

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Introducción y Motivación	1
1.2. Objetivo general	3
1.3. Objetivos específicos	3
1.4. Alcances	3
2. Resumen bibliográfico	5
2.1. Marco teórico	5
2.2. Construcción en túneles, métodos empleados y tuneladoras	5
2.2.1. Métodos clásicos	8
2.2.2. New Austrian Tunneling Method (NATM)	11
2.2.3. Tunnel Boring Machine (TBM)	13
2.3. Análisis de riesgo	17
2.3.1. Identificación del riesgo	18
2.3.2. Evaluación del riesgo	19
2.3.3. Comunicación	19
2.3.4. Prevención y Mitigación	20
2.4. Problemas más comunes asociados al proceso constructivo de túneles	21
2.4.1. Fallas de alineamiento	23
2.4.2. Fallas de administración o mantenimiento	24
2.5. Riesgo presente en túneles construidos con TBM	25
3. Retos y riesgos en proyectos previos de túneles con TBM	29
3.1. Casos históricos dentro y fuera de Chile	29
3.2. Casos internacionales	29
3.2.1. Caso Metro Porto	29
3.2.2. Caso Great Belt Finlandia y Dinámica	30
3.2.3. Caso Metro de Copenhage	31
3.2.4. Caso Túnel Norte de la circunvalación de Estocolmo	33
3.2.5. Caso Túnel de Nosoud, Irán y diseño del escudo de TBM bajo el Río Han, Corea del Sur	33
3.2.6. Caso Metro Dudullu Bostanci, Estambul	34
3.2.7. Caso túneles de escudos de TBM bajo los terrenos de Oslo	35
3.3. Casos recientes	37
3.3.1. Los beneficios de usar un tercer túnel para la exploración e investigación de un túnel largo a gran profundidad	37
3.3.2. El exitoso empleo de TBM en proyectos recientes del Metro de California,	38

3.4.	Casos en Chile	38
3.4.1.	Río Blanco	39
3.4.2.	Los Bronces	39
3.4.3.	El Teniente	40
3.4.4.	Hidroeléctrico Alto Maipo	40
3.4.5.	Línea 7 del metro de Santiago de Chile	41
4.	Procedimiento constructivo de túneles y análisis de riesgo	42
4.1.	Procedimientos constructivos en túneles construidos con TBM	44
4.2.	Recopilación de datos	45
4.3.	Herramientas para la evaluación de riesgo	46
4.3.1.	Técnicas Delphi	49
4.3.2.	Mapas de calor	49
4.3.2.1.	Clasificación de la ocurrencia	50
4.3.2.2.	Clasificación del impacto o importancia	51
4.3.2.3.	Clasificación y aceptación del riesgo	51
4.3.3.	Generación de escenarios	52
4.3.4.	Árboles lógicos	53
4.3.4.1.	Árboles de falla	55
4.3.4.2.	Árbol de eventos	56
4.3.5.	Barreras de protección	57
4.3.6.	Modelos propuestos para el análisis	58
4.3.7.	Curvas de operatividad, fragilidad y vulnerabilidad	59
5.	Amenazas naturales y antrópicas	61
5.1.	Amenazas	61
5.1.1.	Estudios de sismos y suelos	63
5.2.	Influencia de las amenazas sísmica e inundación en túneles	65
5.3.	Análisis de multi-amenazas en túneles construidos con TBM	66
5.4.	Evaluación de amenazas mediante métodos determinísticos y probabilísticos	66
6.	Aplicación de Técnicas Delphi	68
6.1.	Encuestas	68
6.2.	Entrevista	70
7.	Aplicación de los Árboles lógicos	74
7.1.	Segmentación de los riesgos	74
7.2.	Explicación de los riesgos seleccionados	75
7.2.1.	Deformación de la superficie	75
7.2.2.	Presiones en la superficie de avance	79
7.2.3.	Colapsos	81
7.2.4.	Explosiones de roca	83
7.2.5.	Paralización de la obra	86
7.2.6.	Alineamiento (falla)	88
7.2.7.	Formación de torta de lodos	91
7.3.	Mapas de calor	94
7.4.	Método de la Técnica Difusa de Preferencia por Similitud a la Solución ideal	107

8. Aplicación y desarrollo de modelos probabilísticos	117
8.1. Presión de soporte con escenarios	117
8.1.1. Análisis de sensibilidad	124
9. Conclusiones y comentarios	147
9.1. Conclusiones finales y comentarios	149
10. Bibliografía	151
11. Anexos	158
11.1. Anexo A	158
11.1.1. ENCUESTA Versión español	158
11.1.2. SURVEY, versión en inglés	164
11.2. Anexo B	169
11.3. Anexo C	174
11.3.1. Código empleado para el método de presión de soporte con escenarios	175
11.3.2. Código empleado para el método Fuzzy TOPSIS	177
11.4. Anexo D	181
11.4.1. Distribución probabilística acumulada de la zona de Santiago para la Cohesión	181
11.4.2. Tablas de parámetros para la cohesión, ϕ y γ	187
11.5. Anexo E	192
11.5.1. Amenazas sísmicas	192
11.5.2. Amenazas de inundación	198