



**PROPUESTA DE PROTOCOLO DE INSPECCIÓN PARA QUE UNA EMPRESA  
CONSTRUCTORA EN LA REGIÓN METROPOLITANA PUEDA EJECUTAR LA  
MEJOR SOLUCIÓN FRENTE A FILTRACIONES DE AGUA EN OBRAS  
SUBTERRÁNEAS TIPO TÚNELES.**

Proyecto de Título para optar al Título de Constructor Civil

Estudiante:

Genaro Daniel Manquein Valdebenito

Profesor Guía:

Eduardo Andrés Brito Villalobos

Fecha:

Junio 2024

Santiago, Chile

## **DEDICATORIA**

*A mi querida madre Sonia y mi hija Estelita*

*Este proyecto es el resultado de amor, inspiración y apoyo incondicional que ustedes han infundido en mi vida. Mamá, tu presencia ha sido la brújula que ha guiado mis pasos, tu sabiduría la luz que ilumina mi sendero. Agradezco tu inquebrantable apoyo, tus abrazos que consuelan y tus palabras que motivan. Eres una de las razones por la que siempre aspiro a ser mejor.*

*Mi Estela, cada página de este trabajo lleva consigo la chispa de tu alegría y la esperanza que representas. Ver el mundo a través de tus ojos ha dado forma a mi perspectiva, y cada logro en este proyecto es un tributo a la maravilla que traes a mi vida todos los días. Solo nosotros dos sabemos lo que nos ha costado llegar hasta acá y seguiremos firmes por siempre, te amo y eres lo más importante en mi vida.*

*A las dos mujeres excepcionales les dedico con profundo amor y gratitud esta obra. Vuestra presencia ha sido mi mayor regalo, y este trabajo es también vuestro. Gracias por ser mi familia, mi guía y mi inspiración constante.*

*Con amor,*

*Genaro Daniel Manquein Valdebenito*

## **RESUMEN**

La esencia de esta memoria de título radica en la concepción de un protocolo de inspección destinado a ofrecer diversas alternativas para abordar eficientemente las filtraciones de agua en obras subterráneas tipo túneles. El proceso de desarrollo de este protocolo implicará una exhaustiva revisión de información técnica, datos empíricos y experiencias previas, que se nutrirán con el análisis detallado de casos de estudio relevantes. La finalidad última es la formulación de un borrador o propuesta de protocolo que las empresas constructoras puedan implementar, permitiéndoles tomar decisiones fundamentadas y estratégicas cuando se enfrenten a este tipo de problemas.

En primer lugar, abarcará desde la revisión de la caracterización de un proyecto de túnel, principales causas de las filtraciones en túneles así como los métodos de prevención como los sistemas de impermeabilización, sistemas de inyección, revestimientos de hormigón proyectado y sistemas de drenaje usados en túneles además de la revisión de aspectos normativos y técnicos.

En última instancia, este proyecto de memoria de título se propone ofrecer a las empresas constructoras una herramienta sólida y adaptada a la realidad del terreno, que les permita tomar decisiones informadas y estratégicas cuando se enfrenten a filtraciones en túneles. La combinación de datos técnicos, experiencias prácticas respaldarán la creación de un protocolo de inspección integral y aplicable, contribuyendo así a la eficiencia y seguridad en el desarrollo de proyectos de construcción subterránea.

## **SUMMARY**

The essence of this title report lies in the conception of an inspection protocol aimed at offering various alternatives to efficiently address water leaks in underground tunnel-type works. The development process of this protocol will involve an exhaustive review of technical information, empirical data and previous experiences, which will be nourished by the detailed analysis of relevant case studies. The ultimate goal is the formulation of a draft or proposed protocol that construction companies can implement, allowing them to make informed and strategic decisions when dealing with this type of problem.

Firstly, it will cover the review of the characterization of a tunnel project, the main causes of leaks in tunnels as well as prevention methods such as waterproofing systems, injection systems, shotcrete linings and drainage systems used in tunnels in addition to the reviewing of regulatory and technical aspects.

Ultimately, this title report project, aims to offer construction companies and contractors a solid tool adapted to the reality of on site tasks, allowing them to make informed and strategic decisions when faced with leaks in tunnels. The combination of technical data, practical experiences will support the creation of a comprehensive and applicable inspection protocol, thus contributing to efficiency and safety in the development of underground construction projects.

