer el cierre rápido del anillo perimetral de soporte. La tendencia actual es tratar de excavar siempre en sección completa, aunque no siempre es factible.

### 13.2.5 Tipos de soporte en la excavación convencional

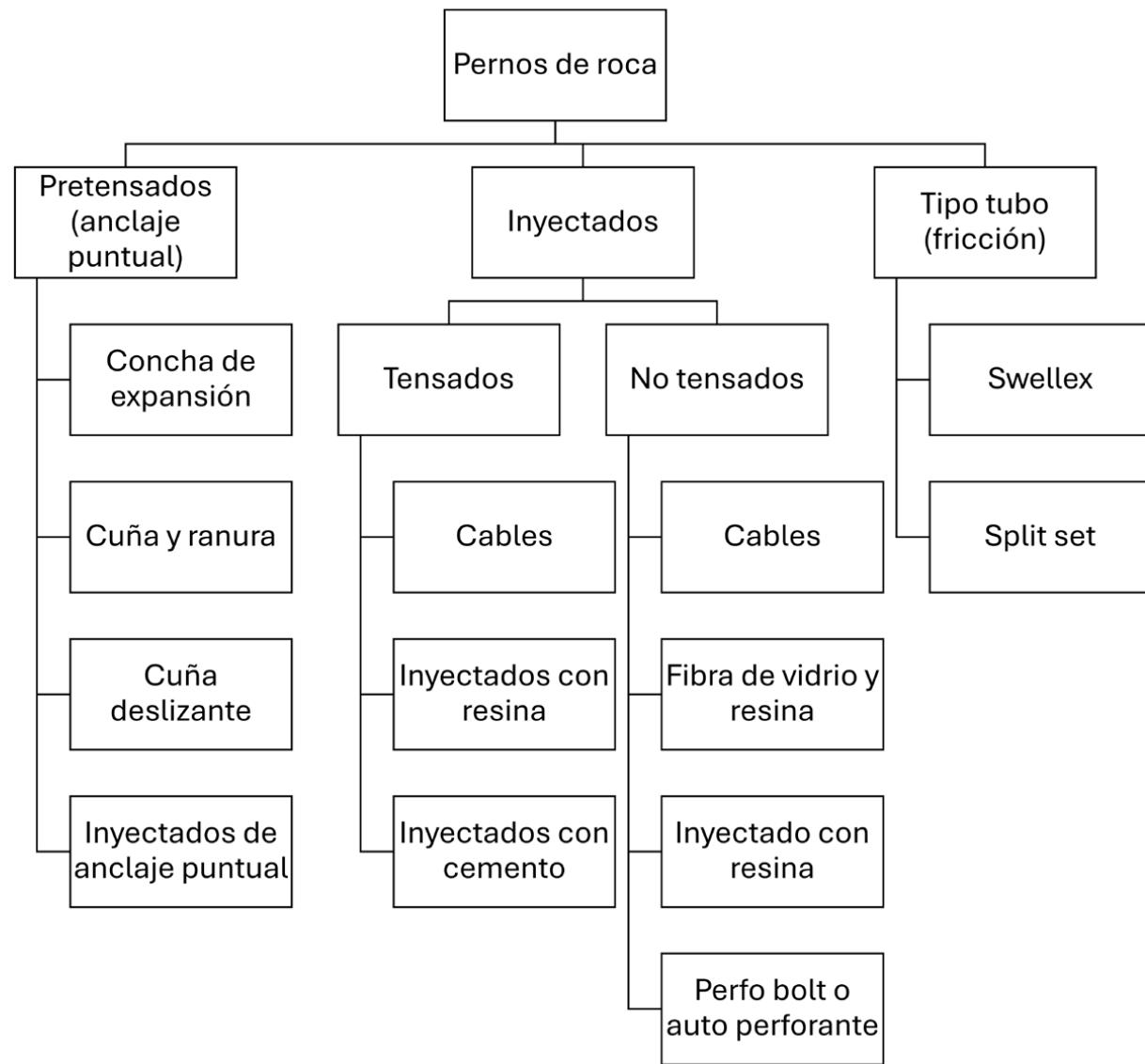
El soporte primario de la excavación se realiza durante el proceso de la excavación, con el propósito de estabilizar el terreno hasta que se construya el revestimiento definitivo. Los elementos más comunes para el soporte primario son los siguientes:

- a. Pernos de anclaje
- b. Concreto lanzado (simple o reforzado con malla o fibras)
- c. Arcos de acero
- d. Vigas reticuladas
- e. Mallas

Los elementos de soporte pueden utilizarse individualmente o combinados. La selección de los elementos de soporte requiere el análisis de las capacidades de cada elemento. Por lo general, se definen secciones tipo en función de la condición geotécnica del terreno a lo largo del túnel.

En términos generales, el soporte es colocado principalmente en las paredes y el techo del túnel (cavidad). Los soportes que se colocan en la zona hacia delante del frente, se les agrupa dentro de las medidas auxiliares (sección 13.2.6).

Uno de los elementos más comunes es el perno de anclaje. Hay una gran variedad de posibilidades (ver Figura 50). Los que se utilizan como temporales suelen ser los que funcionan por fricción (swellex y split set), pero para condiciones permanentes, se requiere que sean inyectados.



**Figura 50.** Tipos de pernos de roca usados en obras subterráneas



**Fotografía 20.** Algunos tipos de anclajes metálicos.

El concreto lanzado es un elemento de soporte muy versátil y tiene múltiples ocupaciones. La Fotografía 21 presenta la aplicación de concreto lanzado de forma manual y la Fotografía 22 muestra la aplicación utilizando control remoto.



**Fotografía 21.** Aplicación manual de concreto lanzado.



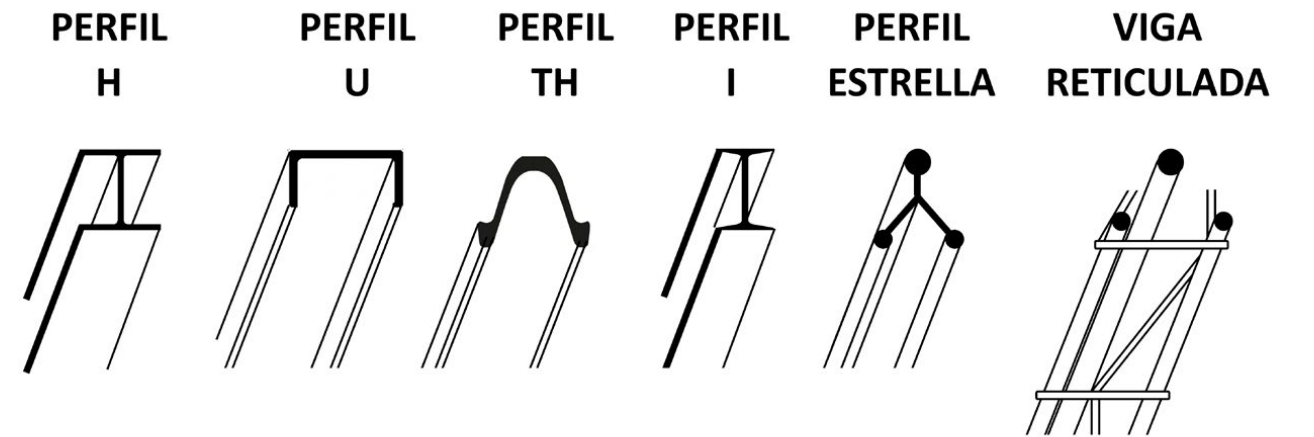
**Fotografía 22.** Aplicación a control remoto de concreto lanzado.

**Fuente:** <https://panel.construproductos.com/images/posts/6228b4c859f6e.jpg>

Hay equipos específicos para la colocación de arcos de acero, como se aprecia en la Fotografía 23. Los arcos que se muestran en esta fotografía son vigas tipo H, dobladas en secciones que conforman el arco. También se pueden utilizar secciones tipo I. En la Figura 51 se presentan varios tipos de secciones de acero.

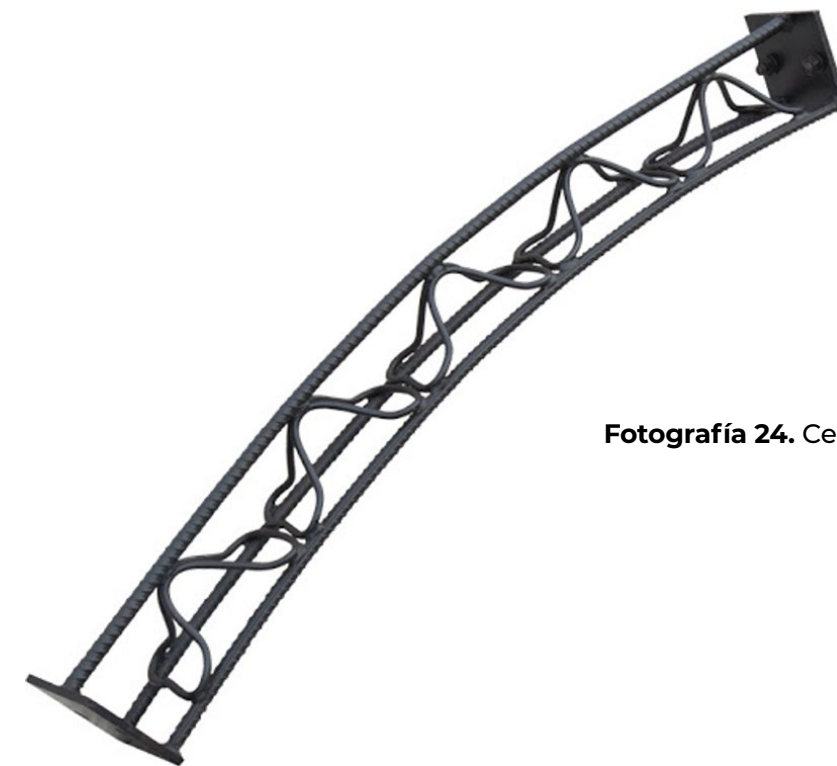


**Fotografía 23.** Armado de arcos de acero (pruebas en exterior).



**Figura 51.** Tipos de perfiles de vigas de acero.

Las cerchas o vigas reticuladas, como la que se muestra en la Fotografía 24, tienen la ventaja de su bajo peso, lo que permite una manipulación sencilla y que no requiere equipo pesado para su instalación. La combinación con el concreto lanzado es muy eficaz para conformar un soporte reforzado versátil.



**Fotografía 24.** Cercha reticulada.

### 13.2.6 Medidas auxiliares de soporte

En casos especiales donde el terreno no presenta las mejores condiciones de excavación, es necesario el uso de medidas auxiliares de soporte. Estas son colocadas hacia delante del frente de excavación y pueden agruparse en tres grupos:

- a. Mejoramiento del terreno
- b. Refuerzo del terreno
- c. Drenaje

#### 13.2.6.1 Mejoramiento del terreno

Se incluye en este grupo las técnicas de aplicación de mejoras para el terreno: las inyecciones, el jet grouting y el congelamiento del terreno. Todas estas técnicas pueden aplicarse desde el frente de la excavación, antes de proseguir con el avance del túnel. También pueden aplicarse en forma radial para reforzar el perímetro del túnel. En el caso de congelamiento, se persigue congelar el agua en el terreno, consiguiendo así una estabilización más duradera del túnel, mientras se realiza el proceso de excavación y soporte.

#### 13.2.6.2 Refuerzo previo del frente

Implica la inserción de elementos estructurales, hacia el frente de la excavación. En la mayoría de los casos, se instalan por encima del volumen que se excavará, aunque es posible instalar pernos de fibra de vidrio como refuerzo del frente de la excavación.

Un método muy utilizado es el paraguas de tubos (ver Figura 52). Estos elementos tubulares procuran crear una estructura en arco sobre el techo del túnel. Se repite el paraguas de tubos cada dos o tres avances, con longitudes del orden de 12 m a 18 m, usualmente. Su geometría es divergente, abriéndose como un abanico y se traslapa cada nueva sombrilla con la última sección de la anterior, extendiéndose al menos 30% (en longitud) más allá del siguiente frente de excavación.

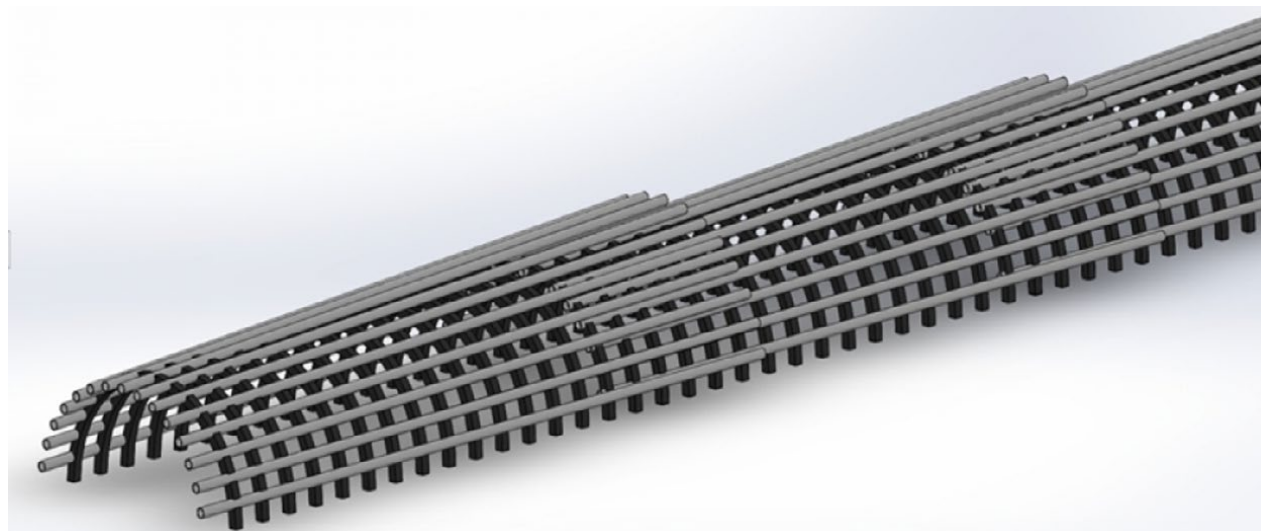


Figura 52. Esquema del paraguas de tubos

El paraguas de tubos es utilizado también en el portal del túnel, previo al primer pase de excavación, para superior la zona disturbada del terreno, como se ve en la Fotografía 25.



Fotografía 25. Paraguas de tubos en el portal del túnel.

Alternativamente a la instalación de tubos, es posible utilizar barras de acero ("spiles"), útiles para conseguir estabilización de corto plazo en la sección del techo, cerca del frente de la excavación. Estos se hacen descansar en un arco de acero, por lo que se utilizan en combinación con estos elementos más rígidos. Deben tener una longitud de al menos 1,5 veces la longitud de avance.

También es posible utilizar "columnas" de jet grouting (en realidad, colocas pseudo horizontalmente), como otra alternativa a los tubos o a las barras de acero.

Todos los elementos de refuerzo mencionados en esta sección son elementos rígidos, que no pueden ser eliminados de manera práctica durante la excavación. Por ello, cuando se requiere el soporte del frente de excavación, deben colocarse elementos que pueden ser posteriormente excavados de manera sencilla. Para esa función, se utilizan pernos de fibra de vidrio, instalados directamente en el frente como se aprecia en la Fotografía 26. Cuando se requiere proseguir la excavación, estos elementos se rompen fácilmente con el esfuerzo de una excavadora convencional.



**Fotografía 26.** Instalación de pernos de fibra de vidrio en el frente de excavación.

### 13.2.6.3 Drenajes

Son necesarios para reducir la presión o el caudal del agua de infiltración hacia el túnel, proveniente del entorno. También permiten reducir los gradientes hidráulicos y conseguir excavar sectores no estables sin esa reducción de los gradientes. Se utilizan perforaciones verticales o inclinadas, desde las paredes del túnel o desde el propio frente de la excavación. Si es necesario, puede aplicarse vacío para la extracción del flujo, aunque se prefiere la acción de la gravedad para sacar el agua.

Debe considerarse que el drenaje del macizo puede tener implicaciones ambientales y sociales, pues se pueden afectar incluso acuíferos utilizados para la provisión de agua potable, y también se pueden provocar asentamientos en la superficie.

Cuando el túnel no es muy profundo, se puede realizar el drenaje desde la superficie, mediante pozos de extracción externos al trazado del túnel.

### 13.2.7 Iluminación y ventilación durante la construcción

Las condiciones del proceso constructivo requieren necesariamente de considerar la inclusión de sistemas de iluminación y ventilación.

El sistema de iluminación es necesario, evidentemente, para realizar todas las tareas cerca del frente del túnel y a lo largo de toda su longitud. Por lo tanto, es necesario realizar un diseño eléctrico para la iluminación y para todos los equipos eléctricos en el proceso constructivo. En sitios urbanos con acceso a la red eléctrica, es posible realizar una conexión relativamente sencilla al sistema eléctrico. En cambio, en lugares remotos, podría ser necesario proveer generadores portátiles. Además, el emplazamiento de campamentos, oficinas, etc. en el sitio del proyecto requiere la consideración del diseño eléctrico.

En cuanto a la ventilación, debe proveerse la inyección de aire y la extracción de gases o polvo. Generalmente, la inyección de aire requiere la instalación de abanicos y un sistema de ductos extensibles que transporten el aire fresco hasta la zona del frente del túnel. El sistema usual consiste en la inyección de aire a través de ductos flexibles, que es proyectado hacia el frente del túnel y, luego, ese flujo de aire sale por el propio túnel, viajando de regreso hacia el portal. Ese recorrido permite la eliminación de aire viciado, gases y polvo.



**Fotografía 27.** Abanico externo y ducto flexible.

En: [https://epiroc.scene7.com/is/image/epiroc/Serpent+ventilation\\_Comm\\_02?landscape1600\\$](https://epiroc.scene7.com/is/image/epiroc/Serpent+ventilation_Comm_02?landscape1600$)

Se requiere realizar un dimensionamiento del sistema de inyección de aire y extracción de gases o material particulado, incluyendo ventiladores y extractores. Con este dimensionamiento se puede establecer la cantidad de ductos de inyección y extracción de gases y todos los elementos del sistema de ventilación. En la Fotografía 27 y en la Fotografía 28 se muestran ejemplos de la instalación del sistema de ventilación.

Se sugiere utilizar como guía para el uso de sistemas de ventilación, la publicación de ITA-AITES (2011), "Guidance on the safe use of temporary ventilation ducting in tunnels".



**Fotografía 28.** Sistema de ventilación en el túnel del proyecto hidroeléctrico Cariblanco

### 13.2.8 Instalaciones hidráulicas y eléctricas

Además de las instalaciones necesarias para la iluminación y la ventilación, se requiere hacer llegar hasta el frente de la excavación, tuberías para el trasiego de agua y aire comprimido, necesarios para los procesos constructivos y la seguridad. Generalmente, el cableado eléctrico y las tuberías hidráulicas y de aire, se instalan de manera suspendida en las paredes del túnel, con el propósito de facilitar los mantenimientos y extensión del sistema. Se requiere considerar esta instalación que, en ambos casos, debe alimentarse desde el exterior del túnel y avanzar conforme avanza la excavación.

Las redes eléctricas deben ajustarse a lo indicado en el Decreto Ejecutivo No. 36979-MEIC, CODEC, en su última edición.

Cuando la infiltración hacia el túnel es de consideración, es necesario construir un sistema apropiado para la extracción del agua. En la mayoría de los casos, la excavación se realiza a contra pendiente, de manera que el agua de infiltración sale del túnel por la acción de la gravedad, pero podría requerirse la construcción de nichos para la acumulación del agua y la instalación de bombas, así como del uso de tuberías para trasladar el agua fuera del túnel, lo cual se requiere cuando la excavación se realiza con pendiente negativa (bajando en la dirección de excavación).

### 13.2.9 Revestimientos y acabados finales

Dependiendo de la función del túnel, será instalado un revestimiento final, que constituye el soporte permanente del túnel. Suele tratarse de concreto colado in situ reforzado con barras de acero, para lo cual es necesario utilizar una formaleta deslizante desmontable. También es posible aplicar concreto lanzado como revestimiento definitivo.

En los túneles de carretera y en los ferroviarios, además se utiliza una geomembrana para impermeabilizar por completo el interior del túnel. Además, requiere una serie de acabados finales para que su operación sea segura, incluyendo iluminación, ventilación permanente, instalaciones hidráulicas y señalización. Se debe considerar con especial atención los túneles con revestimiento impermeable y presiones hidráulicas externas altas. Cuando éstas exceden los 6 bares, se suelen drenar, tanto al usar un método convencional como cuando se utilizan máquinas tuneladoras.

En algunos sistemas de metro, también es necesaria la iluminación y la señalización dentro de los túneles y no sólo en las estaciones.

Para asegurar que el revestimiento de concreto sea resistente al fuego, se debe adicionar a la mezcla un contenido mínimo de 1,5 kg/m<sup>3</sup> de fibras de polipropileno.

### 13.2.10 Equipos en la excavación convencional

Aunque será variable en cada proyecto, el conjunto de equipos para la excavación convencional podría consistir en los siguientes elementos:

#### 13.2.10.1 Jumbo de perforación

Se utiliza para realizar perforaciones (agujeros), que luego se utilizan para colocar explosivos o para instalar anclajes, para realizar inyecciones, para realizar sondeos para la investigación del terreno o para drenar el macizo rocoso. Generalmente disponen de uno a tres brazos hidráulicos equipados con perforadoras o con la posibilidad de instalar una canasta para elevar a los trabajadores hasta las partes altas del túnel. Hay una gran variedad de modelos disponibles en el mercado



**Fotografía 29.** Jumbo de perforación utilizado en el proyecto hidroeléctrico Reventazón

### 13.2.10.2 Cargadores

Equipos para recoger los fragmentos del piso y cargarlos en los camiones de extracción, después de realizada la voladura. Pueden tener distintos perfiles, dependiendo del tamaño de la excavación.



**Fotografía 30.** Cargador de perfil bajo.

### 13.2.10.3 Camiones de escombros y vagonetas

Equipos sobre llantas o sobre vías férreas, con capacidad para trasladar los escombros desde el frente de la excavación hasta un depósito cerca de la entrada del túnel o directamente hasta el sitio de escombrera.



**Fotografía 31.** Banda recolectora y vagón de escombros sobre vías férreas.



**Fotografía 32.** Vagoneta articulada para la extracción de escombros.

#### 13.2.10.4 Lanzadores de concreto

Algunos robotizados y operados a control remoto y otros con operación manual, son equipos utilizados para colocar el concreto lanzado. Deben permitir alcanzar todas las partes de la excavación. Es posible equipar alguno de los brazos del jumbo para lanzar el concreto.



**Fotografía 33.** Lanzador de concreto.

#### 13.2.11 Organización del sitio de obra

Hay varios elementos que deben considerarse en la organización del sitio de obra. La distribución final de los elementos de la obra depende de las particularidades del proyecto. Es una tarea donde el Contratista aprovecha su experiencia para establecer la mejor disposición logística en el sitio del proyecto.

1. Zona de excavación y plataformas de trabajo
2. Carreteables de obra
3. Campamentos
4. Talleres de armado y doblado de acero
5. Piscina de lodos y planta de tratamiento de las aguas contaminadas
6. Talleres de soldadura
7. Planta de concreto
8. Centro de manejo de residuos
9. Silos o espacios para almacenamiento de agregados y de cemento
10. Escombrera
11. Bancos de Transformadores y de Generadores
12. Estructuras para sistemas de ventilación
13. Patios para manejos de materiales de uso común

### 13.3 Excavación con tuneladora

#### 13.3.1 Conceptos básicos de la excavación con máquinas tuneladoras

Los procesos de la excavación del túnel se pueden mecanizar e integrar. Precisamente eso es lo que hacen las máquinas tuneladoras. Estos equipos se caracterizan porque:

- Poseen una cabeza cortante (rueda de corte)
- Están concebidos para excavar túneles (casi siempre de sección circular).
- Excavan, por lo general, a sección completa (frente completo).
- Proveen soporte inmediato a la excavación, sea a la periferia (cavidad) o al frente o cara del túnel.
- La máquina misma provee protección al personal.
- Conforme excava, instala el revestimiento definitivo del túnel, si esto es necesario.

Se afirma que las máquinas tuneladoras, denominadas TBM (por sus siglas en inglés, Tunnel Boring Machines), como regla general, tienden a ser más económicas para la construcción con respecto del método convencional cuando el túnel es de una longitud mayor a un cierto valor "crítico". Se acepta, generalmente, que, para túneles mayores a unos 3 km o 4 km, sería más económica la excavación con TBM y para aquellos con longitudes menores a 1 km es más económica la excavación convencional. Claro está, esto depende de las especificidades del proyecto y no son raras las ocasiones donde túneles largos se excavan convencionalmente y túneles cortos con máquinas tuneladoras.

Como ventajas de las TBM, respecto de la excavación convencional, podrían mencionarse las siguientes (que son afirmaciones generales, pero que pueden variar según las características del proyecto particular):

- Tienen mayores tasas de avance (2 a 3 veces)
- Producen menos emisiones e impacto ambiental
- No necesariamente se requieren ventanas o túneles intermedios de acceso (aunque es cuestión de costos)
- Hay un mejor control de procesos (enfoque tipo fábrica)
- Excavan en sección circular, produciendo menos alteración al terreno, lo que implica que se requiere menos cantidad de soporte. Esto por cuanto la sección circular es más eficiente desde el punto de vista de la distribución de esfuerzos alrededor de la excavación y de ahí que se requiera menor cantidad de soporte en comparación con secciones de otra forma geométrica.
- Por la sección circular, dispone de espacio para ubicar redes de servicios
- Más económica en túneles largos (afirmación general)

Y entre las principales desventajas respecto de la excavación convencional, se pueden mencionar las siguientes (que, nuevamente, pueden variar según las características del proyecto particular):

- La inversión se justifica solo en túneles largos (> 3-4 km)
- Excava una sección transversal mayor a lo estrictamente necesario (círculo), excepto en túneles hidráulicos, donde usualmente se aprovecha la sección circular completa
- La sección transversal no se adapta bien a formas distintas a la circular
- Demanda mayor logística
- Se requieren contratistas experimentados
- Tiempo de movilización muy alto (fabricación de la TBM)
- Es menos flexible en condiciones geológicas cambiantes

En cuanto a los diámetros de túnel que se pueden excavar con TBM, el rango es muy amplio. Por ejemplo, según publica la fábrica de TBM Herrenknecht, de Alemania, en su web ([https://www.herrenknecht.com/fileadmin/\\_processed\\_/9/6/csm\\_01\\_strasse\\_content-EN3\\_3ecd3b1666.png](https://www.herrenknecht.com/fileadmin/_processed_/9/6/csm_01_strasse_content-EN3_3ecd3b1666.png)), ha producido máquinas para túneles viales de hasta 17,6 m de diámetro (más de 34 máquinas con diámetros superiores a 15 m) y de hasta 19 m para las máquinas de lodos. De acuerdo con Vardakos et al. (2023) (ver Figura 53), la demanda actual exige máquinas con diámetros máximos de entre 17 m y 18 m.

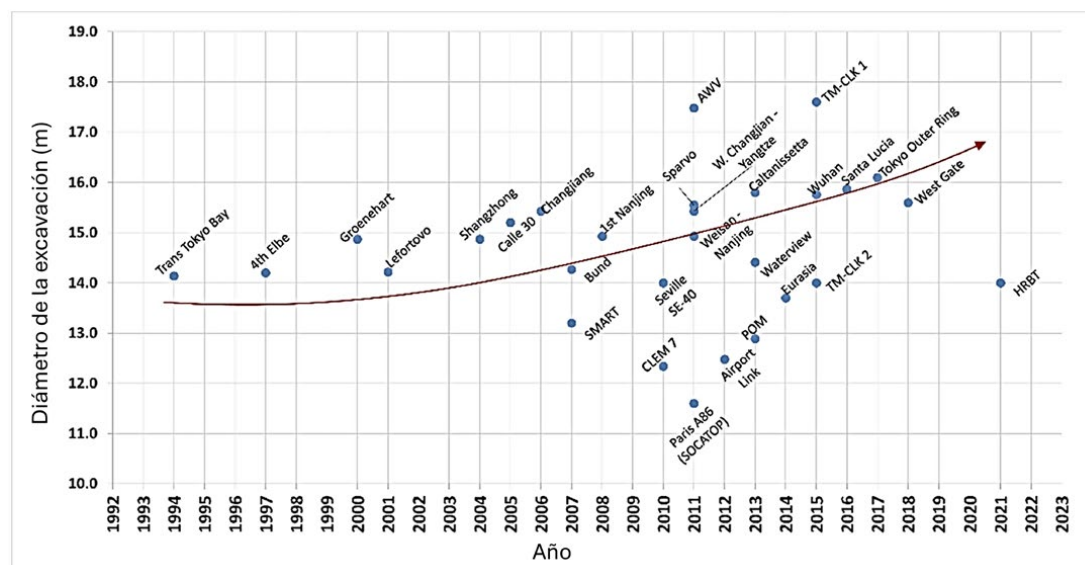


Figura 53. Evolución del diámetro de las TBM (Vardakos et al., 2023).

Existen numerosos fabricantes de máquinas tuneladoras, además del mencionado arriba. En la Tabla 10 se presenta un listado de los principales.

Tabla 10. Fabricantes de máquinas tuneladoras en el mundo

Fuente: <https://tunnelcontact.com/pages/view/577/tbm-producers-list>

FABRICANTE	PAÍS	FABRICANTE	PAÍS
Herrenknecht	Alemania	EM Korea	Corea del Sur
Terratec	Australia / Japón	Hoban	Corea del Sur
CRCHI	China	Hitachi Zosen	Japón
CREG/WIRTH	China / Alemania	JIMT	Japón
LNSS	China	Kawasaki	Japón
Lovsuns	China/Canadá	Komatsu	Japón
NHI	China	OGITEC	Japón
STEC	China	E-BERK	Turquía
Tangxing	China	Robbins	USA/China
Tianye Tolian	China		

Valga explicar que el mercado internacional de fabricantes de máquinas tuneladoras es dinámico y cambia constantemente, por lo que, continuamente, surgen nuevos competidores, se fusionan algunos, ocurren compras y cambios de marcas. Por ello, los indicados en la Tabla corresponden a una referencia del año 2024, que puede cambiar en cualquier momento.

### 13.3.2 Tipos de máquinas tuneladoras

Hay un gran abanico de máquinas tuneladoras, simples y complejas, adaptadas para distintas condiciones de terreno. Por otra parte, máquinas con similares propósitos y tecnologías, reciben a veces nombres diversos por parte de los fabricantes.

Por la misma razón, hay muchas clasificaciones disponibles para identificar el tipo de máquina tuneladora, basadas en diversos criterios. En la Tabla 11 se presenta una clasificación modificada a partir de la clasificación alemana del DAUB (2022).

