



CURSO/GUÍA PRÁCTICA TÚNELES

DISEÑO, TBM, SEGURIDAD Y VENTILACIÓN (CARRETERAS & METRO)



Índice

¿QUÉ APRENDERÁ?.....	29
Introducción.	30
PARTE PRIMERA.	33
Fundamentos y alcance de los túneles de carretera y metro	33
Capítulo 1: Concepto, finalidad y tipologías de túneles (carreteras, metro y servicios).....	33
1. Objeto de la guía y relación con proyectos EPC de túneles.....	33
a. Alcance técnico-operativo de la guía.....	33
b. Diferencia con la contratación “llave en mano” (tratada en otra guía)	34
c. Enfoque internacional (España – Latinoamérica)	35
2. Tipologías de túneles según uso y explotación	35
a. Carretera unidireccional y bidireccional.....	35
b. Metro y ferroviarios urbanos	36
c. Galerías de servicios y túneles técnicos.....	37
3. Condicionantes de trazado y entorno	37
a. Medio urbano consolidado	37
b. Medio interurbano y montaña	38
c. Conexión con otras infraestructuras (puertos, aeropuertos, intercambiadores).....	39
4. Criterios funcionales ligados a seguridad y ventilación	39
a. Longitud y sección como punto de partida de la ventilación	39
b. Número de tubos y galerías de emergencia.....	40
c. Exigencias de explotación 24/7	40
5. Estándares y referencias internacionales aplicables	41
a. Guías europeas y organismos internacionales	41
b. Recomendaciones para Latinoamérica	41
c. Adaptación a clientes públicos y privados	42
6. Interrelación con otras infraestructuras y patrimonio edificado	42
a. Túneles bajo edificaciones existentes	42
b. Compatibilidad con rehabilitación edificatoria de monumentos.....	42
c. Medidas preventivas frente a asientos y vibraciones.....	43
Capítulo 2: Criterios de diseño geométrico y funcional en túneles	44
1. Secciones tipo para carreteras y metro	44
a. Gálibos, sobreeanchos y bermas	44
b. Nichos de seguridad e instalaciones	45
c. Reserva de espacio para futuras ampliaciones.....	46
2. Trazado en planta y alzado	46
a. Radios mínimos admisibles	46
b. Pendientes y puntos bajos	47
c. Conexión con rampas de acceso y pozos.....	48
3. Capacidad, niveles de servicio y explotación	48
a. Intensidad de tráfico y composición vehicular	48

b. Restricciones a mercancías peligrosas	49
c. Trenes, frecuencia y efecto pistón en metro	49
4. Integración de elementos de seguridad desde el diseño	49
a. Pasos transversales.....	49
b. Salidas de emergencia e hidrantes.....	50
c. Zonas de parada y apartaderos	50
5. Espacios técnicos para instalaciones	51
a. Canales, bandejas y galerías	51
b. Cuartos técnicos y de ventilación	51
c. Accesibilidad para mantenimiento	52
6. Coordinación diseño–explotación.....	52
a. Operatividad y tiempos de intervención	52
b. Mantenimiento con tráfico/servicio abierto	52
c. Revisión del diseño a partir de lecciones aprendidas	53
PARTE SEGUNDA.....	54
Geotecnia aplicada al diseño y a la elección del método	54
Capítulo 3: Investigación, reconocimiento del terreno y modelos geotécnicos	54
1. Planificación de la campaña geotécnica	54
a. Sondeos, ensayos in situ y de laboratorio	54
b. Levantamiento geológico y estructural.....	55
c. Cartografía, datos históricos y túneles próximos	56
2. Hidrogeología y presencia de agua	57
a. Nivel freático y presiones de agua.....	57
b. Permeabilidad y drenaje natural	57
c. Riesgo de surgencias y filtraciones	58
3. Elaboración del modelo geológico-geotécnico	58
a. Estratigrafía y litología.....	58
b. Discontinuidades y fallas	59
c. Zonificación para diseño	59
4. Incertidumbre geotécnica y necesidad de auscultación	60
a. Ajuste del modelo durante la excavación.....	60
b. Método observacional	60
c. Repercusión en el sostenimiento	61
5. Condicionantes geotécnicos para métodos convencionales	61
a. Terrenos competentes	61
b. Terrenos blandos o alterados.....	62
c. Terrenos con gas o contaminados	62
6. Condicionantes geotécnicos para métodos mecanizados (TBM)	62
a. Homogeneidad y presencia de bolos/bloques	62
b. Presencia de agua a presión.....	63
Capítulo 4: Clasificación del macizo y efectos sobre el sostenimiento	64
1. Sistemas de clasificación geotécnica	64
a. RMR	64
b. Q-system	65

c. GSI y correlaciones.....	66
2. Predicción de deformaciones y convergencias	67
a. Parámetros de rigidez.....	67
b. Modelización numérica básica	68
c. Definición de secciones tipo de sostenimiento	68
3. Terrenos y situaciones problemáticas	69
a. Karst y cavidades	69
b. Suelos expansivos y colapsables	69
c. Zonas de cizalla y fallas	69
4. Condiciones sísmicas y cargas excepcionales.....	70
a. Acción sísmica en túneles superficiales.....	70
b. Interacción suelo-estructura	70
c. Medidas de refuerzo.....	71
5. Interacción con edificaciones y patrimonio próximo	71
a. Control de asentos.....	71
b. Protección de monumentos y estructuras sensibles.....	71
c. Auscultación y umbrales de alarma	72
6. Implicaciones en el diseño del revestimiento definitivo.....	72
a. Espesor y armado	72
b. Juntas y encuentros.....	73
c. Durabilidad	73
PARTE TERCERA.	74
Métodos constructivos convencionales en túneles	74
Capítulo 5: Excavación secuencial, NATM y método observacional	74
1. Principios del NATM aplicados a túneles de carretera y metro	74
a. Aprovechamiento de la capacidad portante del terreno	74
b. Ciclo de excavación y sostenimiento	75
c. Papel de la auscultación	76
2. Fases de excavación y sostenimiento primario	76
a. Avance de bóveda, hastiales y contrabóveda	76
b. Hormigón proyectado y cerchas	77
c. Bulonado y claveteo del frente.....	78
3. Control de estabilidad en túneles poco profundos	79
a. Entornos urbanos	79
b. Sobreexcavaciones y refuerzos	79
c. Técnicas de pre-soporte	80
4. Control de deformaciones y convergencias	80
a. Instrumentación geotécnica	80
b. Lectura e interpretación de datos	80
c. Modificación del diseño en tiempo real	81
5. Acabados interiores y paso a revestimiento definitivo	81
a. Encofrados y hormigonado	81
b. Integración de galerías y nichos	82
c. Protección frente al fuego	82
6. Calidad, seguridad y medio ambiente en la excavación	83

a. Procedimientos de trabajo y permisos	83
b. Polvo, gases y ventilación provisional	83
c. Gestión de escombros	84
Capítulo 6: Túneles a cielo abierto, emboquilles y técnicas especiales	85
1. Emboquilles en ladera y en terreno inestable	85
a. Contención y sostenimiento	85
b. Transición a túnel	86
c. Impermeabilización inicial	86
2. Falsos túneles y cajones	87
a. Método cut & cover	87
b. Integración urbana y paisajística	87
c. Reposición de servicios	88
3. Técnicas de compensación de hundimientos.....	88
a. Jet-grouting y soil-mixing.....	88
b. Micropilotes	89
c. Congelación del terreno	89
4. Cruces bajo infraestructuras existentes	89
a. Carreteras y ferrocarriles.....	89
b. Galerías y túneles previos	90
c. Protección de conducciones	90
5. Gestión del agua en fase constructiva	91
a. Bombeos y rebaje de nivel freático	91
b. Sellados e inyecciones	91
c. Reutilización y vertido	91
6. Seguridad y coordinación con la explotación existente.....	92
a. Trabajos nocturnos o por ventanas	92
b. Señalización y protección	92
c. Comunicación con el gestor de la infraestructura	92
PARTE CUARTA.	93
Túneles mecanizados (TBM) para carretera y metro	93
Capítulo 7: Selección de la TBM y condicionantes de diseño	93
1. Criterios de elección de TBM (EPB, Slurry, roca)	93
a. Relación con el terreno.....	93
b. Relación con el agua	94
c. Condicionantes de trazado	95
2. Definición de diámetros y gálbos	95
a. Necesidades de la sección funcional	95
b. Espacio para instalaciones.....	96
c. Sobreespesores de revestimiento	96
3. Radios mínimos y alineaciones	97
a. Limitaciones de la máquina	97
b. Ajuste del proyecto	97
c. Empujes y fuerzas en curvas	98
4. Pozos de ataque y de recepción.....	98

a. Dimensionamiento	98
b. Estanqueidad.....	99
c. Seguridad	99
5. Logística de anillos y suministro	100
a. Fabricación y transporte de dovelas.....	100
b. Gestión de almacenes	100
c. Trazabilidad.....	100
6. Integración del diseño TBM en el proyecto global	101
a. Compatibilidad con estaciones (metro)	101
b. Transiciones a métodos convencionales	101
c. Repercusión en plazo y coste.....	102
Capítulo 8: Ejecución con TBM, materiales excavados y revestimiento en dovelas.....	103
1. Ciclo de avance de la TBM	103
a. Excavación y sostenimiento inmediato	103
b. Colocación de dovelas	104
c. Inyección de relleno (backfilling)	105
2. Control de presiones y estabilidad del frente	105
a. Cámaras de trabajo	105
b. Control de nivel de lodos.....	106
c. Prevención de asientos en superficie	106
3. Gestión de material excavado	107
a. Transporte (cintas, vagonetas)	107
b. Desarenado y tratamiento	107
c. Reutilización y vertedero	108
4. Revestimientos con dovelas prefabricadas.....	108
a. Tipologías de dovelas	108
b. Juntas, sellos y estanquidad	109
c. Inspección de calidad.....	109
5. Pasos intermedios, galerías y bifurcaciones	110
a. Ampliaciones locales	110
b. Conexiones a servicios.....	110
c. Tratamientos previos.....	110
6. Seguridad, mantenimiento de la TBM y cierre de túnel	111
a. Procedimientos de emergencia.....	111
b. Mantenimiento preventivo de la máquina	111
c. Desmontaje o recuperación	111
PARTE QUINTA.	113
Diseño estructural, impermeabilización y drenaje del túnel	113
Capítulo 9: Sostenimiento primario y revestimiento definitivo	113
1. Funciones y vida útil del revestimiento	113
a. Estructural	113
b. Estanqueidad.....	114
c. Protección al fuego	114
2. Hormigón proyectado y cerchas	115