## ÍNDICE

|  |    |
|--|----|
| CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN .....   | 10 |
| 1.1. Caso Autopista Américo Vespucio Oriente AVO 1 .....   | 11 |
| 1.2. Objetivo General .....  | 13 |
| 1.3. Objetivos Específicos.....  | 14 |
| 1.4. Hipótesis .....   | 14 |
| 1.5. Descripción de la Metodología .....   | 14 |
| CAPITULO 2: HISTORIA DE LOS TÚNELES EN CHILE .....   | 16 |
| 2.1. Infraestructura Subterránea en Chile: Historia y Evolución de Túneles en el Territorio Nacional .....                   | 16 |
| 2.2. Túnel Trinchera y Minero, Principales Tipos de Sistemas Empleados en el Desarrollo de Túneles de Metro en Santiago..... | 18 |
| CAPÍTULO 3: DEFINICIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE UN PROYECTO DE TÚNEL.....  | 23 |
| 3.1. Características de un Proyecto de Túnel.....  | 25 |
| 3.2. Estudios iniciales .....  | 25 |
| 3.2.1. Estudio Geotécnico .....  | 25 |
| 3.3. Diseño del Túnel.....   | 25 |
| 3.3.1. Diseño Estructural.....   | 25 |
| 3.3.2. Geometría y Trazado.....  | 25 |

|  |    |
|--|----|
| 3.4. Aspectos Ambientales y Normativos.....                    | 26 |
| 3.4.1. Impacto Ambiental.....                                  | 26 |
| 3.5. Métodos de Construcción .....                             | 26 |
| 3.5.1. Técnicas de Excavación.....                             | 26 |
| 3.5.2. Sostenimiento y Revestimiento.....                      | 26 |
| 3.6. Seguridad y Operatividad .....                            | 26 |
| 3.6.1. Seguridad en la Construcción .....                      | 26 |
| 3.6.2. Operatividad del Túnel .....                            | 27 |
| 3.7. Topografía y Monitoreo.....                               | 27 |
| 3.7.1. Topografía de Apoyo .....                               | 27 |
| 3.7.2. Monitoreo de Deformaciones .....                        | 27 |
| <br>   |    |
| CAPITULO 4: PRINCIPALES CAUSAS DE FILTRACIONES EN TÚNELES..... | 28 |
| <br>   |    |
| 4.1. Condiciones Geológicas y Geotécnicas.....                 | 28 |
| 4.1.2. Terreno Subterráneo.....                                | 28 |
| 4.1.3. Presencia de Fallas Geológicas.....                     | 29 |
| 4.2. Deficiencias en la Impermeabilización.....                | 29 |
| 4.2.1. Materiales y Técnicas Inadecuadas.....                  | 29 |
| 4.2.2. Fallas en el Sistema de Impermeabilización.....         | 29 |
| 4.3. Defectos en el Revestimiento del Túnel .....              | 29 |
| 4.3.1. Grietas y Juntas Mal Selladas .....                     | 29 |
| 4.3.2. Degradación del Revestimiento .....                     | 30 |
| 4.4. Drenaje Inadecuado .....                                  | 30 |
| 4.4.1. Sistemas de Drenaje Ineficientes .....                  | 30 |
| 4.5. Condiciones Hidrológicas Cambiantes .....                 | 30 |

|   |    |
|---|----|
| 4.5.1. Variaciones Estacionales .....                   | 30 |
| 4.6. Erosión y Desgaste.....                            | 30 |
| 4.6.1. Acción del Agua .....                            | 30 |
| <br>  |    |
| CAPÍTULO 5: SISTEMAS DE IMPERMEABILIZACIÓN .....        | 31 |
| <br>  |    |
| 5.1. Geomembranas .....                                 | 31 |
| 5.2. PVC (Cloruro de Polivinilo).....                   | 31 |
| 5.2.1. Características del PVC .....                    | 32 |
| 5.3. PE (Polietileno).....                              | 33 |
| 5.3.1. Características del PE .....                     | 33 |
| 5.4. EPDM (Etileno Propileno Dieno Monómero).....       | 35 |
| 5.4.1. Características del EPDM.....                    | 35 |
| 5.5. Sistemas de Inyección.....                         | 36 |
| 5.5.1. Lechadas y Resinas de Inyección .....            | 36 |
| 5.5.2. Lechadas de Cemento: .....                       | 37 |
| 5.5.3. Composición y Tipos de Lechadas de Cemento ..... | 37 |
| 5.5.4. Aplicaciones de las Lechadas de Cemento .....    | 37 |
| 5.5.5. Ventajas de las Lechadas de Cemento .....        | 38 |
| 5.5.6. Procedimiento de Aplicación.....                 | 38 |
| 5.6. Resinas de Poliuretano.....                        | 39 |
| 5.6.1. Uso de Resinas de Poliuretano en Túneles .....   | 40 |
| 5.6.2. Aplicaciones Comunes.....                        | 40 |
| 5.7. Resinas Epoxi.....                                 | 41 |
| 5.7.1. Uso de Resinas Epoxi en Túneles.....             | 42 |
| 5.8. Hormigón Proyectado y Revestimientos .....         | 43 |