**Tabla 11.** Clasificación del tipo de máquina (adaptado de DAUB, 2022).

NOMBRE		MODO DE OPERACIÓN		
ESPAÑOL	INGLÉS	ABIERTO	CERRADO	TRANSICIÓN
<b>MÁQUINAS DE SECCIÓN COMPLETA</b>				
Máquina abierta	Gripper TBM	•	—	—
Escudo abierto para rocas duras	Open Shield	•	—	—
Escudo sencillo para rocas	Single Shield	•	—	—
Escudo sencillo para suelos y rocas blandas	Single shield	•	—	—
Doble Escudo	Double Shield	•	—	—
Máquina de lodos	Slurry Shield	—	•	—
Máquina de Balance de Presión de Tierra	Earth Pressure Balance Shield	•	•	•
Escudo híbrido	Hybrid Shield	•	•	•

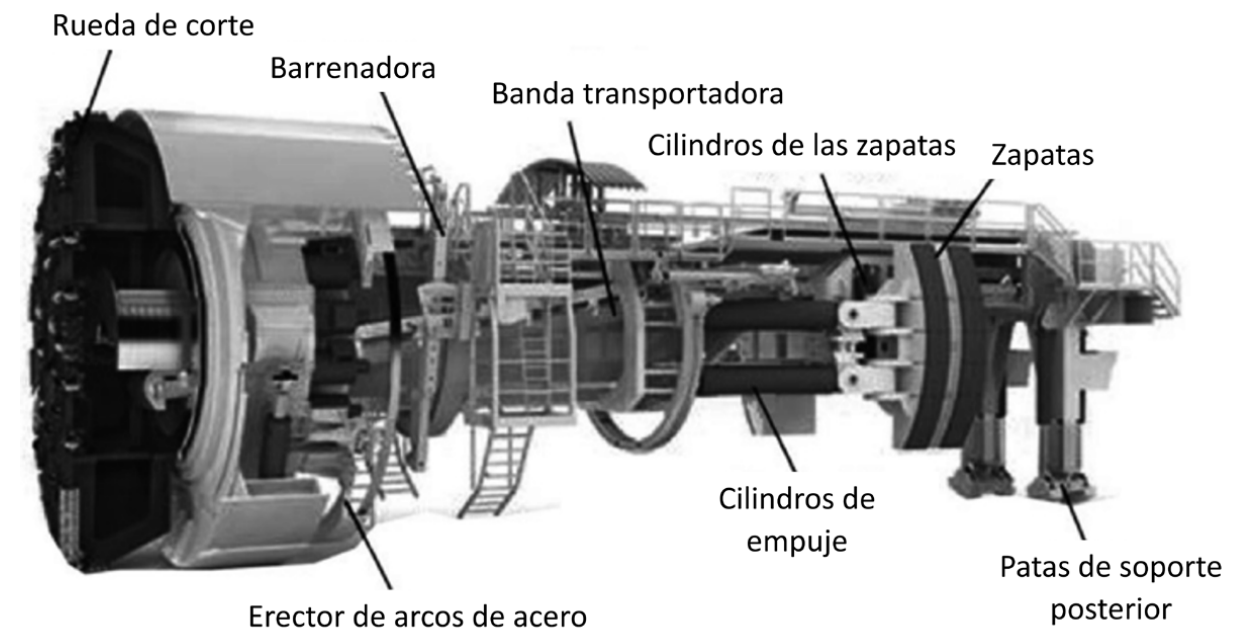
*El símbolo • denota la capacidad de trabajar en el modo de operación indicado.*

Podrían clasificarse bajo otras perspectivas, por ejemplo, según su capacidad de excavar en rocas o en suelo o por el mecanismo específico de excavación. Para los efectos de esta guía, se presenta únicamente la ya descrita.

Con relación al modo de operación, incluido en la Tabla, cada máquina dispone de distintas capacidades, según se explica más adelante en esta misma sección. En general, el modo “cerrado” corresponde a la excavación que se realiza de manera que se aplique una presión para sostener el frente del túnel de manera inmediata y completa. Esa presión se realiza con el material excavado, con lodos bentoníticos o con aire comprimido. En cambio, el modo “abierto” permite la excavación sin la necesidad de brindar soporte al frente, por lo que se aplica cuando las condiciones del terreno son estables y sus deformaciones pequeñas.

**13.3.2.1 TBM abierta (TBM con zapatas)**

La TBM abierta (Figura 54) se utiliza para excavar rocas duras, que no requieren un soporte inmediato del frente ni de la cavidad. No poseen un escudo perimetral. Para impulsarse, utiliza unas zapatas laterales de presión que se abren para apoyarse en las paredes del túnel y servir como reacción para que los cilindros de empuje impulsen la máquina hacia adelante.



**Figura 54.** Esquema de una TBM abierta

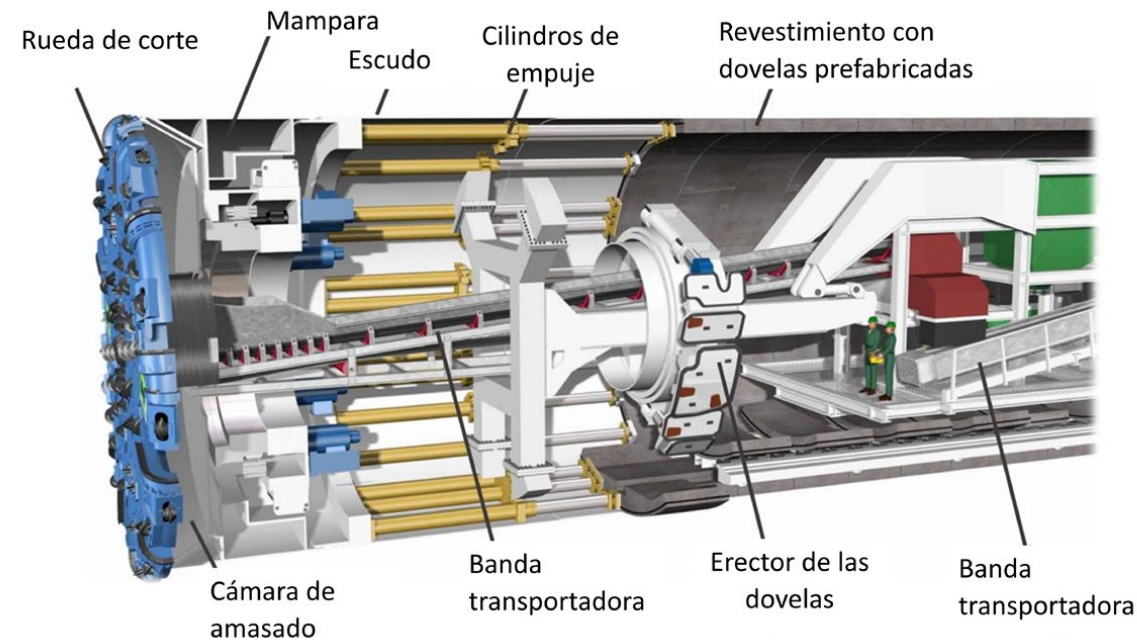
Fuente: [https://media.springernature.com/lw685/springer-static/image/chp%3A10.1007%2F978-981-99-0059-6\\_2/MediaObjects/518667\\_1\\_En\\_2\\_Fig1\\_HTML.png](https://media.springernature.com/lw685/springer-static/image/chp%3A10.1007%2F978-981-99-0059-6_2/MediaObjects/518667_1_En_2_Fig1_HTML.png)

Una vez que se alcanza la longitud prevista de excavación, las zapatas (grippers) se cierran y los cilindros se retraen, de manera que la máquina, junto con el tren de apoyo, se mueven hacia adelante para iniciar un nuevo ciclo de excavación. El material excavado es trasladado mediante una banda transportadora.

En caso necesario, esta máquina tiene la capacidad de instalar elementos de soporte similares a los utilizados en la excavación convencional: arcos, mallas, anclajes y concreto lanzado.

**13.3.2.2 Escudo sencillo para rocas**

Se puede utilizar en rocas blandas o medias, así como en suelos finos con consistencia alta y suficiente cohesión. Esta máquina posee un escudo metálico en su perímetro, que soporta el terreno y protege el interior de la máquina y a los trabajadores. Necesariamente requiere la instalación del revestimiento con dovelas prefabricadas (ver sección 13.3.3.8), que es utilizado por la máquina como apoyo para impulsarse hacia adelante y excavar el terreno. La rueda de corte de la máquina está equipada con discos y la extracción del material se realiza con banda transportadora. En la Figura 55 se muestra el esquema.



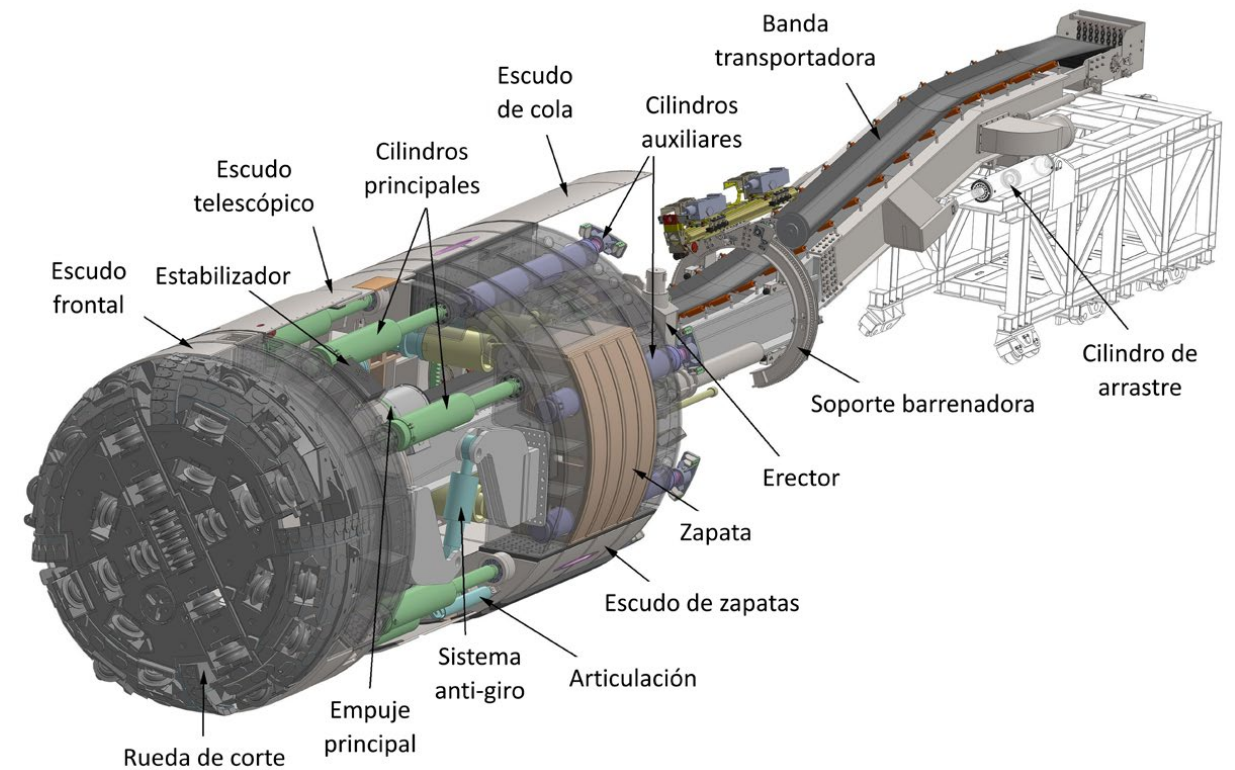
**Figura 55.** Esquema de una TBM de escudo simple

En: <https://railssystem.net/wp-content/uploads/2015/01/tbm-elements.jpg>

### 13.3.2.3 Doble escudo

Esta máquina aprovecha las capacidades de las máquinas abiertas de roca y las de escudo simple, combinándose por medio de una sección intermedia, telescópica. Esta configuración permite que el modo de excavación sea casi continuo, lo que le permite tener altos rendimientos si las condiciones del terreno son buenas. La sección frontal (escudo frontal) sostiene la rueda de corte y los cilindros principales de empuje. La sección posterior (escudo de zapatas) contienen las zapatas y los cilindros auxiliares de empuje. Entre ellos se ubica la sección telescópica del escudo.

Cuando las zapatas se abren para presionar contra el terreno, el escudo frontal puede avanzar con la excavación, al mismo tiempo que en el escudo posterior se está instalando un anillo del revestimiento con dovelas. Un nuevo avance se consigue una vez que se completa el anillo y se cierran las zapatas, cuando los cilindros auxiliares empujan hacia adelante mientras los cilindros principales se retraen. Así se consigue reiniciar el ciclo de excavación. Si el terreno desmejora y no se pueden abrir las zapatas, el modo de excavación cambia al del escudo sencillo, permitiendo continuar con el avance. La Figura 56 muestra el esquema de esta máquina.



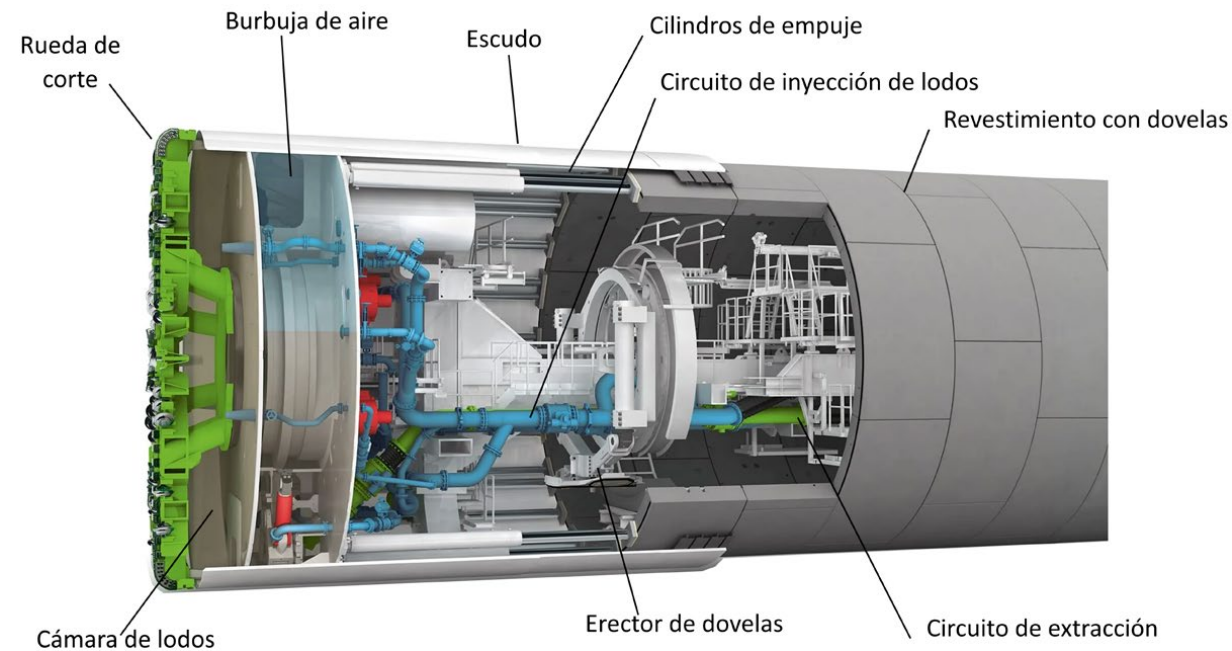
**Figura 56.** Esquema de una TBM de doble escudo.

En: [https://tunnelpro.it/sites/tunnelpro/files/2019-11/tbm\\_illustrata.jpg](https://tunnelpro.it/sites/tunnelpro/files/2019-11/tbm_illustrata.jpg)

### 13.3.2.4 Máquina de lodos

Esta máquina, concebida para excavar en suelos granulares permeables y bajo el nivel freático, permite ofrecer un soporte inmediato y continuo al frente de excavación que, sin ese soporte, colapsaría de inmediato. Para aplicar el soporte al frente, se utiliza un fluido presurizado (lodo, usualmente bentonítico). Inmediatamente tras la rueda de corte se ubica la cámara de excavación, sellada y separada de una sección posterior por medio de una pared metálica, pero conectada hidráulicamente. En la parte superior de esa cámara posterior, se suele disponer de una burbuja de aire que permite controlar con precisión la presión aplicada al fluido y, por ende, al frente del túnel. Alternativamente, algunas máquinas disponen de válvulas y sistemas hidráulicos para el control de la presión, en lugar de utilizar la burbuja de aire.

La densidad y la viscosidad de los lodos deben ajustarse en función de las propiedades del terreno. La remoción del material excavado (mezclado con los lodos bentoníticos) se realiza por medio de un sistema de tuberías, donde los sólidos viajan en la suspensión hasta una planta de separación ubicada en la superficie. En esa planta se separan los sólidos de la bentonita que es reinyectada hacia la máquina por medio de tuberías. La Figura 57 muestra un esquema de este tipo de máquinas.



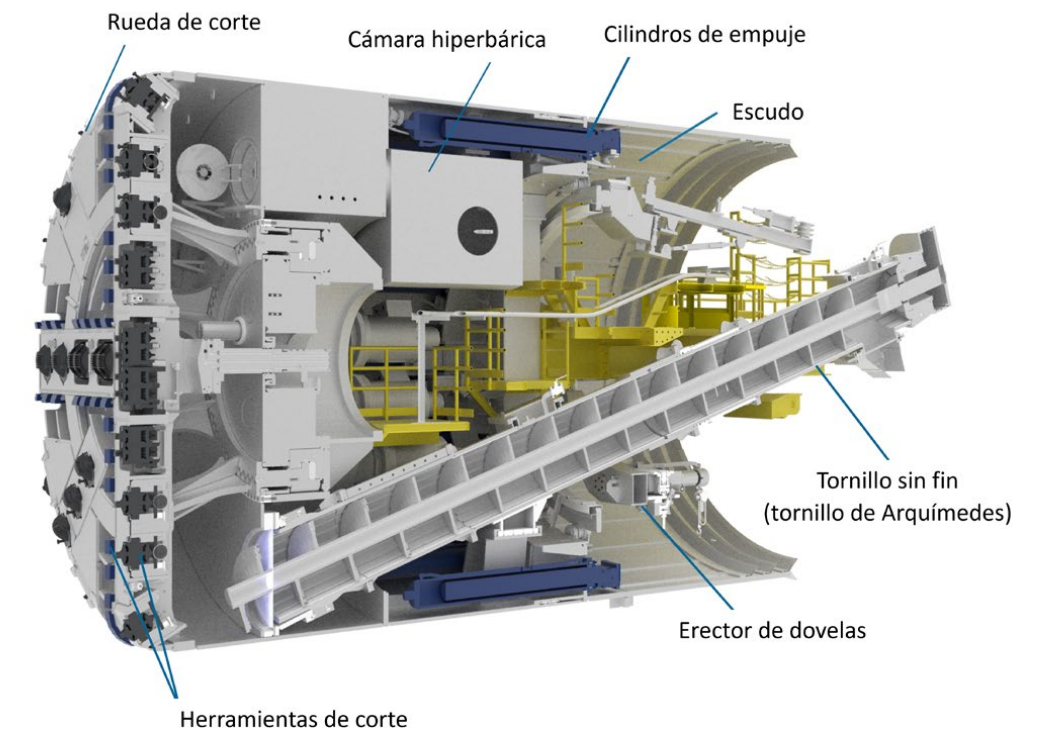
**Figura 57.** Esquema de una TBM de lodos

En: [https://www.herrenknecht.com/fileadmin/user\\_upload/Main\\_Website/03\\_Produnkte/01\\_Tunnelling/08\\_Mixschild/03\\_Image-Map/01\\_imagemap\\_mixschild\\_1.jpg](https://www.herrenknecht.com/fileadmin/user_upload/Main_Website/03_Produnkte/01_Tunnelling/08_Mixschild/03_Image-Map/01_imagemap_mixschild_1.jpg)

### 13.3.2.5 EPB (Balance de presión de tierras)

Para los suelos finos (más de 15%) con baja permeabilidad, se utiliza la EPB. En este caso, también se aplica una presión inmediata al frente de la excavación, pero en este caso se utiliza el mismo suelo excavado, condicionado con agua o espumas químicas que logran darle a la mezcla una consistencia blanda y pastosa. La extracción del material excavado se logra mediante un tornillo de Arquímedes (tornillo sin fin), que va trasladando el material desde la cámara de amasado hasta una boquilla, al tiempo que va reduciendo la presión desde aquella que tiene el material en el frente de la excavación, hasta la atmosférica, cuando sale de la boquilla del tornillo de Arquímedes. El material es depositado en una banda transportadora que se encarga de enviarlo hacia afuera.

La presión en la cámara de amasado se logra por medio del control simultáneo de la velocidad de giro del tornillo de Arquímedes en relación con la tasa de avance de la máquina. Se muestra el esquema en la Figura 58.



**Figura 58.** Esquema de una máquina EPB

En: [https://www.robbinstbm.com/wp-content/uploads/2017/05/SectionView\\_EPB-1.jpg](https://www.robbinstbm.com/wp-content/uploads/2017/05/SectionView_EPB-1.jpg)

### 13.3.2.6 Escudos híbridos

Algunas máquinas se han diseñado de manera que se pueda modificar su sistema de excavación, por ejemplo, de extracción con tornillo de Arquímedes a banda transportadora, etc. Se les llama híbridas o duales, pero requieren de cambios significativos que toman un tiempo apreciable antes de poder continuar en su nueva configuración. El cambio les permite adaptarse a terrenos diferentes.

Uno de los recientes avances de las máquinas tuneladoras es el perfeccionamiento de una máquina que combina la de lodos y la EPB de manera integrada, logrando así excavar terrenos muy variables de manera más rápida, sin necesidad de realizar cambios estructurales en la máquina. La máquina dispone de dos cámaras conectadas entre sí por medio de tuberías, así como un colchón de aire para el control de la presión. La extracción se realiza por medio de un tornillo de Arquímedes en primera instancia, que deposita el material a una caja de cambio de fase, donde el material se hace pasar por un quebrador, si es necesario y donde recibe líquido en la cantidad necesaria para continuar desde ahí la extracción por medio de tuberías, como en la máquina de lodos. Estos desarrollos están protegidos bajo patentes comerciales, por lo cual no se presenta una imagen.

### 13.3.2.7 Máquina de extensión o ampliación

Se usan en rocas duras y permiten agrandar la sección de un túnel piloto previamente excavado, hasta el diámetro previsto del túnel principal. Sus principales elementos son la rueda de corte, el mecanismo de fijación y el mecanismo de avance. El terreno excavado debe ser soportado de manera convencional.

### 13.3.2.8 Escudos con rozadora y excavadora convencional

Este equipo, así como la excavadora convencional, no proveen ningún soporte a la cavidad ni al frente del túnel, de lo cual se encarga el escudo. La rozadora o la excavadora, en este caso, son los elementos de excavación del terreno, pero en la máquina se dispone de escudo y cilindros de empuje, el sistema de extracción del material excavado (banda transportadora) y el erector de las dovelas.

Las máquinas equipadas con estos medios de excavación, se denominan máquinas de “ataque puntual”, por la forma en que realizan la destroza del terreno, esto es, mediante el elemento cortador, localizado en el extremo de un brazo hidráulico que permite desplazar el cortador (rozadora o pala excavadora) a las distintas zonas del frente de excavación.

## 13.3.3 Proceso de excavación con máquina tuneladora

Es necesario considerar el comportamiento del terreno en función de la máquina tuneladora que se seleccione. En este sentido, la selección de la máquina tuneladora se realiza con criterios específicos. Por ello, una buena investigación geotécnica tiene mayor relevancia cuando se selecciona la máquina tuneladora. El éxito de la excavación depende en gran medida de escoger la máquina correcta para las condiciones geotécnicas que se encontrarán. De hecho, el proceso de excavación es diferente si el túnel se excava en suelo o en roca.

### 13.3.3.1 Excavación en roca

En el caso de excavación en roca, es posible, en algunos casos, utilizar máquinas tuneladoras abiertas (sección 13.3.2.1). La calidad del macizo rocoso determina la posibilidad de utilizar una TBM abierta, puesto que el empuje de las zapatas de reacción requiere que el terreno tenga suficiente capacidad. Si el macizo rocoso no tiene la calidad suficiente, el uso de las zapatas es inviable y se debe escoger una máquina de escudo simple o de doble escudo que empujarían contra el revestimiento de dovelas, solucionando el problema.

Un aspecto importante para la excavación en roca es que la máquina disponga de equipamientos para la investigación y tratamiento del terreno, como los equipos para la instalación de soporte (arcos, mallas, pernos, concreto lanzado, para el caso de las máquinas abiertas), pero también la posibilidad de realizar perforaciones que faciliten la investigación del terreno que se ubica delante de la excavación u otros procesos como inyecciones o drenajes.

En general, se utiliza como criterio que la máquina tuneladora en roca desarrolle sus capacidades en el 90% de las situaciones y disponga de contingencias para el 10%. Estos no son porcentajes precisos; lo que se quiere indicar es que la máquina por seleccionar debe ser capaz de excavar en la mayoría del trazado, pero se tenga claro cómo resolver las condiciones excepcionales y equipares para lograrlo. Esto puede establecerse con base en el análisis detallado del modelo geotécnico.

Otras consideraciones para la excavación en roca incluyen la definición o selección de las características técnicas y geométricas de la TBM y su equipo adicional, los aspectos logísticos (ej. Uso de banda transportadora vs otros medios extracción), así como la experiencia del contratista y del operador de la TBM.

Con respecto al ciclo de excavación, la máquina de doble escudo, a diferencia de cualquier otra tuneladora, permite un ciclo de excavación prácticamente continuo, como se explicó en la sección 13.3.2.3. Este es un criterio importante en el proceso constructivo, pues influye directamente en el plazo de ejecución de la obra de manera muy significativa.

Las TBM con escudo tienen un rango de aplicación más amplio, sobre todo para diámetros grandes, en comparación con las máquinas abiertas, que son más sensibles ante terrenos inestables. La selección entre un escudo sencillo y uno doble depende básicamente de la proporción de terreno competente (donde se pueden utilizar zapatas/grippers) donde puede usarse el modo continuo de excavación y de terreno no competente, donde se debe recurrir al modo discontinuo de la máquina de escudo sencillo. El uso del doble escudo mejora significativamente el rendimiento de la excavación.

En cuanto a las condiciones límite, es decir, las condiciones en las cuales la TBM no puede trabajar en la forma para la cual fue diseñada y construida, generando una disminución en el avance o incluso la obstrucción de la TBM. Cada situación límite requiere intervenciones especiales para el mejoramiento del terreno o para lograr el avance de la máquina. Sin embargo, es importante tener claro que una condición geológica es “límite” en el tanto el diseño o la operación de la TBM no permita superarla.

Las principales condiciones límite para la excavación en roca, que suelen requerir consideraciones y equipamientos especiales, se describen en la sección 13.3.5.

### 13.3.3.2 Estabilidad del frente de excavación

El primer criterio por examinar, para la excavación en suelo, corresponde a la evaluación del requerimiento de soporte del terreno, en particular por la necesidad de brindar soporte inmediato al frente del túnel. De manera que se requiere conocer si el terreno es estable o no.

Una primera guía, para el caso de túneles excavados en roca, puede ser el uso de un sistema de clasificación. Así, por ejemplo, terrenos con RMR superior a 60 podrían considerarse estables, mientras que valores de RMR entre 20 y 60 son de calidad regular a media y si el RMR es menor de 20, deben considerarse adversos por la posibilidad de presentar fluencia (squeezing) o severa inestabilidad.

En el caso de suelos, la granulometría del terreno por excavar es la determinante. Así, si el suelo es fino, se tenderá a preferir una máquina tipo EPB y si es granular, una de lodos. Generalmente, se acepta como criterio general que una máquina EPB es viable cuando la permeabilidad es menor a  $1 \times 10^{-5}$  m/s y la presencia de finos sea mayor al 15%. Sin embargo, no hay reglas completamente fijas y debe analizarse cada caso.

En los estudios de selección de la máquina, es necesario establecer la necesidad de ofrecer soporte al frente en función del riesgo de producir cavidades y, eventualmente, asentamientos en la superficie. En el contexto urbano, este es un riesgo que puede provocar grandes impactos.

### 13.3.3.3 Selección de las herramientas de corte

Las herramientas de corte de la máquina tuneladora deben seleccionarse en función del terreno, además de las consideraciones propias del diseño de la rueda de corte de la máquina tuneladora. La influencia que tiene el tipo de terreno en el proceso de excavación puede ser determinante. Algunos aspectos que deben considerarse son los siguientes:

- a. Adherencia del terreno a las herramientas de corte: Los materiales con contenido arcilloso pueden adherirse al equipo, implicando limpiezas manuales que requieren mucho tiempo, pero además pueden provocar desgaste excesivo en las herramientas de corte y en la propia rueda de corte.
- b. Abrasividad y desgaste: es necesario determinar la capacidad de abrasividad del material que será excavado, para seleccionar apropiadamente los componentes de la máquina tuneladora. En materiales de grano grueso será importante también estimar la tendencia a quebrarse y el contenido de cuarzo. El índice más común para representar la abrasividad es el Índice de Abrasividad Cerchar (CAI).

#### 13.3.3.4 Acondicionamiento del suelo en la EPB

Cuando se excava por medio de una máquina tipo EPB se requiere el “condicionamiento” del suelo, por medio de agua, aire o agentes químicos, con el propósito de conseguir que el material posea una consistencia pastosa, de manera que pueda ofrecer un soporte adecuado al frente de la excavación y pueda ser manejado adecuadamente por medio del tornillo sin fin para su extracción. En concreto, debe procurarse cumplir los siguientes objetivos:

- a. Mejorar temporalmente las propiedades del terreno, en particular su capacidad de fluir, para que transite fácilmente desde la cámara de amasado y por el tornillo sin fin.
- b. Reducir la permeabilidad del suelo excavado cuando se acumula en la cámara de amasado, para evitar flujos no deseados desde el medio circundante.
- c. Aumentar la compresibilidad para evitar fluctuaciones en la presión que se aplica en la cámara de amasado.
- d. Dar soporte a la cara del túnel con un material homogéneo capaz de transmitir la presión al terreno que se excava.
- e. Reducir la fricción interna para evitar el aumento excesivo de las presiones, torque y temperatura que enfrenta la rueda de corte y el tornillo sin fin, así como evitar el desgaste excesivo de éste y de las herramientas de corte.

Para conseguir estos objetivos se puede utilizar espumas tensoactivas o polímeros, bentonita o suspensiones de arcilla. Incluso puede ser solamente agua. En cualquier caso, deben utilizarse materiales que no representen una amenaza al ambiente o el deterioro de los sitios de escombrera donde se disponga el material.

#### 13.3.3.5 Soporte en máquinas de lodos

Cuando se excava por medio de una máquina de lodos (en general, aplicable a terrenos granulares), se crea una suspensión, generalmente con bentonita (lodo), que aporta una cobertura a la superficie del terreno que está siendo excavado. Esta suspensión genera una capa superficial que recubre el terreno y que facilita la transmisión de presiones a través del lodo que llena la cámara de excavación.

Por otra parte, la suspensión de lodos sirve como medio de transporte para trasladar el material excavado hacia la superficie, a través del sistema hidráulico, hasta la planta de separación, localizada cerca de la entrada del túnel. Todos los aditivos y materiales adicionados a la suspensión deben ser evaluados en términos de su efectividad y su compatibilidad técnica y ambiental.

