

Guía Práctica para Túneles en Roca

Ing. Dean Brox, MSc DIC

Dean Brox Consulting, Vancouver, Canadá

Copyright © 2020 Dean Brox
Todos los derechos reservados.

“Ninguna parte de esta publicación puede ser reproducida, distribuida o transmitida en cualquier forma o por cualquier medio, incluyendo fotocopiado, grabación u otros métodos electrónicos o mecánicos, o por cualquier sistema de almacenamiento y recuperación de información sin el permiso previo por escrito del Autor, excepto en el caso de citas muy breves incorporadas en reseñas críticas y otros usos no comerciales permitidos por la ley de derechos de autor”.

Tabla de Contenidos

Prólogo

1	Introducción	1
2	Usos Funcionales de Túneles en Roca	5
2.1	General	5
2.2	Usos Funcionales	5
3	Ejecución de Proyectos de Túneles	9
3.1	General	9
3.2	Método de Entrega del Proyecto	9
3.3	Etapas de Ejecución	10
3.4	Planificación Temprana del Mandante	11
3.5	Ingeniería de Proyectos por Consultores.....	12
3.6	Nivel de Trabajo y Documentos durante la Ejecución	14
3.7	Requisitos Funcionales para Diseño-Construcción	15
3.8	Contratación Temprana del Contratista	15
3.9	Revisiones de Constructibilidad	16
3.10	Evaluación Independiente de Riesgos de TBM	17
4	Investigaciones de Terreno	21
4.1	General	21
4.2	Consecuencias de las Investigaciones Limitadas	22
4.3	Revisión de la Información Existente	24
4.4	Planificación y Presupuesto	24
4.5	Recopilación de Información Relevante y Plano Base.....	28
4.6	Identificación de Riesgos Geológicos Importantes.....	30
4.7	Planificación por Etapas de las Investigaciones.....	30
4.8	Mapeo de Terreno	32
4.9	Mediciones Geofísicas	33
4.10	Perforaciones Exploratorias	36
4.11	Pruebas In Situ.....	39
4.12	Selección y Preparación de Muestras	43
4.13	Ensayos de Laboratorio.....	47
4.14	Instrumentación de Terreno y Monitoreo	48
4.15	Galerías de Exploración/Túneles Piloto	49
4.16	Informes	51
4.17	Fotografías de Testigos.....	51
4.18	Almacenamiento de Largo de Plazo de los Testigos.....	52
5	Caracterización de Rocas	55
5.1	Geología Regional y Local	55

5.2	Geología del Trazado del Túnel	56
5.3	Zonas de Fallas y de Fracturas.....	56
5.4	Fracturas del Macizo Rocoso.....	57
5.5	Resistencia	58
5.6	Mineralogía	60
5.7	Alteración	61
5.8	Abrasividad.....	62
5.9	Durabilidad y Potencial de Hinchamiento	62
5.10	Condiciones y Predicción del Agua Subterránea.....	69
5.11	Esfuerzos In Situ	71
5.12	Calidad de Macizo Rocoso	75
5.13	Trazado del Túnel y Caracterización de Tramos.....	77
6	Diseño de Túneles en Roca	79
6.1	Bases y Criterios de Diseño	79
6.2	Normas Técnicas y Códigos de Mejores Prácticas.....	80
6.3	Sección Transversal del Túnel.....	81
6.4	Forma y Dimensiones del Túnel	82
6.5	Ubicación de los Portales y Diseño del Soporte.....	83
6.6	Trazado en Planta y Separación	85
6.7	Trazado en Elevación.....	86
6.8	Inclinación Práctica	87
6.9	Requerimientos de Accesos Temporales	87
6.10	Requerimientos de Drenaje	88
6.11	Requerimientos para la Losa del Túnel.....	88
6.12	Requerimientos para el Diseño Operacional	89
6.13	Requerimientos para el Acceso	90
6.14	Diseño de Túneles Hidráulicos a Presión.....	91
6.15	Consideraciones para el Diseño Sísmico	100
6.16	Tapones para Túneles en Roca.....	101
6.17	Constructibilidad de Diseño	104
7	Estabilidad de Túneles.....	107
7.1	General	107
7.2	Modos Probables de Inestabilidad.....	107
7.3	Análisis de estabilidad y selección de parámetros	109
7.4	Evaluación Empírica de la Estabilidad.....	109
7.5	Evaluación Cinemática de la Estabilidad	110
7.6	Análisis de Estabilidad de Elementos Finitos.....	112
7.7	Análisis de Estabilidad de Elementos Discretos.....	113
7.8	Evaluación y Caracterización del Sobreesfuerzo.....	114