|   |    |
|---|----|
| 5.8.1. Uso de Hormigón Projectado y Revestimientos en Túneles en Chile .....                                  | 43 |
| 5.8.2. Revestimientos de Túneles .....  | 44 |
| 5.8.3. Tipos de Revestimientos .....  | 44 |
| 5.8.4. Innovaciones y Tecnología .....  | 44 |
| 5.9. Sistemas de Drenaje.....   | 45 |
| 5.9.1. Ranuras y canaletas de recogida .....  | 46 |
| 5.9.2. Colectores y depósitos .....   | 46 |
| 5.9.3. Sistemas de separación de aceite y agua.....   | 47 |
| 5.9.4. Láminas drenantes y tubos de drenaje .....   | 47 |
| <br>  |    |
| CAPITULO 6: NORMATIVAS Y ESTANDARES .....   | 48 |
| <br>  |    |
| 6.1. Normativa Chilena.....   | 48 |
| 6.1.1. Manual de Carreteras Volumen 5 .....   | 49 |
| 6.1.2. Manual de Recomendaciones de Estándares Generales Básicos para Proyectos de Túneles Viales (MOP) ..... | 50 |
| 6.2. Normativa internacional.....   | 51 |
| 6.2.1. Norma UNE-EN 13491:2013 .....  | 52 |
| 6.2.2. Norma UNI EN 13969:2005.....   | 52 |
| <br>  |    |
| CAPITULO 7 CONCLUSIÓN PARCIAL DEL ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO Y DE NORMAS .....                                    | 53 |
| <br>  |    |
| CAPITULO 8: PROTOCOLOS EN OBRAS DE CONSTRUCCION .....   | 54 |
| <br>  |    |
| 8.1. Ley General De Urbanismo Y Construcciones Ministerio De Vivienda Y Urbanismo ....                        | 55 |

|   |    |
|---|----|
| CAPÍTULO 9: METODOLOGÍA .....   | 56 |
| 9.1. Entrevistas a Profesionales con Experiencia en Obras de Construcción de Túneles Viales ..... | 57 |
| 9.1.1. Entrevista 1 .....   | 57 |
| 9.1.2. Entrevista 2 .....   | 61 |
| 9.1.3. Entrevista 3 .....   | 64 |
| 9.2. Desarrollo Protocolo .....   | 66 |
| CAPÍTULO 10: RESULTADOS.....  | 75 |
| 10.1. Resultados de las Entrevistas .....   | 75 |
| 10.2. Análisis de los Resultados .....  | 76 |
| CAPÍTULO 11: CONCLUSIONES .....   | 77 |
| CAPÍTULO 12: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....  | 79 |
| CAPÍTULO 13: ANEXOS .....   | 83 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 .....  | 12 |
| Autopista Américo Vespucio Oriente.....   | 12 |
| Figura 2 .....  | 17 |
| Túnel Vial las Raíces, Temuco .....   | 17 |
| Figura 3 .....  | 18 |
| Túnel Lo Prado .....  | 18 |
| Figura 4 .....  | 19 |
| Plano de estaciones construidas con el método de tajo abierto .....             | 19 |
| Figura 5 .....  | 20 |
| Trabajos de Excavación Método Trinchera .....                                   | 20 |
| Figura 6 .....  | 20 |
| Trabajos de Excavación Método Trinchera .....                                   | 20 |
| Figura 7 .....  | 21 |
| Plano de estaciones construidas con el método de tajo abierto .....             | 21 |
| Figura 8 .....  | 22 |
| Diseño de Piques y Túneles en la Construcción de Infraestructura de Metro ..... | 22 |
| Figura 9 .....  | 22 |
| Implementación de Obras para el Pique Cuevas.....                               | 22 |
| Figura 10.....  | 24 |
| Sección Transversal de un Túnel .....   | 24 |
| Figura 11 .....   | 31 |
| Geomembranas en Túneles .....   | 31 |
| Figura 12.....  | 33 |