Cuando el terreno excavado es muy permeable, se requieren lodos de alta densidad (en el rango de 1,1 a 1,3 ton/m<sup>3</sup>).

#### 13.3.3.6 Transporte y separación del terreno excavado

El transporte del material excavado debe analizarse en toda su trayectoria, desde la cámara de excavación, su paso por la máquina tuneladora y el tren de apoyo, su deposición en los trenes de apoyo o en la banda de extracción, hasta la planta de separación (si la máquina es de lodos) o el depósito de almacenamiento temporal en el sitio de obra y su carga y traslado a la escombrera definitiva.

Usualmente se utilizan los siguientes medios de extracción desde la máquina a la superficie:

- a. Transporte hidráulico por tubería (lodos)
- b. Banda transportadora continua hasta el depósito temporal
- c. Traslado discontinuo con vagones sobre rieles
- d. Traslado discontinuo con equipos sobre llantas de hule

En cuanto al proceso de separación necesario cuando se excava con la máquina de lodos, evidentemente es más sencillo conseguir extraer la suspensión de la mezcla cuando las partículas son granulares. La suspensión retorna al circuito y esas partículas podrían aprovecharse, por ejemplo, como agregados para el concreto. El proceso requiere más energía cuando el porcentaje de material fino aumenta.

Al material depositado de manera definitiva se le puede exigir el cumplimiento de determinadas características para que su impacto ambiental se reduzca. En tal caso, hay costos asociados al tratamiento adicional que requiere darse al material antes de depositarlo en la escombrera. Con relación al transporte desde el sitio de obra hasta la escombrera, deben respetarse las normativas ambientales y las restricciones de tránsito, especialmente en las zonas urbanas.

#### 13.3.3.7 Relleno del espacio anular

Debido a la necesidad de instalar el revestimiento con dovelas en condiciones de seguridad al interior del escudo de cola, se requiere una configuración geométrica particular del escudo (su conicidad y su espesor, así como el diámetro de la rueda de corte), y resulta inevitable la creación de un espacio entre el extradós del revestimiento con dovelas y la superficie excavada del terreno. Ese volumen que se crea, denominado espacio anular, debe ser rellenado de manera continua e inmediata conforme se realiza el proceso de excavación y el avance de la máquina tuneladora. El relleno consigue crear la transferencia de carga entre el terreno y el relleno segmentado y le da confinamiento a este último, dándole estabilidad. Además, el relleno de la brecha anular previene la deformación del terreno y, eventualmente, que ocurran asentamientos en la superficie, aspecto crítico en la excavación en ambiente urbano.

Cuando el terreno excavado es estable (como las rocas), es posible realizar inyección con aire a presión de gravilla como material de relleno (con o sin inyección posterior de lechada de cemento), a través de huecos previstos en las dovelas del revestimiento con dovelas, por detrás de la máquina tuneladora. Pero cuando el terreno requiere soporte inmediato (como en suelos), se utiliza un material impermeable, como mortero de cemento, mortero bicomponente u otros productos químicos. La inyección en ese caso es realizada a través de tuberías que rematan en ductos practicados en el propio escudo, rellenando así la brecha anular inmediatamente después del final del escudo.

No se debe avanzar en la excavación si no existe, simultáneamente, la inyección del mortero en la brecha anular.

### 13.3.3.8 Revestimiento con dovelas prefabricadas

El revestimiento con dovelas de concreto se utiliza prácticamente en la totalidad de los túneles excavados con máquina tuneladora. Es un elemento fundamental que requiere su propio diseño y logística de producción, transporte, almacenamiento y colocación. El diseño de la máquina tuneladora debe considerar todo el sistema relacionado con el revestimiento con dovelas, pues, precisamente, funciona como elemento de reacción para el avance de la máquina.

El revestimiento con dovelas es necesario para diversas condiciones:

- a. Cuando hay necesidad de proveer soporte inmediato pues el medio es inestable.
- b. Para el control de movimientos del terreno que se producen por la excavación.
- c. Para evitar el drenaje del manto freático (el revestimiento debe ser impermeable). Esto aplica solamente hasta unos 6 a 8 bares de presión externa, en cuyo caso suele optarse por drenar el terreno y utilizar revestimiento permeable.
- d. Para ofrecer el medio de reacción que permita el avance de la máquina tuneladora hacia adelante, durante el proceso de excavación.
- e. Para evitar la necesidad de instalar un revestimiento secundario o adicional (aunque, bajo ciertas condiciones del proyecto, tal revestimiento secundario podría ser indispensable)

El revestimiento con dovelas se compone de anillos, los cuales a su vez están compuestos por dovelas o segmentos. Los anillos pueden ser de tres tipos:

- Anillo recto: cuando el alineamiento del túnel es rectilíneo.
- Anillo izquierdo/derecho: para realizar curvas en una dirección específica, lo que se logra manteniendo la clave en la mitad superior del anillo.
- Anillo universal: para realizar curvas en cualquier dirección (izquierda, derecha, arriba, abajo).

Las dovelas o segmentos también pueden ser de tres tipos:

- Rectangulares
- Trapezoidales
- Hexagonales (tipo "panal de abejas")
- Romboidales

En la Figura 59 se resumen los componentes del revestimiento con dovelas prefabricadas.

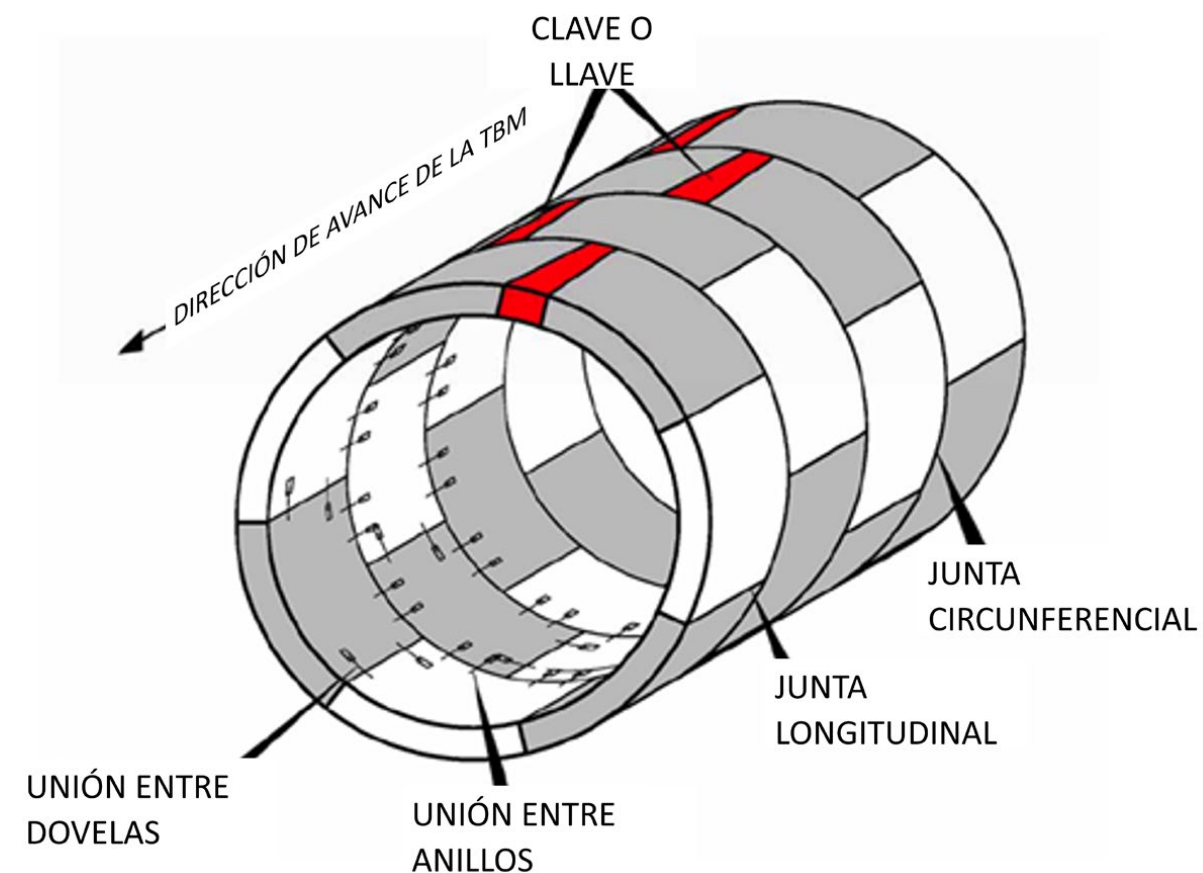


Figura 59. Componentes del revestimiento con dovelas prefabricadas

### 13.3.3.9 Operación de la máquina y sistema de control

La máquina tuneladora requiere ser "pilotada". Por ello, se requiere un sistema de control que permite llevar adelante toda la operación de excavación. Se requiere monitorear una gran cantidad de actividades, además de los procesos de control y aseguramiento de la calidad. Entonces, es necesario un sistema robusto que defina la forma de realizar el trabajo y los controles que se ejecutarán.

El piloto de la máquina, desde la cabina de control ubicada dentro de la TBM, dispone de una serie de controles para definir empujes, presiones, velocidad de la rueda de corte, velocidad del sistema de extracción y un gran número de otras variables. Dentro del equipo se dispone de computadoras y tableros, que se replican en una cabina en el exterior.

El sistema de control de datos, por otra parte, debe incluir los parámetros que serán medidos y registrados y los mecanismos de comunicación apropiados. La definición de parámetros se realiza antes de iniciar la construcción y además de la definición de parámetros, se debe establecer la frecuencia de lecturas y los valores "umbral" de atención y alarma de cada uno.

Es conveniente un sistema en "tiempo real" para garantizar la seguridad y operatividad del sistema.

Dentro de los principales parámetros por controlar en las máquinas para suelos, por ejemplo, están los siguientes:

- Presión en la cámara de amasado y en el tornillo (caso EPB)
- Densidad aparente del material en la cámara de amasado
- Volumen excavado y peso del material extraído
- Volumen y presión de la lechada inyectada para el relleno del espacio anular
- Torque, avance, velocidad de rotación
- Empuje

Los operadores de la máquina deben ser personal experimentado y capacitado y el diseñador del proceso de excavación debe preparar con antelación y de manera minuciosa el plan de excavación, con la definición de los rangos operativos de todos los parámetros de control.

#### 13.3.3.10 Presiones de operación

Las TBM en suelo, que trabajan bajo presión en modo cerrado, deben compensar la presión del agua subterránea y del terreno mismo. Se requiere en estos casos que la cámara de amasado (ubicada detrás de la rueda de corte), esté efectivamente llena de material (suelo condicionado o bentonita) para proveer soporte efectivo al frente de la excavación. Por ello, el monitoreo y control de las presiones de operación y de la densidad del material es esencial para la excavación.

La definición de los rangos de presión para operar la máquina tuneladora de suelos, debe realizarse para cada proyecto específico. Depende del tipo de terreno y su comportamiento, por lo que la TBM debe diseñarse para los valores seleccionados en el proyecto específico.

La TBM debe ser capaz de proveer como mínimo una presión igual a la hidrostática más un 10%, además de la presión del suelo. Se deben evitar presiones excesivas para eliminar el riesgo de reventaduras o levantamientos no deseados ("blow-out").

#### 13.3.3.11 Uso del aire comprimido

Se requiere entrar en la cámara de presión para cambiar herramientas de corte o para hacer reparaciones. Estas acciones deben realizarse al mismo tiempo que se sigue aplicando presión al frente de la excavación, en el caso de terrenos inestables donde la máquina tuneladora requiere trabajar en modo cerrado. Esto es posible con la aplicación de aire comprimido para mantener las presiones dentro de la cámara de amasado, que debe vaciarse parcialmente para realizar el cambio de herramientas.

El sistema utilizado para esta operación es la cámara hiperbárica, que permite una elevación o una reducción de la presión dentro de la cámara de amasado y dentro de la misma cámara hiperbárica, para conseguir que el personal pueda entrar y salir de manera segura. Se trata de una operación especializada que debe seguir estrictos protocolos de seguridad, que incluyen desde la disponibilidad de equipo médico, ambulancias y coordinación con los centros hospitalarios cercanos para atender cualquier emergencia.

### 13.3.4 Criterios de selección de la TBM

La selección de la máquina tuneladora es un elemento crítico de éxito de un proyecto de túneles. Debe ser realizada por un equipo experimentado, partiendo de los criterios ya mencionados en las secciones anteriores. Son muchas las variables que intervienen en la selección de la máquina apropiada, pero es fundamental obtener un modelo geotécnico muy preciso, con suficiente información y ensayos apropiados y numerosos para la definición de los valores de todos los parámetros geotécnicos de las distintas unidades geotécnicas por las cuales atravesará el túnel.

Con base en el modelo geotécnico, se puede realizar una clasificación adecuada en unidades geotécnicas homogéneas, según se identifiquen a lo largo del túnel. Esto permite realizar una selección preliminar del tipo de máquina tuneladora.

Además del terreno, es necesario identificar los requerimientos para la extracción del material y la gestión de los escombros o material excavado. Es necesario analizar las alternativas para la reutilización y los requerimientos para la deposición final del material excavado. Estos criterios permitirán definir el tipo de máquina más apropiada para el túnel por construir.

Finalmente, hay consideraciones externas que pueden influir en la selección del tipo de máquina:

- Requisitos legales
- Restricciones respecto a los impactos al manto freático
- Control de los asentamientos en la superficie y de las deformaciones permisibles
- Recalce o protección de estructuras existentes
- Directivas de seguridad ocupacional
- Consideraciones sociales
- Aspectos estratégicos del desarrollador
- Restricciones de espacio físico (en áreas urbanas)

Con relación a las máquinas tuneladoras para roca, la selección de la máquina apropiada depende de distintos aspectos que deben considerarse. Por ejemplo:

- Las TBM abiertas son adecuadas cuando se tienen masas rocosas estables y no se requiere el revestimiento inmediato con dovelas prefabricadas.
- El escudo sencillo requiere necesariamente el revestimiento con dovelas prefabricadas.
- Para tener un rendimiento aceptable, las de escudo sencillo son más convenientes cuando el material es fácilmente "excavable".
- El diseño de la TBM es factor crítico de éxito. Así, una máquina correctamente equipada logrará superar las condiciones de riesgo identificadas en el proyecto.
- No existen diseños estándar, la máquina debe equiparse para resolver las situaciones específicas del proyecto, por lo cual el diseño normalmente variará. Evidentemente, es posible realizar ajustes y modificaciones en la máquina (en la fábrica), para adaptarlas de manera que puedan ser reutilizadas.
- La máquina debe ser concebida para las condiciones particulares que enfrentará, pero también se debe tomar en cuenta la experiencia y tradición del contratista que la usará.

### 13.3.5 Escenarios de riesgo para la TBM

Hay algunos escenarios de riesgo para la excavación con TBM, que pueden representar condiciones límite donde la máquina puede enfrentar disminución en su avance o incluso una obstrucción total. En estas

situaciones, se requieren intervenciones especiales que pueden incluir investigación específica, drenajes y hasta la necesidad de construir manualmente un túnel piloto ubicado arriba o al lado de la máquina (o bien, desde el back-up) y dar un tratamiento de mejora del terreno. Ahora bien, estas situaciones pueden preverse y equipar la máquina con las herramientas apropiadas para superar la condición adversa. En caso de no realizar esta previsión, podría ser necesario el cambio de herramientas durante el proceso constructivo, a veces, en condiciones adversas.

### 13.3.5.1 Excavabilidad de la roca

Se dice que una roca no es excavable si la TBM no es capaz de penetrar el terreno a una tasa suficiente o si el desgaste de las herramientas de corte excede los límites aceptables. La excavabilidad de una formación rocosa se define solo en comparación con la técnica de perforación y voladura, en función del tiempo y costo requerido por ambas metodologías de excavación.

El principal índice utilizado es la Tasa de Penetración (PR), en mm/rev, bajo el máximo empuje de la TBM. No se puede establecer un límite absoluto para la PR, bajo el cual se diga que la roca no es penetrable, esto porque la PR está influenciada por la resistencia y abrasividad de la roca y el diámetro de la excavación. Una alta abrasividad asociada a una baja PR implica cambio frecuente de discos, incremento del costo unitario del volumen excavado y tiempo adicional por los cambios de discos.

En general, se puede indicar:

- PR < 2-2,5 mm/rev : indica problemas de excavabilidad
- PR > 3-4 mm/rev : la excavación empieza a ser eficiente

### 13.3.5.2 Inestabilidad de las paredes de la excavación

Esta es una limitante para el caso de TBM abiertas. El problema en este caso ocurre inmediatamente detrás de la cabeza de corte, donde resulta difícil colocar los elementos soportantes de manera oportuna. Además, es difícil colocar en forma efectiva las zapatas para apoyar la máquina tuneladora, lo cual incide en su avance.

Los principales riesgos a esta condición son el bloqueo de la cabeza cortadora debido a los materiales colapsados que la presionan y la sobre-excavación causada por el deslizamiento de bloques, conformando cavernas por encima de la cavidad.

Algunas intervenciones que pueden requerirse en este caso incluyen las siguientes:

- Estabilización y reconstrucción de las paredes, inmediatamente detrás de la cabeza cortadora.
- Uso de arcos de acero, concreto lanzado y cuñas de madera (el concreto lanzado puede dañar eventualmente el equipo).
- Excavación tradicional al frente de la TBM, mediante un túnel piloto o completo.
- Pretratamiento de la masa rocosa al frente, mediante inyección o con el método de paraguas de refuerzo.
- Inyección del volumen colapsado y relleno de la cavidad con resinas y espumas.

### 13.3.5.3 Inestabilidad del frente de la excavación

En zonas de gran fracturación del macizo o en presencia de materiales finos, pueden ocurrir inestabilidades de gran volumen en el frente del túnel, produciendo grandes volúmenes de excavación adicional. En tales casos, se frena el avance debido a que la cabeza de corte no logra girar, debido al material que la presiona o la bloquea. También, la sobre excavación producida por los deslizamientos es tal que se forman cavernas en equilibrio precario, lo cual provoca la detención del avance hasta controlar la situación.

Esta situación requiere intervenciones importantes, por ejemplo:

- Inyección del volumen colapsado y relleno de la cavidad con resinas y espumas.
- En máquinas abiertas, se dispone de arcos de acero, concreto lanzado, pernos, revestimientos.
- Excavación de un túnel “by-pass” con el objetivo de liberar la cabeza de corte de bloques que la entraben, estabilizar el volumen colapsado y avanzar una sección del túnel por excavación convencional o consolidar el terreno con inyección e instalar pre reforzamiento. La sombrilla de tubos no es efectiva en estos casos.
- Se requiere disponer en sitio de todos los equipos necesarios para resolver la condición (bombas, perforadoras, resinas, espumas, etc.).

### 13.3.5.4 Zonas de falla

El material que rellena la falla puede eventualmente “fluir”, comportándose prácticamente como un fluido a presión, e inundar el túnel. Esto es posible cuando el terreno está totalmente meteorizado y hay agua a presión. Puede ocurrir también que en la zona de falla no hay una milonita o relleno de falla, sino que la roca está muy fracturada y el frente se derrumba (en cuyo caso se reproducen las condiciones descritas en la sección 13.3.5.3).

En el caso de TBM abierta, esta situación es prácticamente irreversible. En cambio, las TBM con escudo permiten tomar acciones para tratar de sobrepasar la situación (aunque debe detenerse la excavación para resolver el problema).

Dentro de las intervenciones posibles pueden mencionarse:

- Drenaje por medio de perforaciones desde la máquina por agujeros en el escudo.
- Mejoramiento del terreno, normalmente mediante inyección convencional o química, realizada a través de agujeros dispuestos en el escudo o pasando por los espacios disponibles en la rueda de corte.
- Túnel by-pass o túnel piloto por método convencional

### 13.3.5.5 Terreno exprimible o fluyente (“squeezing rock”)

Cuando ocurre convergencia del túnel, se tiene una situación difícil para cualquier TBM. Esa convergencia excesiva puede ser provocada por fluencia del terreno (squeezing) o por expansión de minerales arcillosos o anhidrita (swelling).

Es una condición que puede ser tan frecuente como los colapsos al frente o en las paredes. Las máquinas con escudo son muy sensibles a este problema, por causa de su longitud (cuanto más largo es el escudo, mayor es el área en contacto potencial con el terreno), quedando obligadas a intervenciones especiales cuando se presenta la convergencia.

En TBM abiertas, se pueden experimentar grandes dificultades para instalar el soporte. Sin embargo, es posible liberar una TBM con doble escudo atrapada en terrenos de este tipo, pues en ella es posible interferir a 4-5 m de la cara a través de la abertura de la zona telescópica. Para un escudo sencillo, la operación debe iniciarse desde la parte posterior a la cola del escudo, demoliendo uno o dos anillos del revestimiento-

Intervenciones posibles para este caso, podrían ser las siguientes:

- Hidro lavado de alta presión (600 bares) alrededor del escudo
- Sobreexcavar 5 a 20 cm, para lo cual la TBM deberá estar previamente equipada con herramientas de corte adicionales y la posibilidad de restituir los discos periféricos
- Usar soporte flexible, por ej. Arcos de acero con junta deslizante.
- Excavar lo más rápido posible.
- En máquinas con escudo, se puede aumentar el empuje, pero el revestimiento debe tener la resistencia necesaria para soportar ese aumento de las presiones.
- Aplicar bentonita lubricante alrededor del escudo y del revestimiento.

### 13.3.5.6 Otras (terrenos blandos, agua subterránea, gases, karst, altas temperaturas, obstáculos antrópicos)

El progreso de la TBM se ve muy afectado ante la presencia de flujos grandes de agua. En tal caso, los aspectos más importantes a controlar son la presión y el caudal del influjo a través del frente de la excavación. Las TBM con capacidad para trabajar en modo “cerrado” (con escudo y con revestimiento impermeable), pueden manejar mejor esta situación.

Otros riesgos pueden presentarse, como la presencia de gases, karst, agua con alta temperatura y la presencia de obstáculos de origen antrópico (pozos, tuberías, pilotes) en la ruta de la excavación. Es fundamental identificar estos riesgos e incorporarlos en el análisis y la gestión del riesgo.

### 13.3.5.7 Asentamientos en la superficie

En el caso de los túneles excavados en el ámbito urbano, donde por lo general se requieren túneles ubicados a poca profundidad y que transcurren por las capas blandas de suelo, es posible que se provoquen asentamientos en la superficie. Este es uno de los principales escenarios de riesgo que se consideran para el caso de excavación en terrenos blandos, en particular en el ambiente urbano, situación que con frecuencia aplica al caso de túneles ferroviarios y túneles de metro, así como en túneles viales.

La excavación de un túnel somero implica que, al retirarse un volumen de terreno por efecto de la excavación, se producen deformaciones. Cuando el proceso de excavación no es controlado adecuadamente, cabe la posibilidad de provocar sobre excavaciones en el túnel, las cuales, bajo ciertas condiciones, tienen en potencial de generar cavidades que, prolongadas hacia la superficie, constituyen pozos o chimeneas que generan el riesgo de colapso de estructuras o caída de vehículos o personas incluso ajenas al proceso constructivo, como ha ocurrido en diversos casos en años recientes.

Teóricamente, la excavación del túnel afecta el terreno desde un volumen aún no excavado frente a la máquina y a todo su contorno. Entonces, el comportamiento del terreno es un problema tridimensional que genera una “cuenca” de asentamientos en la superficie del terreno. En la Figura 60 se muestra la geometría de esa cuenca de asentamientos.

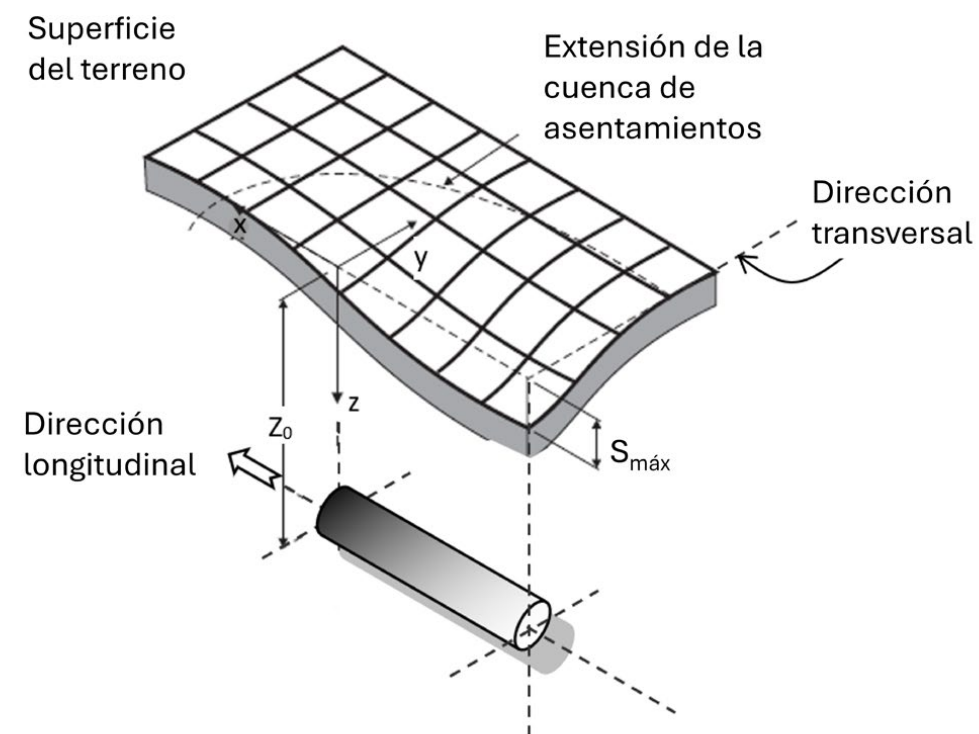


Figura 60. Forma tridimensional de la Cuenca de asentamientos.

Es necesario evaluar de manera específica y detallada esta condición para cualquier túnel a poca profundidad, especialmente en el contexto urbano, donde se admite una pérdida de volumen máxima de 0,5% cuando se excava con máquina tuneladora o de 1,5% cuando se excava por métodos convencionales.

## 13.4 Excavación desde la superficie

En este grupo de métodos para la construcción de obras subterráneas, se incluyen aquellos en los cuales la obra se excava y construye produciendo una abertura en la superficie, para construir la estructura de soporte y, posteriormente, volver a rellenar encima y restituir lo que hubiese sido afectado.

Se incluye aquí la construcción de sótanos, que deben considerarse obras subterráneas, aunque forman parte de una edificación que sobresale por encima de la superficie y que mantienen su acceso por esa misma edificación.

### 13.4.1 Método de cortar y cubrir (“cut and cover”)

Aplicable a túneles muy someros (poco profundos). Este método consiste en abrir una trinchera o zanja, crear las estructuras de soporte lateral del túnel y luego colocar una estructura de soporte (techo del túnel), capaz de soportar las cargas superficiales (terreno, vehículos, estructuras). Hay dos métodos o secuencias constructivas:

- a. De abajo hacia arriba (“Bottom-Up”)
- b. De arriba hacia abajo (“Top-Down”)

Ambos métodos pueden utilizarse para la construcción de túneles, aunque este método no es tan frecuente para este objetivo, puesto que requiere mucho tiempo de interrupción en la superficie. En cambio, es bastante utilizado para la construcción de estaciones en sistemas ferroviarios o de metro. También es muy utilizado en la excavación de sótanos en edificaciones.

En la secuencia de abajo hacia arriba (Figura 61) la excavación permanece abierta en la superficie hasta alcanzar el nivel mínimo de excavación. Previamente han debido instalarse muros diafragmas o pantallas ancladas (u otros métodos de soporte temporal como tablestacas o pantallas de pilotes) para el soporte vertical del terreno que permita la excavación profunda. Luego, viniendo desde la parte inferior, se construye la estructura de soporte definitiva hasta restituir, finalmente, el terreno y la infraestructura ubicada en la superficie.

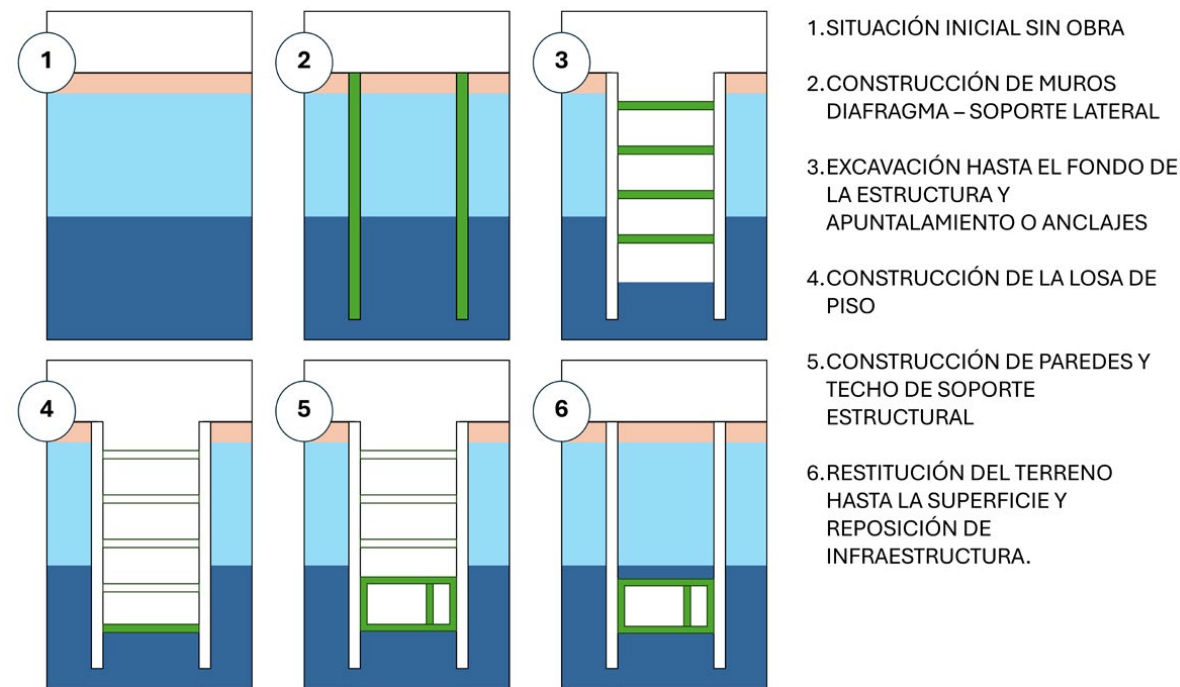


Figura 61. Secuencia “de abajo hacia arriba” (bottom-up).