7.9	Estabilidad del Túnel en Zonas de Falla	124
7.10	Convergencia Extremas	127
7.11	Estabilidad de Túneles Hidroeléctricos Antiguos.....	133
7.12	Revisión de la Estabilidad de Túneles	134
8	Excavación de Túneles.....	135
8.1	Consideraciones Prácticas	135
8.2	Dimensiones Mínimas para Construcción	136
8.3	Consideraciones para Sobreexcavaciones	137
8.4	Excavación con Perforación y Tronadura	139
8.5	Diseño de la Tronadura.....	142
8.6	Fragmentación Química de Rocas sin Vibraciones	144
8.7	Acuñadura	144
8.8	Alta Productividad con Perforación y Tronadura.....	145
8.9	Método de Excavación Secuencial (SEM)	146
8.10	Excavación mediante Tuneladora (TBM)	148
8.11	Evaluación de la Aplicabilidad de la Uso de TBM	155
8.12	Uso de TBM en Condiciones Adversas o Difíciles	158
8.13	El Uso de TBMs en Proyectos Mineros	160
8.14	Especificaciones Técnicas Mínimas para TBMs	161
8.15	Excavación con Fresadoras.....	162
8.16	Métodos para Excavaciones Inclinadas.....	163
8.17	Excavación de Piques	164
8.18	Excavación de Cavernas	167
8.19	Nuevas Tecnologías y Desarrollos para Excavaciones	169
8.20	Evaluación de los Métodos de Construcción	172
9	Soporte del Túnel	175
9.1	Principios Generales de Diseño	175
9.2	Soporte de Roca Inicial	177
9.3	Soporte de Roca Final.....	178
9.4	Instalación Práctica del Soporte	179
9.5	Soporte de los Portales.....	179
9.6	Elementos de Soporte y Productos Típicos.....	181
9.6.1	Pernos.....	181
9.6.2	Cables.....	184
9.6.3	Malla.....	184
9.6.4	Hormigón Proyectado (Shotcrete)	185
9.6.5	Marcos Reticulados y Perfiles Metálicos	186
9.7	Soporte de Túneles en Excavaciones con TBM.....	188
9.8	Soporte del Túneles para Condiciones Severas.....	190