a. Especificaciones.....	115
b. Control de calidad	116
c. Refuerzos locales	116
3. Revestimiento de hormigón in situ	117
a. Encofrados deslizantes	117
b. Espesores y recubrimientos	117
c. Juntas de construcción	118
4. Revestimientos en dovelas (túneles mecanizados)	118
a. Tipos de hormigón.....	118
b. Armaduras y fibras	119
c. Elementos de anclaje.....	119
5. Encuentros con galerías, pozos y nichos.....	119
a. Sellos y juntas	119
b. Refuerzos perimetrales	120
c. Protección mecánica.....	120
6. Durabilidad y mantenimiento del revestimiento	120
a. Agentes agresivos.....	120
b. Recubrimientos protectores.....	121
c. Plan de inspecciones.....	121
Capítulo 10: Impermeabilización, drenaje y control de filtraciones.....	122
1. Sistemas de impermeabilización.....	122
a. Láminas sintéticas.....	122
b. Sistemas compuestos	123
c. Protección mecánica.....	123
2. Drenaje longitudinal y transversal	124
a. Cunetas y canales	124
b. Pozos de bombeo	124
c. Puntos bajos	125
3. Gestión de aguas de infiltración	125
a. Separación de aguas limpias y sucias	125
b. Control de caudales.....	127
c. Descargas autorizadas	127
4. Tratamientos de inyección	128
a. Pre-grouting en frente.....	128
b. Sellado de juntas	128
c. Reparación de filtraciones en servicio	129
5. Control de agua en túneles bajo nivel freático	129
a. Sobrecargas hidrostáticas.....	129
b. Alivio de presión	130
c. Compatibilidad con estructuras próximas	130
6. Explotación e inspección de sistemas de drenaje	130
a. Frecuencias de limpieza.....	130
b. Registro de incidencias.....	131
c. Medidas correctivas.....	131
PARTE SEXTA.	132
Ventilación y control de humos en túneles (carreteras & metro).....	132

Capítulo 11: Ventilación en túneles de carretera.....132

1. Objetivos de la ventilación en carretera.....	132
a. Control de contaminantes (CO, NOx, partículas)	132
b. Control térmico	133
c. Seguridad de los usuarios	133
2. Tipologías de sistemas	134
a. Longitudinal (jet fans).....	134
b. Semitransversal y transversal.....	134
c. Ventilación natural asistida	135
3. Dimensionamiento y cálculo de caudales.....	135
a. Escenarios de tráfico	135
b. Incendio de diseño	136
c. Criterios de aceptabilidad.....	136
4. Equipos y disposición	137
a. Ventiladores y compuertas.....	137
b. Conductos y galerías.....	137
c. Ubicación y accesibilidad	137
5. Automatización y control	138
a. Sensores de calidad del aire	138
b. Integración con SCADA.....	138
c. Modos de fallo y redundancia	139
6. Operación, mantenimiento y pruebas periódicas	139
a. Ensayos funcionales.....	139
b. Sustitución de equipos	139
c. Registro y auditoría.....	140

Capítulo 12: Ventilación en túneles de metro y ferroviarios urbanos141

1. Particularidades del metro	141
a. Efecto pistón.....	141
b. Estaciones intermedias	142
c. Túneles ciegos.....	142
2. Pozos de ventilación y chimeneas.....	143
a. Dimensionamiento	143
b. Integración urbana	144
c. Control acústico	144
3. Ventilación de emergencia	145
a. Modos incendio	145
b. Extracción de humos	145
c. Control de presiones.....	146
4. Coordinación con material móvil y señalización	146
a. Compatibilidad con los trenes	146
b. Comunicación con el centro de control	146
c. Operaciones degradadas	147
5. Explotación 24/7 y mantenimiento.....	147
a. Planificación de paradas	147
b. Límites de operación	147

c. Renovación de equipos	148
6. Evaluación de prestaciones y actualización	148
a. Modelos CFD	148
b. Ensayos integrados (IST)	149
c. Mejora continua	149
PARTE SÉPTIMA.	150
Seguridad contra incendios (PCI), evacuación y autoprotección	150
Capítulo 13: Análisis de riesgos de incendio en túneles	150
1. Escenarios de incendio en carretera	150
a. Turismos	150
b. Vehículos pesados y autobuses	151
c. Mercancías peligrosas	152
2. Escenarios de incendio en metro	152
a. Trenes detenidos en túnel	152
b. Materiales interiores	153
c. Estaciones próximas	153
3. Curvas de incendio y exigencias de resistencia	154
a. Hidrocarburos, HCM, RWS	154
b. Protección del revestimiento	154
c. Protección de instalaciones	155
4. Sistemas de detección y alarma	155
a. Detección temprana	155
b. CCTV y DAI	155
c. Megafonía y guiado	156
5. Extinción y apoyo a servicios de emergencia	156
a. Bocas de incendio equipadas	156
b. Hidrantes y reservas de agua	156
c. Accesos para bomberos	157
6. Coordinación con planes externos	157
a. Protección civil	157
b. Concesionarios/operadores	158
c. Actualización de riesgos	158
Capítulo 14: Diseño de evacuación, salidas de emergencia y planes de autoprotección ...	159
1. Criterios generales de evacuación	159
a. Distancias máximas	159
b. Tiempo disponible de evacuación	160
c. Condiciones de visibilidad	160
2. Galerías de conexión y refugios	161
a. Túneles bitubo	161
b. Galerías transversales	161
c. Refugios presurizados	162
3. Señalización e iluminación de emergencia	162
a. Señalización fotoluminiscente	162
b. Iluminación de baja altura	163

c. Mensajería variable	163
4. Personas con movilidad reducida	164
a. Medios de ayuda a la evacuación	164
b. Información accesible	164
c. Formación del personal	165
5. Plan de autoprotección específico de túneles	165
a. Organización y responsabilidades	165
b. Protocolos de intervención	165
c. Simulacros periódicos	166
6. Auditoría y mejora continua	166
a. Indicadores de seguridad	166
b. Lecciones aprendidas	167
c. Integración con auditoría de seguridad vial	167
PARTE OCTAVA	168
Instalaciones electromecánicas, control y comunicaciones	168
Capítulo 15: Alimentación eléctrica, redundancias y grupos de emergencia	168
1. Demandas eléctricas de túneles	168
a. Ventilación	168
b. Iluminación	169
c. Sistemas de control	170
2. Esquemas de alimentación	170
a. Anillos de media tensión	170
b. Transformadores	171
c. Distribución de baja tensión	171
3. Sistemas de alimentación ininterrumpida	172
a. UPS	172
b. Baterías	172
c. Criterios de autonomía	173
4. Grupos electrógenos	173
a. Potencia y arranque	173
b. Combustible y seguridad	174
c. Ensayos	174
5. Protección y selectividad	175
a. Relés y protecciones	175
b. Discriminación de fallos	175
c. Continuidad de servicio	175
6. Mantenimiento y registro	176
a. Planes preventivos	176
b. Inspecciones	176
c. Documentación	176
Capítulo 16: Sistemas de control, comunicaciones y seguridad operacional	178
1. SCADA y centros de control	178
a. Arquitectura	178
b. Integración con sensores	179

c. Control remoto	179
2. CCTV y detección automática de incidentes	180
a. Cámaras	180
b. Análisis de imágenes	180
c. Alarmas	181
3. Comunicaciones en túnel	181
a. Radio (TETRA, LTE)	181
b. Sistemas de avisos al usuario	182
c. Canal para bomberos y emergencias	182
4. Integración con ITS y gestión del tráfico	182
a. Señales de mensaje variable	182
b. Cierres de túnel	183
c. Coordinación con la red viaria/metro	183
5. Ciberseguridad y resiliencia	183
a. Segmentación de redes	183
b. Copias de seguridad	184
c. Plan de contingencia	184
6. Registro de datos y trazabilidad	185
a. Black-box de incidentes	185
b. Informes periódicos	185
c. Soporte a auditorías	185
PARTE NOVENA.	187
Explotación, mantenimiento y rehabilitación de túneles	187
Capítulo 17: Puesta en servicio, commissioning e Integrated Systems Testing (IST)	187
1. Planificación de pruebas	187
a. Secuencia de puesta en marcha	187
b. Pruebas de ventilación	188
c. Pruebas de seguridad	189
2. Coordinación con el operador	189
a. Manuales de operación	189
b. Formación del personal	190
c. Roles en emergencia	190
3. Pruebas de evacuación y emergencia	191
a. Simulacros reales	191
b. Evaluación de tiempos	191
c. Medidas correctoras	191
4. Documentación final de obra (solo técnica)	192
a. As built	192
b. Inventario de equipos	192
c. Plan de mantenimiento	193
5. Transferencia a explotación sin entrar en el EPC	193
a. Condiciones mínimas de operatividad	193
b. Limitaciones iniciales	194
c. Seguimiento de incidencias	194
6. Lecciones aprendidas y retroalimentación al diseño	194