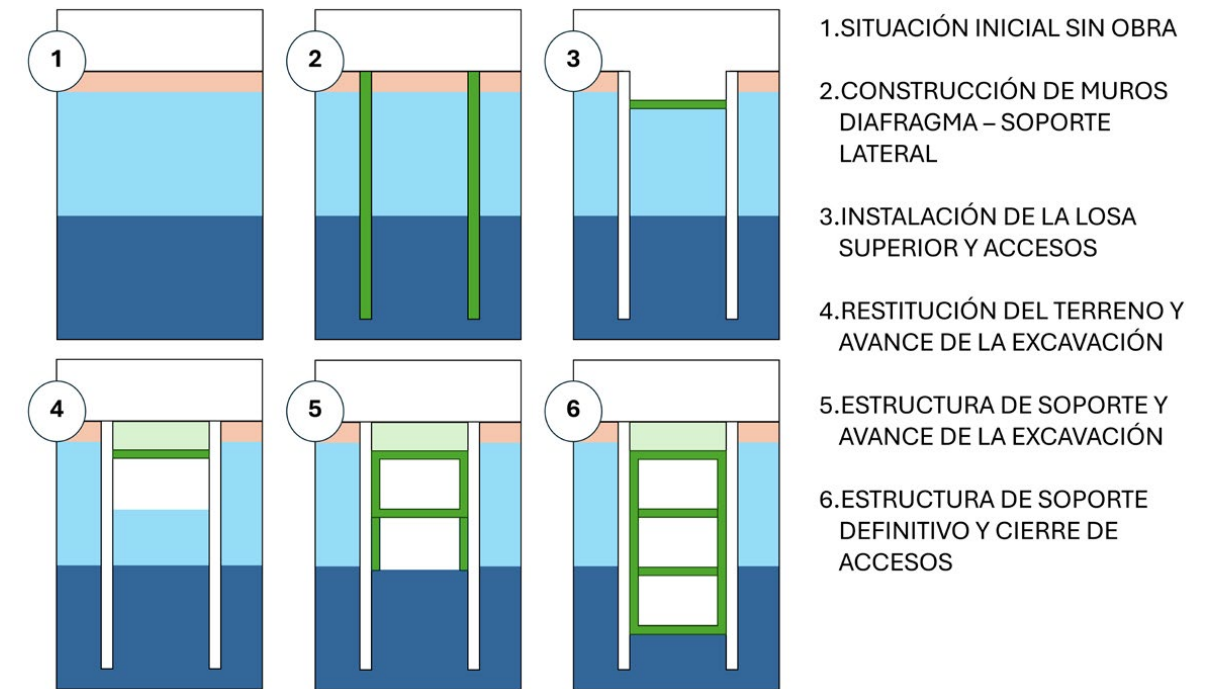


Figura 62. Secuencia “de arriba hacia abajo” (top-down)

En la secuencia de arriba hacia abajo (Figura 62) se inicia de manera similar, pero se excava solamente hasta el nivel de la losa superior. Una vez que esta se instala, se restituye el terreno, lo cual permite recuperar la dinámica de la superficie de manera mucho más rápida. Luego se procede con la excavación y la construcción de la estructura definitiva, prosiguiendo hacia abajo.

### 13.4.2 Pozos

Los pozos son excavaciones verticales, profundas, de muy variados diámetros y profundidades. Actualmente, una de sus principales aplicaciones es la de proveer acceso a los túneles, en particular en los sistemas de transporte de personas. El pozo presenta la importante ventaja de que puede ser construido de manera lateral, fuera de la vialidad, de manera que se puede realizar la construcción sin interrumpir el tránsito y luego, al nivel del túnel (que generalmente sí pasa por debajo de la zona de vialidad), se construye un acceso desde el pozo.

El pozo se aprovecha entonces como acceso para el proceso constructivo del túnel, pudiendo por ejemplo meter y sacar maquinarias y personas, así como proveer la ruta de extracción del material excavado en el túnel. Después del proceso constructivo, el pozo mismo puede utilizarse para las instalaciones de la estación y facilitar el trasiego de personas desde la superficie y hasta los trenes, en ambas direcciones de desplazamiento. También pueden requerirse para los sistemas de ventilación permanente.

Tratándose de una excavación vertical (por lo general), debe atravesar diversas condiciones del terreno, desde el horizonte de suelos, los materiales de transición hasta la roca fracturada y, eventualmente, el basamento rocoso sano. También, en muchos casos, deberá ser excavado bajo el nivel freático, lo cual condiciona su diseño, construcción y operación. Esto, por supuesto, dependerá de la profundidad requerida para el pozo.

La forma de la sección transversal del pozo puede ser circular, rectangular o elíptica. Por ejemplo (aunque no son pozos urbanos) hay dos proyectos hidroeléctricos en Costa Rica cuyas casas de máquinas están alojadas en pozos elípticos de una treintena de metros de profundidad y en el proyecto de Mejoramiento Ambiental del Área Metropolitana, hay pozos de más de 25 m de profundidad. En cuanto a su tamaño, la ITA (2021) sugiere la siguiente clasificación (Tabla 12):

**Tabla 12.** Clasificación de pozos según su diámetro (ITA, 2021)

Tamaño	Área de la sección transversal (en m²)	Diámetro (m)
Muy pequeño	< 20	< 5
Pequeño	20 – 35	5 – 6,5
Mediano	35 – 50	6.5 – 8
Grande	50 – 115	8 – 12
Muy grande	> 115	> 12

En cuanto a las profundidades, se podrían clasificar según la Tabla 13:

**Tabla 13.** Clasificación de pozos según su profundidad

Tamaño	Profundidad (m)
Somero	< 20
Mediano	20 – 40
Profundo	40 – 60
Muy profundo	> 60

Dentro de los sistemas constructivos más comunes para la retención del terreno y la construcción del pozo, se pueden mencionar los siguientes:

- Pilotes de acero y revestimiento horizontal de madera (o placas de acero)
- Tablestacas (para pozos poco profundos)
- Segmentos prefabricados de concreto o anillos colados in situ
- Excavación convencional con anclajes o arcos de acero y concreto lanzado
- Pilotes secantes de concreto
- Pantalla de lodos y muros diafragma (muros colados)
- Congelación del suelo
- Cajones (caissons)

Además de los anteriores, los pozos se pueden construir también por medio de la excavación mecanizada, aplicando la excavación desde abajo hacia arriba o viceversa. Se dispone, por ejemplo, de la excavación con SBM (Shaft Boring Machine) o SDM (Shaft Drilling Machine).

### 13.4.3 Túneles falsos

Los túneles falsos son estructuras utilizadas en carreteras de montaña como protección contra la caída de bloques de roca desde la ladera hacia la vía. Se construyen sobre la ruta, generando una cobertura protectora. Su objetivo principal, según Arias (2021), “es separar el tránsito y peatones del posible impacto de caída de rocas”. En otro contexto, el nombre de “túnel falso” podría referirse a las partes del túnel que se construyen en el emboquille, externamente, para alejarse de la ladera y así servir como protección en el portal, aumentando un poco la longitud real del túnel. Sin embargo, en el contexto de esta Guía, se hará referencia a estos túneles como soluciones para carreteras montañosas que, aun no siendo verdaderos túneles (pues no se excavan dentro del terreno), producen la sensación en los viajeros de estar atravesando uno y, de ahí, esa denominación.

Estas estructuras usualmente requieren ser ancladas al terreno, en una zona donde éste tenga la capacidad de anclarla y que sea estable. Además, se requiere un material de amortiguamiento sobre el techo, para administrar la energía producida por el impacto de los bloques. En términos generales, su desempeño dependerá de la capacidad estructural, por lo que es muy importante determinar con precisión el nivel de energía que deberá soportar y proveer un material adecuado de amortiguamiento.

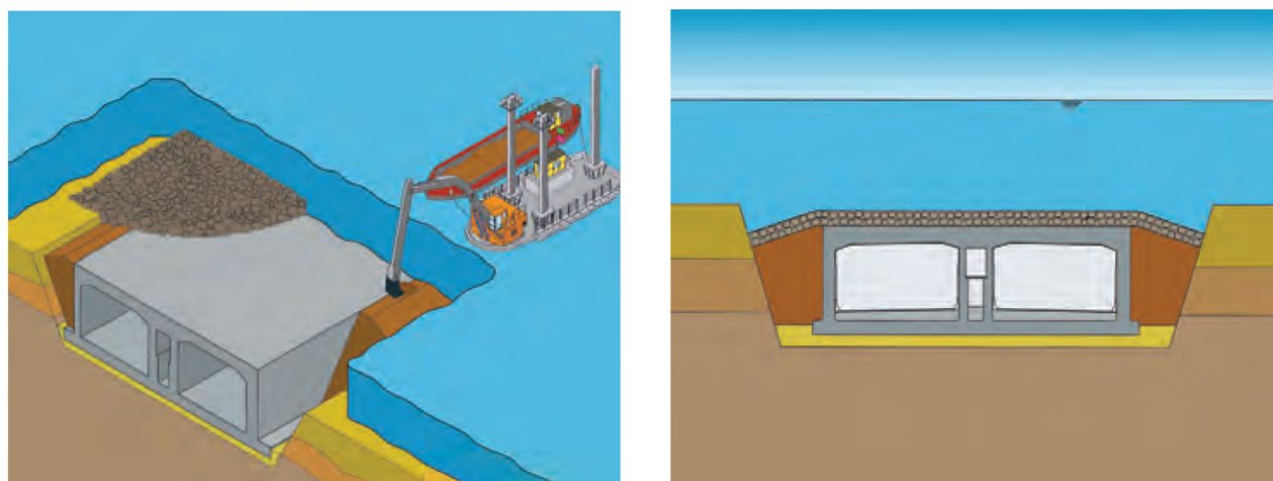
En el capítulo 16 se discuten los túneles falsos de una manera más extensa.

## 13.5 Excavación subacuática

En ciertas ocasiones, los túneles deben superar también el obstáculo de un cuerpo de agua, como un río, una bahía, etc. En tales casos, se requiere utilizar una técnica de construcción subacuática. Actualmente, existen dos posibilidades: los túneles sumergidos y los túneles flotantes (aunque de estos últimos no se ha construido ningún túnel de este tipo todavía, pero hay un buen número de proyectos propuestos (ITA, 2023)).

### 13.5.1 Túneles sumergidos

Son túneles construidos bajo masas de agua, por medio de segmentos de túnel prefabricados en seco, transportados por flotación y luego sumergidos y unidos en su posición final. Son instalados en trincheras excavadas mediante dragado en el lecho de la masa de agua (Figura 63).



**Figura 63.** Vista esquemática de un túnel sumergido (ITA, 2022)

Con respecto a otras soluciones, presenta algunas ventajas significativas. Por ejemplo, su longitud resulta menor que la de un túnel convencional (que requiere mayor profundidad) y que un puente sobre la masa de agua (que normalmente requiere una gran longitud para permitir el paso inferior de embarcaciones).

Por otra parte, la sección transversal de un túnel sumergido puede ser mucho más compacta en comparación con la que se requeriría para un túnel convencional (que, incluso, puede necesitar de dos túneles para administrar la circulación en ambos sentidos). La sección transversal de los túneles sumergidos no requiere ser circular y, de hecho, se puede acomodar cualquier forma de ella.

Además de las anteriores, la construcción de los túneles sumergidos puede ser más rápida, toda vez que es posible realizar distintas actividades de manera contemporánea, por ejemplo: dragado, prefabricado de los segmentos, obras de aproximación, etc.

Los principales procesos constructivos de los túneles sumergidos son los siguientes:

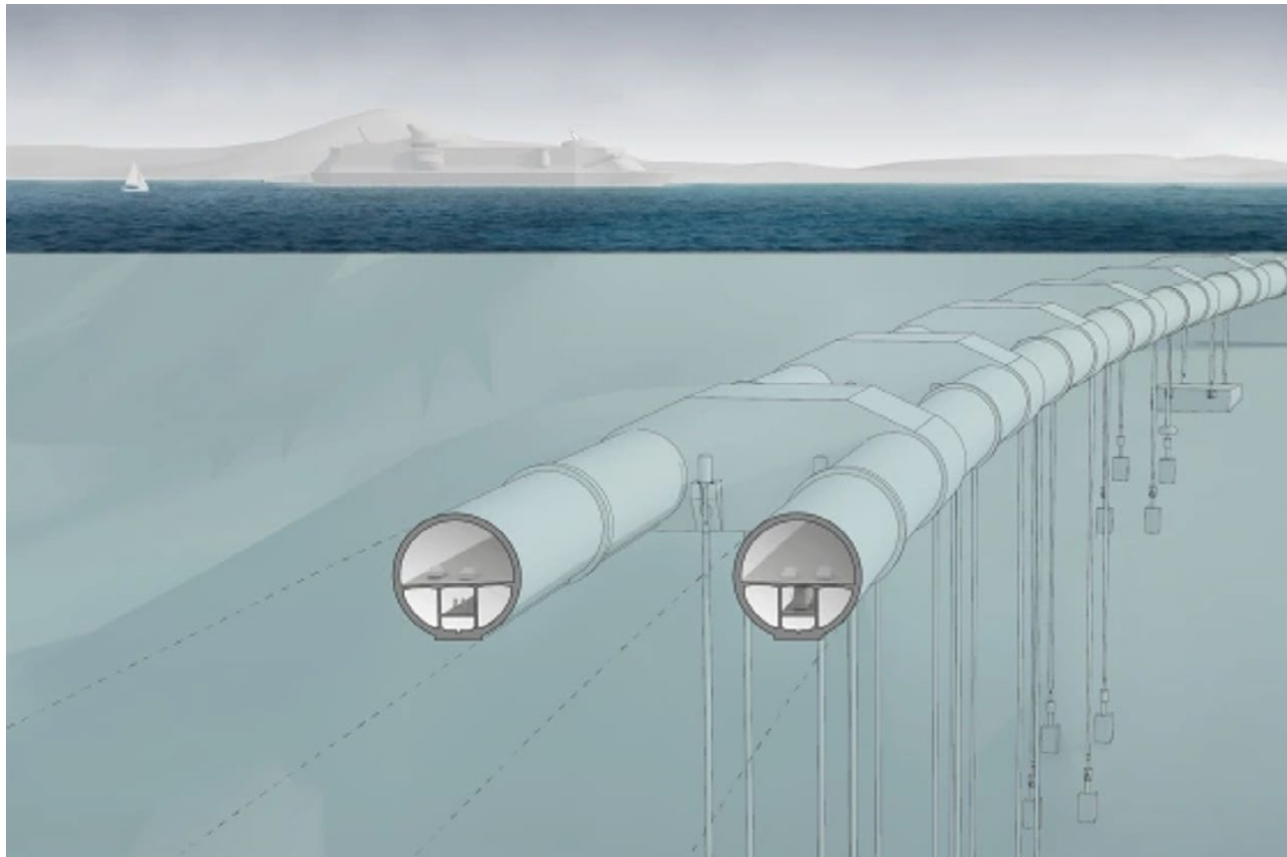
- Dragado de la trinchera donde se instalará el túnel, hasta un adecuado nivel de cimentación.
- Relleno de material competente, granular, en el fondo de la trinchera
- Construcción de los segmentos prefabricados (normalmente de longitudes de decenas de metros, hasta del orden de 200 m)
- Sellado temporal de los extremos del segmento e inundación del dique para hacer flotar los segmentos
- Lanzamiento de los segmentos al cuerpo de agua
- Traslado de los segmentos por flotación hasta el sitio del túnel
- Sumersión y colocación de los segmentos, mediante el llenado de tanques de balasto en el interior del segmento y con control vía GPS de alta precisión y colaboración de buzos.
- Unión y sello entre segmentos, por medio de sellos especiales y placas exteriores.
- Relleno final de la trinchera para la fijación de los segmentos y evitar su flotación. Además, se recubren con bloques como medio de protección.
- Unión final con las estructuras de aproximación. Estas estructuras se construyen en seco en los extremos del túnel y se unen también con los segmentos prefabricados para crear la conexión completa del túnel.

El interior del túnel, finalmente, recibe acabados, señalización, iluminación y ventilación. El aspecto final no difiere de un túnel convencional.

### 13.5.2 Túneles flotantes

Se trata de un túnel que atraviesa un cuerpo de agua, sin descansar directamente sobre el lecho o fondo. Se mantiene en flotación a un nivel fijo, por el efecto boyante positivo o negativo (suspendido desde elementos de flotación en la superficie o mantenido en posición por medio de anclajes al fondo). En la Figura 64 se puede apreciar un posible esquema de fijación.

Pueden ser una alternativa interesante, sobre todo para pasar masas de agua donde el lecho es muy profundo (más de 100 m) o donde la navegación es muy intensa. Actualmente, se trata de una tecnología en desarrollo y no se ha construido todavía ningún túnel de este tipo.



**Figura 64.** Esquema de sujeción de túnel flotante (ITA, 2023)

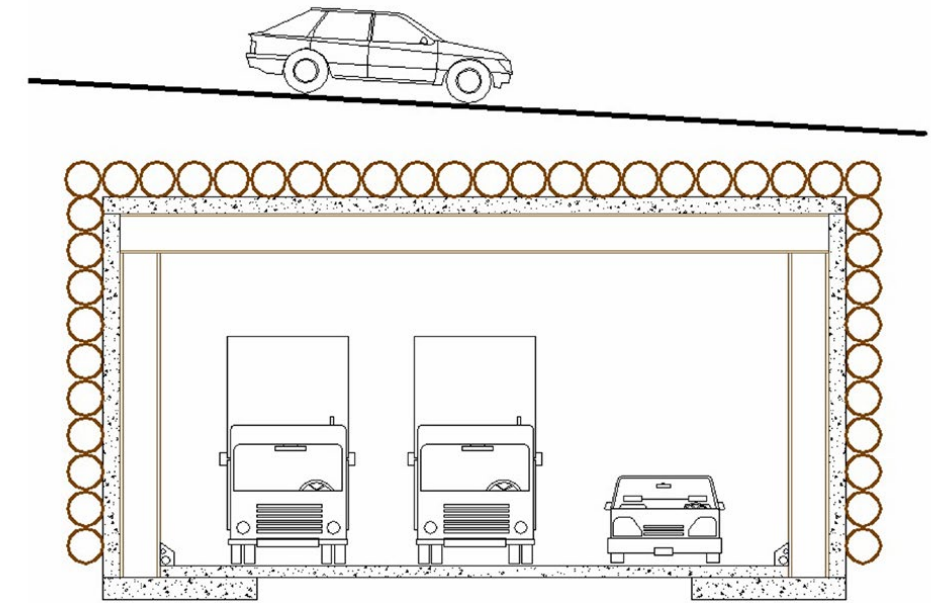
## 13.6 Otros métodos constructivos

Hay un gran número de otros métodos constructivos, algunos muy creativos. En cada caso, debe evaluarse su seguridad y realizar una adecuada evaluación de los riesgos. En esta sección se comentan algunos de estos métodos.

### 13.6.1 Tubería hincada

Hay distintas variaciones de esta técnica, que consiste, en este caso, en el hincado de tuberías paralelas que se instalan antes de realizar la excavación, esto es, constituyen un pre-soporte del techo y las paredes del túnel. Se ha evidenciado como una técnica muy útil cuando hay una cobertura mínima, como suele ser el caso de pasos a desnivel bajo de carreteras muy transitadas. Se trata de túneles cortos, de pocas decenas de metros.

En la Figura 65 se muestra, esquemáticamente, cómo sería la sección transversal de un túnel de este tipo. Como se observa, se requiere la instalación de marcos estructurales de acero, que guían y soportan los tubos hincados. Estos son instalados por medio de martillos de impactado, colocados horizontalmente, y atraviesan toda la longitud del paso inferior.



**Figura 65.** Sección transversal esquemática de un túnel con tubería hincada.

En la Fotografía 34 se muestra un ejemplo de un túnel con tubería hincada durante el proceso constructivo. El interior del túnel, una vez excavado, es recubierto por completo con concreto lanzado o con concreto convencional.



**Fotografía 34.** Proceso constructivo de un túnel con tubería hincada.

### 13.6.2 Micro túneles (excavación sin zanja)

Un grupo muy importante de aplicaciones requiere la construcción de pequeños túneles, denominados "micro". Se les da ese nombre cuando la excavación no puede ser accesada por personas y, por lo tanto, la excavación debe controlarse de manera remota. Para ello, se utilizan máquinas tuneladoras de pequeño diámetro. En términos muy generales, se hace referencia a diámetros menores a los 3 o 4 m, aproximadamente.

Sin embargo, los microtúneles son en realidad un subgrupo de una tecnología mucho más amplia, que es la de "excavación sin zanja" (trenchless). Esta agrupa diferentes técnicas para la instalación de tuberías e infraestructura, sin que se realicen excavaciones desde la superficie. En la Figura 66 se presenta una clasificación de estos métodos.

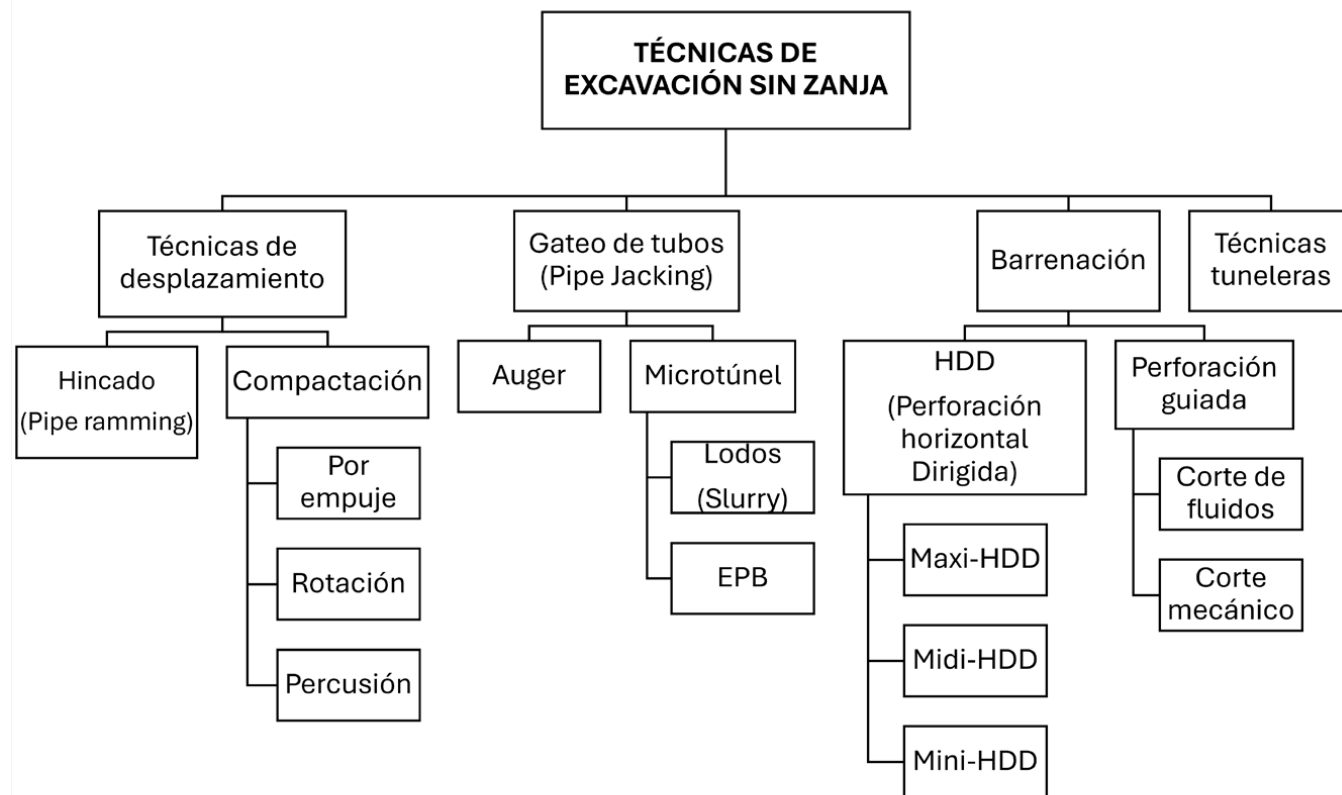


Figura 66. Clasificación de las técnicas de excavación sin zanja.

Una de las técnicas que ha tenido mayor auge en los últimos años en Costa Rica es la excavación de micro túneles con hincado de tubos (pipe jacking). En este caso el túnel es excavado mediante una máquina tuneladora (diámetros entre 0,60 m y 3 m), la cual es empujada mediante un sistema hidráulico y guiada completamente por control remoto.

Las máquinas tuneladoras para este propósito se denominan comúnmente como MTBM y se disponen con diámetros de hasta 3,5 m. Sus principales características son las siguientes:

- La operación es remota, ningún operador dentro del túnel.
- Técnica de excavación y confinamiento: Excavación completa (rueda de corte rotativa), presión de lodos o presión de tierra.
- Soporte del túnel: Tubería hincada.
- Empuje desde un pozo de lanzamiento
- Recuperación de la máquina por medio de un pozo de recepción

Y dentro de las ventajas técnicas de las MTBM, se pueden indicar las siguientes:

- Zona de obra es relativamente reducida, lo cual permite acomodarse a espacios reducidos y, en muchos casos se evita el cierre del tránsito.
- Utilizadas en todo tipo de geología (roca y suelo), aunque debe preverse cuál será el material por excavar para escoger correctamente la máquina.
- La longitud máxima de separación entre el pozo de lanzamiento y el de recepción puede alcanzar hasta 1 km, en tramos rectilíneos y favorables, aunque esto ocurre solamente en raras excepciones. En la gran mayoría de los casos, se procuran longitudes máximas del orden de 300 m.
- Se pueden practicar algunas curvas, con radios de giro mayores a 500 m. Radios de giro menores requieren soluciones especiales o intervenciones manuales.
- Es una tecnología con buena fiabilidad, por lo cual se puede alcanzar alta eficiencia cuando el contratista es experimentado.
- Rápida movilización y desmovilización (2 semanas).
- El mercado de las MTBM y los equipos asociados es amplio y se tiene relativamente buena disponibilidad y soporte.

En cuanto al desempeño de las MTBM, se presentan algunos datos en la Tabla 14:

Tabla 14. Rangos de desempeño de las MTBM (Adaptado de Pipe Jacking Association, 2017)

V (km/h)	40	60	80	100	120
d (m)	40	80	130	180	230

En cuanto a las dimensiones y forma de los pozos, es necesario evaluar las características específicas del proyecto. A manera de guía, se presentan, en la Tabla 15, distintas dimensiones usuales de pozos y longitudes de tubo. Los tubos deben diseñarse y construirse de manera que soporten los empujes de la máquina y todo el proceso de elaboración, almacenaje, transporte e izaje. Entre los tubos se requiere una junta especial, hermética y, además, deben estar equipados con todos los aditamentos necesarios para realizar las maniobras de empuje, incluyendo la aplicación de bentonita en su extradós.

**Tabla 15.** Dimensiones usuales de pozos y longitudes de tubo de los microtúneles (pipe jacking)

DN (cm)	Pozo de lanzamiento		Pozo de recepción		Long. Tubo (mm)
	Circular (m)	Rectangular (m)	Circular (m)	Rectangular (m)	
40	3,5	3,5 x 3,0	2,5	2,5 x 2,0	2000
60	3,5	3,5 x 3,0	2,5	2,5 x 2,0	2000
70	4,5	4,5 x 3,5	3,5	3,5 x 2,0	2000
90	4,6	4,6 x 3,5	3,5	3,5 x 2,0	3000
100	5,8	5,8 x 4,0	4,5	4,5 x 2,5	3000
120	5,8	5,8 x 4,0	4,5	4,5 x 2,5	3000
150	8,5	8,5 x 5,5	5,8	5,8 x 4,0	3000
180	9,5	9,5 x 5,5	6,5	6,5 x 4,0	3000
200	10,0	10,0 x 6,0	7,0	7,0 x 4,0	3000
250	10,0	10,0 x 6,0	8,0	8,0 x 4,0	3000
300	12,0	12,0 x 6,0	8,5	8,5 x 5,0	3000

### 13.7 Monitoreo durante el proceso constructivo

Durante el proceso constructivo, es necesario verificar que todos los análisis y supuestos del diseño se cumplen, en particular con respecto a deformaciones y cargas dentro y fuera del túnel. Es necesario, en resumen, aplicar el proceso de monitoreo establecido en el PGR (sección 10.1.3) y verificar que las variables de control se ubican dentro de los rangos esperados según los análisis realizados durante la etapa de diseño.

En términos generales, hay instrumentación en la superficie y dentro del túnel. La que se instala en la superficie proporciona datos sobre el subsuelo y las condiciones de la superficie, así como sobre el comportamiento de las estructuras en la superficie, en el área de influencia del túnel, como respuesta a la excavación. Esto es de particular interés en túneles excavados en el ámbito urbano.

Los propósitos del sistema de monitoreo se pueden resumir en los siguientes aspectos:

- Controlar la estabilidad de la estructura
- Evaluar la respuesta de la estructura y del terreno al método constructivo
- Evaluar la efectividad del soporte
- Comparar las predicciones teóricas con el comportamiento real

- Verificar la estimación de los parámetros del terreno por medio de retro cálculo
- Registro de datos para los procesos contractuales
- Optimizar la excavación
- Reaccionar según el Plan de Gestión de Riesgos

El sistema de monitoreo requiere un diseño específico, realizado por especialistas y adaptado al proyecto particular. Además, se requiere una interpretación adecuada de los datos recopilados durante el proceso constructivo, para lo cual es necesario prever recursos adecuados, no sólo del sistema de recolección de datos o de cuadrillas de topografía y geodesia, sino también de especialistas que puedan contrastar los datos obtenidos con relación a los parámetros esperados e interpretar o diagnosticar el comportamiento del terreno como respuesta a la construcción del túnel o la obra subterránea.

#### 13.7.1 Parámetros por controlar

La lista de parámetros por controlar depende del proyecto específico, según los aspectos críticos o puntos de interés que establezcan el diseñador o el constructor. La AFTES (2005) menciona los siguientes posibles intereses sobre el sistema de auscultación:

- Corroborar la estabilidad en el corto plazo
- Adaptar y optimizar los métodos de ejecución.
- Verificar el impacto de las obras sobre el medio ambiente
- Verificar el impacto de las obras sobre las estructuras y edificaciones existentes
- Comprobar la durabilidad en el largo plazo

Así, se pueden establecer cuatro objetivos generales para la auscultación:

- Alertar en caso de ocurrencia de riesgos a la seguridad
- Verificar el comportamiento adecuado de las obras y la comprensión de los mecanismos físicos que ocurren
- Verificar la evolución del parámetro medido y de otros no identificados previamente
- Verificar el comportamiento y funcionamiento de la obra en su operación

Ahora bien, cada instrumento colocado debe responder a una pregunta específica, por lo tanto, debe enunciarse el objetivo particular de cada equipo.

En general, hay tres tipos de parámetros que se requiere controlar:

- a. Evolución de los desplazamientos en superficie y dentro del túnel
- b. Control del estado de esfuerzos (generalmente a partir de deformaciones)
- c. Variación de las condiciones hidráulicas

El Plan de auscultación y monitoreo para la fase de construcción debe considerar, entre otros, los siguientes aspectos:

- a. Ubicación de los puntos de medición
- b. Selección de los instrumentos de medición
- c. Contratación del proveedor especialista de la auscultación
- d. Sistema de gestión del sistema (software, recursos, comunicación, etc.)

- e. Periodicidad de las mediciones
- f. Automatización de las lecturas
- g. Tratamiento de los datos e interpretación
- h. Avisos, alertas y alarmas

### 13.7.2 Monitoreo dentro del túnel

Dentro del túnel, una de las medidas más relevantes es la convergencia, esto es, la deformación de las paredes en dirección hacia dentro de la sección transversal. Por ello, muchos sensores se instalan con este propósito. En la Figura 67 se esquematiza una posible distribución de sensores.