9.9	Soporte para Convergencias Extrema (Squeezing)	193
9.10	Evaluación del Potencial de Corrosión	196
9.11	Requisitos para la Instalación de Pre-Soporte	197
9.12	Congelamiento del Terreno	199
9.13	Verificación de la Estabilidad del Túnel.....	201
10	Requerimientos para Revestimientos de Túneles	203
10.1	Objetivo de Revestimientos de Túneles en Roca	203
10.2	Aceptabilidad de Túneles en Roca sin Revestimiento	203
10.3	Revestimiento Final con Hormigón Proyectado	207
10.4	Revestimiento Final para Túneles Hidráulicos	209
10.5	Revestimiento Final con Hormigón In Situ	210
10.6	Revestimientos para Fallas Geológicas Importantes	213
10.7	Revestimiento para Excavación con TBM	215
10.8	Requerimientos de Impermeabilización	218
10.9	Requerimientos de Protección contra Incendios.....	219
11	Consideraciones de Construcción	221
11.1	Movilización a Faena	221
11.2	Preparación del Sitio	221
11.3	Accesos a Portales y Piques.....	223
11.4	Ventilación	223
11.5	Suministro de Agua para Construcción.....	224
11.6	Suministro de Electricidad	224
11.7	Bombeo y Pozos para Construcción	225
11.8	Tratamiento de Aguas	225
11.9	Requisitos Ambientales para el Muestreo y Ensayos.....	227
11.10	Disposición de Materiales Excavados	228
11.11	Implementación del Soporte de Diseño	230
11.12	Requisitos para el Mapeo Geológico y Geotécnico	232
11.13	Inspecciones para el Aseguramiento de la Calidad	233
11.14	Instrumentación Geotécnica	234
12	Riesgos de Construcción y Medidas de Mitigación	237
12.1	Peligros en Portales.....	237
12.2	Peligros en la Construcción de Túneles.....	238
12.3	Influencia en la Estabilidad del Túnel	240
12.4	Control y Gestión de las Aguas Subterráneas.....	240
12.5	Impactos a la Comunidad	243
12.6	Atrapamiento y Liberación de TBM	244
12.7	Problemas y Características de Diseño de las TBM	245
12.8	Generación de Materiales Finos.....	246

12.9	Perforación Exploratoria Durante la Excavación	247
12.10	Pre-drenaje.....	248
12.11	Inyecciones Delante de la Frente de Excavación	250
12.12	Inyecciones detrás de la Frente	251
12.13	Túneles Piloto.....	252
12.14	Técnicas de Investigación durante la Construcción.....	253
12.15	Equipo y Recursos Adicionales	255
13	Estimación de los Costos de Construcción	257
13.1	General	257
13.2	Estándares para la Estimación de Costos.....	259
13.3	Supuestos Clave para la Estimación.....	260
13.4	Costos Directos de Construcción	261
13.5	Costos Indirectos de Construcción	262
13.6	Contingencias para los Costos y Ganancias.....	262
13.7	Costos del Mandante	264
13.8	Costo Total Esperado del Proyecto de Túnel.....	264
13.9	Análisis Probabilístico e Incertidumbre Geológica.....	265
13.10	Análisis Integrado de Riesgos	266
13.11	Comparaciones de Costos con Proyectos Similares	267
14	Programa de Construcción para Túneles en Roca.....	269
14.1	Identificación de Actividades Clave	269
14.2	Plazos Críticos para la Adquisición de Equipos Clave	273
14.3	Evaluación de Tasas Realistas de Producción	273
14.4	Contingencias en el Programa.....	274
14.5	Actividades de la Ruta Crítica	275
15	Estrategia e Implementación del Contrato del Proyecto	277
15.1	General	277
15.2	Documentación del Contrato y Tipos de Contratos	277
15.3	Precalificación	282
15.4	Forma de Pago	283
15.5	Asignación de Riesgos y Compensación.....	285
15.6	Informes Geotécnicos de Línea Base.....	286
15.7	Gestión del Contrato y del Programa	289
15.8	Alianzas.....	291
15.9	Resolución de Disputas	293
15.10	Gestión de Reclamos	294
16	Gestión de Riesgos	297
16.1	Gestión de Riesgos y Ejecución	297
16.2	Evaluaciones Cualitativas de Riesgos y Registro	300