|                                    |    |
|------------------------------------|----|
| Geomembranas en Túneles .....      | 33 |
| Figura 13 .....                    | 34 |
| Geomembranas en Túneles .....      | 34 |
| Figura 14 .....                    | 36 |
| Geomembranas en Túneles .....      | 36 |
| Figura 15 .....                    | 39 |
| Sistemas de Inyección.....         | 39 |
| Figura 16 .....                    | 41 |
| Sistemas de Inyección.....         | 41 |
| Figura 17 .....                    | 42 |
| Sistemas de Inyección.....         | 42 |
| Figura 18 .....                    | 45 |
| Sistemas de Inyección.....         | 45 |
| Figura 19 .....                    | 46 |
| Sistemas de Drenaje .....          | 46 |
| Figura 20 .....                    | 47 |
| Sistemas de Drenaje .....          | 47 |
| Figura 21 .....                    | 48 |
| Ministerio de Obras Publicas ..... | 48 |
| Figura 22 .....                    | 51 |
| Normalización Española .....       | 51 |

## CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

Las filtraciones de agua en túneles son una problemática bastante común en Chile, ya sea en la etapa de construcción y posteriormente en la explotación de estas obras de infraestructura como por consecuencia de accidentes vehiculares. Este problema puede tener diversas causas y consecuencias, y su gestión es crucial para garantizar la seguridad y durabilidad de los túneles, la necesidad de esta esta investigación surge debido a la magnitud de este problema, que si bien no existe una cuantificación específica del costo medio de la reparación de estas filtraciones, el criterio experto confirma que son de alta cuantía pero varía caso a caso, estos problemas no solo pueden comprometer la estabilidad de la estructura, sino también poner en riesgo la seguridad de quienes utilizan los túneles.

Las filtraciones en túneles pueden originarse por diversos factores, tales como infiltraciones de agua desde fuentes naturales como capas freáticas o acuíferos circundantes o también por la entrada de aguas lluvia a través de grietas, juntas o defectos de la estructura de túnel, la presión del agua subterránea, la permeabilidad del terreno circundante, la antigüedad del túnel o la calidad de su construcción, entre otros. Para contrarrestar estas filtraciones, se pueden implementar medidas preventivas, como la impermeabilización del túnel mediante el uso de materiales especiales, incluyendo concreto impermeable, membranas de impermeabilización y recubrimientos epóxicos. Además, se pueden instalar sistemas de drenaje que permitan la recolección y eliminación eficiente del agua filtrada. Estas soluciones representan sólo algunas de las opciones disponibles para abordar este desafío específico en la construcción de túneles.

La realización de inspecciones regulares en los túneles es crucial para detectar cualquier indicio de filtración y aplicar medidas preventivas antes de que el problema se agrave. En el caso de detectar filtraciones, es imperativo tomar medidas correctivas de manera oportuna para garantizar la seguridad de los usuarios del túnel.

Las filtraciones de agua en túneles representan un desafío significativo en la construcción subterránea, ya que pueden surgir debido a diversos factores como la presión hidrostática, la porosidad del terreno y la falta de sellado adecuado durante la construcción. La comprensión

profunda de estas causas es esencial para implementar estrategias efectivas de prevención y mitigación que salvaguarden la estabilidad y seguridad de la infraestructura.

En los últimos años en Chile se han registrado algunas situaciones que eventualmente podrían causar algún tipo de accidentes e incidentes relacionados con filtraciones de agua en túneles viales. Estas filtraciones pueden representar un riesgo significativo para la seguridad usuarios de estas obras en operación. A continuación, se menciona del caso particular de la Autopista Américo Vespucio Oriente:

### **1.1. Caso Autopista Américo Vespucio Oriente AVO 1**

Uno de los casos más recientes es el de la autopista Américo Vespucio Oriente (AVO 1). Inaugurada en julio de 2022, esta obra ha enfrentado problemas significativos desde agosto de 2023, cuando se reportaron constantes anegaciones en varios tramos del túnel, incluso en días sin lluvias. Estas filtraciones han provocado charcos, mala visibilidad y baja adherencia de los neumáticos, incrementando la inseguridad para los usuarios. Las autoridades y la concesionaria están en disputa sobre las responsabilidades y soluciones para estos problemas.