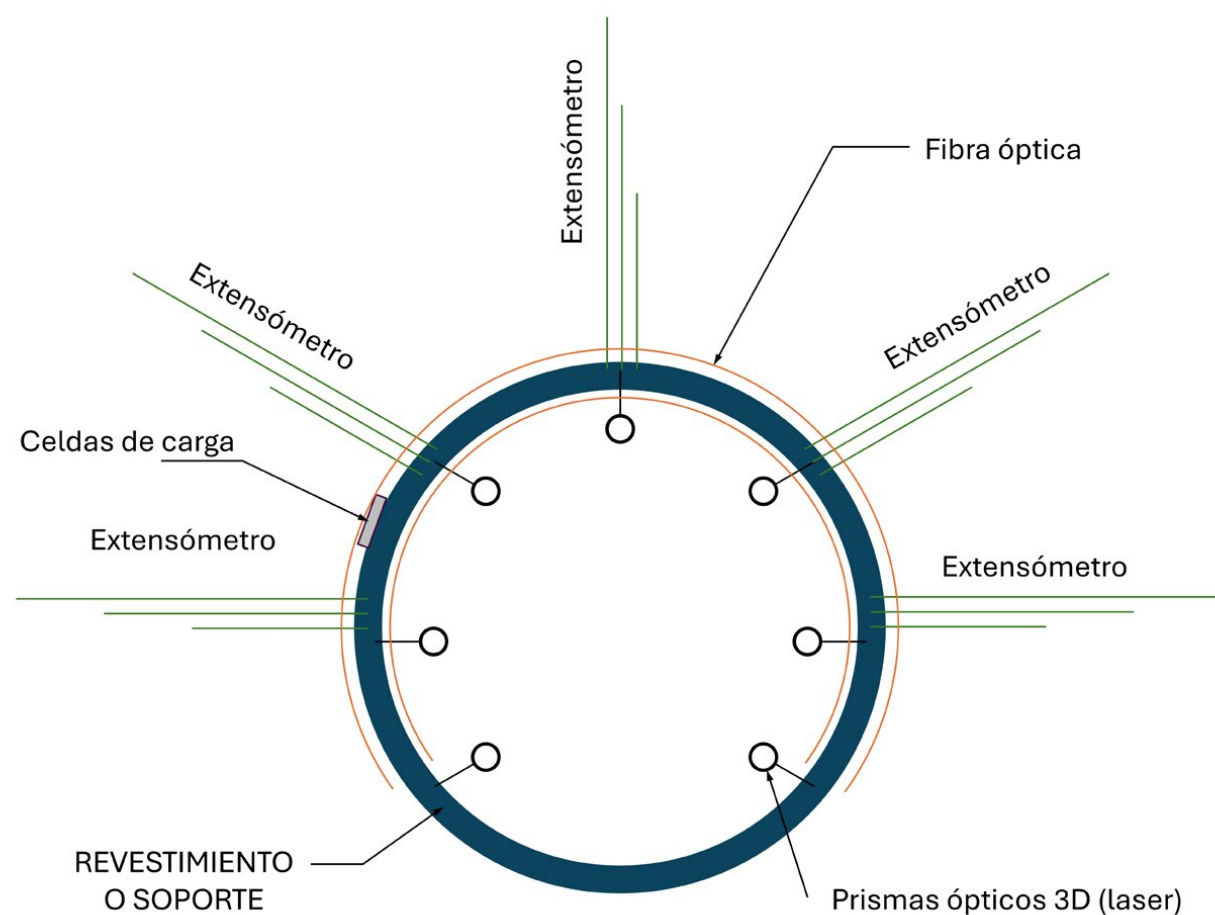


Figura 67. Esquema de instrumentación dentro del túnel.

Los prismas ópticos 3D permiten obtener, con el uso de una estación total, la ubicación precisa de los prismas y, a partir de esa información, determinar la magnitud de las convergencias de la sección transversal. También es de interés conocer la deformación del terreno a profundidad, para lo cual se pueden instalar extensómetros que permiten conocer la variación de las deformaciones. También se puede utilizar la tecnología Lidar para el levantamiento tridimensional de todo el interior del túnel.

Actualmente, se utilizan elementos auxiliares como celdas de carga para medir los esfuerzos y sistemas basados en tecnologías con fibra óptica. Por otra parte, hay una tendencia clara al uso de sistemas inalámbricos, que abaratan el costo de cableado. Entre los sensores inalámbricos que se pueden utilizar, se incluyen los siguientes:

- Medidores de convergencia
- Medidores de inclinación en sentido transversal y longitudinal
- Medidores de inclinación para registrar la ovalización de la sección
- Interfases con sensores medidores de grietas
- Medidores de nivel de agua y piezómetros eléctricos con transmisión inalámbrica
- Inclinómetros inalámbricos

En el caso de la excavación convencional y suponiendo un avance continuo de la excavación, en una sección dada, los desplazamientos (convergencias) deberían estabilizarse con el tiempo. Una aceleración de las convergencias indica inestabilidad (a menos que se estén realizando otras actividades de excavación) y la estabilidad final en condiciones difíciles se alcanza después de colocar el arco inferior (“invert”).

El control de las convergencias se realiza mediante el seguimiento de las curvas de deflexión, que permiten comparar los desplazamientos del terreno a lo largo del túnel al mostrar varias curvas. Se provee información de la deformación longitudinal del túnel y se pueden observar tendencias de crecimiento o decrecimiento de las deformaciones.

### 13.7.3 Monitoreo fuera del túnel

En cuanto al monitoreo fuera del túnel, este se enfoca en la verificación de asentamientos de la superficie y el control de deformaciones o desplazamientos de las estructuras en el área de influencia, así como en el seguimiento de grietas y fisuras preexistentes o nuevas. En este caso, se utilizan estaciones totales robotizadas que controlan gran cantidad de puntos distribuidos sobre el terreno y en las edificaciones.

Además, desde la superficie pueden instalarse inclinómetros, extensómetros y piezómetros cerca de la periferia del túnel y controlar así los desplazamientos dentro del terreno provocados por la excavación, así como cualquier variación en los niveles freáticos.

El sistema de monitoreo debe abarcar toda el área de influencia del túnel y se instala desde antes de que la excavación se encuentre próxima, al menos 50 m antes de que el frente de excavación alcance la sección de control y monitoreo y al menos 100 m después de que el frente haya avanzado más allá de dicha sección.

En la medida de lo posible, se prefiere que todo el sistema de monitoreo sea automatizado y funcione en tiempo real, para lo cual debe diseñarse apropiadamente todo el sistema de comunicación y de gestión de datos, mediante software desarrollado específicamente para esa tarea. Actualmente, la función de

auscultación y monitoreo es muy especializada y se suele contratar empresas dedicadas a esta tarea. Sin embargo, la interpretación y la gestión de la información sigue siendo responsabilidad del Constructor, durante la fase de ejecución de la Obra.

#### 13.7.4 Monitoreo de excavaciones profundas desde la superficie

El monitoreo no se limita solamente a la excavación de túneles. Debe ser aplicado también en las excavaciones profundas, como las de sótanos o, bien, de estaciones y pozos de acceso. Aplican, para ello, las mismas condicionantes explicadas en las secciones anteriores, así como el uso de los diferentes instrumentos y sistemas.

### 13.8 Seguridad y salud ocupacional durante el proceso constructivo

Para la ejecución de cualquier obra subterránea en el país, debe respetarse la legislación nacional vigente en la materia de seguridad y salud ocupacional, en todos sus extremos. Sin embargo, debe tenerse en consideración que las obras subterráneas constituyen espacios cerrados donde se conjugan condiciones de riesgo diferentes a las que se encuentran normalmente en los sitios de obra de estructuras en la superficie, que demandan acciones y cuidados particulares.

Para los efectos de esta Guía, se adoptan las recomendaciones de la ITA (2008), del documento “Guidelines for good occupational health and safety practice in tunnel construction”, en todos sus alcances. Alternativamente, es también aceptable la aplicación de la normativa británica BS 6164:2019 (The British Standards Institution (2019) o su versión más reciente).

Se requiere un planeamiento detallado para garantizar la seguridad y la salud ocupacional de todas las personas que laboran en el espacio subterráneo. Por ello, se considera indispensable la elaboración de un Plan de Salud y Seguridad Ocupacional (PSSO) específico para el proyecto de la obra subterránea. Este Plan debe ser concordante con el PGR. Además, se requiere el PSSO desde las etapas de preinversión (planificación, preliminares y diseño), que luego se debe actualizar y ampliar para las etapas de construcción y de operación y mantenimiento.

El PSSO debe considerar los siguientes aspectos:

- Requerimientos de seguridad de acuerdo con la etapa del proyecto
- Plan de emergencias
- Equipamiento de seguridad personal
- Control del tránsito dentro de la obra
- Movimiento vertical en pozos
- Ventilación
- Iluminación
- Barrenación
- Uso de explosivos

- Fuentes de riesgo a la salud
- Instalaciones eléctricas
- Uso de aire comprimido
- Trabajo en condiciones de aire a presión
- Condiciones de trabajo en máquinas tuneladoras
- Condiciones de trabajo con rozadoras
- Gestión del agua en la excavación
- Sistema de comunicaciones en subterráneo
- Manipulación de los elementos de soporte de la excavación
- Monitoreo de la atmósfera dentro del túnel
- Control de incendios
- Sistema de comunicación de las situaciones de riesgo

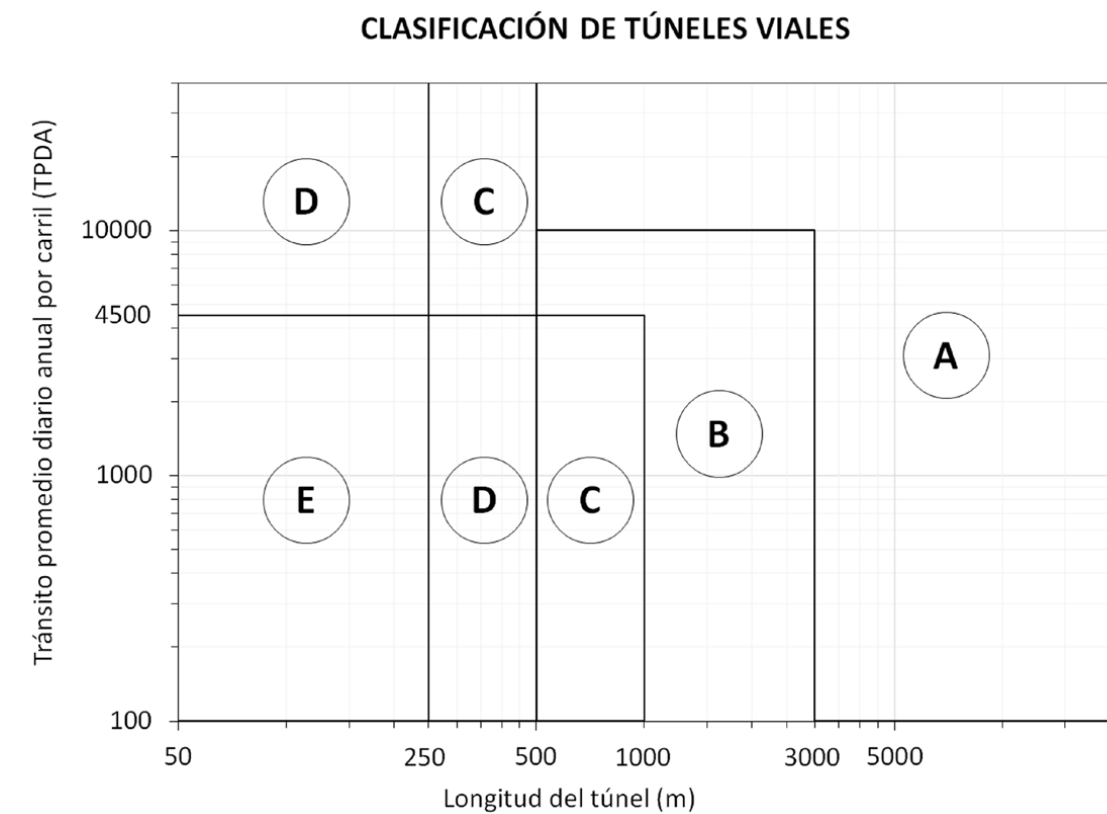
El contenido del PSSO para la obra subterránea deberá cumplir con los requisitos mínimos establecidos en la guía de ITA (2008), en sus capítulos 21 y 22.



## 14 Túneles viales

### 14.1 Clasificación de los túneles viales

El sistema de clasificación de túneles viales está basado en dos variables: la longitud y el tránsito promedio diario anual (TPDA). En la Figura 68 se presenta el sistema de clasificación de túneles sugerido para Costa Rica. Se establecen cinco categorías de túnel, siendo la de mayor categoría la A y la de menor categoría la E.



**Figura 68.** Clasificación de los túneles viales  
 Fuente: (Ministerio de Transporte Instituto Nacional de Vías, 2015)

## 14.2 Diseño geométrico

El diseño geométrico en planta y perfil del túnel estarán sujetos al diseño geométrico del resto de la carretera para asegurar la homogeneidad del sistema de transporte, además de las indicaciones de esta sección.

### 14.2.1 Diseño geométrico en planta

Para el diseño curvas tangentes, curvas circulares y curvas de transición, se recomienda seguir las consideraciones del Manual Centroamericano de Normas para el Diseño Geométrico de Carreteras (SIECA, 2000), Capítulo III: Elementos de Diseño. Adicionalmente, se deberán considerar los siguientes aspectos:

#### 14.2.1.1 Velocidad de diseño

La velocidad máxima de diseño en el interior del túnel debe ser la misma que en el resto de la carretera, con una reducción de la velocidad de 20 km/h en las zonas de ingreso y salida.

#### 14.2.1.2 Distancia de visibilidad en curva

Se requiere mantener una distancia de visibilidad en curva mínima (d) superior a la distancia de parada por visibilidad con el suelo mojado (sección 14.2.1.4). La distancia de visibilidad en curva d depende de la distancia del observador hasta el hastial del túnel y se verá disminuida por los anchos de espaldón y aceras en el interior del túnel.

#### 14.2.1.3 Curvas horizontales

Se recomienda la consideración de una curva horizontal como parte del acercamiento a la entrada y a la salida del túnel, cuando el túnel tenga una longitud mayor a 200 m. Las curvas horizontales son necesarias para prevenir el deslumbramiento durante el día producido por el sol, que pueden sufrir los conductores a la salida del túnel.

$$R_{hm} = 1,75 + \frac{d^2 + 4(1,75 + E + A)^2}{8(1,75 + E + A)} \quad \text{(Ecuación 1)}$$

Donde

$R_{hm}$  es el radio de giro horizontal mínimo

$d$  es la distancia de visibilidad en curva (sección 14.2.1.2)

$E$  es el ancho del espaldón (sección 14.2.3.2)

$A$  es el ancho de la acera (sección 14.2.3.3)

#### 14.2.1.4 Distancia de parada por visibilidad

La distancia de parada por visibilidad mínima disponible deberá ser al menos igual a la distancia de parada, la cual se compone de la distancia de frenado, más la distancia de percepción y reacción. En la Tabla 16 se presentan las distancias de visibilidad mínimas requeridas.

Tabla 16. Distancia de parada (valores en metros)

V (km/h)	40	60	80	100	120
d (m)	40	80	130	180	230

Para un túnel con pendiente, deberá realizarse la corrección en la distancia de parada, sumando los valores que se establecen en la Tabla 17 a los valores de la Tabla 16.

Tabla 17. Corrección de la distancia de parada por la pendiente (valores en metros)

Velocidad (km/h)	-6 %	-4 %	-2 %	0 %	+2 %	+4 %	+6 %
40	1	1	1	0	-1	-1	-1
50	2	1	1	0	-1	-1	-2
60	4	3	2	0	-1	-1	-4
70	7	5	3	0	-2	-3	-7
80	11	7	3	0	-3	-6	-8
90	16	11	4	0	-5	-8	-9
100	29	16	6	0	-7	-11	-15
110	35	22	10	0	-9	-16	-22

Fuente: Recuperado de (Ministerio de Transportes y Comunicaciones de Perú, 2014).

## 14.2.2 Diseño geométrico en perfil (alineamiento vertical)

### 14.2.2.1 Pendiente de diseño

La pendiente mínima en el interior de un túnel está dada por la necesidad de drenaje de las aguas que afloran procedentes del terreno. Se recomienda una pendiente mínima de 0,5% en todos los casos. La pendiente máxima estará en función de la categoría del túnel, según se detalla en la Tabla 18.

**Tabla 18.** Pendiente máxima permitida

CATEGORÍA	PENDIENTE MÁXIMA (%)
A	3,0
B	3,0
C	4,0
D	5,0
E	6,0

En caso de que sea necesario incrementar la pendiente debido a limitaciones de espacio, se deberán adoptar medidas adicionales para incrementar la seguridad, basadas en análisis de riesgo específico para el proyecto.

### 14.2.2.2 Curvas verticales

Debe evitarse la construcción de curvas verticales cóncavas (con puntos bajos) en el interior de un túnel para no generar problemas de estancamiento del agua. En caso no poder evadirse, deberá instalarse un sistema de bombeo hidráulico para la extracción de fluidos en estas zonas.

El radio de giro mínimo para las curvas verticales, para el empalme con los portales, puede estimarse con la siguiente ecuación

$$R_{vm} = 125V_d - 4500 \quad \text{(Ecuación 2)}$$

Donde

$R_{vm}$  es el radio de giro vertical mínimo, en m  
 $V_d$  es la velocidad de diseño en km/h

### 14.2.2.3 Peralte

Es la inclinación dada a la corona de una carretera en tramos de curva para contrarrestar el efecto de la fuerza centrípeta que percibe el vehículo automotor en movimiento. El peralte no debe superar el valor de 10% para tramos en curva dentro del túnel.

### 14.2.2.4 Cruces

No se permite la localización de cruces o intersecciones cerca de la entrada a los túneles. Los cruces, si se estiman necesarios, deben estar alejados al menos dos veces la distancia de visibilidad de parada con respecto del ingreso a los portales. En caso de que su utilización sea inevitable, deberá existir buena visibilidad y una apropiada señalización de advertencia de ingreso al túnel y a los cambios de dirección.

### 14.2.2.5 Portales y aproximaciones

Los portales deben ubicarse en terreno estable y con suficiente espacio. La orientación de estas entradas y salidas al túnel, si fuese posible, no deben estar direccionadas directamente al este ni al oeste, para evitar la incidencia directa de la luz solar.

Cuando a la salida del túnel existe el riesgo de caída de bloques o material desde los taludes laterales o del talud posterior, podría ser necesaria la instalación de barreras de protección o extender la salida construyendo un falso túnel, hasta una distancia segura.

En caso de que existan cuerpos de agua cercanos al portal, con el potencial de generar inundaciones hacia el túnel, deben construirse paramentos o protecciones apropiadas para evitar la entrada del agua.

Los portales requieren aletones laterales de protección, que muchas veces funcionan como muros de contención, al mismo tiempo. La altura de estas estructuras puede ser variable, hasta alcanzar una altura mínima de 0,6 m por encima del nivel de cualquier inundación potencial.

En casos de alto riesgo de inundación, podría ser necesario equipar el túnel con compuertas herméticas.

## 14.2.3 Sección transversal

Para las dimensiones de la sección transversal debe utilizarse la normativa vigente a nivel nacional, basada en las directrices del Manual Centroamericano de Normas de Diseño Geométrico de Carreteras (SIECA, 2000). A continuación, se replican las especificaciones aplicables.

### 14.2.3.1 Ancho y número de carriles

Se recomienda un ancho mínimo de carril de 3,50 metros. El número de carriles deberá ser el mismo que en la carretera de superficie.

### 14.2.3.2 Ancho del espaldón

El ancho del espaldón se establece en 1 metro. Dependiendo de la clasificación del túnel, si se clasifica en las categorías D y E, podrá ser reducido a 0,5 metros.

### 14.2.3.3 Ancho de aceras

La circulación de peatones en un túnel estará limitada a situaciones de emergencia o labores de mantenimiento. En tal caso, el ancho de aceras se establece en 1 m, con una altura de 0,1 m sobre la calzada.

No se debe permitir la circulación de personas, ciclistas, bicimotos, motos menores a 50 cc, animales o vehículos de tracción animal, durante la operación del túnel.

### 14.2.3.4 Gálibo vertical

La altura libre por encima de la calzada debe ser al menos 5,00 m sobre el ancho total de la carretera (ancho de la calzada más espaldones). El dimensionamiento general de la sección transversal del túnel deberá incluir las áreas mínimas requeridas para el funcionamiento de los sistemas electromecánicos, incluyendo la ventilación longitudinal y la variación de la carpeta asfáltica debido a recarpeteos futuros, los cuales se ubican fuera del gálibo de circulación vehicular.

En la Figura 69 se ilustra la sección transversal de un túnel bidireccional, a manera de ejemplo.

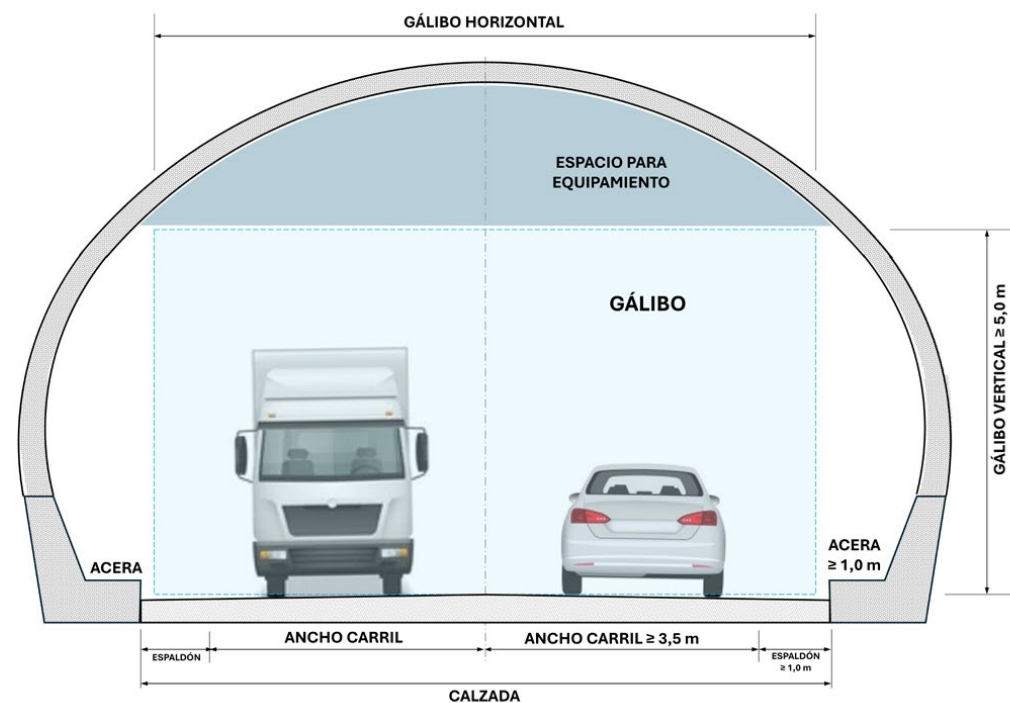


Figura 69. Sección transversal típica de un túnel bidireccional

## 14.3 Requerimientos funcionales

### 14.3.1 Sistema de drenaje

El túnel vial debe ser estanco, es decir no se permite el flujo de agua desde la clave o desde los hastiales (paredes) del túnel hacia la superficie de rodamiento. Por lo tanto, el diseño del sistema de manejo de las filtraciones y su drenaje debe considerar en todo momento este requerimiento de forma estricta.

El drenaje de todos los caudales provenientes de la infiltración desde el terreno o cualquier otro que ingrese al túnel, debe lograrse por gravedad, a menos que sea materialmente imposible. En tal caso, se deberá proveer un sistema de bombeo con capacidad suficiente para gestionar los caudales (sección 14.3.2).

Las filtraciones deberán ser canalizadas por medio de tubería con capacidad suficiente hasta un drenaje longitudinal o colector general que permita la posterior evacuación del agua hacia el exterior del túnel.

### 14.3.2 Sistema de bombeo

Se deberá prever de estaciones de bombeo diseñadas para hacer frente a cualquier evento de inundación que se pueda producir en el túnel. Para ello, se deberá investigar y conocer los caudales de diseño máximos proyectados, además de las posibles zonas con mayor riesgo de inundación.

La ubicación y capacidad de los sistemas de bombeo deberán establecerse según un estudio técnico específico.

### 14.3.3 Revestimiento y acabados finales

El acabado final de un túnel para uso vehicular muchas veces viene dado por el sistema de sostenimiento empleado, en otros casos la aplicación de un revestimiento o acabado final está regido por razones estéticas o, bien, cuando es necesario mejorar las condiciones existentes en el interior del túnel.

Para la selección de los acabados finales se requieren estudios específicos para evaluar la conveniencia o la mejora en las condiciones de servicios del túnel. Su uso también dependerá de los requerimientos establecidos por el desarrollador o propietario de la infraestructura.

Existen sistemas de sostenimiento que pueden aprovecharse como acabados finales, por ejemplo, los siguientes:

- concreto colado reforzado con varillas o fibras de vidrio,
- concreto lanzado sin refuerzo o reforzado con malla electrosoldada y,
- elementos prefabricados de concreto o acero.

En caso de requerirse, para mejorar la parte estética, pueden utilizarse:

- paneles vitrificados,
- paneles de acero esmaltado y,
- paneles cerámicos.

El revestimiento debe asegurar que se cumplan los requerimientos de impermeabilización (sección 14.3.4). Por ello, será necesario instalar un revestimiento de doble capa. Este consiste, básicamente, en la inserción de un material de impermeabilización entre los materiales utilizados para el soporte o reforzamiento y la estructura de revestimiento definitivo de concreto. Esquemáticamente, se ilustra en la Figura 70

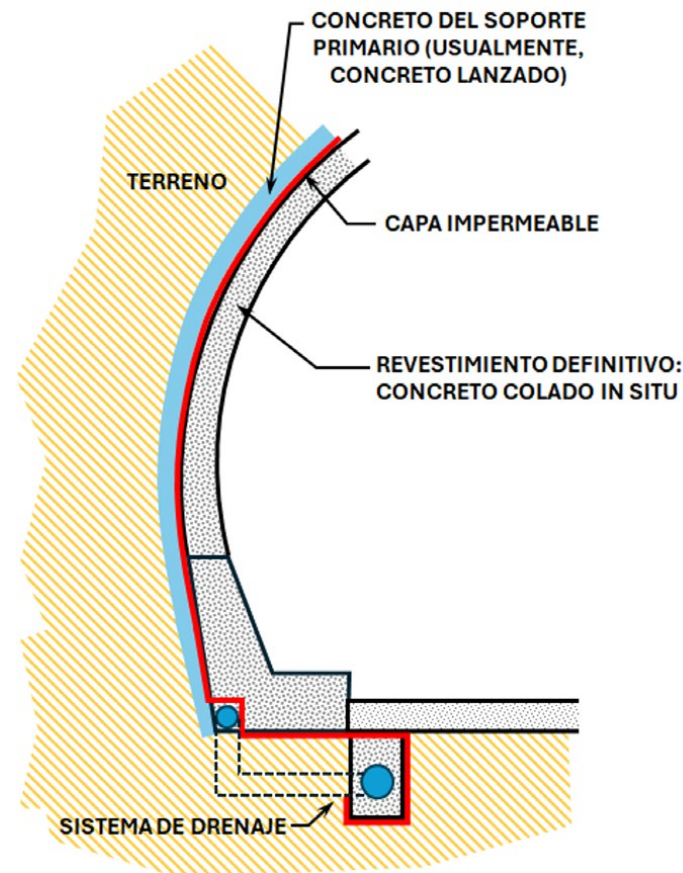


Figura 70. Configuración típica del revestimiento definitivo.

Es posible utilizar otros sistemas de revestimiento definitivo e impermeabilización. La selección del sistema depende de las características particulares del proyecto.

### 14.3.4 Sistema de impermeabilización

El sistema de impermeabilización deberá cumplir los siguientes requisitos:

- Debe proteger la superficie del túnel de manera durable contra el agua infiltrada.
- Debe poder adaptarse a las irregularidades que se generan entre la unión del soporte y el material circundante.

- Debe ser un material durable, resistente a la tracción y auto extinguable.
- Debe garantizar una humedad de "casi seco", es decir, el caudal de infiltración permitido debe ser menor a 0,01 l/m<sup>2</sup> en 24 horas.

Pueden utilizarse geomembranas u otros materiales, siempre y cuando se pueda garantizar su durabilidad por toda la vida útil del proyecto.

## 14.4 Elementos de seguridad

### 14.4.1 Bahías de parqueo de emergencia

Se trata de espacios donde es posible el estacionamiento temporal de los vehículos que presentan inconvenientes en su funcionamiento sin interferir con la libre circulación de los demás vehículos dentro del túnel. Las bahías de parqueo de emergencia se requieren para túneles de categoría A o B, con longitud mayor o igual a 2000 m.

Deberán poseer una longitud mínima de 40 m, más la longitud del muro deflector de transición, la cual deberá ser mayor a 4 m en la entrada y mayor a 8 m en la salida. Asimismo, se recomienda un ancho de carril mínimo de 3.35 metros, para permitir el adelantamiento de los demás vehículos. En la Figura 71 se ilustra la sección transversal en la ubicación de una bahía de parqueo de emergencia, donde se observa que se requiere una ampliación de la sección transversal en los sitios donde se ubica este elemento del túnel.

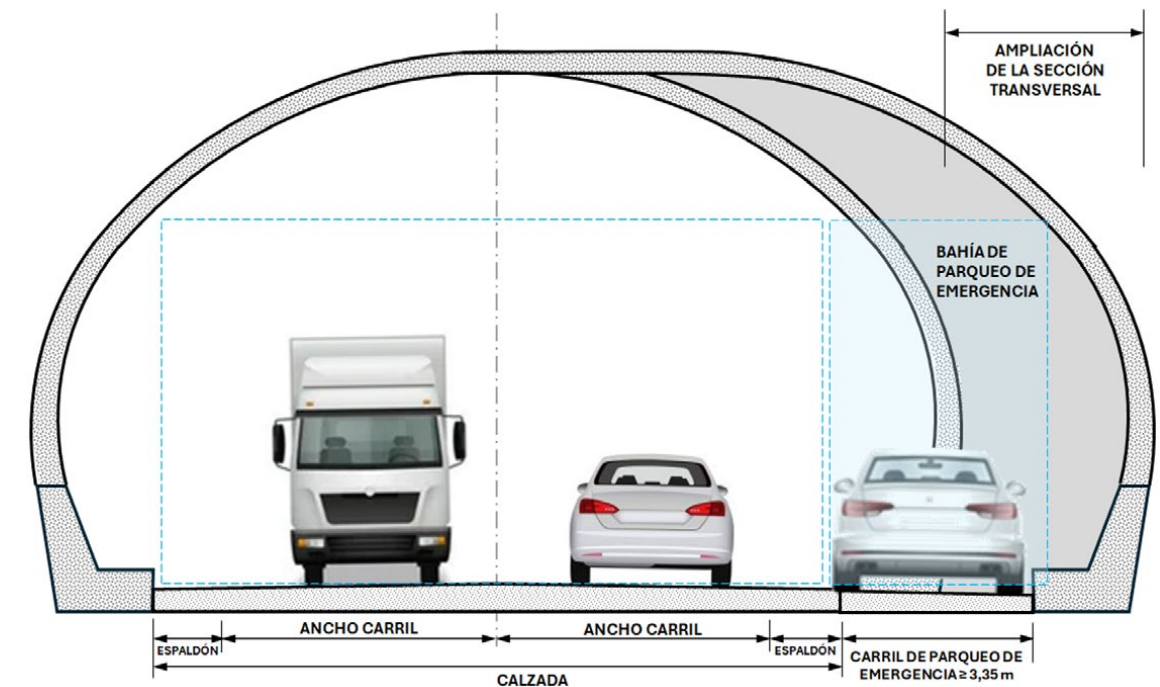


Figura 71. Bahía de parqueo de emergencia (vista en la sección transversal).