a. Fallos habituales	194
b. Actualización de procedimientos	195
c. Revisión periódica	195
Capítulo 18: Mantenimiento, inspecciones periódicas y rehabilitación	196
1. Programas de mantenimiento	196
a. Rutinario	196
b. Preventivo	197
c. Correctivo	198
2. Inspección de revestimientos e impermeabilización	198
a. Fisuras y desprendimientos	198
b. Filtraciones	199
c. Reparaciones	199
3. Mantenimiento de instalaciones	200
a. Ventilación	200
b. Iluminación	200
c. Control	201
4. Rehabilitación de túneles existentes	201
a. Mejora de PCI	201
b. Actualización de ventilación	202
c. Refuerzo estructural	202
5. Explotación con tráfico/servicio abierto	203
a. Cortes parciales	203
b. Desvíos	203
c. Seguridad del personal	203
6. Indicadores de nivel de servicio y auditoría de seguridad	204
a. KPI operativos	204
b. Auditoría de seguridad vial	204
c. Informes a la administración/propiedad	205
PARTE DÉCIMA.	206
Túneles en entornos urbanos, patrimoniales y medioambiente	206
Capítulo 19: Túneles poco profundos en ciudad y bajo edificaciones	206
1. Condicionantes urbanos	206
a. Tráfico y afecciones	206
b. Servicios afectados	207
c. Coordinación con otras obras	208
2. Control de asientos	208
a. Métodos de predicción	208
b. Auscultación en continuo	209
c. Umbrales de alarma	209
3. Protección de edificios y monumentos	210
a. Inspecciones previas	210
b. Medidas de refuerzo	211
c. Seguimiento posterior	211
4. Interacción con metro y túneles existentes	212

a. Cruces	212
b. Paralelismos	212
c. Recalces	213
5. Integración arquitectónica de bocas y pozos	213
a. Diseño urbano	213
b. Ruido y vibraciones	214
c. Seguridad de los usuarios	214
6. Casuística internacional	215
a. Experiencias en España	215
b. Experiencias en Latinoamérica	215
c. Lecciones para futuros proyectos	216
Capítulo 20: Aspectos ambientales, gestión de materiales y sostenibilidad	217
1. Gestión del material excavado	217
a. Caracterización	217
b. Reutilización	218
c. Eliminación	219
2. Control de ruidos y vibraciones	219
a. Fase de obra	219
b. Fase de explotación	220
c. Medidas correctoras	220
3. Protección de acuíferos y drenajes	220
a. Riesgos de contaminación	220
b. Control de vertidos	221
c. Vigilancia ambiental	221
4. Eficiencia energética del túnel	222
a. Iluminación eficiente	222
b. Ventilación de bajo consumo	222
c. Recuperación de energía	222
5. Economía circular en túneles	223
a. Reciclaje de materiales	223
b. Componentes prefabricados	223
c. Durabilidad y LCC (coste del ciclo de vida)	223
6. Relación con la guía EPC (solo referencia técnica)	224
a. Qué especificar técnicamente	224
b. Qué queda para el contrato	224
c. Documentación ambiental mínima	225
PARTE UNDÉCIMA.	226
HERRAMIENTAS DE TÚNELES: DISEÑO, TBM, SEGURIDAD Y VENTILACIÓN (CARRETERAS & METRO). CHECKLISTS Y FORMULARIOS TÉCNICOS	226
Capítulo 21: Checklists de diseño, geotecnia y elección de método	226
CHECKLIST Nº 21.01 — Reconocimiento e investigación geotécnica para túneles	226
Sección 1. Identificación y alcance del expediente/proyecto	227
Sección 2. Datos del terreno y condicionantes urbanos	227
Sección 3. Requisitos y verificaciones técnicas/urbanísticas/financieras	227
Sección 4. Riesgos, seguridad y cumplimiento normativo	228

Sección 5. Plazos, hitos y condicionantes.....	229
Sección 6. Costes, importes y garantías	229
Sección 7. Aprobaciones y firmas (RACI)	229
Sección 8. Evidencias y referencias	229
CHECKLIST Nº 21.02 — Modelo geológico-geotécnico para túneles	230
Sección 1. Identificación y alcance del expediente/proyecto	230
Sección 2. Datos del activo/terreno/inmueble	230
Sección 3. Requisitos y verificaciones técnicas	231
Sección 4. Riesgos, seguridad y cumplimiento normativo	231
Sección 5. Plazos, hitos y condicionantes.....	231
Sección 6. Costes, importes y garantías	232
Sección 7. Aprobaciones y firmas (RACI)	232
Sección 8. Evidencias y referencias	232
CHECKLIST Nº 21.03 — Elección NATM vs TBM en túneles urbanos y de carretera	232
Sección 1. Identificación y alcance del expediente/proyecto	232
Sección 2. Datos del activo/terreno/inmueble	233
Sección 3. Requisitos y verificaciones técnicas	233
Sección 4. Riesgos, seguridad y cumplimiento normativo	234
Sección 5. Plazos, hitos y condicionantes.....	234
Sección 6. Costes, importes y garantías	234
Sección 7. Aprobaciones y firmas (RACI)	234
Sección 8. Evidencias y referencias	234
CHECKLIST Nº 21.04 — Diseño geométrico en túneles de carretera	235
Sección 1. Identificación y alcance del expediente/proyecto	235
Sección 2. Datos del activo/terreno/inmueble	235
Sección 3. Requisitos y verificaciones técnicas	236
Sección 4. Riesgos, seguridad y cumplimiento normativo	236
Sección 5. Plazos, hitos y condicionantes.....	236
Sección 6. Costes, importes y garantías	236
Sección 7. Aprobaciones y firmas (RACI)	237
Sección 8. Evidencias y referencias	237
CHECKLIST Nº 21.05 — Diseño geométrico en túneles de metro	237
Sección 1. Identificación y alcance del expediente/proyecto	237
Sección 2. Datos del activo/terreno/inmueble	238
Sección 3. Requisitos y verificaciones técnicas	238
Sección 4. Riesgos, seguridad y cumplimiento normativo	238
Sección 5. Plazos, hitos y condicionantes.....	239
Sección 6. Costes, importes y garantías	239
Sección 7. Aprobaciones y firmas (RACI)	239
Sección 8. Evidencias y referencias	239
CHECKLIST Nº 21.06 — Afecciones a patrimonio y edificios existentes.....	239
Sección 1. Identificación y alcance del expediente/proyecto	240
Sección 2. Datos del activo/terreno/inmueble	240
Sección 3. Requisitos y verificaciones técnicas	240
Sección 4. Riesgos, seguridad y cumplimiento normativo	241
Sección 5. Plazos, hitos y condicionantes.....	241
Sección 6. Costes, importes y garantías	241
Sección 7. Aprobaciones y firmas (RACI)	241
Sección 8. Evidencias y referencias	242

Capítulo 22: Checklists de métodos constructivos y control de obra subterránea243

CHECKLIST Nº 22.01 — Excavación secuencial / NATM en túneles243

Sección 1. Identificación y alcance del expediente/proyecto	243
Sección 2. Datos del túnel y del entorno.....	244
Sección 3. Requisitos y verificaciones técnicas	244
Sección 4. Riesgos, seguridad y cumplimiento normativo	245
Sección 5. Plazos, hitos y condicionantes.....	245
Sección 6. Costes, importes y garantías	245
Sección 7. Aprobaciones y firmas (RACI)	245
Sección 8. Evidencias y referencias	245

CHECKLIST Nº 22.02 — Emboquilles, falsos túneles y método cut & cover246

Sección 1. Identificación y alcance del expediente/proyecto	246
Sección 2. Datos del activo/terreno/inmueble	246
Sección 3. Requisitos y verificaciones técnicas	247
Sección 4. Riesgos, seguridad y cumplimiento normativo	247
Sección 5. Plazos, hitos y condicionantes.....	247
Sección 6. Costes, importes y garantías	247
Sección 7. Aprobaciones y firmas (RACI)	248
Sección 8. Evidencias y referencias	248

CHECKLIST Nº 22.03 — Operación de TBM (avance, presiones, mantenimiento)248

Sección 1. Identificación y alcance del expediente/proyecto	248
Sección 2. Datos del activo/terreno/inmueble	249
Sección 3. Requisitos y verificaciones técnicas	249
Sección 4. Riesgos, seguridad y cumplimiento normativo	249
Sección 5. Plazos, hitos y condicionantes.....	250
Sección 6. Costes, importes y garantías	250
Sección 7. Aprobaciones y firmas (RACI)	250
Sección 8. Evidencias y referencias	250

CHECKLIST Nº 22.04 — Gestión de material excavado en túneles250

Sección 1. Identificación y alcance del expediente/proyecto	251
Sección 2. Datos del material y de la obra	251
Sección 3. Requisitos y verificaciones técnicas	251
Sección 4. Riesgos, seguridad y cumplimiento normativo	252
Sección 5. Plazos, hitos y condicionantes.....	252
Sección 6. Costes, importes y garantías	252
Sección 7. Aprobaciones y firmas (RACI)	252
Sección 8. Evidencias y referencias	252

CHECKLIST Nº 22.05 — Auscultación y control de deformaciones en túneles253

Sección 1. Identificación y alcance del expediente/proyecto	253
Sección 2. Datos del activo/terreno/inmueble	253
Sección 3. Requisitos y verificaciones técnicas	254
Sección 4. Riesgos, seguridad y cumplimiento normativo	254
Sección 5. Plazos, hitos y condicionantes.....	254
Sección 6. Costes, importes y garantías	254
Sección 7. Aprobaciones y firmas (RACI)	255
Sección 8. Evidencias y referencias	255