16.3	Asignación de Riesgos	303
16.4	Evaluaciones Cuantitativas de Riesgos	304
17	Inspección de Túneles en Roca	305
17.1	General	305
17.2	Inspecciones Manuales	306
17.3	Inspección de Túneles Históricos Utilizando Drones	308
17.4	Inspecciones Subacuáticas	310
18	Renovación, Reparaciones y Decomisionamiento	315
18.1	Renovación de Túneles en Roca	315
18.2	Reparaciones de Túneles en Roca.....	317
18.3	Decomisionamiento de Túneles en Roca	318
19	Casos Históricos y Lecciones Aprendidas	321
19.1	General	321
19.2	Proyecto Lesotho Highlands, Fase 1, Lesotho	321
19.3	Túnel Peatonal Pacific Place, Hong Kong.....	322
19.4	Túneles de la Carretera Ring Taipei, Taiwán	324
19.5	Túnel de la Carretera Bolu Mountain, Turquía	325
19.6	Túnel Ferroviario de Base San Gotardo, Suiza.....	326
19.7	Agua Potable Seymour Capilano, Canadá	327
19.8	Túnel Hidroeléctrico Niágara, Canadá	328
19.9	Túneles de Transferencia de Arrowhead, EE. UU.....	330
19.10	Túneles Canada Line Transit, Canadá	331
19.11	Túnel Hidroeléctrico Ashlu, Canadá.....	333
19.12	Proyecto Hidroeléctrico Forrest Kerr, Canadá	334
19.13	Túnel Hidroeléctrico Río Esti, Panamá	335
19.14	Túnel Hidroeléctrico Chacayes, Chile.....	337
19.15	Túneles Hidroeléctricos Los Arándanos, Chile	338
19.16	Túnel Tranvía en Red Lake Gold Mine, Canadá	340
19.17	Túnel Correa Mina Pascua Lama, Chile/Argentina	341
19.18	Túnel Hidroeléctrico Los Cóndores, Chile	343
19.19	Túneles Hidroeléctricos Pando y Monte Lirio, Panamá....	344
19.20	Túneles Hidroeléctricos Alto Maipo, Chile.....	346
19.21	Túnel de Desagüe de Efluentes, Mid-Halton, Canadá.....	347
19.22	Proyecto Hidroeléctrico Ituango, Colombia	348
20	Contratación de los Profesionales	351
20.1	Contratación de Profesionales	351
20.2	Roles de los Profesionales	352
20.2.1	General	352
20.2.2	Geólogos	353

20.2.3 Ingenieros Geotécnicos.....	354
20.2.4 Ingenieros Civiles	354
20.2.5 Ingenieros de Túneles	354
20.2.6 Expertos Técnicos Independientes.....	355
20.3 Responsabilidades y Deberes de los Profesionales	355
21 Salud y Seguridad	359
22 Referencias.....	363
23 Glosario.....	383
24 Acerca del Autor y del Traductor	385
25 Dedicaciones y Recomendaciones.....	387
26 Patrocinio para estudiar Masters en Túneles	389
27 Descargo de Responsabilidad	391
28 Agradecimientos.....	393

Lista de Tablas

Tabla 3.1	Alcance de Ingeniería y Entregas Clave	14
Tabla 5.1	Tipo y Caracterización de Fallas Geológicas.....	57
Tabla 7.1	Análisis para los modos de inestabilidad	109
Tabla 7.2	Validación de la predicción de sobreesfuerzos	117
Tabla 7.3	Clases de Squeezing.....	129
Tabla 7.4	Ejemplos recientes del fenómeno de squeezing	130
Tabla 7.5	Consecuencias del squeezing al Soporte de Roca	130
Tabla 8.1	Producción típica de TBMs, túneles de 6m de diámetro.	154
Tabla 8.2	Ejemplos de atrapamientos de TBMs.....	159
Tabla 8.3	TBMs utilizadas en proyectos mineros	160
Tabla 10.1	Colapsos recientes en túneles hidroeléctricos	213
Tabla 10.2	Túneles hidroeléctricos con anillos prefabricados	217
Tabla 13.1	Sistema de clasificación de costos del AACE.....	260
Tabla 13.2	Contingencias de costos en la etapa de diseño final	263
Tabla 17.1	Frecuencias para inspecciones subacuáticas.....	313
Tabla 23.1	Descripción de Acrónimos	383