En la Figura 72 se ilustra, en una vista en planta, la configuración de la zona de la bahía de parqueo de emergencia.

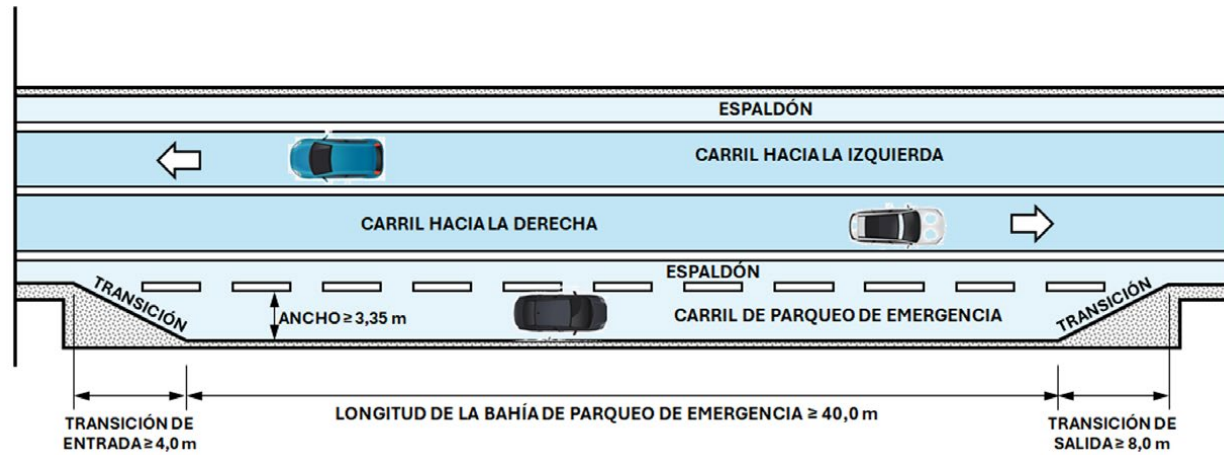


Figura 72. Bahía de parqueo de emergencia (vista en planta).

La distancia o separación máxima entre bahías de parqueo de emergencia es de 1000 m. En caso de túneles bidireccionales, se podrán intercalar en ambos lados del túnel siempre y cuando se respeten los 1000 m de separación, conforme se explica en la Figura 73.

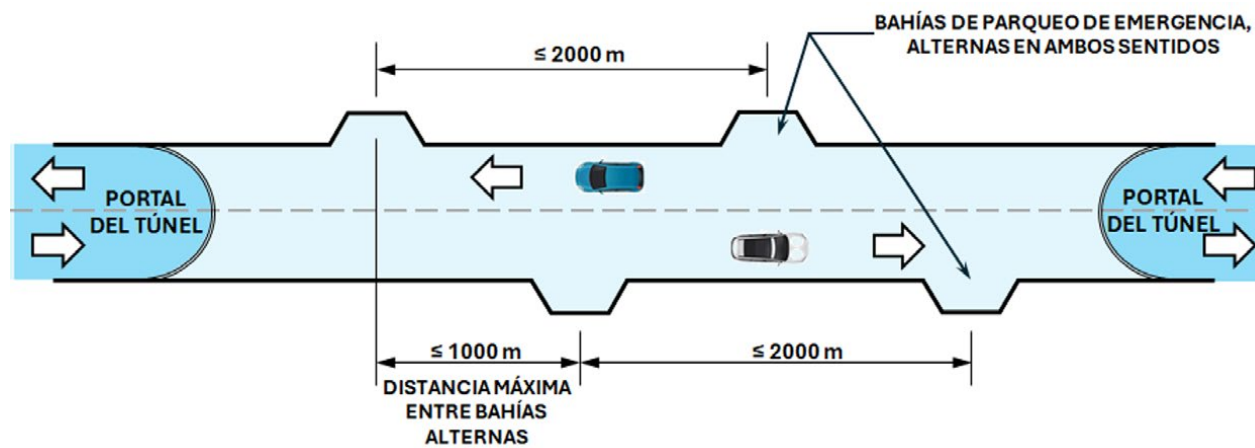


Figura 73. Esquema (en planta) de ubicación entre bahías de parqueo de emergencias.

### 14.4.2 Túneles de emergencia para evacuación

En túneles mayores a 1000 m de longitud, se deberán construir túneles de evacuación, independientes del túnel de circulación principal, que permitan la salida a un sitio seguro en la superficie, así como la entrada y salida de los equipos de respuesta. Los túneles de evacuación de vehículos deberán estar localizados a cada 1000 m dentro del túnel, como máximo, mientras que debe construirse una salida peatonal a cada 500 m dentro del túnel.

La dimensión mínima de la sección transversal del túnel de emergencia será de 4,0 m de ancho por 3,5 m de alto, y una pendiente máxima del 10%, para el caso de un túnel de emergencia para la evacuación vehicular. Al lado izquierdo de la Figura 74 se presenta un esquema del túnel de evacuación, para el caso de vehículos y en el lado derecho, para evacuación peatonal. Para el túnel de emergencia de evacuación peatonal, las dimensiones mínimas serán de 2,5 m de ancho por 2,2 m de alto.

En caso de ser un túnel doble (gemelo o bi-túnel, dos conductos paralelos) podrá proyectarse la construcción de los túneles de evacuación como conexiones perpendiculares entre ambos túneles, con la finalidad de permitir la evacuación por el conducto más seguro. Conviene hacer coincidir los túneles de evacuación con las bahías de parqueo de emergencia descritas en la sección 14.2.3.

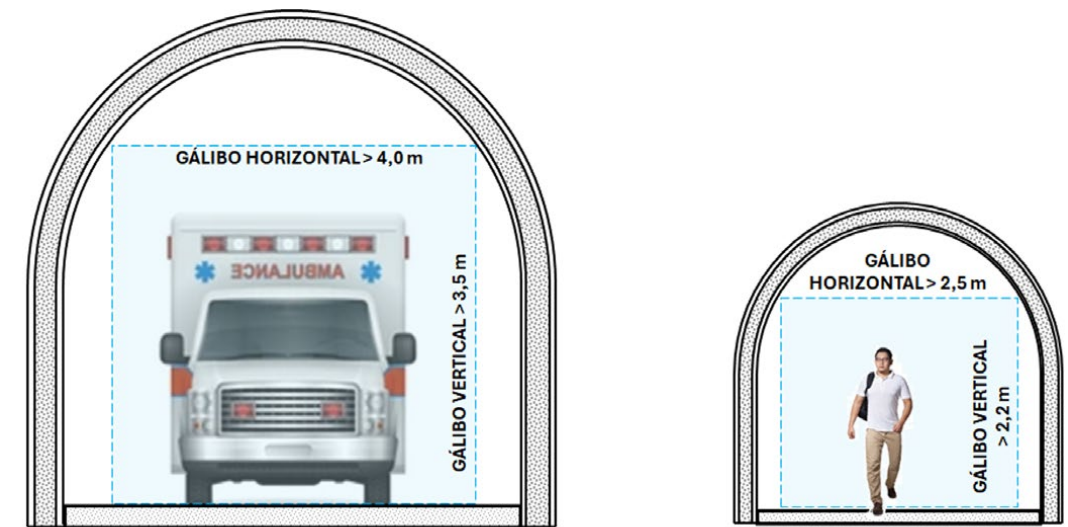


Figura 74. Sección transversal típica túnel de evacuación (izquierda: vehicular, derecha: peatonal)

### 14.4.3 Nichos de emergencia

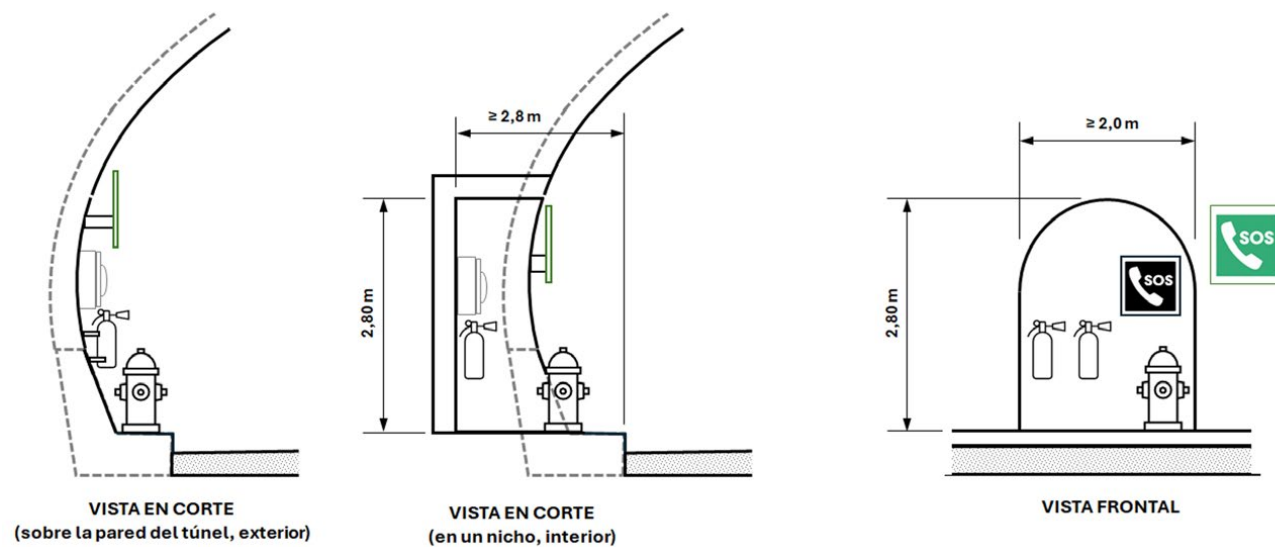
Además de las bahías de parqueo de emergencia y los túneles de evacuación, se requiere instalar equipos para comunicación de emergencias con el centro de control del túnel, con su respectiva señalización e incluyendo postes SOS, extintores o hidrantes. Estos equipos deberán ser instalados en las paredes laterales del túnel, directamente o en nichos excavados lateralmente.

Las dimensiones mínimas de los nichos de seguridad deben ser de 2,0 m de largo, 2,8 m de profundidad y 2,8 m de alto. En el caso de ser instalados sobre la pared, deberán acomodarse en una configuración

cercana a esas dimensiones, ajustado al espacio disponible.

Se deberán instalar a una distancia máxima de 250 m dentro del túnel, pudiendo alternarse de lado en túneles bidireccionales, siempre que se respete tal distancia en ambos sentidos. Los túneles de evacuación deben contar con un nicho de emergencia. En estos casos, los nichos de emergencia no deberán obstaculizar el paso dentro del túnel de evacuación.

En la Figura 75 se ilustra el esquema de los nichos de emergencia.



**Figura 75.** Configuración y esquema de los nichos de emergencia.

#### 14.4.4 Estaciones de auxilio

Las estaciones de auxilio son puntos distribuidos a lo largo del túnel, cuyo propósito principal es la comunicación de emergencias. En el punto de la estación deberá disponerse de un dispositivo de alarma para la comunicación directa con el centro de control (teléfono tipo SOS o poste SOS, con operación full dúplex y modo de manos libres). Las estaciones de auxilio se colocarán de manera equidistante de los nichos de seguridad, en forma alternada.

### 14.5 Sistemas y equipos por instalar en el túnel

La operación segura del túnel, así como la gestión del riesgo, requieren la instalación de sistemas y equipos eléctricos, electrónicos, hidráulicos y mecánicos según lo que se establece en esta sección, en la Tabla 19 y en la Tabla 20.

En todos los casos, todos los sistemas y equipos deben ubicarse fuera del gálibo establecido para el túnel, en el espacio disponible o, bien, en el espacio provisto específicamente en el diseño.

En la Tabla 19 se establece el equipo mínimo requerido para la operación segura del túnel. En tanto, en la Tabla 20 se indica el equipo mínimo requerido para la gestión de riesgos y situaciones de emergencia. Los requisitos mínimos de equipamiento, en ambos casos, dependen de la categoría del túnel, según lo establecido en la Figura 68.

#### 14.5.1 Suministro de energía

El túnel deberá disponer de un sistema de alimentación eléctrica, al cual deberán estar conectados todos aquellos elementos básicos para la seguridad. Es importante garantizar el funcionamiento de la mayor parte de los equipos eléctricos y electrónicos para satisfacer las necesidades de operación ante cualquier eventualidad en su funcionamiento.

El suministro de energía deberá tener una reserva en caso de que el sistema principal falle y se recomienda la utilización de un dispositivo de alimentación ininterrumpida (UPS, alimentados por generadores dedicados), en caso de que sea una pérdida total del suministro de alimentación energética. El sistema de suministro de energía deberá cumplir los requerimientos de la norma NFPA 502, sección 12.4.

**Tabla 19.** Equipamiento requerido para la operación según la clasificación del túnel.

EQUIPAMIENTO REQUERIDO	A	B	C	D	E
<b>SISTEMA DE ILUMINACIÓN</b>					
Sistema permanente	✓	✓	✓	✓	✓
Luminarias de seguridad	✓	✓	✓	○	○
Luminarias de emergencia (evacuación)	✓	✓	✓	R	○
<b>SISTEMA DE VENTILACIÓN</b>					
Ventilación mecánica	✓	✓	R	○	○
Anemómetros	✓	✓	R	○	○
Sensores de visibilidad	✓	✓	R	○	○
Detectores de gas CO	✓	✓	R	○	○
Detectores de gas NOX	○	○	○	○	○
<b>SISTEMA DE COMUNICACIÓN</b>					
Altavoces y megafonía	✓	✓	✓	R	○
Radio	✓	✓	R	R	○
Emisora	✓	○	○	○	○
<b>SISTEMA DE CONTROL DE TRÁFICO</b>					
Barreras exteriores	✓	✓	✓	R	R
Semáforos exteriores	✓	✓	R	○	○
Semáforos interiores	✓	○	○	○	○
Sistema de control del gálibo	✓	✓	✓	✓	✓
Circuito cerrado de televisión (CCTV)	✓	✓	R	○	○
Centro de control	✓	✓	○	○	○
Sistema de detección de vehículos	✓	✓	✓	○	○
Estaciones meteorológicas	✓	✓	○	○	○
<b>AUTOMATIZACIÓN</b>					
Sistema Scada	✓	✓	R	○	○
Controlador principal redundante	✓	✓	✓	○	○
Red de conectividad	✓	✓	R	○	○
Detección automática de incidentes	✓	✓	R	○	○
Detección de incendios	✓	✓	✓	○	○
Alarma manual	✓	✓	○	○	○
Alarma automática	✓	✓	✓	○	○
<b>SISTEMA ELÉCTRICO DE RESPALDO</b>					
Planta eléctrica	✓	✓	✓	R	○
Doble circuito eléctrico	✓	R	○	○	○
Sistema ininterrumpido de energía (UPS)	✓	✓	✓	○	○

✓Obligatorio    R: Recomendado    ○Opcional

**Tabla 20.** Equipamiento requerido para la gestión de emergencias según la clasificación del túnel.

EQUIPAMIENTO REQUERIDO	A	B	C	D	E
<b>SISTEMA PARA LA GESTIÓN DE EMERGENCIAS</b>					
Teléfonos de emergencias SOS	✓	✓	✓	✓	○
Túneles de evacuación vehicular	✓	✓	○	○	○
Túneles de evacuación peatonal	✓	✓	R	R	○
Aceras laterales	✓	✓	✓	✓	✓
Nichos de emergencia	✓	✓	✓	R	R
Bahías de parqueo de emergencia	✓	✓	R	○	○
<b>SISTEMA DE CONTROL DE INCENDIOS</b>					
Gabinete (extintores + manguera)	✓	✓	✓	✓	R
Extintores portátiles	✓	✓	✓	✓	R
Conexiones de manguera clase I (NFPA 14)	✓	✓	✓	✓	R
Hidrantes dentro del túnel	✓	✓	✓	✓	R
Hidrantes en los portales	✓	✓	✓	✓	R
Red hidráulica para la extinción de incendios	✓	✓	✓	✓	R
Sistema fijo de extinción de incendios	✓	✓	✓	✓	R

### 14.5.2 Sistemas de ventilación

La ventilación tendrá como función principal reducir a los límites aceptables la concentración de los gases tóxicos y humos expulsados por los motores de combustión interna. Además, deberá permitir el control de los flujos de aire para la gestión del humo en caso de incendios dentro del túnel. Se determinará el sistema de ventilación más conveniente mediante un estudio técnico específico. Puede utilizarse como guía la norma NFPA 502, capítulo 11.

Los sistemas de ventilación mecánicos más utilizados son los siguientes:

- Sistemas de ventilación longitudinal.
- Sistemas de ventilación transversal.
- Sistemas de ventilación híbridos.

El proyecto de ventilación del túnel debe abordar los siguientes aspectos como mínimo:

- Producción de Dióxido de Carbono,
- opacidad,
- efecto pistón,
- características de crecimiento y composición del tránsito,
- características del ducto de aire:
  - área transversal,
  - longitud,
  - pérdidas por fricción,

- o otras pérdidas,
- o presiones en el ducto,
- o densidad del aire y,
- o rendimiento de los equipos.
- operación ante incendios y,
- efecto de los vientos externos.

Mediante la evaluación de estos factores y considerando el riesgo ante incendio, se deberá crear una estrategia de ventilación que permita maximizar el uso del sistema de ventilación del túnel para el control y la remoción del humo y gases contaminantes.

De igual forma, deberá existir ventilación de emergencia, que permita asistir sin interrupción durante las labores de evacuación y rescate.

Las partes mecánicas del sistema de ventilación expuestas al humo deben tener la capacidad de funcionar, como mínimo, durante 2 horas continuas a temperaturas de al menos 200°C, de conformidad con la norma RD 635/2006 (Ministerio de Fomento del Gobierno de España, 2006).

### 14.5.3 Sistemas de iluminación

Se requiere de un sistema permanente de iluminación en el interior de los túneles viales. El objetivo principal de la iluminación es el de suministrar a los conductores una visibilidad apropiada, bajo cualquier condición. De igual forma, se busca que el conductor sea mínimamente impactado al pasar de un ambiente naturalmente iluminado, a otro oscuro, como lo puede ser el interior de un túnel o viceversa.

La iluminación del túnel deberá ser controlada, de tal manera que la transición lumínica conforme se avance sea gradual, permitiendo de esta forma una mejor adaptación del ojo del conductor.

Deberá prestarse especial atención en las zonas de entrada, umbral, transición y salida del túnel. En donde será necesario fijar los niveles mínimos de luminancia de acuerdo con las condiciones del tránsito, longitud del túnel y la sección transversal.

Para garantizar la correcta iluminación dentro del túnel ante una eventualidad, deberá poseerse iluminación de seguridad, de evacuación y permanente si el túnel así lo requiere.

El sistema de iluminación será definido mediante un estudio técnico específico que cumpla con las características indicadas en esta sección.

Además del sistema de iluminación permanente, se requiere de un sistema de iluminación de seguridad, para la gestión de las emergencias, incluso en el caso de una falla o corte del suministro de energía eléctrica, de manera que pueda realizarse la evacuación del túnel con el uso de los vehículos. También en el caso de evacuación peatonal, se requiere de iluminación para orientar a las personas desplazándose a pie en el evento de una emergencia dentro del túnel. Esta última debe ubicarse a una altura menor a 1,2 y ser proyectada de manera que facilite la salida de los usuarios.

### 14.5.4 Sistemas de comunicación y alerta

Con la finalidad de garantizar una comunicación entre usuarios y el operador del túnel, se deberá disponer de equipos con sistemas de comunicación y alerta, que permitan establecer de una manera ágil la comunicación de incidentes con el operador para la rápida toma de decisiones y posterior desplazamiento de unidades en caso de requerirse, como por ejemplo el inicio de un incendio en el interior del túnel que pueda ser rápidamente controlado.

Dentro de los dispositivos de comunicación más utilizados en túneles para uso vehicular, se encuentran los siguientes.

- a) **Teléfonos de emergencia:** Los teléfonos de emergencia a un lado de la vía permiten a los usuarios comunicarse directamente con los encargados del túnel, la policía de tránsito o bomberos ante cualquier eventualidad.
- b) **Pulsadores de alarma:** Permiten a los usuarios enviar señales de alarma al centro de control de manera directa. En algunos casos son herramientas bastantes útiles ante la atención de incidentes, sobre todo en túneles poco automatizados.
- c) **Detección automática de incidentes (DAI):** Son sistemas de asistencia computarizada que permiten por medio de un análisis de secuencias de imágenes de vídeo, detectar posibles incidentes en el túnel y así informar a los operadores para tomar las medidas necesarias de atención del incidente. Algunos posibles incidentes son los siguientes:
  - vehículos detenidos en la vía,
  - vehículos circulando en sentido contrario,
  - reducciones de la velocidad,
  - peatones en la vía,
  - caída de objetos en la calzada,
  - fuego, humo y
  - movimientos en zonas de acceso restringido.
- d) **Retransmisión de emisiones de radio**

Al ser un túnel un espacio cerrado y reducido, la propagación de ondas de radio en su interior se ve afectada. Debido a esto, será necesario la instalación de equipos que permitan retransmitir las frecuencias necesarias, por ejemplo:

- servicios de rescate (Cruz Roja, Bomberos, etc.),
- frecuencias FM públicas y
- teléfonos móviles.

Para ello, el desarrollador deberá verificar que se cumplan las normativas nacionales relacionadas con el uso de radiofrecuencias para los servicios indicados, según los requerimientos técnicos y legales vigentes establecidos por la Superintendencia de Telecomunicaciones, de acuerdo con la Ley General de Telecomunicaciones, No. 8642.

Los sistemas de telecomunicaciones del túnel, por otra parte, deberán estar alineados

con las políticas nacionales de ciber seguridad vigentes, establecidas a través de la Dirección de Ciberseguridad del Ministerio de Ciencia, Innovación, Tecnología y Telecomunicaciones (MICITT).

**e)** Megafonía

En algunos casos deberá evaluarse la posibilidad de incluir dispositivos que permitan dirigirse de manera directa a los usuarios del túnel. Los más utilizados son los altavoces para proporcionar información o indicar instrucciones, los altavoces con función de sirena para indicar peligros y altavoces instalados en las salidas de emergencia para ayudar a la ubicación.

**f)** Redes telemáticas

En los casos donde se considere necesaria la utilización de redes telemáticas para conectar dispositivos dentro del túnel o en su entorno, se recomienda que las mismas sean diseñadas bajo un estándar industrial.

Para el diseño de ductos, se recomienda utilizar las normas ANSI/NETAMTS-2023 y ANSI/TIA-1005-A para el diseño de los ductos de cableado y pruebas de puesta en operación. Para el cableado utilizar las normativas ANSI/TIA-606-B, ANSI/TIA-606-C, ANSI/TIA-568.3, ANSI/TIA-568 A, ANSI/TIA-568B, ANSI/TIA-1005-A y ISO/IEC 11801-3 (Cableado genérico para locales del cliente -- Parte 3: Industrial).

Con el fin de garantizar la interoperabilidad de los dispositivos a lo largo del tiempo, se debe establecer un estándar de protocolo de comunicación acorde con las regulaciones para Costa Rica, de manera que en el futuro no se tengan problemas de comunicación en la operación del túnel. A nivel de equipos terminales de campo los protocolos más utilizados son: Modbus RTU, EtherNet/IP, Ethernet TCP/IP, Modbus TCP/IP, Profinet y Profibus.

## 14.5.5 Sistemas de control del tránsito

En túneles con alta intensidad de tránsito (Categoría A y B) es necesaria la implementación de sistemas de video vigilancia para controlar las condiciones del tránsito en tiempo real. Para ello, se disponen cámaras en intervalos regulares, proporcionando así una cobertura total del túnel que permite, entre otras cosas, contabilizar la cantidad de vehículos que circulan por el túnel y la identificación de posibles incidentes.

Además de los sistemas de video, el sistema de control del tránsito incluye sensores o dispositivos para la medición de la densidad del tráfico, señales luminosas, pantallas de mensajes y señalización fija.

La señalización cumplirá la función de informar adecuadamente al usuario mientras circula por el túnel. Deberá velarse por la ubicación de la señalización dentro del túnel y la buena visibilidad. Se deberán respetar las disposiciones dadas por el Manual Centroamericano de Dispositivos Uniformes para el Control de Tránsito (SIECA, 2000).

De igual manera, se recomienda la aplicación de sistemas de balizamiento fijos o móviles para regular o impedir el ingreso al túnel durante una eventualidad o para labores de mantenimiento programados.

## 14.5.6 Sistema de control de incendios

Durante la ocurrencia de un incendio dentro de un túnel vial, los mayores peligros para los usuarios son el humo tóxico y el fuego. Por otra parte, la intensidad del fuego puede provocar daños severos a la infraestructura. Por ello, el túnel deberá estar equipado con sistemas de detección y extinción de incendios como medios para combatir un posible incendio dentro del túnel, con el menor impacto sobre los usuarios, personal de emergencia y la infraestructura.

El sistema de control de incendios deberá diseñarse de acuerdo con lo establecido en la norma NFPA 502, capítulo 7 (2023 o su versión más reciente).

### 14.5.6.1 Equipamiento contra incendios

Para la detección automática del fuego se usan detectores basados en el calor y el índice de aumento de temperatura, mientras que para la detección de humo son usadas pantallas de oscurecimiento por humo.

El proyecto deberá poseer y dimensionar los sistemas de combate contra incendios. Deberán incluirse al menos, los siguientes aspectos:

- **Red de incendio con todo su equipamiento:**
  - o tanque de agua,
  - o estación de bombeo,
  - o red de tuberías antiincendios y
  - o válvulas.
- **Sistema de combate manual:**
  - o carretes de mangueras,
  - o teléfono,
  - o hachas,
  - o luces de emergencia,
  - o extintores manuales y
  - o equipamiento de protección personal.
- **Sistema de manejo de aire con todo su equipamiento:**
  - o ventiladores o extractores de humo,
  - o celosías anti-humo,
  - o sistemas de iluminación antipánico y
  - o programa de contingencia en la operación de la ventilación antiincendios.
- **Cortinas de agua**

### 14.5.6.2 Sistema de prevención de incendios

El sistema de prevención contra incendios debe incluir medidas estructurales y organizacionales, establecidas claramente dentro del PGR elaborado para la etapa de operación y mantenimiento.

Se requiere un sistema automatizado para la detección de humo y fuego, así como un sistema automático de extinción para atenuar el fuego, permitiendo así que los servicios de respuesta de emergencias puedan llegar hasta el sitio del evento. El sistema deberá estar centralizado y disponible en el Centro de Control de operaciones del túnel.

#### 14.5.6.3 Sistema de detección de incendios

Todos los túneles, excepto los de categoría E, deberán tener al menos dos medios independientes de identificación y localización del fuego.

En caso de que el túnel no cuente con vigilancia permanente (24 horas, 7 días por semana), se requiere la instalación de un sistema de detección automática del fuego acorde con el numeral 7.4.6 de la norma NFPA 502 (2023).

Los circuitos cerrados de televisión (CCTV) con dispositivos que indiquen el flujo de tráfico o cámaras de seguridad para la identificación y localización del fuego, se permiten si el túnel cuenta con vigilancia permanente, acorde al numeral 7.4.3 de NFPA 502 (2023).

Cuando sean instalados sistemas fijos contra incendio a base de agua en el interior del túnel, se deberá proveer un sistema de detección de incendio automático acorde con el numeral 7.4.6 de NFPA 502 (2023).

Los espacios auxiliares dentro del túnel, como estaciones de bombeo, cuartos de depósito y otras áreas, deberán también ser supervisados por un sistema automático de alarma contra incendio acorde al numeral 7.4.6 de NFPA 502 (2023).

Los paneles de detección y alarma de incendio (FACP) deben cumplir lo requerido en el numeral 7.4.7 de NFPA 502 (2023).

#### 14.5.6.4 Sistemas de extinción de incendios

Es necesario que todos los túneles, excepto aquellos de la categoría E, dispongan de un sistema hidráulico para la extinción de incendios (aunque para túneles en categoría E, también es recomendado). Este sistema deberá cumplir lo establecido en la norma NFPA 502 (2023), capítulo 10.

Las señales de las bombas contra incendio, así como su estado de operación y el de los motores correspondientes deben ser captadas y trasladadas al Centro de Control de operaciones.

Los componentes del sistema de extinción (gabinetes, hidrantes, rociadores, etc.) no deberán quedar expuestos a daño mecánico o a colisiones vehiculares.

Los extintores portátiles en los nichos de seguridad deberán estar alojados en gabinetes de acero inoxidable, cumpliendo con la norma NFPA 502 (2023), numeral 7.9. Deberán estar pintados en color rojo y distanciados a cada 90 m como máximo dentro del túnel.

Los túneles de las categorías A, B y C requieren sistema fijo contra incendio, a base de agua, siguiendo los lineamientos de la norma NFPA 502 (2023), capítulo 9.

#### 14.5.7 Sistema de monitoreo de gases y visibilidad

La detección de gases es relevante para conocer la concentración de Monóxido de Carbono (CO), producido por la combustión de los motores y, de manera optativa, de óxidos de Nitrógeno (óxido nítrico (NO), dióxido de Nitrógeno (NO<sub>2</sub>), etc.). Los requerimientos para los sensores de gases son los siguientes:

- Medición principal: infrarrojo.
- Rango de medición: 0 a 300 ppm.
- Altura de instalación:  $\geq 2$  m.
- Protección: IP 67.
- Salida: 4 mA a 20 mA y/o contacto de relé y/o unidad de control (Ethernet o serial).
- Rango de temperatura de trabajo:  $-25^{\circ}\text{C}$  a  $+55^{\circ}\text{C}$ .
- Funciones correctivas: ajuste automático.

La visibilidad o factor de extinción, también debe ser monitoreada. Es afectada por el contenido de hollín que generan los motores diesel, especialmente de vehículos pesados. El equipo tiene los siguientes requerimientos:

- Rango de medición de visibilidad: 0 a 15 km.
- Altura de instalación:  $\geq 2$  m.
- Protección: IP 67.
- Salida: 4 mA a 20 mA y/o contacto de relé y/o unidad de control (Ethernet o serial) o protocolos industriales.
- Rango de temperatura de trabajo:  $-25^{\circ}\text{C}$  a  $+55^{\circ}\text{C}$ .
- Funciones de corrección: ajuste automático.