CHECKLIST Nº 22.06 — Seguridad y salud en obra de túneles255

Sección 1. Identificación y alcance del expediente/proyecto	255
Sección 2. Datos del activo/terreno/inmueble	256

Sección 3. Requisitos y verificaciones técnicas	256
Sección 4. Riesgos, seguridad y cumplimiento normativo	256
Sección 5. Plazos, hitos y condicionantes.....	256
Sección 6. Costes, importes y garantías	257
Sección 7. Aprobaciones y firmas (RACI)	257
Sección 8. Evidencias y referencias	257
Capítulo 23: Checklists de ventilación, PCI y evacuación en túneles	258
CHECKLIST Nº 23.01 — Cálculo y selección de ventilación en túneles de carretera	258
Sección 1. Identificación y alcance del expediente/proyecto	258
Sección 2. Datos de tráfico y contaminantes	259
Sección 3. Requisitos y verificaciones técnicas	259
Sección 4. Riesgos, seguridad y cumplimiento normativo	260
Sección 5. Plazos, hitos y condicionantes.....	260
Sección 6. Costes, importes y garantías	260
Sección 7. Aprobaciones y firmas (RACI)	260
Sección 8. Evidencias y referencias	260
CHECKLIST Nº 23.02 — Ventilación y extracción en túneles de metro	261
Sección 1. Identificación y alcance del expediente/proyecto	261
Sección 2. Datos del túnel y estaciones.....	261
Sección 3. Requisitos y verificaciones técnicas	262
Sección 4. Riesgos, seguridad y cumplimiento normativo	262
Sección 5. Plazos, hitos y condicionantes.....	262
Sección 6. Costes, importes y garantías	262
Sección 7. Aprobaciones y firmas (RACI)	263
Sección 8. Evidencias y referencias	263
CHECKLIST Nº 23.03 — Sistemas PCI en túneles (detección, alarma, hidrantes).....	263
Sección 1. Identificación y alcance del expediente/proyecto	263
Sección 2. Datos del túnel y de la instalación.....	264
Sección 3. Requisitos y verificaciones técnicas	264
Sección 4. Riesgos, seguridad y cumplimiento normativo	264
Sección 5. Plazos, hitos y condicionantes.....	264
Sección 6. Costes, importes y garantías	265
Sección 7. Aprobaciones y firmas (RACI)	265
Sección 8. Evidencias y referencias	265
CHECKLIST Nº 23.04 — Evacuación y salidas de emergencia en túneles	265
Sección 1. Identificación y alcance del expediente/proyecto	265
Sección 2. Datos del túnel y de las salidas.....	266
Sección 3. Requisitos y verificaciones técnicas	266
Sección 4. Riesgos, seguridad y cumplimiento normativo	266
Sección 5. Plazos, hitos y condicionantes.....	267
Sección 6. Costes, importes y garantías	267
Sección 7. Aprobaciones y firmas (RACI)	267
Sección 8. Evidencias y referencias	267
CHECKLIST Nº 23.05 — Integración con SCADA, CCTV y DAI en túneles	268
Sección 1. Identificación y alcance del expediente/proyecto	268
Sección 2. Datos del sistema	268
Sección 3. Requisitos y verificaciones técnicas	268
Sección 4. Riesgos, seguridad y cumplimiento normativo	269
Sección 5. Plazos, hitos y condicionantes.....	269

Sección 6. Costes, importes y garantías	269
Sección 7. Aprobaciones y firmas (RACI)	270
Sección 8. Evidencias y referencias	270

CHECKLIST Nº 23.06 — Pruebas, simulacros e IST (Integrated Systems Testing) en túneles.....270

Sección 1. Identificación y alcance del expediente/proyecto	270
Sección 2. Datos del túnel	271
Sección 3. Requisitos y verificaciones técnicas	271
Sección 4. Riesgos, seguridad y cumplimiento normativo	271
Sección 5. Plazos, hitos y condicionantes.....	271
Sección 6. Costes, importes y garantías	272
Sección 7. Aprobaciones y firmas (RACI)	272
Sección 8. Evidencias y referencias	272

Capítulo 24: Formularios de explotación, mantenimiento y auditoría de túneles273

FORMULARIO Nº 24.01 — Puesta en servicio del túnel273

Sección 1. Identificación y alcance del expediente/proyecto	273
Sección 2. Datos generales del túnel e instalaciones	274
Sección 3. Resultado de pruebas y verificaciones	274
Sección 4. Limitaciones o condicionantes de explotación	274
Sección 5. Plazos, hitos y condicionantes.....	274
Sección 6. Costes, importes y garantías	275
Sección 7. Aprobaciones y firmas (RACI)	275
Sección 8. Evidencias y referencias	275

FORMULARIO Nº 24.02 — Inspección periódica de revestimiento y drenaje275

Sección 1. Identificación y alcance del expediente/proyecto	276
Sección 2. Estado del hormigón y juntas.....	276
Sección 3. Filtraciones, humedades y calcificaciones.....	276
Sección 4. Estado de cunetas, bombeos y colectores	276
Sección 5. Plazos, hitos y condicionantes.....	276
Sección 6. Costes, importes y garantías	277
Sección 7. Aprobaciones y firmas (RACI)	277
Sección 8. Evidencias y referencias	277

FORMULARIO Nº 24.03 — Mantenimiento de ventiladores y compuertas277

Sección 1. Identificación y alcance del expediente/proyecto	277
Sección 2. Tareas periódicas (limpieza, engrase, pruebas)	278
Sección 3. Medición de rendimiento.....	278
Sección 4. Registro de incidencias.....	278
Sección 5. Plazos, hitos y condicionantes.....	278
Sección 6. Costes, importes y garantías	278
Sección 7. Aprobaciones y firmas (RACI)	279
Sección 8. Evidencias y referencias	279

FORMULARIO Nº 24.04 — Revisión de PCI y evacuación279

Sección 1. Identificación y alcance del expediente/proyecto	279
Sección 2. Detección y alarma.....	280
Sección 3. BIE, hidrantes y reservas de agua.....	280
Sección 4. Señalización y equipos de rescate.....	280
Sección 5. Plazos, hitos y condicionantes.....	280
Sección 6. Costes, importes y garantías	280
Sección 7. Aprobaciones y firmas (RACI)	281
Sección 8. Evidencias y referencias	281

FORMULARIO Nº 24.05 — Auditoría de seguridad vial en túneles	281
Sección 1. Identificación y alcance del expediente/proyecto	281
Sección 2. Condiciones de visibilidad e iluminación.....	281
Sección 3. Señalización vertical y variable.....	282
Sección 4. Condiciones de accesos y aparcamientos de emergencia	282
Sección 5. Plazos, hitos y condicionantes.....	282
Sección 6. Costes, importes y garantías	282
Sección 7. Aprobaciones y firmas (RACI)	282
Sección 8. Evidencias y referencias	282
FORMULARIO Nº 24.06 — Registro de incidentes y no conformidades en túneles.....	283
Sección 1. Identificación y alcance del expediente/proyecto	283
Sección 2. Descripción del incidente	283
Sección 3. Actuación realizada	283
Sección 4. Acción preventiva/correctora y responsable	284
Sección 5. Plazos, hitos y condicionantes.....	284
Sección 6. Costes, importes y garantías	284
Sección 7. Aprobaciones y firmas (RACI)	284
Sección 8. Evidencias y referencias	284
Capítulo 25: Matrices técnicas de riesgos y de compatibilidad con contratos EPC.....	285
MATRIZ Nº 25.01 — Riesgos geotécnicos en fase de diseño	285
Sección 1. Identificación de riesgos (agua, karst, heterogeneidad)	285
Sección 2. Probabilidad e impacto	286
Sección 3. Medidas de mitigación técnica.....	286
MATRIZ Nº 25.02 — Riesgos de seguridad, ventilación y PCI	287
Sección 1. Identificación de riesgos.....	287
Sección 2. Probabilidad e impacto	287
Sección 3. Medidas de mitigación técnica.....	288
MATRIZ Nº 25.03 — Riesgos de explotación y mantenimiento	288
Sección 1. Identificación de riesgos de explotación	288
Sección 2. Probabilidad e impacto	289
Sección 3. Medidas de mitigación técnica.....	289
MATRIZ Nº 25.04 — Compatibilidad técnica con contratos EPC (sin solape).....	290
Sección 1. Qué debe ir en el proyecto técnico	290
Sección 2. Qué puede dejarse al contratista (sin entrar en precio)	290
Sección 3. Documentos de referencia cruzada con la guía EPC	290
MATRIZ Nº 25.05 — Documentación mínima del túnel	291
Sección 1. Proyecto y as built	291
Sección 2. Manuales O&M	291
Sección 3. Planes de emergencia y simulacros.....	291
Sección 4. Plazos y almacenamiento	292
MATRIZ Nº 25.06 — Mejora continua y actualización de la guía	292
Sección 1. Revisión periódica de checklists	292
Sección 2. Inclusión de nuevas tecnologías (CFD, sensores, IA).....	292
Sección 3. Retroalimentación desde la explotación a los futuros diseños	292
PARTE DUODÉCIMA.	294
PRÁCTICA DE TÚNELES: DISEÑO, TBM, SEGURIDAD Y VENTILACIÓN (CARRETERAS & METRO) ..	294