El problema de las filtraciones en la Autopista Américo Vespucio Oriente (AVO I) se originó a raíz de la infiltración de agua en las obras subterráneas ubicadas en el entorno del río Mapocho. Durante el invierno de 2023, se produjeron eventos de precipitaciones intensas que desencadenaron la entrada de agua en los túneles del Ramal Mapocho y en las trincheras cubiertas cercanas a la ribera sur del río. Estas filtraciones se concentraron principalmente en dos sectores específicos: el túnel en mina del Ramal Mapocho y la trinchera cubierta al sur del fin del túnel en mina bajo el río Mapocho.

El escurrimiento superficial de agua aflorada en el túnel y las trincheras evidenciaba la presencia de infiltraciones significativas, lo cual representaba un riesgo para la estabilidad y la operatividad de la autopista. Estas filtraciones se manifestaron en forma de afloramientos de agua en diferentes sectores, lo que indicaba la existencia de problemas de impermeabilización y drenaje en la infraestructura subterránea. Las causas subyacentes de este problema incluyeron el diseño inadecuado de las trincheras abiertas y cerradas, la presencia de aportes de agua subterránea superiores a lo esperado en el entorno del río debido a la escorrentía, y la falta de impermeabilización en ciertos tramos del túnel. Estos factores contribuyeron a la generación de

filtraciones que afectaron la integridad estructural y la funcionalidad de la autopista, así como la seguridad de los usuarios y la operación del sistema vial.

En consecuencia, las filtraciones en la Autopista AVO I representaron un desafío importante que requería una evaluación detallada, la identificación de las causas raíz y la implementación de soluciones efectivas para prevenir futuros problemas de infiltraciones y garantizar la adecuada operación y mantenimiento de la infraestructura subterránea en el entorno del río Mapocho.

Figura 1

Autopista Américo Vespucio Oriente



Nota. Filtraciones de agua en Autopista. [Fotografía], The Clinic, 2023  
<https://www.theclinic.cl/2023/09/28/mop-confirma-cierre-autopista-vespucio-oriente-avo-filtraciones-agua-derrumbe/>

## 1.2. Objetivo General

Esta investigación tiene como finalidad la creación de un protocolo de inspección, un documento técnico de fácil interpretación el cual pueda aportar soluciones que logren evitar esta problemática y en consecuencia evitarse futuros costos de reparación y también situaciones peligrosas a raíz de estos problemas, y en consecuencia que puedan sufrir los usuarios de estas obras subterráneas. Dentro de este marco, se llevará a cabo un estudio bibliográfico para recopilar y sintetizar la información relevante existente sobre las filtraciones en túneles. Este enfoque permitirá no solo explorar las diversas soluciones o recomendaciones relacionados con el fenómeno, sino también identificar las estrategias de prevención y mitigación que se puedan proponer y aplicar con éxito. La revisión de la literatura será integral, abarcando investigaciones, informes técnicos y avances tecnológicos que hayan contribuido al entendimiento y abordaje de este desafío en particular.

En el proceso de desarrollo de estrategias efectivas, se buscará no solo comprender las causas y consecuencias a nivel teórico, sino también aplicar ese conocimiento a soluciones prácticas en terreno según la opinión experta de profesionales con experiencia en este tipo de obra. La investigación aspira a proponer recomendaciones específicas y factibles de llevar a cabo y puedan implementarse en proyectos de construcción de túneles. Esto implica considerar no solo la impermeabilización tradicional, sino también explorar nuevas tecnologías y métodos que puedan mejorar la resistencia a las filtraciones y prolongar la vida útil de las estructuras subterráneas.

Al finalizar este proyecto, se espera no solo contribuir al conocimiento académico sobre el fenómeno de filtraciones en túneles, sino también proporcionar a las empresas constructoras y profesionales del ámbito de la ingeniería herramientas concretas para abordar y prevenir eficazmente este problema. En la aplicación práctica de los hallazgos de esta investigación se espera tenga un impacto positivo en la seguridad, durabilidad y eficiencia de las infraestructuras subterráneas, fortaleciendo así la resiliencia de estas estructuras clave en la ingeniería civil.