La velocidad del aire es un factor importante por monitorear, por medio de anemómetros. Para estos sensores, se requiere:

- Rango de medición:  $-15$  m/s a  $+15$  m/s, con capacidad de medición a intervalos de tiempo de 1 min en operación normal y 3 a 10 s en caso de incendio.
- Altura de instalación:  $\geq 2$  m.
- Protección: IP 67.
- Salida: 4 mA a 20 mA y/o contacto de relé y/o unidad de control (Ethernet o serial) o protocolos industriales.
- Rango de temperatura de trabajo:  $-25^{\circ}\text{C}$  a  $+55^{\circ}\text{C}$ .
- Funciones de corrección: ajuste automático.

#### 14.5.8 Sistema de control de gálibo

El objetivo de este sistema es controlar la altura de los vehículos que puedan ingresar al túnel, en función de la altura máxima establecida en el diseño. Es posible el uso de sistemas electrónicos y sistemas mecánicos.

#### 14.5.9 Sistemas de automatización

Por medio de la automatización es posible integrar todos los sistemas y equipos instalados en el

túnel, siempre y cuando tengan la capacidad de ser conectados de manera electrónica. El sistema de automatización facilita y mejora significativamente la gestión operativa del túnel y la respuesta ante los riesgos. Por ello, es importante su instalación.

El sistema de automatización, como requisito general, debe ofrecer garantía de operación incluso cuando no se disponga de la presencia de personal de control, incluso cuando falle la comunicación entre el Centro de control y los equipos instalados, siguiendo lo establecido en el Plan de Operación del túnel.

El sistema de automatización integra gran cantidad de dispositivos y de información. Por ello, es necesario que disponga de todos los elementos necesarios para su operación, incluyendo un controlador principal, el controlador de periféricos o unidades terminales, adecuadamente instaladas y protegidas. Además, la integración se facilita por medio de la instalación y operación de un sistema SCADA, constituido por un conjunto de aplicaciones de software y con interfaces apropiadas para los usuarios, que permite la supervisión, control y adquisición de todos los datos.

#### 14.5.10 Centro de control

El Centro de control es una instalación física donde se realiza la gestión de la operación del túnel. Por lo tanto, se integran todos los mecanismos de monitoreo y control instalados en la obra, visualizados por medio de algún tipo de interfaz gráfica que permita a los controladores gestionar la operación del túnel.

El requerimiento del Centro de control depende de la categoría del túnel, definida de conformidad con la Figura 68. En aquellos casos donde no se considere obligatorio, se requiere al menos de un nicho para la colocación de los equipos centralizadores de los datos que se generan en los instrumentos instalados en el túnel. En el caso de túneles sucesivos, separados entre sí a menos de 3 km, será posible que estos sean gestionados desde el mismo Centro de control.

## 15 Sistemas de transporte masivo

No existe en Costa Rica, de momento, un sistema de transporte masivo de personas (metro). Por ello, se ofrecen en este capítulo, propuestas específicas para el desarrollo de esta infraestructura en las ciudades de Costa Rica.

### 15.1 Factibilidad de un sistema de transporte masivo de personas

Como fases anteriores a la otorgación de la factibilidad de un proyecto de sistema masivo de transporte (tipo Metro, o variantes tipológicas del mismo), se pueden detallar dos fases distintas: Estudios de Prefactibilidad y Estudios de Factibilidad.

Cada etapa tiene sus alcances y funciones, claramente definidos y enfocados a desarrollar de forma orgánica y funcional un importante número de estudios, los cuales son necesariamente multidisciplinarios y requieren un compromiso fuerte por parte de los numerosos actores que se verán involucrados: las distintas instancias del estado (por medio de sus Ministerios competentes, Instituciones autónomas, Municipalidades, Autoridades de Control y reguladoras, etc.), las fuentes potenciales de financiamiento (Ministerio de economía, bancos multilaterales, entidades financieras, sistema bancario nacional, etc.), los actores económicos y productivos involucrados (tanto en la fase de construcción de la infraestructura, como en la fase de operación), y los agentes productivos afectados positiva o negativamente por la nueva infraestructura.

Finalmente, parte importante del trabajo en las fases iniciales del desarrollo debe ser destinado a un trabajo transversal de concientización ciudadana y comunicación, con el fin de realizar una necesaria actividad pedagógica sobre los beneficios y costos tanto de la situación sin proyecto como la del proyecto operando, sondear la real aceptación de la población sobre las decisiones que se puedan tomar en las sedes competentes, informar debidamente a los potenciales afectados (expropiaciones, sistemas de transporte afectados por la inserción de un sistema competidor, etc.) y mejorar la aceptación social de las externalidades negativas que cualquier proceso puede aportar durante la fase de implementación (como la afectación durante las obras de construcción, por ejemplo). También será necesario evaluar el sistema legal para determinar cuál sería la vía idónea para el desarrollo del proyecto.

### 15.2 Estudios de Prefactibilidad

Los estudios de Prefactibilidad tienen entre sus primeros objetivos, realizar un diagnóstico sobre la problemática del transporte urbano y en general de la movilidad del Área Metropolitana, a fin de comprender los efectos de la instauración de un nuevo sistema sobre demanda captada y generada por el mismo (las cuales deben ser estudiadas de forma específica) y la posible integración del nuevo sistema con los medios de transporte existentes.

Existen ya, en el caso del Área Metropolitana de San José, diversos insumos importantes que deben ser considerados, entre los cuales se pueden citar el Plan Nacional de Transportes de Costa Rica 2011-2035 (elaborado por la empresa española INECO), así como sus versiones anteriores de los años 1981 y 1995;

las propuestas de Ordenamiento Territorial del Gran Área Metropolitana, incluyendo el PRUGAM (2011), el POTGAM (2012) y el Plan GAM 2013, este último aprobado a inicios del año 2014; la Propuesta para la implantación de un sistema TREN-TRAM en el área del Valle Central de Costa Rica (FEVE, 2011); los Anuarios de la información de tránsito (publicados anualmente por el MOPT) y los estudios de Sectorización y Modernización del Transporte Público realizados en los últimos años, para citar algunos de los estudios existentes.

Algunos de dichos estudios han permitido ya identificar cuáles son los principales flujos de desplazamiento de personas y vehículos en el Gran Área Metropolitana, por ejemplo, así como la identificación de la demanda de transporte público, considerando también las densidades poblaciones y las relaciones origen-destino durante la última década.

Como ejercicio temprano, deben ser definidos claramente los grupos sociales beneficiados o perjudicados con el Proyecto, así como las entidades que se verán involucradas en el mismo, tanto en su construcción como en su posterior operación y mantenimiento. A partir de este diagnóstico, deben ser planificadas, desde las más tempranas fases, las acciones específicas pensadas para reducir el riesgo de conflictos sociales en relación con el proyecto, así como la ocurrencia de conflictos interinstitucionales sobre competencias, responsabilidades presupuestarias, entre otros.

En segundo lugar, es necesario adaptar los estudios de demanda realizados hasta la fecha (incluidos en los documentos mencionados) o, si fuese necesario, realizar nuevos estudios de demanda con encuestas origen-destino entre las distintas zonas de transporte definidas en el Plan Nacional de Transportes (PNT) y pertenecientes al GAM. El proceso debe necesariamente incluir la revisión y calibración del modelo de demanda, en caso de utilizar un modelo preexistente, así como la definición de los escenarios de modelización, con el fin de determinar la demanda proyectada a los años horizonte (típicamente incluyendo escenarios a los 10 y 20 años desde la fecha de disponibilidad de datos) que se definan para el proyecto.



**Fotografía 35.** Sistema BRT en fase de saturación (Sistema Transmilenio, Bogotá).

Resulta claro que la previsión de los niveles de demanda actual hacia un sistema de transporte que no existe y que no se ha vislumbrado para las próximas décadas, presenta necesariamente un nivel de incertidumbre que hay que tener en cuenta. Es muy importante considerar que la mayor o menor calidad de estos estudios de demanda puede afectar de forma significativa el resultado del estudio de Prefactibilidad y, finalmente, también la calidad del proyecto que se vaya a desarrollar. Efectivamente, existen dos riesgos muy frecuentes y que de igual manera amenazan la sostenibilidad del proyecto: por un lado, la subestimación de la demanda, lo cual lleva a subestimar la capacidad del sistema que se vaya a implementar, con la consecuencia de que el mismo se encuentra saturado después de un periodo muy inferior a su vida útil esperada. Ver por ejemplo la Fotografía 35, correspondiente al caso del Sistema Transmilenio en Bogotá, Colombia, donde la demanda resultó superior a lo previsto y a la capacidad del sistema. El incremento de vehículos y frecuencias para cubrir la demanda ha llevado a situaciones como la mostrada en la foto, en la que una interminable fila de autobuses llega a saturar el corredor casi impidiendo el movimiento de los mismos autobuses.

Por el lado opuesto, la consideración de una demanda excesiva respecto a la que efectivamente se pueda producir, lleva a diseñar sistemas con excesiva capacidad, con un costo no sostenible que es pagado por todos los contribuyentes o, en caso de concesiones, que lleva a posteriores reclamaciones por parte del concesionario por la reducción de sus ingresos esperados. Un ejemplo de esta condición es la autopista M12, entre Madrid y Barajas (ver Fotografía 36). La adopción de técnicas oportunas para estos estudios reduce notablemente las posibilidades de errores en este sentido y es importante que la fiscalización de los resultados del estudio de demanda sea realizada por una entidad independiente y autónoma con respecto al (los) promotor(es) del proyecto.

En el caso de la autopista M12, se tuvo una demanda efectiva real de 9.000 vehículos/día, inferior a la demanda prevista en fase de proyecto (50.000 vehículos/día), con la consecuente no viabilidad del esquema de concesión y la no rentabilidad del proyecto (que costó cerca de 600 MUSD para unos 9,5 km de trazado). El concesionario presentó en enero de 2014 un proceso de concurso de acreedores después de menos de 9 años de la puesta en marcha de la infraestructura, con una deuda estimada en más de 700 MUSD, frente a un contrato de concesión previsto en 25 años.



**Fotografía 36.** Autopista de pago en concesión (M12, Barajas - Madrid).

Una vez establecida claramente la demanda, el paso siguiente consiste en la definición de las alternativas técnicas de sistemas de transporte masivo desarrolladas a nivel conceptual, definiendo alternativas de trazado, alternativas de tipo de infraestructura (Metro, corredores tipo BRT, Tranvía, Tren metropolitano, etc.) y de modalidad de construcción (superficial, subterránea, en viaducto, o combinación entre ellas).

En esta fase, algunas de estas variaciones podrán ser descartadas en forma temprana, a partir de evaluaciones preliminares como los Análisis Multi-Criterio –MCA– o similares. Para las alternativas seleccionadas, se deberán estudiar las características del trazado en su conjunto y sus componentes (planta y elevación, secciones típicas, posición y dimensión de estaciones o paradas según el sistema, material rodante, etc.).

El objetivo de esta fase es conocer con la debida precisión (congruente con el nivel de detalle del estudio en esta fase, en el cual no existirá una ingeniería detallada sino solo una ingeniería conceptual) la expectativa de costos y plazos de ejecución de la infraestructura en cada una de sus alternativas planteadas, su cronograma de inversión, así como los costos operativos y de mantenimiento en el horizonte de proyecto.

A este respecto, es importante alertar sobre la adopción de supuestos costos kilométricos de sistemas completos (y complejos), a partir de referencias internacionales, con el fin de justificar la adopción de un sistema en contra de otro o de una solución constructiva en detrimento de otra. En ocasiones, los importes referenciales que se consideran en la fase de Prefactibilidad de proyectos de sistemas de transporte (o en fases anteriores) proceden de la elección (arbitraria) de costos de realización de proyectos de otras experiencias que, implícitamente, podrían favorecer una solución preconcebida. No debe ser olvidado que existen en el mundo centenares de proyectos de sistemas de transportes, cuyos costos de realización pueden variar en algunos ordenes de magnitud incluso dentro de una misma área geográfica, por una infinidad de factores, tales como: complejidad del trazado, costo de las expropiaciones y reasentamientos a realizar (que a veces pueden estar incluidos o no en el presupuesto), combinación de características únicas (dimensiones, demanda, tipo de servicio, estaciones, nivel tecnológico y de automatización, etc.), geología, posición del nivel freático, sismicidad u otras características peculiares del lugar de implantación, realización de una nueva línea o extensión de líneas existentes, extensión de interferencias, condicionantes medioambientales o de seguridad; condiciones de mercado; gestión y experiencia tanto del licitador como de los potenciales contratistas; valores de referencia de impuestos, costos de estudios, proyectos, licitaciones y supervisión, entre muchos otros. Aunque sería posible citar una elevada cantidad de casos por cada uno de estos aspectos, se omite tal discusión por estar fuera del enfoque del artículo.

Es evidente que la combinación de todos estos factores es única para cada proyecto y que, dada la inmensa variabilidad de costos globales obtenidos en proyectos ya realizados (en proyectos de metros subterráneos, por ejemplo, se pueden mencionar costos promedio que varían entre los 15 y los 400 millones de dólares por kilómetro), “[...] no tiene sentido usar resultados ex post de otros proyectos para una previsión ex ante del costo de un nuevo proyecto de metro. Los costos de un proyecto nuevo deben ser estimados de forma convencional, con cantidades y precios unitarios, aunque esto se pueda hacer solo por macro conceptos [...]” (Flyvberg et al, 2008). Si bien la mención original de estos autores se refiere a proyectos de metro subterráneo pesado, en nuestra opinión esta afirmación es extensible a proyectos de sistemas de transporte masivo urbano en general.

Pues bien, una vez estimados los costos y plazos esperados de cada alternativa, se deben evaluar los aspectos económicos del Proyecto para evidenciar sus beneficios esperados, su rentabilidad social, a través de los indicadores normalmente considerados en proyectos de transportes y, finalmente, su sostenibilidad en el horizonte del proyecto. El resultado del proceso debe ser la identificación de la

alternativa óptima, si existe (la selección de la alternativa solo debería ser efectuada entre aquellas que tengan rentabilidad social positiva).

Cabe destacar que existen en la actualidad discrepancias –no resueltas– sobre las metodologías a adoptar para la estimación de los beneficios de un proyecto de transportes de este tipo. Por ejemplo, al considerar la variable de ahorro de tiempo de viaje, se presentan en su cálculo indecisiones recurrentes sobre los parámetros que se deben asignar al valor unitario del “tiempo ahorrado”. También otros elementos resultan de cuantificación muy difícil (como los ahorros en contaminación atmosférica, en ocurrencia de enfermedades respiratorias, en la reposición vehicular, etc.). Por ello, los análisis pueden no llegar a producir una rentabilidad social positiva de un proyecto con inversión elevada.

Por otro lado, no todos los expertos se encuentran favorables a considerar otras fuentes de rentabilidad social como serían por ejemplo los incrementos de valor catastral relacionados con la instauración del nuevo sistema de transporte, bajo el argumento de que dichos beneficios podrían estar duplicados en términos económicos. A este respecto, es interesante considerar cómo numerosos estudios han manifestado que se registran fuertes incrementos de valor en los inmuebles (por medio de transacciones registradas) en las zonas en las que se ubicarán estaciones de metro subterráneas, no solo desde el comienzo del funcionamiento del sistema, sino desde el momento mismo del anuncio de la creación de la línea, es decir, cuando aún no es posible cuantificar ningún efectivo “ahorro de tiempos de traslado”. Esta observación parecería demostrar que no se trata de beneficios duplicados, y es también sintomática de la complejidad de los asuntos a tratar en la fase de evaluación de alternativas, que pueden diferir en modalidad de transporte, tipología de servicio, modalidad constructiva y aceptación social.

Como conclusión de estas consideraciones, es importante resaltar las numerosas dificultades que presentan las complejas evaluaciones en fase de Prefactibilidad, las cuales exigen tanto esfuerzo como la realización de un proyecto de detalle, el cual, al contrario, podría verse como una aplicación mucho más mecánica de normas y convenciones a una solución ya definida. Por ello, es muy importante que las tareas de esta fase sean realizadas por equipos multidisciplinarios de la mayor experiencia posible, tanto en la parte de realización misma por parte de un consultor, como por parte de la fiscalización del estudio que debe realizar el propietario.

Es importante también que los estudios realizados por parte de los promotores directos del Proyecto (sean ellos organismos públicos o actores privados) sean comprobados por medio de estudios independientes, apoyados por datos robustos que garanticen la rendición de cuentas sobre la calidad de las estimaciones, con la debida implementación de políticas de gestión del riesgo del proyecto en todas sus etapas (Flyvberg, 2009). Esto también por el hecho de que existe una cierta tendencia en el campo de los mega-proyectos, que algunos estudiosos (Flyvberg, op.cit.) han bautizado como un “Darwinismo invertido” o “sobrevivencia del menos apto”, esto es: no son los mejores proyectos los que se realizan, sino los que mejor adoptan la fórmula “subestimación de costos + sobreestimación de beneficios = financiación” para conseguir su viabilidad. Bajo esta óptica, las problemáticas no afrontadas, subestimadas o afrontadas con metodologías erróneas o afrontadas con un sesgo hacia una solución predeterminada, cuando llevan a aprobar una solución de proyecto cuya aprobación no debería haberse producido, llevan a encadenar problemas presupuestarios, contractuales o administrativos de envergadura mucho mayor o de difícil retroceso.

## 15.3 Estudios de Factibilidad

A continuación, se ilustran los principales tipos de estudios a realizar en esta fase y se presentan elementos de reflexión, basados en experiencias en proyectos reales, con el objetivo de optimizar el proceso en el caso de San José.

- Estudios Topográficos: los estudios topográficos deberán ser realizados con un nivel de detalle suficiente para permitir realizar un diseño de factibilidad con el grado de precisión requerido para esta fase.
- Estudios Geológicos, Geotécnicos e Hidrogeológicos: con relación a este aspecto, la experiencia muestra que cuanto mayor definidas estén las condiciones geológicas, geotécnica e hidrogeológicas del entorno en el que se va a realizar la infraestructura, tanto más es posible definir eficazmente un esquema de identificación y distribución de riesgos entre las partes involucradas y en la modalidad de contrato que se quiera desarrollar para su construcción. Esquemas que asignen excesivamente el riesgo geológico al constructor, por causa de una deficiente implementación de los estudios previos, conllevan la inclusión de importantes contingencias con costos superiores al de las mismas campañas de investigación.
- Diseño del trazado seleccionado (debe cumplir requerimientos funcionales y plantear una metodología constructiva): en esta fase, el estudio del trazado debe incorporar ya los elementos técnicos fundamentales de la solución adoptada, como por ejemplo los condicionantes derivados de las velocidades de proyecto, las pendientes máximas permitidas por el sistema en cuestión o condicionantes sobre elementos puntuales como las estaciones de pasajeros, elementos de ventilación o seguridad, conexión con depósitos o patios, etc. Posteriormente a esta fase de proyecto, solo ligeros cambios, consistentes en mejoras prestacionales, deberían ser planteados y admitidos.
- Diseño de las estaciones de pasajeros (debe cumplir requerimientos funcionales y plantear una metodología constructiva): en esta fase también, la ubicación de las estaciones de pasajeros debería estar ya completamente definida, así como su dimensionamiento, en función de los niveles de demanda establecidos en la Prefactibilidad, de las normas de seguridad aplicadas, y de los niveles de servicio y confort considerados para el Proyecto. Es muy importante que estos tres aspectos sean muy bien definidos en esta fase, así como el horizonte de proyecto a considerar, para evitar problemas de falta de capacidad de las estaciones, el principal lugar de interacción de los usuarios con el sistema, con la consecuente desafección de estos hacia el sistema en sí. Gran atención debe ser prestada hacia la integración de la estación con el entorno urbano, principalmente para evitar que su accesibilidad se vea dificultada, con la aparición de aglomeraciones en el exterior de las estaciones para su acceso o la aparición de problemas de seguridad (real o percibida) sobre todo entre franjas sociales más vulnerables (ver Fotografía 37). Una clara política de accesibilidad para usuarios de movilidad reducida, así como la combinación con medios de transportes distintos, incluso personales (bicicletas, patines, etc.) debe ser definida en esta fase. En el caso del sistema de BTR de Lima, Perú, los usuarios ocupan parte de la sede vial con largas colas para el ingreso a la estación en cada hora punta, por efecto de un ingreso a la zona de pago muy infra dimensionado con respecto a los viajeros efectivos presentes.

- Diseño de los patios (debe cumplir requerimientos funcionales y plantear una metodología constructiva): es importante desarrollar el proyecto de los depósitos, patios y zonas de control con un claro horizonte temporal para evitar su saturación en un periodo inferior a la vida útil del Proyecto, más aún en cuanto se trata de espacios de gran dimensión, con condicionantes muy estrictos de conexión con las líneas (sobre todo en caso de sistema ferroviario), para los cuales buscar soluciones alternativas en el futuro se puede revelar muy complicado. Es mejor en estos casos destinar o reservar espacios con capacidad superior a la estrictamente necesaria al proyecto, que posteriormente, en un horizonte de unos 5-10 años, tener que recurrir a soluciones mucho más costosas.



**Fotografía 37.** Aglomeración en la entrada de una estación del Metropolitano de Lima (sistema BRT).

- Diseño de los equipamientos ferroviarios y no ferroviarios, en el caso de metro tipo tren o en caso de sistemas sobre ruedas de hule. Se trata principalmente de elementos de superestructura ferroviaria, alimentación eléctrica y sistemas relacionados, señalización y automatización, supervisión, telecomunicaciones y control, etc.
- Diseño de las otras estructuras (pozos o elementos de ventilación si se trata de obras subterráneas, pozos o vías de emergencia, etc.). Estas estructuras variarán mucho según el sistema elegido, pero deben ser definidas con suficiente detalle en esta fase ya que pueden significar afectaciones importantes tanto en tema de expropiaciones, interferencia con servicios afectados, etc.
- Gestión de las interferencias urbanas (predios afectados, expropiaciones, edificios sensibles): como fue anticipado en el punto anterior, el conjunto de todas las obras de infraestructura a realizar debe ser oportunamente insertado en el tejido urbano

circundante, considerando e intentando minimizar al máximo las interferencias con otros servicios, viviendas, etc. Es importante recordar que los procesos de gestión de estas interferencias serán los primeros en afrontarse, en muchos casos imposibilitando el mismo inicio de los trabajos, por lo tanto, es fundamental que sean atendidos con prioridad alta en las fases previas del proyecto.

- Plan de gestión del riesgo durante la construcción y monitoreo: estos aspectos deben estar presentes en cada uno de los puntos descritos anteriormente de forma transversal y continua, para proporcionar un diseño que efectivamente minimice los grandes riesgos que se presentan en grandes proyectos de este tipo, desde los riesgos constructivos, geológicos, de seguridad, de afectación a las estructuras existentes, financieros, etc. Es importante que ya desde etapas tempranas se desarrolle un Plan de Gestión del Riesgo (Ver Capítulo 10) que aborde correctamente los principales riesgos de la infraestructura en su fase constructiva y poder evaluar, antes de proceder a la ingeniería de detalle, los riesgos residuales que se obtendrán después de las medidas de mitigación aplicadas para que sean aceptables.
- Evaluación de Impacto Ambiental: Impactos sociales, ambientales, reasentamientos, audiencia pública, etc.
- Costos y presupuestos de las obras civiles, equipamiento electromecánico y material rodante. Como paso final al proceso definido arriba, se debe desarrollar un presupuesto detallado por grandes partidas, que tenga en cuenta, en la medida de lo posible, elementos de precio locales o lo más cercano posible, considerando de forma clara los gastos adicionales como la cuantificación de los imprevistos y contingencias, las expropiaciones, los gastos generales y accesorios que se generarán, etc. Combinado con el cronograma referencial del proyecto, se deberá definir un cronograma financiero, para que el horizonte del proyecto coincida con el horizonte de su financiación.
- Costos y presupuestos de la operación bajo un escenario de referencia (en un año definido como base), con supuestos claros y definidos de antemano sobre niveles de servicio, etc. De la misma forma del punto anterior, es importante considerar los costos de la operación en los supuestos iniciales, para evaluar de forma completa el proyecto (ver punto siguiente). Actualización del Análisis de beneficios sociales del proyecto con los resultados del proyecto de factibilidad. Análisis costo-beneficio, etc.: finalmente, todo el proceso anterior debe ser finalizado con la evaluación de la forma más detallada posible la sostenibilidad del proyecto en todos sus componentes, tanto en la fase de construcción e infraestructura como en la posterior operación, considerando oportunamente los beneficios que generará y evitar los riesgos descritos en el apartado anterior, precisamente relacionados a una falta de rentabilidad del proyecto en su conjunto.
- Identificación de los distintos marcos contractuales y de desarrollo del proyecto:
  - o Obra pública, con sus peculiares riesgos y beneficios
  - o Concesión integral (con un esquema BOT, BOOT, DBOT, u otro) con sus peculiares riesgos y beneficios

- Especificaciones Técnicas en nivel de detalle coherente con el marco contractual definido: sobre este aspecto, las mismas podrán ser más o menos detalladas en los aspectos constructivos o, bien, orientadas de forma preponderante al aspecto prestacional según los niveles de servicio exigidos, frecuencias mínimas, valores de disponibilidad mínimos, etc.
- Promoción hacia los agentes del mercado interesados (según la modalidad que sea elegida): concesionarios, constructores, gestores, consultores, financiadores, proveedores, etc. Es importante que esta actividad se realice de forma transversal y a lo largo de toda la etapa, para identificar los agentes del mercado que puedan estar interesados o sentirse afectados por el proyecto y actuar con eficacia hacia ellos, involucrándolos en el proceso e integrando eventuales mejoras que incrementen la posibilidad de contar con una elevada competencia a la hora de adjudicar trabajos o contratos.
- Implementación de un plan de comunicación social, y participación ciudadana, con el fin de incluir la opinión de los ciudadanos en el desarrollo del proyecto, y minimizar la oposición al proyecto, que podría darse en ausencia del conocimiento de los criterios que llevan a definir determinadas elecciones proyectuales.
- Gestión de la Aprobación por parte de las entidades responsables.
- Gestión del (los) Concurso(s) de licitación.



## 16 Túneles falsos

### 16.1 Definición

Los túneles falsos corresponden a una tipología especial de túnel. Por su función se clasifican como de transporte (carreteras y ferroviarios) y de montaña. Rosales (2012), los define como una “estructura de protección, generalmente de concreto reforzado, que se construye a lo largo de la vía y cuyo objetivo principal es separar el tránsito y peatones del posible impacto de caída de rocas” o de masas inestables de la ladera.

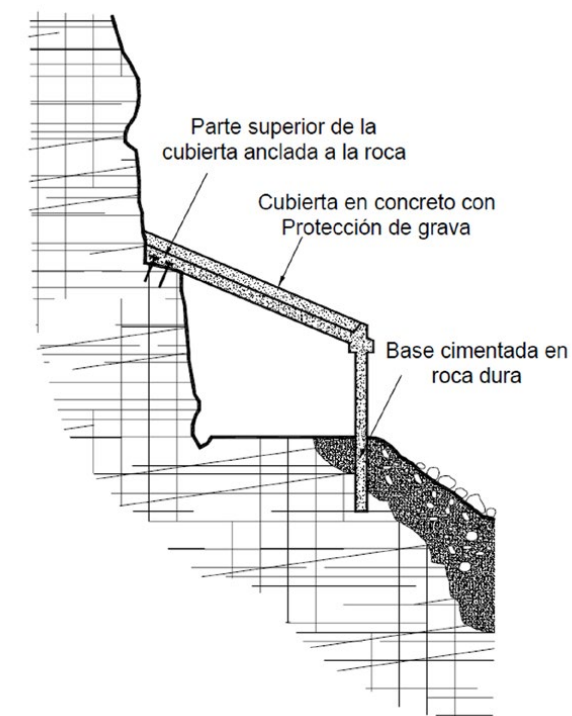
En general, el túnel falso es una efectiva medida de protección, principalmente cuando la estabilización del talud o ladera es inviable o muy costosa a través de otras técnicas, siempre y cuando el mismo túnel falso sea técnicamente viable.

### 16.2 Configuración

Los componentes típicos de los túneles falsos se pueden apreciar en el esquema de la Figura 76. El elemento principal es la cubierta de techo, que suele ser una losa de concreto reforzado, de alta capacidad estructural.

Además, esta losa suele contener encima una capa de material que sirve como amortiguador para reducir la energía de los impactos. La losa suele tener una pendiente suficiente para facilitar el tránsito del material deslizado por encima de la estructura.

El túnel falso requiere estar anclado en la roca y cimentado en material competente y estable. La parte externa del túnel consiste generalmente en un conjunto de marcos estructurales a base de vigas y columnas. En ocasiones, también estos elementos requieren de anclaje hacia el terreno estable.



**Figura 76.** Esquema de la cubierta de protección contra caídas (túnel falso). Fuente: Suárez (2012)

### 16.3 Diseño

Se requiere considerar las fuerzas de impacto transmitidas sobre la losa de cubierta, así como la estabilidad de la cimentación, en particular de las columnas exteriores. El elemento principal, la losa o techo, debe satisfacer varios requerimientos:

- a. Capacidad de absorber las energías de compresión y cortante durante los impactos
- b. Ser ligero (aspecto quizás en contra de la necesidad de ofrecer resistencia)
- c. Resistir impactos sin sufrir daños

La estimación de la capacidad de recibir impactos requiere conocer cuál sería la mayor carga producida por un bloque o material cayendo, en todo el rango de su vida útil. Por ello, un análisis probabilístico es necesario para establecer cuál sería la máxima carga de impacto sobre la estructura.

#### 16.3.1 Estimación de la fuerza de impacto

El primer paso corresponde a la estimación del origen de los bloques que puedan desprenderse desde el talud. Distintos factores influyen para determinar un área como fuente de desprendimientos, incluyendo la topografía, la pendiente, la altura, la litología, el grado de meteorización, el fracturamiento y las propiedades geotécnicas de los materiales. Por supuesto, hay también factores como los sismos o la meteorología que pueden influir en la ocurrencia de desprendimientos.

Una vez que se ha identificado el área de origen de desprendimientos, debe realizarse un análisis probabilístico para modelar las posibles trayectorias de los bloques que se desprenden y conocer las características del movimiento, como velocidad, alturas de rebote, zonas de deslizamiento o rotación, etc. Para el análisis de trayectorias existe software especializado. A partir de esta información es posible establecer los niveles de energía del impacto.

La fuerza de impacto ocurre durante poco tiempo. Su valor máximo se estima como una carga estática, que transmite un determinado esfuerzo a la estructura (ver Figura 77).