Capítulo 26: Casos de túneles de carretera (diseño, ventilación y PCI)294

1. Túnel corto con ventilación longitudinal en vía urbana.....	294
a. Condicionantes geométricos y de trazado	294
b. Selección de ventilación longitudinal con jet fans	295
c. Integración de PCI básica y galerías cortas de evacuación	296
2. Túnel de media longitud con tráfico mixto (turismos y pesados).....	296
a. Evaluación de carga térmica e incendio de diseño.....	296
b. Sección tipo con apartaderos y nichos técnicos.....	297
c. Coordinación con centro de control y sistemas ITS	297
3. Túnel largo con galerías de emergencia cada 250 m	298
a. Justificación de distancias según buenas prácticas internacionales	298
b. Soluciones de galerías transversales y conexión con túnel paralelo.....	298
c. Señalización e iluminación de evacuación	298
4. Rehabilitación PCI en túnel existente de los años 80	299
a. Diagnóstico de deficiencias en ventilación, detección y megafonía	299
b. Sustitución/actualización de equipos en servicio.....	299
c. Puesta en servicio y simulación de incendio	300
5. Túnel en zona de montaña con entrada de agua	300
a. Problemas de drenaje y puntos bajos	300
b. Compatibilidad entre impermeabilización y PCI	300
c. Mantenimiento invernal y seguridad del personal.....	301
6. Gestión de mercancías peligrosas en túneles de carretera	301
a. Evaluación de riesgos específicos	301
b. Medidas de segregación y señalización	302
c. Procedimientos de emergencia y comunicación con autoridades	302

Capítulo 27: Casos de túneles de metro y ferroviarios urbanos (TBM, explotación y emergencias)303

1. Excavación con TBM EPB en suelos blandos urbanos.....	303
a. Condicionantes de asentamientos y auscultación de superficie	303
b. Diseño de dovelas y estanquidad en nivel freático	304
c. Integración con pozo de ataque y estaciones existentes	305
2. Paso bajo edificio histórico o monumento	305
a. Evaluación previa de la estructura y de las vibraciones admisibles	305
b. Refuerzo temporal o permanente de la cimentación existente.....	306
c. Auscultación en tiempo real y umbrales de alarma	306
3. Integración con estación subterránea existente	307
a. Condicionantes de ventilación compartida	307
b. Evacuación coordinada túnel-estación.....	307
c. Control de humos en escenarios de incendio en andén.....	308
4. Ventilación y extracción de humos en metro de línea continua	308
a. Definición de pozos de ventilación y chimeneas.....	308
b. Modos de operación normal y de emergencia	308
c. Coordinación con el centro de control de transporte	309
5. Operación 24/7 con ventanas de mantenimiento muy reducidas	309
a. Planificación de trabajos nocturnos y seguridad	309

b. Sustitución de equipos en túnel en servicio.....	310
c. Registro de incidencias y análisis de fiabilidad	310
6. Simulacro integral de emergencia en túnel de metro	310
a. Definición del escenario de referencia	310
b. Coordinación con bomberos, policía y operador	311
c. Informe de lecciones aprendidas y mejoras de señalización.....	311
Capítulo 28: Casos de mejora y rehabilitación de túneles en servicio.....	312
1. Incremento de capacidad de ventilación en túnel ya construido	312
a. Diagnóstico de déficit de caudal y sobrepresiones	312
b. Sustitución o refuerzo con ventiladores adicionales.....	313
c. Ensayos de aceptación y actualización del SCADA	314
2. Implantación de nuevas salidas de emergencia	314
a. Justificación por cambio normativo o aumento de tráfico.....	314
b. Soluciones constructivas con el túnel en servicio	315
c. Adaptación de señalización y plan de autoprotección	315
3. Sustitución de sistemas eléctricos y de iluminación.....	316
a. Auditoría del estado actual y priorización	316
b. Migración a sistemas eficientes y con redundancia.....	316
c. Ensayos, formación del personal y documentación final	317
4. Control de filtraciones persistentes en túnel urbano	317
a. Identificación de puntos de entrada y causas geotécnicas	317
b. Técnicas de inyección y reparación local.....	317
c. Programa de inspección y mantenimiento preventivo.....	318
5. Actualización de PCI (detección, alarma, hidrantes)	318
a. Compatibilidad con el resto de instalaciones existentes.....	318
b. Mejora de la megafonía y de la comunicación con usuarios	318
c. Pruebas integradas y simulacros periódicos.....	319
6. Rehabilitación estructural de revestimiento	319
a. Diagnóstico de patologías (fisuración, desprendimientos)	319
b. Refuerzo con hormigón proyectado o anillos interiores.....	319
c. Control de calidad y seguimiento en explotación.....	320
Capítulo 29: Lecciones aprendidas y errores frecuentes en túneles.....	321
1. Errores en la investigación geotécnica inicial.....	321
a. Campañas insuficientes o mal ubicadas	321
b. No considerar la hidrogeología real	322
c. Falta de actualización del modelo durante la obra.....	322
2. Errores en la elección del método constructivo	323
a. Seleccionar NATM donde era más adecuado TBM (o al revés).....	323
b. No prever transiciones de terreno	323
c. No evaluar ventanas de explotación y afecciones urbanas	324
3. Errores en el dimensionamiento de ventilación y humos.....	324
a. Trabajar con escenarios de incendio poco realistas.....	324
b. Falta de integración con PCI y evacuación	324
c. No prever redundancias ni modos degradados.....	325
4. Errores en la evacuación y salidas de emergencia.....	325



a. Distancias excesivas entre galerías.....	325
b. Señalización insuficiente o poco visible con humo	325
c. Falta de accesibilidad para PMR	326
5. Errores en la coordinación obra–explotación	326
a. No implicar al futuro operador desde el diseño	326
b. Cambios de equipos sin actualizar el SCADA.....	326
c. Ausencia de manuales claros para emergencias	327
6. Lecciones aprendidas aplicables a España y Latinoamérica	327
a. Documentar y estandarizar las buenas prácticas	327
b. Ajustar las soluciones a la capacidad de mantenimiento local	327
c. Incorporar la auditoría post-incidente como rutina	328
Capítulo 30: Casos prácticos de túneles: diseño, tbm, seguridad y ventilación (carreteras & metro)	329
Caso práctico 1. "TÚNELES: DISEÑO, TBM, SEGURIDAD Y VENTILACIÓN (CARRETERAS & METRO)."	
Optimización integral de la sección, ventilación y PCI en un túnel urbano corto de carretera con condicionantes de explotación 24/7.....	329
Causa del Problema	329
Soluciones Propuestas.....	330
1. Rediseño geométrico de la sección tipo con integración de seguridad e instalaciones.	330
2. Recálculo de la ventilación longitudinal con escenario de incendio y pérdidas por curvatura.	331
3. Sistema PCI y evacuación adaptado a túnel corto sin tubo paralelo, con salida intermedia presurizada.	331
4. Integración en el SCADA y centro de control municipal existente.....	332
5. Análisis de alternativa de ventilación semitransversal (finalmente descartada).....	332
Consecuencias Previstas.....	333
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	334
Lecciones Aprendidas.....	335
Caso práctico 2. "TÚNELES: DISEÑO, TBM, SEGURIDAD Y VENTILACIÓN (CARRETERAS & METRO)."	
Adaptación de un túnel de carretera de media longitud con tráfico mixto (turismos y pesados) a requisitos avanzados de ventilación, PCI y explotación centralizada.....	337
Causa del Problema	337
Soluciones Propuestas.....	338
1. Refuerzo de la ventilación longitudinal con equipos de mayor potencia y sectorización por tramos.....	338
2. Implantación de zonas de refugio/mini-galerías cada 250-300 m, combinadas con nichos de PCI.	339
3. Creación de apartaderos funcionales en dos puntos estratégicos.	339
4. Actualización de PCI, señalización de evacuación y megafonía, con integración plena en el centro de control nacional.	340
5. Refuerzo puntual del revestimiento frente a altas temperaturas y plan de inspección acelerada. ..	340
Consecuencias Previstas.....	341
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	342
Lecciones Aprendidas.....	343
Caso práctico 3. "TÚNELES: DISEÑO, TBM, SEGURIDAD Y VENTILACIÓN (CARRETERAS & METRO)."	
Excavación con TBM EPB en suelos blandos urbanos con control de asientos y ventilación de emergencia integrada.....	345
Causa del Problema	345
Soluciones Propuestas.....	346
1. Actualización del modelo geológico-geotécnico y sectorización del túnel para la TBM.	346
2. Control reforzado de la presión de cámara, del condicionamiento y de la inyección trasdosal.	346
3. Sistema de auscultación intensiva y umbrales de alarma escalonados.....	347

4. Ventilación de obra y preinstalación de ventilación de emergencia para la operación futura.	347
5. Procedimiento específico de aproximación al pozo de ventilación/estación con medidas de seguridad y PCI.	348
Consecuencias Previstas.....	348
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	349
Lecciones Aprendidas.....	350

Caso práctico 4. "TÚNELES: DISEÑO, TBM, SEGURIDAD Y VENTILACIÓN (CARRETERAS & METRO)."

Paso subterráneo bajo edificio histórico sensible con TBM EPB y sistema de protección del patrimonio, auscultación intensiva y adaptación de la ventilación de emergencia.352

Causa del Problema	352
Soluciones Propuestas.....	353
1. Refuerzo previo del edificio histórico mediante losa de reparto y micropilotaje parcial.	353
2. Mejoramiento del terreno bajo y alrededor de la zona de influencia del edificio mediante inyecciones de compensación (compensation grouting).	353
3. Excavación con TBM EPB en modo "sensitivo" con parámetros muy ajustados.	354
4. Auscultación intensiva y transparente, accesible para patrimonio, dirección de obra y operador... 354	
5. Reubicación del pozo de ventilación/emergencia y rediseño del modo de humos de emergencia. .	355
6. Plan de obra con limitación de vibraciones y ruidos, y coordinación con el edificio.	355
Consecuencias Previstas.....	355
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	357
Lecciones Aprendidas.....	357

Caso práctico 5. "TÚNELES: DISEÑO, TBM, SEGURIDAD Y VENTILACIÓN (CARRETERAS & METRO)."

Rehabilitación integral de PCI, ventilación y control en túnel carretero de los años 80 en servicio continuo.....359

Causa del Problema	359
Soluciones Propuestas.....	360
1. Sustitución del sistema de ventilación transversal parcial por un sistema longitudinal reforzado con jet fans, manteniendo únicamente la extracción en puntos clave.	360
2. Refuerzo de la PCI: detección lineal rápida, hidrantes cada 50 m y mejora de la red de BIEs.	360
3. Implantación de galerías/salidas de emergencia adicionales mediante microtúneles transversales.361	
4. Renovación de la alimentación eléctrica, UPS y grupos para garantizar la operación de ventilación e iluminación en incendio.	361
5. Integración completa en el centro de control con CCTV de alta resolución, DAI y protocolo de escenarios.	362
Consecuencias Previstas.....	362
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	363
Lecciones Aprendidas.....	364

Caso práctico 6. "TÚNELES: DISEÑO, TBM, SEGURIDAD Y VENTILACIÓN (CARRETERAS & METRO)."

Diseño y ejecución de un túnel carretero largo con galerías de emergencia cada 250 m y ventilación mixta para escenario de incendio de alta carga térmica.366

Causa del Problema	366
Soluciones Propuestas.....	367
1. Reducción de la distancia entre galerías de emergencia a 250 m y diseño de conexión al tubo sano con presurización.....	367
2. Sistema de ventilación mixto: longitudinal de base + extracción puntual en zona de incendio.	367
3. PCI reforzada y adaptada a túnel largo: hidrantes cada 50 m, BIEs cada 50 m alternas, columna seca en galerías.	368
4. Sistema eléctrico y de control redundante y distribuido.	368
5. Coordinación con explotación y plan de mantenimiento con túnel abierto.	369
Consecuencias Previstas.....	369
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	371

Lecciones Aprendidas.....	372
Caso práctico 7. "TÚNELES: DISEÑO, TBM, SEGURIDAD Y VENTILACIÓN (CARRETERAS & METRO)."	
Integración de un nuevo túnel de metro con una estación subterránea existente y ventilación compartida en entorno urbano denso.	374
Causa del Problema.....	374
Soluciones Propuestas.....	375
1. Diseño de una cavidad de conexión con compuerta cortafuegos y falso techo de sectorización.	375
2. Reconfiguración del sistema de ventilación de la estación a un modo combinado estación-túneles con extracción preferente.	375
3. Actualización y densificación del PCI en la zona de interconexión.	376
4. Integración en el SCADA existente y definición de escenarios operacionales claros.	376
5. Refuerzo estructural y de estanqueidad en la zona de rompe-dovela.	377
Consecuencias Previstas.....	377
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	378
Lecciones Aprendidas.....	379
Caso práctico 8. "TÚNELES: DISEÑO, TBM, SEGURIDAD Y VENTILACIÓN (CARRETERAS & METRO)."	
Cruce subterráneo bajo estuario con TBM Slurry, condicionantes ambientales y ventilación de emergencia unidireccional.	381
Causa del Problema.....	381
Soluciones Propuestas.....	382
1. Selección de TBM Slurry y definición de la presión de operación por tramos.....	382
2. Revestimiento en dovelas preparado para ventilación de emergencia y para sobrepresiones puntuales.	382
3. Sistema de ventilación de emergencia unidireccional (todo hacia la margen urbana) con compuertas de seccionamiento.....	383
4. PCI y evacuación reforzadas en túnel sin salidas intermedias.	383
5. Gestión ambiental de lodos y aguas de proceso integrada con la explotación.	384
Consecuencias Previstas.....	384
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	385
Lecciones Aprendidas.....	386
Caso práctico 9. "TÚNELES: DISEÑO, TBM, SEGURIDAD Y VENTILACIÓN (CARRETERAS & METRO)."	
Sustitución de ventilación y actualización de PCI en túnel de metro en explotación 24/7 con ventanas de mantenimiento muy reducidas.	388
Causa del Problema.....	388
Soluciones Propuestas.....	389
1. Cambio de filosofía de ventilación: de natural asistida a semilongitudinal con impulsión/extracción por pozos existentes.....	389
2. Sectorización de túnel mediante compuertas y by-pass de humos en galerías técnicas ya existentes.....	389
3. Actualización de PCI: detección por aspiración en túnel, hidrantes en sala técnica y mejora de megafonía.	390
4. Señalización de evacuación de baja altura y alimentación de emergencia.	390
5. Integración en un SCADA nuevo con escenarios de emergencia y registro.....	390
Consecuencias Previstas.....	391
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	393
Lecciones Aprendidas.....	394
Caso práctico 10. "TÚNELES: DISEÑO, TBM, SEGURIDAD Y VENTILACIÓN (CARRETERAS & METRO)."	
Gestión de una TBM en transición suelo-roca con riesgo de pérdidas de presión, recalce de superficie y adaptación de la ventilación de obra.....	396
Causa del Problema.....	396
Soluciones Propuestas.....	397

1. Recalibración del modelo geológico-geotécnico y sectorización muy fina de la transición.	397
2. Adaptación de la TBM EPB para trabajar en frente mixto (suelo-roca) y control de desgaste.	397
3. Medidas de protección superficial: recalce preventivo puntual y auscultación intensiva bajo la calle en pendiente.	398
4. Adaptación de la ventilación de obra y previsión de ventilación de servicio en la fase de dovelas. .	398
5. Actualización contractual y de seguridad: activación de la cláusula de condiciones imprevistas y emisión de un procedimiento específico de transición.	399
Consecuencias Previstas.....	399
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	400
Lecciones Aprendidas.....	402

Caso práctico 11. "TÚNELES: DISEÑO, TBM, SEGURIDAD Y VENTILACIÓN (CARRETERAS & METRO)."

Túnel de carretera en zona de montaña con entradas masivas de agua, incompatibilidad inicial entre impermeabilización y PCI, y adaptación de la ventilación a condiciones invernales.

Causa del Problema.....	404
Soluciones Propuestas.....	405
1. Sistema de drenaje y "doble piel" de impermeabilización en tramo conflictivo.	405
2. Reposición y protección del PCI en nichos "en seco".	406
3. Actualización de la ventilación: jet fans de alto empuje, resistencia al ambiente húmedo y modos específicos de invierno.	406
4. Refuerzo de la alimentación eléctrica y de los sistemas de bombeo.	407
5. Revisión del plan de autoprotección y de los protocolos invernales.	407
Consecuencias Previstas.....	407
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	409
Lecciones Aprendidas.....	410

Caso práctico 12. "TÚNELES: DISEÑO, TBM, SEGURIDAD Y VENTILACIÓN (CARRETERAS & METRO)."

Gestión de un incendio de camión cisterna en túnel de carretera con ventilación longitudinal limitada y rediseño posterior de evacuación y PCI.

Causa del Problema.....	411
Soluciones Propuestas.....	412
1. Conversión funcional a "casi unidireccional" mediante segregación física de sentidos y carril reversible de emergencia.	412
2. Rediseño de la ventilación longitudinal con aumento de potencia y, sobre todo, con lógica de soplado preprogramada.	413
3. Reconfiguración de PCI: hidrantes cada 50 m y BIEs redundantes en hornacinas enfrentadas.	413
4. Creación de galerías de evacuación y refugios cada 250 m mediante aprovechamiento de la galería de servicios.	414
5. Refuerzo eléctrico y SCADA integrado con protección civil.	414
Consecuencias Previstas.....	414
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	415
Lecciones Aprendidas.....	416

Caso práctico 13. "TÚNELES: DISEÑO, TBM, SEGURIDAD Y VENTILACIÓN (CARRETERAS & METRO)."

Cruce de túnel de metro poco profundo bajo edificio histórico con restricciones patrimoniales, auscultación intensiva y pozo de ventilación camuflado.

Causa del Problema.....	417
Soluciones Propuestas.....	418
1. Protección, recalce selectivo y auscultación 24/7 del edificio histórico.	418
2. Paso de TBM EPB a muy poca cobertura con control de presión de cámara y sobreinyección trasdosal compensada.	418
3. Pozo de ventilación "invisible" mediante integración en un edificio municipal existente.	419
4. Adaptación del PCI y de la evacuación a tramo sin salida directa a superficie.	419
Consecuencias Previstas.....	420

Resultados de las Medidas Adoptadas.....	421
Lecciones Aprendidas.....	422

Caso práctico 14. "TÚNELES: DISEÑO, TBM, SEGURIDAD Y VENTILACIÓN (CARRETERAS & METRO)."
Implantación de nuevas salidas de emergencia y galerías transversales en un túnel urbano de
carretera en servicio sin tubo paralelo.....423

Causa del Problema.....	423
Soluciones Propuestas.....	424
1. Construcción de galerías transversales cortas cada 180-200 m, excavadas desde el propio túnel (hacia un ducto paralelo técnico).	424
2. Reordenación del PCI en el entorno de las nuevas galerías de emergencia.	424
3. Adaptación de la ventilación a un modelo "sectorizable" por tramos de 200 m.	425
4. Mejora de la señalización de evacuación, iluminación de emergencia y comunicación con usuarios.	426
5. Refuerzo estructural local y control de asientos en excavaciones laterales.	426
Consecuencias Previstas.....	426
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	429
Lecciones Aprendidas.....	429

Caso práctico 15. "TÚNELES: DISEÑO, TBM, SEGURIDAD Y VENTILACIÓN (CARRETERAS & METRO)."
Incendio de maquinaria en túnel en construcción con ventilación insuficiente y rediseño del plan de
emergencias de obra.431