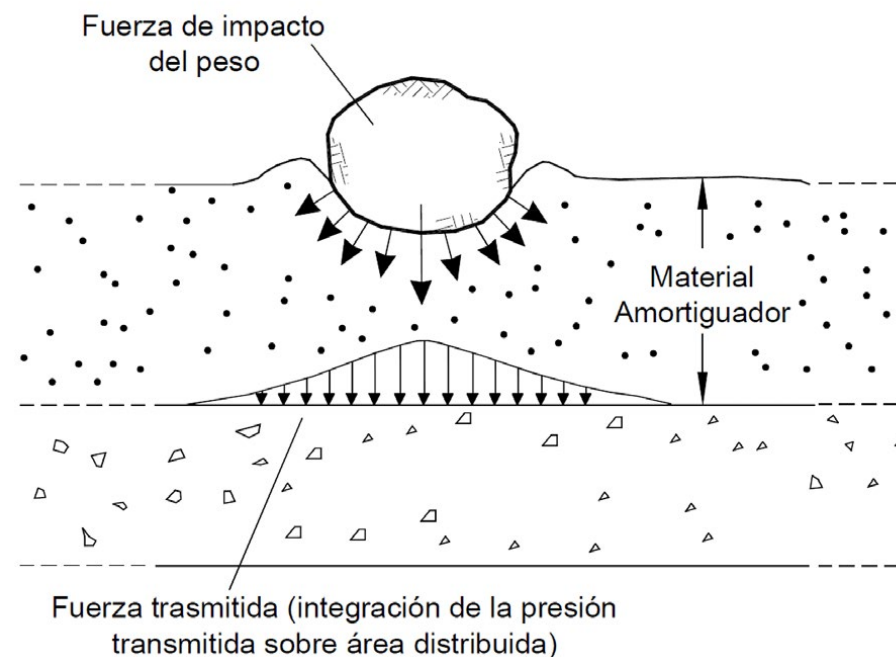


Figura 77. Distribución de la fuerza de impacto. Suárez (2012).

Según Montani (1998), la fuerza de impacto o acción dinámica ( $F_k$ ) se puede obtener con la siguiente ecuación

$$F_k = 2,8e^{-0,5}r^{0,7}M_{E,k}^{0,4} \tan \varphi_k \left(\frac{m_k v_k^2}{2}\right)^{0,6} \quad \text{(Ecuación 3)}$$

Donde

$F_k$  es la fuerza de impacto en kN

$m_k$  es la masa del bloque de diseño, en t

$v_k$  es la velocidad del bloque de diseño al momento de impacto, en m/s

$e$  es el espesor de la capa de amortiguamiento, en m

$r$  es el radio de esfera equivalente, en m

$M_{E,k}$  es el módulo de compresibilidad estática de la capa de amortiguamiento, en kPa

$\varphi_k$  es el ángulo de fricción interna de la capa de amortiguamiento, en °

La profundidad de penetración,  $d$ , puede estimarse como

$$d = \frac{m_k v_k^2}{F_k} \quad \text{(Ecuación 4)}$$

#### 16.3.2 Sistema de amortiguación

La función principal del sistema de amortiguación es disipar la energía del impacto. Además, es importante su capacidad de distribuir ampliamente los esfuerzos de contacto. En términos generales, se tiende a utilizar material granular, tipo grava, pero también arena y bloques. Para alcanzar el comportamiento adecuado, es fundamental proveer suficiente espesor, más de 50 cm o más del doble de la profundidad de penetración del bloque,  $d$ .

#### 16.3.3 Respuesta estructural

Una vez que se ha estimado la fuerza de impacto y que se ha definido el espesor y tipo de la capa de amortiguación, se procede con el diseño estructural de la losa de techo. Normalmente se utiliza el concreto reforzado, aunque también el acero.

El diseño estructural permitirá establecer el espesor de la losa, que debe verificarse para que soporte el punzonamiento, que es el modo de falla más probable.

### 16.3.4 Cimentación

Debe verificarse la capacidad de la cimentación en ambos lados de la estructura. La cimentación exterior debe ubicarse sobre material competente (roca) o, bien, utilizar pilotes o pilares para alcanzar el nivel apropiado.

En cuanto a la cimentación interior, debe contemplarse la capacidad del muro de retención, pues en ese sector se ubica un relleno contra la pared de la ladera, en caso necesario. Si la losa se apoyara directamente en la roca en el talud, este muro resulta innecesario. Esta cimentación, en caso de utilizarse, es probablemente más exigida que la externa. Por ello, idealmente debe colocarse directamente sobre la roca y ser anclada apropiadamente (ver esquema de la Figura 78).

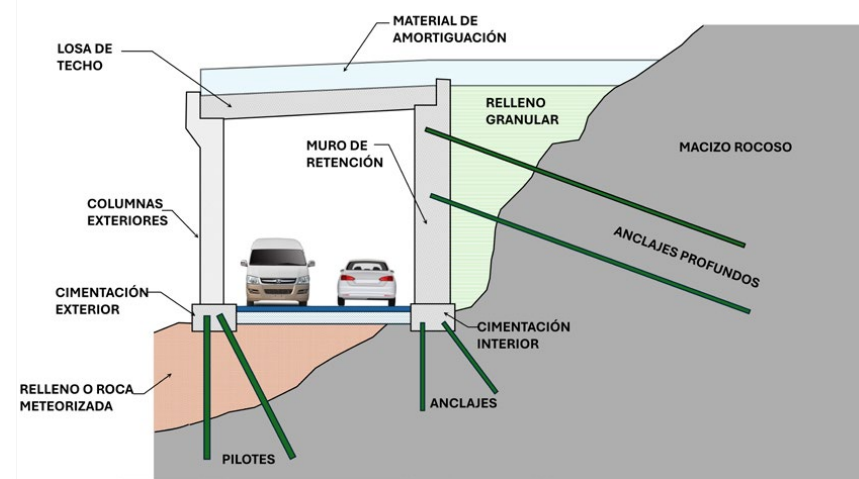


Figura 78. Esquema de estructura anclada

## 16.4 Estabilidad global

Además de los aspectos de diseño de la estructura, descritos en la sección anterior, se debe resaltar la importancia de realizar un adecuado análisis de la estabilidad global. Es inútil la instalación del túnel falso si ocurre una falla global del talud que implique en el volumen desplazado a todo el conjunto, incluyendo anclajes.

En términos generales, si la instalación se realiza sobre un talud de roca dura, deben considerarse los modos de falla típicos de rocas: deslizamiento de cuñas o prismas, volcamiento de bloques. Sin embargo, en el caso de taludes rocosos blandos o meteorizados, deben considerarse además los tipos de falla profunda, como fallas rotacionales o traslacionales. Este es un caso frecuente en las rutas montañosas de Costa Rica, donde el perfil de meteorización puede alcanzar hasta 6 m o 7 m de profundidad y luego se presenta una capa de roca más competente.

El análisis de la estabilidad global supone un adecuado conocimiento del terreno, es decir, un modelo geotécnico apropiado. Por ello, se debe plantear una buena investigación geológica y geotécnica, con el propósito de entender a profundidad los mecanismos de falla y la condición real del emplazamiento.

## 17 Referencias

AFTES (2001a) Guidelines on Earthquake Design and Protection of Underground Structures. GT22RIA1, Version 1. Association Francaise des Tunnels et de l'espace Souterrain. AFPS/AFTES. May, 2001.

AFTES (2001b) Recommendations on the Convergence – Confinement Method. GT7R6A1, Version 1. Association Francaise des Tunnels et de l'espace Souterrain.

AFTES (2005) Méthodes d'auscultation des ouvrages souterrains. GT19R2F1. Recommandations de l'AFTES (Association Francaise des tunnels et de l'espace souterrain). Tunnels et ouvrages souterrains No.187, 2005.

American Society of Civil Engineers (2022). Geotechnical Baseline Reports. ASCE Manuals and Reports Practice No. 154. Task Committee on Geotechnical Baseline Reports. Edited by: Randall J. Essex, P.E. <https://doi.org/10.1061/9780784416082>. © 2022 American Society of Civil Engineers

Arguedas, I. (2014) Innovaciones tecnológicas en los últimos cinco años en proyectos de generación hidroeléctrica. Congreso de Ingeniería Civil, CIC 2014. San José, Costa Rica, mayo 2014.

Arias, I. R. (2021) Túneles falsos y su aplicación a carreteras de montaña en Costa Rica. Trabajo de graduación. Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica.

Asociación Costarricense de Geotecnia, ACG (2009). Código de cimentaciones de Costa Rica. Colegio Federado de Ingenieros y de Arquitectos de Costa Rica. Cartago, Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica.

Asociación Costarricense de Geotecnia, ACG (2015) Código Geotécnico de Taludes y Laderas de Costa Rica (2015). Colegio Federado de Ingenieros y de Arquitectos de Costa Rica. Editorial Tecnológica de Costa Rica.

Asociación Costarricense de Geotecnia, ACG (2024) Código Geotécnico de Costa Rica 2024. Colegio Federado de Ingenieros y de Arquitectos de Costa Rica. En edición.

Barton, N. (2002). Some New Q-Relations to Assist in Site Characterization and Tunnel Design. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 39, No. 2, pp. 185–216.

Benson, R.P. (1989) Design of unlined and lined pressure tunnels. En: Tunnelling and Underground Space Technology. Vol. 4, No.2, 1989, pp. 155-170.

Bieniawski, Z.T. (1989). Engineering Rock Mass Classifications: A Complete Manual. John Wiley & Sons, New York, 272 pp.

Comité Européen de Normalisation CEN (2004) EN 1998-5 (2004) Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 5: Foundations, retaining structures and geotechnical aspects. Authority: The European Union Per Regulation 305/2011, Directive 98/34/EC, Directive 2004/18/EC.

Colegio Federado de Ingenieros y de Arquitectos de Costa Rica (2010) Código Sísmico de Costa Rica 2010. Editorial Tecnológica de Costa Rica. Cuarta edición, 2011.

Consejo Nacional de Planificación Urbana (2013) Plan GAM 2013. Secretaría Plan Nacional de Desarrollo Urbano, INVU. San José, diciembre 2013.

Corporación Andina de Fomento, CAF, Banco de desarrollo de América Latina (2008) Desarrollo urbano y movilidad en América Latina. Dirección de Análisis y Programación Sectorial de la Vicepresidencia de Infraestructura de CAF. ISBN: 978-980-6810-55-6.

Create Digital (2023) Finding space for the future. Engineers Australia. Descargado de: <https://createdigital.org.au/wp-content/uploads/2018/05/Masterplan-2019.jpg> el 16 de noviembre 2023.

DAUB Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen e. V. (German Tunnelling Committee) (2021) Diseño, construcción y operación digital de estructuras subterráneas. Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen e. V., Grupo de trabajo del DAUB “BIM en túneles”. Traducción al español de Pedro Ramírez Rodríguez, Mayo 2021.

DAUB Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen e. V. (2022) Recommendation Digital Design, Building and Operation of Underground Structures. BIM in Tunnelling Model requirements – Part 3: Ground Model Supplement to DAUB recommendation BIM in Tunnelling (2019). Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen e. V.

DAUB Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen e. V. (2022) Recommendations for the Selection of Tunnel Boring Machines. Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen e. V.

Deere, D.U., Hendron, A.J., Patton, D.F., and Cording, E.J. (1967). Design of Surface and Near Surface Construction in Rock. Failure and Breakage of Rock: Proceedings of 8th Symposium on Rock Mechanics, University of Minnesota, MN. C. Fairhurst, Editor. AIME, Littleton, Colorado, pp. 237–301.

Deere, D.U., Peck, R.B., Monsees, J.E., and Schmidt, B. (1969). Design of Tunnel Liners and Support Systems. Report of University of Illinois to Office of High-Speed Ground Transportation, U.S. Department of Transportation (DOT), NTIS Publication No. PB-183799, 420 pp.

Dehghanian, K. (2021) Analytical Method for Preliminary Seismic Design of Tunnels. Theory and practice on tunnel engineering. IntechOpen. DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.97634>

Denyer, P., Montero, W., Alvarado, G.E. (2003). Atlas tectónico de Costa Rica. Editorial de la Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica. 79 pp.

Dowding C.H. y Rozen, A. (1978) Damage to rock tunnels from earthquake shaking. Journal of Geotechnical Engineering Division. ASCE 104, February 1978, pp. 175-190.

Du Lee, C. (2021) Developing Underground Space: A View From Singapore. Key considerations to set a sustainable course. Descargado en: <https://www.wsp.com/en-us/insights/developing-underground-space-a-view-from-singapore>

EPRI (1987) Design guidelines for pressure tunnels and shafts. AP-5273 Research Project 1745-17. Final Report, June 1987. Prepared by: University of California at Berkeley. Brekke, T.L. y Ripley, B.D. Electric Power Research Institute, Palo Alto, California.

Erharter, G., Weil, J. Bacher, L., Heil, F. Kompolschek, P. (2023) Building information modelling based ground modelling for tunnel projects – Tunnel Angath, Austria. Tunnelling and Underground Space Technology 135 (2023) 105039. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2023.105039>. Elsevier Ltd.

FEVE, Ferrocarriles de Vía Estrecha (2011). Propuesta para la implantación de un sistema TREN-TRAM en el área del Valle Central de Costa Rica. San José de Costa Rica. Presentación realizada el 2 de marzo 2011. FIDIC (2019) Conditions of Contract for Underground Works” (Emerald Book). Fédération Internationale des Ingénieurs-Conseils (FIDIC). ISBN13: 978-2-88432-087-0. Ginebra, Suiza.

FIDIC (2023) Underground Works Contract (Emerald Book) Guide. Fédération Internationale des Ingénieurs-Conseils (FIDIC). ISBN13: 978-2-88432-087-0. Ginebra, Suiza.

Flyvbjerg, B. (2009) Survival of the unfittest: why the worst infrastructure gets built—and what we can do about it. Oxford Review of Economic Policy, Volume 25, Number 3, 2009, pp.344–367

Flyvbjerg, B., Bruzelius, N., and Van Wee, B. (2008) Comparison of Capital Costs per Route-Kilometre in Urban Rail.

Flyvbjerg, B., Skamris Holm, M., and Buhl, S. (2002) Underestimating costs in public works projects. Error or lie?

García, L. (2025) Línea 3 del Metro de Panamá: ¿cuándo estará lista?, consultado el 12 de setiembre de 2025, en: <https://www.laestrella.com.pa/panama/nacional/linea-3-del-metro-de-panama-cuando-estara-lista-BB11237251>. La Estrella de Panamá, 19 de marzo de 2025.

Geomekca Ingeniería (2013) Diseño estructural preliminar del revestimiento del túnel de desvío. Proyecto Hidroeléctrico Privado. Documento privado.

Geomekca Ingeniería (2016) Informe final de supervisión del proceso de excavación del Túnel de Trasvase. Informe interno del Consorcio NJS-Sogreah. Contrato de Factibilidad y Diseño del Proyecto de Mejoramiento Ambiental del Área Metropolitana de San José, desarrollado por el Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados.

Hacker, D., Zeindl, M. (2023) Project management in connection with a digital construction site with BIM in tunnelling. En: Proceedings of the 15th International ISRM Congress 2023 & 72nd Geomechanics Colloquium. ISRM, Austrian Societe for Geomechanics. Austria, 2023

Hashash Y. M. A., Hook, J.J., Schmidt, B. and Yao, J.I. (2001) Seismic design and analysis of underground structures. Tunnelling and Underground Space Technology, Vol.16, 2001, pp. 247-293. Pergamon.

Hashash, Y.M., Hook, J.J., Schmidt, B., Yao, J.I. (2001) Seismic design and analysis of underground structures. Tunnelling and Underground Space Technology 16 (2001) 247-293. Pergamon, Elsevier. ITA-AITES Accredited Material.

Hoek, E. (2023) Practical Rock Engineering (Ed. 2023) Descargado de: <https://www.rocsience.com/learning/hoeks-corner>

Hoek, E. y Brown, E.T. (2019) The Hoek-Brown failure criterion and GSI – 2018 edition. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, Vol.11, Issue 3, June 2019, pp. 445-463

ICE (2010) Informe de factibilidad del proyecto Ampliación de la Planta Cachí. Instituto Costarricense de Electricidad. UEN Proyectos y Servicios Asociados. San José, Costa Rica.

ICE (2010b) Estudios preliminares para el desarrollo del túnel vial del proyecto San José – Cartago. Proyecto No. CSC-078-08. Informe Final. Instituto Costarricense de Electricidad. UEN Proyectos y Servicios Asociados. San José, Costa Rica. Marzo, 2010.

INEC (2023) Estimación de población y vivienda 2022. Resultados generales. Instituto Nacional de Estadística y Censos, San José, Costa Rica. Julio 2023.

INVIAS (2021) Manual para el diseño, construcción, operación y mantenimiento de túneles de carretera para Colombia. Edición 2021. Instituto Nacional de Vías. Bogotá D.C., Colombia, febrero de 2021.

ITA (1988) Guidelines for the design of tunnels. Tunnelling and Underground Space Technology, Vol.3, No.3, pp. 237-249, 1988. Pergamon Press.

ITA (2000) Guidelines for the design of shield tunnel lining. Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 15, No. 3, pp. 303-331.

ITA (2008) Guidelines for good occupational health and safety practice in tunnel construction. ITA Working Group Health and Safety in Works, ITA WG No.5. ITA Report No.001, November 2008. ISBN: 978-2-9700624-0-0.

ITA (2009) General Report on Conventional Tunnelling Method. ITA Report No. 002, April 2009. ISBN 978-2-9700624-1-7.

ITA (2011) Guidance on the safe use of temporary ventilation ducting in tunnels. ITA Working Group No.5. ITA Report No.008, November 2011. ISBN: 978-2-9700776-0-2.

ITA (2011) Monitoring and control in tunnel construction. ITA Working Group No.2. ITA Report No.009, November 2011. ISBN: 978-2-9700776-3-3.

ITA (2016) Recommendations on the development process for mined tunnels. ITA Working Groups No.14 and No.19. ITA Report No.17, April 2016. ISBN: 978-2-9701013-6-9.

ITA (2021) Shafts – Definitions and Classifications. ITA Working Group No.23. ITA Report No.26, april 2021. ISBN: 978-2-9701242-8-3.

ITA (2022) An Owner's guide to Immersed Tunnels. ITA Working Group No. 7. ITA Report No. 7, April 2022. ISBN: 978-2-9700858-7-4.

ITA (2023) An Owner's guide to Submerged Floating Tunnels. ITA Working Group No. 11. ITA Report No. 33, April 2023. ISBN: 978-2-9701670-2-0.

ITACUS (2011) White paper 2: Planning the use of underground space. International Tunnelling and Underground Space Association Committee on Underground Space. Descargado de: <https://about.ita-aites.org/wg-committees/itacus/downloads?start=9>

ITATECH (2015) ITAtech guidelines on monitoring frequencies in urban tunnelling. ITAtec Activity Group Monitoring. ITAtech Report No.3-V2, May 2015. ISBN: 978-2-9700858-4-3.

Jeon, S., Bae, M., Lee, S., Cho, H. (2015) BIM application case for shallow subway tunnel construction. ITA WTC 2015 Congress and 41st General Assembly. Croatia, 2015.

Jiménez, M. et al. (2010). Diseño y construcción de una llave de cortante para la estabilización de la margen izquierda de la presa del P.H. Pirrís. X Congreso Nacional de Geotecnia. Asociación Costarricense de Geotecnia.

Kolymbas, D. (2005) Tunnelling and Tunnel Mechanics, A rational approach to tunnelling. Springer. ISBN-10 3-540-25196-0 Springer Berlin Heidelberg New York.

Lauffer, H. (1958). Gebirgsklassifizierung für den Stollenbau. Geologie und Bauwesen, Vol. 24, No. 1, pp. 46–51.

Liu, S., Liu, S., Lu, S., Ma, F., Pei, G. (2022) Seismic Behaviour of Shallow Tunnelling Method Tunnels Accounting for Primary Lining Effects. Buildings 2023, 13, 20. <https://doi.org/10.3390/buildings13010020>

Lombardi, G. (1973). Dimensioning of Tunnel Rings with Regard to Construction Procedure. Tunnels and Tunneling, Vol. 5, No. 4, pp. 340–353

Lunardi, P. (2000) The design and construction of tunnels using the approach based on the analysis of controlled deformation in rocks and soils. Tunnels and Tunnelling International, The ADECO-RS Approach. Mayo, 2000.

Maidl, B., Thewes, M. y Maidl, U. (2014) Handbook of Tunnel Engineering II. Basics and additional services for design and construction. Ernst & Sohn, a Wiley Brand. ePDF ISBN: 978-3-433-60354-3

Metro de Panamá (2025) Red maestra del Metro de Panamá. Sitio web de Metro de Panamá, consultado el 12 de setiembre de 2025, en: <https://www.elmetrodepanama.com/red-maestra/>

Milano, A. (2017) Régimen jurídico del subsuelo. CCROS 2017, Congreso costarricense de obras subterráneas 2017. Asociación costarricense de obras subterráneas. San José, Costa Rica.

Ministerio de Economía y Finanzas del Perú (2012) Contratación de un Consultor Integral para el Concurso de Proyectos Integrales para la Concesión de la Línea 2 de la Red Básica del Metro de Lima – Proyecto Especial Sistema Eléctrico de Transporte Masivo de Lima y Callao. Bases del Concurso Público N° 004-2012  
Ministerio de Economía y Finanzas, Agencia de la Promoción de la Inversión Privada, Comité Permanente de Contrataciones.

Ministerio de Obras Públicas y Transportes de Costa Rica (2011) Plan Nacional de Transportes de Costa Rica 2011-2035, Memoria. Elaborado por la empresa INECO. San José, Setiembre 2011.

Ministerio de Obras Públicas y Transportes de Costa Rica (2011b) Plan Nacional de Transportes de Costa Rica 2011-2035, El transporte público de pasajeros y el proyecto de Sectorización. Elaborado por la empresa INECO. San José, Setiembre 2011.

Ministerio de Obras Públicas y Transportes de Costa Rica (2018). Reporte del Tránsito Promedio Diario, 30 de 07 de 2018. [sig.mopt.go.cr](http://sig.mopt.go.cr). Obtenido de Secretaría de Planificación Sectorial: Descargado de: <https://sig.mopt.go.cr:8084/transito/tpd.php>

Ministerio de Planificación y Política Económica (2022) Normas técnicas de inversión pública. Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica, Área de inversiones. San José, Costa Rica. Mideplan.

Ministerio de Transportes y Comunicaciones de Perú. (2014). Manual de Carreteras "Túneles, Muros y Obras Complementarias". Volumen 1. Lima: Dirección General de Caminos y Ferrocarriles.

Ministerio de Vivienda y Asentamientos Humanos (2008) Plan Regional Urbano de la Gran Área Metropolitana de Costa Rica 2008-2030. PRUGAM. Consejo Nacional de Planificación Urbana, INVU.

Ministerio de Vivienda y Asentamientos Humanos (2011) Plan de Ordenamiento Territorial del Gran Área Metropolitana 2011-2030. POTGAM. Editor: Leonel Rosales Maroto, Dirección de Urbanismo, INVU.

Muir Wood, A. M. (2000) Tunnelling: management by desing. Taylor & Francis e-Library. ISBN 0-203-78590-8

Muir Wood, A.M. and Duffy, F. (1996) Realising our potential—in the built environment. Education for the Built Environment, Ove Arup Foundation, London.

Municipalidad de Esparza (2024) Sitio web de la Municipalidad de Esparza, consultado en octubre de 2024, <https://www.muniesparza.go.cr/articulo/262/tunel-de-cambalache>

Naranjo, A. y Bonilla, J. (2012) Utilización de bases de datos y sistemas de información geográfica en el seguimiento geológico-geotécnico de obras subterráneas En: XI Congreso Nacional de Geotecnia, Congeo, Costa Rica. San José, Costa Rica, agosto de 2012.

Panet, M. (2023) The tunnel behavior at the fase of excavation. Muir Wood Lecture 2023. ITA-AITES. ISBN: 978-2-9701436-9-7.

Panet, M. and Guellec, P. (1974). Contribution à l'étude du soutènement d'un tunnel á l'arrière du front de taille. Proceedings of the 3rd International Congress of the ISRM. Denver. National Academy of Sciences. Washington, DC, pp. 1163–1168.

Peck, R. B. (1969) State of the Art Report. Deep Excavation and Tunneling in Soft Ground. Proceedings 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, State-of-the-Art Volume, Mexico City, Mexico. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, pp. 225–290.

Pescara, M., Gaspari, G.M., Repetto, L. (2011) Design of underground structures under seismic conditions: a long deep tunnel and a metro tunnel. ETH Zurich, 2011 Colloquium on seismic design of tunnels.

PIARC (2024) Manual de Túneles de Carretera. Explotación y Mantenimiento. Consultado en: <https://tunnelsmanual.piarc.org/es/explotacion-y-mantenimiento>, mayo 2024.

PIARC. (2015a). Manual de túneles de Carretera: Introducción. París: World Road Association.

PIARC. (2015b). Manual de Túneles de Carretera: Aspectos Generales. La Défense Cedex, France: World Road Association.

PIARC. (2015c). Manual de Túneles de Carretera: Exigencias Operativas y de Seguridad. La Défense Cedex, Francia: World Road Association.

Pipe Jacking Association (2017) An introduction to pipe jacking and microtunnelling. Pipe Jacking Association. ISBN 978-1-5272-0341-9.

Pizzarotti, E., Soldo, L., Bistacchi, A., Regondi, L., Mezzanzanica, M. (2022) Advanced geomodelling and BIM. En: ITA-AITES World Tunnel Congress, WTC2022 and 48th General Assembly Bella Center, Copenhagen, Denmark, 2022.

Power, M.S., Rosidi, D., Kaneshiro, J. (1996) Vol. III Strawman: screening, evaluation, and retrofit design of tunnels. Report Draft. National Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, New York.

Power, M., Rosidi, D., Kaneshiro, J. (1998) Seismic vulnerability of tunnels-revisited. In: Ozedimir, L., (Ed). Proceedings of the North American Tunneling Conference. Elsevier, Long Beach, CA, USA.

Power, M., Rosidi, D., Kaneshiro, J., Gilstrap, S., Chiou, S.J. (1998b) Summary and evaluation of procedures for the seismic design of tunnels. Final Report for Task 112-d-5.3(c). National Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, New York.

Rafie, K. (2017) Microtunneling. Post en LinkedIn, enlace: [https://media.licdn.com/dms/image/C5112AQE9CoE-9CjRRw/article-inline\\_image-shrink\\_1000\\_1488/0/1520211042615?e=1718236800&v=beta&t=7Rp4DxEt8rOqSAwnQEdzDBelcmF5-ooxUcl\\_KSowHEY](https://media.licdn.com/dms/image/C5112AQE9CoE-9CjRRw/article-inline_image-shrink_1000_1488/0/1520211042615?e=1718236800&v=beta&t=7Rp4DxEt8rOqSAwnQEdzDBelcmF5-ooxUcl_KSowHEY), descargado el 9 de abril de 2024.

Ruiz C., P. & Soto B., G. (2014) Preparación del mapa de susceptibilidad a deslizamientos utilizando imágenes lidar en los cerros de Escazú, cantones Aserrí, Desamparados, Alajuelita, Santa Ana y Escazú, Costa Rica. Informe final. Contratación directa 2013CD-000025-00200. San José, diciembre 2014.

Sánchez, W., Jiménez, E., Quirós, D. (2014) Un tapón urbano reta a ingenieros. En: Periódico La Nación, 10 de abril 2014.

Schmidt, V., Moya, A., Climent, A., Rojas, W. & Boschini, I. (2005) Microzonificación sísmica de San José. 120 págs. (pdf en CD), Editorial Universidad de Costa Rica, San José.

SCT (2016) Manual de Diseño y Construcción de Túneles de Carretera. Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Dirección General de Servicios Técnicos. México. Descargado de: [www.dgst.sct.gob.mx](http://www.dgst.sct.gob.mx)

SIECA (2000). Manual Centroamericano de Dispositivos Uniformes para el Control para el Control del Tránsito. Guatemala: Secretaría de Integración Económica Centroamérica.

Soto, G.J., (2009) Consideraciones de Geología e Hidrogeología. En: Estudios preliminares para el desarrollo del túnel vial del Proyecto San José-Cartago, Proyecto N° CSC-078-08, Informe final, ICE, págs. 54-81.

Suárez, J. (1998) Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales. Instituto de investigaciones sobre erosión y deslizamientos. Ingeniería de Suelos Ltda., Colombia.

Tapia, M. (2010) Condicionantes geotécnicos para la construcción de un metro subterráneo en la ciudad de San José. Colegio de Ingenieros Civiles de Costa Rica. Congreso CIC-2010, San José, Costa Rica.

Tapia, M. (2013a) Manejo de riesgos geotécnicos en la construcción de obras de infraestructura. En: Construction Summit, 2013.

Tapia, M. (2013b) Costa Rica: desarrollando su espacio subterráneo. Primer Congreso Latinoamericano de Túneles y Espacios Subterráneos. Santiago, Chile.

Terzaghi, K. (1946). Rock defects and loads on tunnel support. Rock Tunneling with Steel Supports. R.V. Proctor and T. White, Editors. The Commercial Shearing and Stamping Co., Youngstown, Ohio pp. 15–99.

The British Standards Institution (2019) Health and safety in tunnelling in the construction industry – Code of practice. BSI Standards Publication BS 6164:2019. Published by BSI Standards Limited 2019 ISBN 978 0 580 94022 4. ICS 93.060

USACE (1997) Tunnels and shafts in rock, engineering and design. EM 1110-2-2901, Department of the Army. U.S. Army Corps of Engineers. Washington, DC.

Vardakos, S., Zlatanovic, S., Wongkaew, S.M., Bauer, A. (2023) Large diameter TBM tunnels – Trends in planning and design. Expanding Underground. Knowledge and Passion to Make a Positive Impact on the World – Anagnostou, Benardos & Marinos (Eds) © 2023 The Author(s), ISBN 978-1-003-34803-0. Open Access: [www.taylorfrancis.com](http://www.taylorfrancis.com), CC BY-NC-ND 4.0 license

Vargas et al. (2013) Rumbo a la carbono neutralidad en el transporte público de Costa Rica, Taxis y Autobuses. Proyecto Apoyo a la preparación de estrategias de desarrollo bajo en emisiones y adaptado al cambio climático. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo PNUD y Ministerio de Ambiente y Energía MINAE.

Wang, J.N. (1993). Seismic Design of Tunnels: A State-of-the-Art Approach, Monograph, monograph 7. Parsons, Brinckerhoff, Quade and Douglas Inc, New York.

Wells, D.L., Coppersmith, K.J. (1994) New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. Bull. Seismol. Soc. Am. 84 (4), 974-1002.

Wessling, A., Larsson, S. Kajberg, J. (2023) A statistical bonded particle model study on the effects of rock heterogeneity and cement strength on Dynamic rock fracture. Comp. Part. Mech. (2023). <https://doi.org/10.1007/s40571-023-00688-6>.

Wickham, G.E., Tiedemann, H.R., and Skinner, E.G. (1974). Ground Support Prediction Model – RSR Concept. Proceedings 2nd RETC, San Francisco, CA. H.C. Pattison and E. D'Appolonia, Editors. AIME, New York, pp. 691–707.

Yu, H., Yuan, Y., Bobet, A. (2017) Seismic analysis of long tunnels: A review of simplified and unified methods. Underground Space 2 (2017) 73-87. Science Direct. <http://dx.doi.org/10.1016/j.undsp.2017.05.003>

# GUÍA PARA EL DESARROLLO DE OBRAS SUBTERRÁNEAS EN COSTA RICA

EDITORIAL



Una producción del Departamento de Comunicación y Prensa CFIA.