Causa del Problema.....	431
Soluciones Propuestas.....	432
1. Duplicación de la ventilación de obra y creación de un modo de alta extracción de emergencia. ...	432
2. Puesta en servicio acelerada del pozo auxiliar con escalera y línea de aire.	432
3. Rediseño del plan de emergencias de obra con roles, comunicaciones y puntos de concentración.	433
4. Protección y reubicación de PCI de obra.	433
5. Integración temprana de obra en el SCADA de la futura línea.	434
Consecuencias Previstas.....	434
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	435
Lecciones Aprendidas.....	435

Caso práctico 16. "TÚNELES: DISEÑO, TBM, SEGURIDAD Y VENTILACIÓN (CARRETERAS & METRO)."
Rehabilitación integral de un túnel ferroviario histórico para incorporar ventilación de emergencia,
PCI y salidas seguras manteniendo el servicio.....437

Causa del Problema.....	437
Soluciones Propuestas.....	438
1. Creación de refugios/galerías de emergencia cada 200-230 m mediante galerías radiales cortas hacia un colector existente.	438
2. Instalación de ventilación longitudinal ligera con jet fans compactos y lógica de "empujar hacia la salida más cercana".....	438
3. PCI ferroviaria completa: hidrantes, BIE de túnel y línea de agua independiente.	439
4. Señalización y medios de evacuación ferroviarios adaptados a usuarios no expertos.....	439
5. Refuerzo estructural localizado del revestimiento para soportar los nuevos anclajes y la posible acción térmica.	440
Consecuencias Previstas.....	440
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	441
Lecciones Aprendidas.....	443

Caso práctico 17. "TÚNELES: DISEÑO, TBM, SEGURIDAD Y VENTILACIÓN (CARRETERAS & METRO)."
Integración de un túnel mecanizado de nueva línea con una estación subterránea existente, con
rediseño de ventilación, PCI y evacuación sin interrumpir el servicio.....445

Causa del Problema.....	445
Soluciones Propuestas.....	446

1. Estructura de recepción de la TBM y ventana reforzada en el hastial de la estación.....	446
2. Rediseño de la ventilación de la estación para funcionamiento bidireccional y para extracción desde el nuevo túnel.	446
3. Refuerzo de la evacuación y de la señalización accesible para tramo estación-túnel nuevo.	447
4. Integración de SCADA, detección y PCI de la nueva línea con la estación existente.	447
5. Coordinación constructiva con la explotación: ventanas, pantallas, límites de vibración y auscultación del edificio superior.	448
Consecuencias Previstas.....	448
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	450
Lecciones Aprendidas.....	450

Caso práctico 18. "TÚNELES: DISEÑO, TBM, SEGURIDAD Y VENTILACIÓN (CARRETERAS & METRO)."

Transición crítica suelo-roca de una TBM EPB bajo entorno urbano con edificios sensibles, control de asientos y adaptación del sistema de ventilación y evacuación de obra.

Causa del Problema.....	452
Soluciones Propuestas.....	453
1. Modo de operación "transición suelo-roca" en la TBM con ventana de presiones y control de volumen excavado vs. inyectado.	453
2. Inyecciones de compensación previas y paraguas de protección bajo los edificios patrimoniales. ...	453
3. Auscultación intensiva en superficie y en intradós de túnel con umbrales operativos que obligan a modificar el avance.	454
4. Refuerzo de la ventilación de obra en modo "zona de transición" y filtrado de aire de cabina.	454
5. Revisión del plan de evacuación de obra para contemplar una parada de TBM en zona "caliente".	455
6. Coordinación con el ayuntamiento para cortes nocturnos de tráfico y protección de servicios.....	455
Consecuencias Previstas.....	456
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	457
Lecciones Aprendidas.....	457

Caso práctico 19. "TÚNELES: DISEÑO, TBM, SEGURIDAD Y VENTILACIÓN (CARRETERAS & METRO)."

Fallo crítico de ventiladores de extracción en túnel de metro en explotación 24/7 y diseño de sistema redundante con mantenimiento predictivo.....

Causa del Problema.....	459
Soluciones Propuestas.....	460
1. Duplicación funcional de la extracción con ventiladores gemelos y rutas de aire alternativas.	460
2. Sectorización de la ventilación en tramos de 300-350 m con compuertas y detección zonal.	461
3. Mantenimiento predictivo con sensórica y alarmas tempranas para ventiladores y compuertas.	461
4. Actualización del plan de emergencia de la línea para escenarios de ventilación degradada.	462
5. Mejora de la alimentación eléctrica y de la autonomía en emergencia.	462
6. Refuerzo de la ventilación de obra en el tramo donde la TBM se acerca a la estación.....	463
Consecuencias Previstas.....	463
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	464
Lecciones Aprendidas.....	465

Caso práctico 20. "TÚNELES: DISEÑO, TBM, SEGURIDAD Y VENTILACIÓN (CARRETERAS & METRO)."

Adaptación de un túnel carretero bidireccional en servicio para tráfico con mercancías peligrosas: rediseño de ventilación, PCI y evacuación sin construir un segundo tubo.

Causa del Problema.....	466
Soluciones Propuestas.....	467
1. Ingeniería de explotación: paso controlado de mercancías peligrosas y sentido único temporal. ...	467
2. Sectorización y refuerzo de la ventilación longitudinal existente con modo "incendio de alta potencia".	467
3. Creación de refugios presurizados y galerías de conexión cortas a un colector existente.	468
4. Refuerzo PCI: agua asegurada, detección temprana y sistemas de agua nebulizada en zona crítica.	469
5. Integración SCADA-ITS-centro de control vial y protocolos con bomberos.	469

Consecuencias Previstas.....	470
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	471
Lecciones Aprendidas.....	471

Caso práctico 21. "TÚNELES: DISEÑO, TBM, SEGURIDAD Y VENTILACIÓN (CARRETERAS & METRO)."
Actualización de ventilación y PCI en túnel de metro poco profundo bajo casco histórico con severas restricciones acústicas y sin posibilidad de nuevos pozos.473

Causa del Problema	473
Soluciones Propuestas.....	474
1. Conversión del sistema de ventilación existente en un sistema "biregional" con uso de las estaciones como plenos de extracción.	474
2. Sustitución de los ventiladores del pozo por unidades silenciosas de doble etapa y envolventes acústicas.	474
3. Refuerzo de PCI en túnel con hidrantes cada 100 m, armarios combinados y línea de agua independiente de la ciudad.	475
4. Señalización de baja altura, iluminación autónoma y megafonía de túnel.	475
5. Integración SCADA + CFD + plan de autoprotección específico de túnel bajo casco histórico.	476
Consecuencias Previstas.....	476
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	477
Lecciones Aprendidas.....	478

Caso práctico 22. "TÚNELES: DISEÑO, TBM, SEGURIDAD Y VENTILACIÓN (CARRETERAS & METRO)."
Explotación 24/7 de una línea de metro con ventanas de mantenimiento muy reducidas y mantenimiento seguro de ventilación, PCI y SCADA en túneles mecanizados.479

Causa del Problema	479
Soluciones Propuestas.....	480
1. Sectorización operativa de la línea para crear "microventanas" de 20-30 minutos en tramos concretos.	480
2. Ventilación provisional de apoyo para mantenimiento (bypass de aire) y modo "obra" en el SCADA.	480
3. Calendario cíclico de pruebas de PCI y ventilación, con agrupación por "familias de equipo".	481
4. Sistema de localización y control de personal en túnel en tiempo real.....	481
5. Mantenimiento predictivo de ventiladores, compuertas y bombas PCI para reducir entradas físicas.	482
Consecuencias Previstas.....	482
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	483
Lecciones Aprendidas.....	484

Caso práctico 23. "TÚNELES: DISEÑO, TBM, SEGURIDAD Y VENTILACIÓN (CARRETERAS & METRO)."
Rehabilitación estructural interior de un túnel carretero en servicio con pérdida de recubrimiento, filtraciones y necesidad de mantener gálibo, ventilación y PCI operativos.485

Causa del Problema	485
Soluciones Propuestas.....	486
1. Diagnóstico estructural y clasificación por niveles de intervención.	486
2. Sistema de rehabilitación interior de baja pérdida de gálibo.	486
3. Gestión de las filtraciones y drenaje interior asociado.	487
4. Reconfiguración temporal de ventilación y PCI durante las obras nocturnas.	487
5. Protección de instalaciones y recolocación de anclajes.....	488
Consecuencias Previstas.....	488
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	489
Lecciones Aprendidas.....	490

Caso práctico 24. "TÚNELES: DISEÑO, TBM, SEGURIDAD Y VENTILACIÓN (CARRETERAS & METRO)."
Corrección en obra de una elección errónea de TBM EPB en tramo urbano con radios muy reducidos y terreno heterogéneo: paso a excavación secuencial (NATM) manteniendo plazos y seguridad.491

Causa del Problema	491
--------------------------	-----



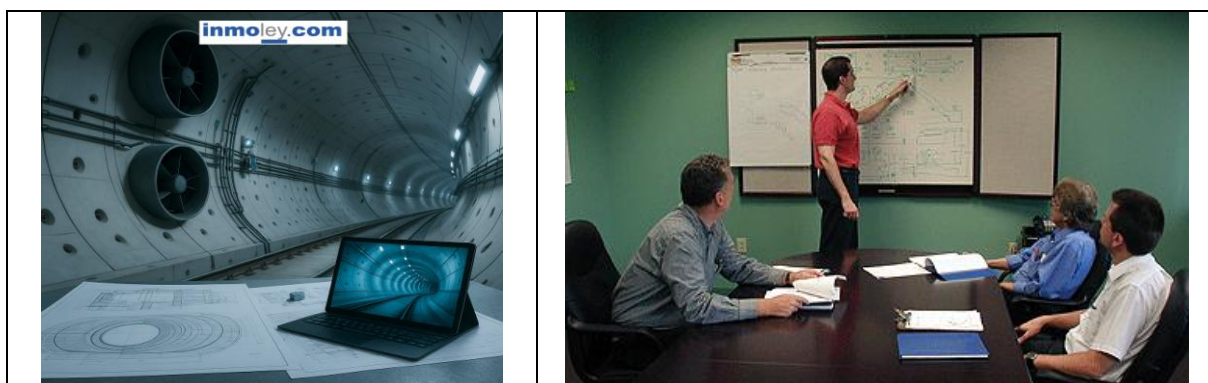
Soluciones Propuestas.....	492
1. Rediseño funcional del tramo: TBM hasta donde es viable, NATM en el tramo urbano crítico.	492
2. Construcción de un pozo interior de ataque/ventilación en un patio municipal existente.....	492
3. NATM urbano con preapoyo sistemático y ciclos cortos de avance.....	493
4. Ventilación de obra, PCI y plan de emergencia específicos para un túnel “mixto”.	493
5. Control de asientos y protección de edificios del casco histórico.	494
6. Recalibración contractual, documental y de costes.	494
Consecuencias Previstas.....	495
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	496
Lecciones Aprendidas.....	496

Caso práctico 25. "TÚNELES: DISEÑO, TBM, SEGURIDAD Y VENTILACIÓN (CARRETERAS & METRO)."

Auditoría post-incidente e implantación de un modelo de seguridad “multicapa” en un túnel carretero internacional tras incendio de vehículo pesado con ventilación insuficiente.498

Causa del Problema.....	498
Soluciones Propuestas.....	499
1. Redimensionamiento funcional de la ventilación con modo “incendio pesado” y sectorización estricta.	499
2. Densificación de salidas de emergencia y creación de refugios presurizados intermedios.	500
3. Refuerzo del sistema PCI y del suministro de agua contra incendios.	500
4. Tratamiento de filtraciones y protección del revestimiento frente a altas temperaturas.	500
5. Operación inteligente (ITS) y restricciones dinámicas a mercancías peligrosas.	501
6. Auditoría post-incidente, formación y simulacros anuales obligatorios.....	501
Consecuencias Previstas.....	502
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	503
Lecciones Aprendidas.....	503

¿QUÉ APRENDERÁ?



- Diseñar secciones tipo de túneles de carretera y metro integrando seguridad, ventilación y espacios para instalaciones.
- Evaluar el terreno con criterios geotécnicos avanzados y seleccionar el método constructivo más adecuado (convencional o TBM).
- Aplicar el método observacional y las técnicas NATM para controlar deformaciones y garantizar la estabilidad durante la excavación.
- Definir el sostenimiento primario y el revestimiento definitivo atendiendo a criterios estructurales, de durabilidad e impermeabilización.
- Diseñar y dimensionar sistemas de drenaje y control de filtraciones en túneles bajo y sobre el nivel freático.
- Calcular y justificar sistemas de ventilación en túneles de carretera y metro, tanto en servicio normal como en incendio.
- Diseñar soluciones de protección contra incendios, evacuación y autoprotección específicas para túneles.
- Planificar y especificar instalaciones eléctricas, de control, comunicaciones y SCADA adaptadas a la explotación de túneles.
- Organizar la puesta en servicio, el commissioning y las pruebas integradas (IST) de todas las instalaciones del túnel.
- Estructurar planes de mantenimiento, inspección y rehabilitación para túneles existentes, con indicadores de nivel de servicio.
- Integrar condicionantes urbanos, patrimoniales y ambientales en el diseño y construcción de túneles en España y Latinoamérica.
- Utilizar checklists, formularios y matrices de riesgos para alinear el diseño técnico del túnel con contratos EPC sin solapamientos.

Introducción.



Túneles de carretera y metro: de la complejidad técnica a la práctica diaria

En las últimas décadas, los túneles de carretera y metro se han convertido en piezas clave de la movilidad en España y Latinoamérica. Cada nuevo proyecto se desarrolla bajo una creciente presión técnica, económica, normativa y social: más tráfico, mayores exigencias de seguridad, condicionantes urbanos extremos, entornos patrimoniales sensibles y una opinión pública que no admite fallos. En este contexto, el diseño, la construcción y la explotación de túneles ya no pueden abordarse como una especialidad aislada, sino como un sistema complejo donde geotecnia, TBM, ventilación, PCI, evacuación e instalaciones deben encajar con precisión milimétrica.

El problema al que se enfrentan muchos profesionales es conocido: exceso de documentación teórica, normas dispersas, experiencias internacionales difíciles de adaptar a nuestro contexto y, sobre todo, poca información realmente práctica que muestre cómo se toman las decisiones en proyectos y obras reales. A menudo se repiten errores por falta de lecciones aprendidas estructuradas; se subestiman riesgos geotécnicos, se dimensionan ventilaciones con hipótesis poco realistas o se diseñan sistemas de PCI y evacuación que resultan difíciles de explotar y mantener en condiciones 24/7. Esta guía nace precisamente para cubrir ese hueco: ofrecer al profesional un material orientado a la práctica, pensado para ayudarle a tomar decisiones con criterio técnico y visión de explotación desde el primer trazo de proyecto.

Esta guía práctica de "TÚNELES: DISEÑO, TBM, SEGURIDAD Y VENTILACIÓN (CARRETERAS & METRO)" ofrece una visión integral y estructurada de todo el ciclo de vida del túnel. Arranca en los fundamentos del diseño geométrico y funcional, avanza por la geotecnia aplicada y la elección del método constructivo (convencional o mecanizado), aborda en profundidad la ventilación y el control de humos, la seguridad contra incendios y la evacuación, y se adentra en las instalaciones, el SCADA, la explotación, el mantenimiento y la rehabilitación. Todo ello se completa con una parte específica de herramientas —checklists, formularios y matrices técnicas— y con una amplia colección de casos prácticos de carreteras y metro que permiten ver cómo se aplican los criterios teóricos en



situaciones reales, tanto en túneles nuevos como en túneles existentes que deben ser adaptados a requisitos actuales.

El lector encontrará capítulos dedicados a la investigación geotécnica, la clasificación del macizo y sus implicaciones en el sostenimiento; a los métodos convencionales tipo NATM y a las técnicas especiales de emboquilles y falsos túneles; a la selección y operación de TBM EPB, Slurry o de roca; al diseño estructural del revestimiento, la impermeabilización y el drenaje; a la ventilación en carretera y metro, con escenarios de incendio de alta carga térmica; a la protección contra incendios, la evacuación, los planes de autoprotección y la integración con protección civil. La guía también profundiza en la alimentación eléctrica, las redundancias, los grupos electrógenos, el SCADA, el CCTV, la DAI y las comunicaciones específicas de túnel, así como en la puesta en servicio, el commissioning, el IST, el mantenimiento, la rehabilitación y los condicionantes urbanos y medioambientales.

Para el profesional del sector, esta guía no es solo un compendio de conceptos, sino una herramienta de trabajo. Le permitirá estructurar mejor sus proyectos, anticipar riesgos y justificar decisiones ante clientes, administraciones, operadores y concesionarias. Los checklists y formularios ayudan a no olvidar aspectos críticos en geotecnia, métodos constructivos, ventilación, PCI, evacuación, explotación y mantenimiento. Las matrices técnicas de riesgos orientan sobre qué debe quedar claramente definido en el proyecto y qué puede dejarse al contratista en un contrato EPC, evitando solapamientos y lagunas que luego se traducen en conflictos, sobrecostes y retrasos. La parte de casos prácticos aporta ejemplos completos que muestran qué se hizo, por qué se hizo así, qué problemas surgieron y qué lecciones pueden extraerse para futuros túneles.

Los beneficios son directos y tangibles: mejora en la calidad de los proyectos, reducción del riesgo de errores graves en obra, mayor capacidad para dialogar de igual a igual con geotécnicos, especialistas en ventilación, responsables de PCI y equipos de explotación, y más seguridad a la hora de defender soluciones ante administraciones y órganos de control. Al mismo tiempo, hay beneficios intangibles pero decisivos: ganar confianza en la toma de decisiones, consolidar una metodología propia respaldada por buenas prácticas internacionales y reforzar la reputación profesional como especialista capaz de integrar diseño, construcción y explotación bajo un enfoque de seguridad y fiabilidad.

Invertir en esta guía práctica es, en realidad, invertir en conocimiento especializado que se traduce en mejores proyectos, obras más seguras y explotaciones más robustas. En un entorno donde los incidentes en túneles tienen un enorme impacto social, económico y reputacional, disponer de criterios claros, herramientas contrastadas y ejemplos reales bien explicados marca la diferencia entre un trabajo correcto y un trabajo excelente. La guía está pensada para ingenieros de proyecto, geotécnicos, especialistas en ventilación y PCI, jefes de obra, responsables de conservación, técnicos de administraciones y



concesionarias, y cualquier profesional que deba decidir, revisar o explotar soluciones en túneles de carretera y metro.

En un sector tan exigente como el de los túneles, quedarse con conocimientos fragmentarios o desactualizados no es una opción. La normativa evoluciona, la tecnología avanza, los estándares de seguridad se endurecen y las expectativas de los usuarios y de las administraciones no dejan de crecer. Contar con una guía práctica que combine teoría, experiencia internacional y herramientas directamente aplicables al día a día permite al profesional situarse un paso por delante, anticiparse a los problemas y diseñar túneles más seguros, eficientes y sostenibles.

Es el momento de dar un salto de calidad en la forma de concebir, proyectar, construir y explotar túneles de carretera y metro. Esta guía está concebida para acompañarle en ese salto, capítulo a capítulo, checklist a checklist, caso práctico a caso práctico. La decisión está en sus manos: convertir la experiencia acumulada del sector en una ventaja competitiva para su trabajo diario y en una garantía de seguridad y fiabilidad para las infraestructuras que diseña, construye o explota.