### **1.3. Objetivos Específicos**

1. Identificar las características de un proyecto de túnel vial
2. Describir las principales causas y soluciones sobre las filtraciones en túneles
3. Investigar y revisar aspectos normativos y técnicos
4. Descripción de la estructura de un de protocolo
5. Realización de entrevistas a profesionales con experiencia en el tipo de obras
6. Elaboración del protocolo de inspección

### **1.4. Hipótesis**

Se plantea necesario validar la necesidad de implementar un protocolo de inspección específico para la prevención y control de filtraciones en obras subterráneas tipo túneles y demostrar que dicho protocolo es fundamental para reducir costos futuros, prevenir accidentes, garantizar la durabilidad de las estructuras y mejorar la eficiencia en el desarrollo de proyectos de construcción subterránea.

### **1.5. Descripción de la Metodología**

La metodología propuesta en la siguiente investigación para desarrollar el protocolo de inspección destinado a abordar las filtraciones de agua en obras subterráneas tipo túneles se basa en un enfoque integral que combina diversas etapas y técnicas. A continuación, se describe detalladamente la metodología a utilizar:

1. Realizar una exhaustiva revisión bibliográfica: Se llevará a cabo un estudio detallado de la literatura existente sobre filtraciones en túneles.
2. Analizar casos de estudio relevantes: Se procederá a realizar un análisis detallado de casos de estudio relevantes que proporcionen ejemplos concretos de problemas de filtraciones en túneles y las soluciones aplicadas.
3. Consultar a expertos del campo: Se llevarán a cabo entrevistas estructuradas con profesionales con experiencia en obras de construcción de túneles, incluyendo ingenieros, supervisores de obra y técnicos, para obtener opiniones expertas sobre la eficacia de los métodos de control propuestos.
4. Desarrollar un protocolo de inspección: Con base en la información recopilada y el análisis realizado, se procederá al desarrollo de un protocolo de inspección específico para abordar las filtraciones en obras subterráneas tipo túneles. Para una etapa posterior a la investigación, se propone continuar la investigación con las siguientes actividades:
5. Validar el protocolo mediante pruebas piloto y simulaciones: A través de pruebas piloto y simulaciones en situaciones controladas para verificar su efectividad y aplicabilidad en la prevención y control de filtraciones.
6. Analizar los resultados obtenidos: Realizar un análisis detallado de los resultados obtenidos durante la validación del protocolo, evaluando su impacto en la eficiencia, seguridad y durabilidad de las infraestructuras subterráneas, con el fin de identificar posibles áreas de mejora y ajustes necesarios.

## **CAPITULO 2: HISTORIA DE LOS TÚNELES EN CHILE**

### **2.1. Infraestructura Subterránea en Chile: Historia y Evolución de Túneles en el Territorio Nacional**

Una parte significativa del territorio chileno experimenta su desarrollo entre dos cadenas montañosas prominentes: la columna vertebral de América Latina, Los Andes, y la Cordillera de la costa. Aproximadamente el 70% de esta región está cubierto por montañas, colinas y elevaciones, lo cual, junto con la intensa actividad minera, ha generado una cantidad considerable de socavones y túneles.

El instinto inherente del excavador se arraiga profundamente en la mentalidad nacional, manifestándose a lo largo de kilómetros y kilómetros de túneles excavados en la explotación de depósitos minerales, incluso bajo el lecho oceánico, como es el caso del carbón. Este fenómeno se repite en proyectos de irrigación, en las infraestructuras ferroviarias y carreteras, en las centrales hidroeléctricas y en diversas otras iniciativas de desarrollo.

Desde la creación del Ministerio de Obras Públicas, la responsabilidad recae sobre este organismo para la construcción de túneles en ferrocarriles, obras hidráulicas y carreteras.

En la red ferroviaria del norte, específicamente en el tramo La Calera - Cabildo, se excavó el túnel Palos Quemados, que tiene una longitud de 1050 metros. En la zona de Cabildo se construyeron cuatro túneles con una longitud total de 2,180 metros, de los cuales La Grupa y Las Palmas son ahora utilizados por Vialidad tras la desactivación del ferrocarril. Entre Los Vilos y el Choapa se erigió el túnel Cavilolen, con poco más de 1,600 metros de longitud, y de Illapel a San Marcos, el túnel Espino, con cerca de 1,500 metros de longitud.

En la zona central, se inauguró en 1910 el túnel Caracoles del Ferrocarril Transandino, con una extensión de 3,143 metros (de los cuales 1,460 metros corresponden al lado chileno)

Cerca de Lonquimay, se concluyó en 1939 el túnel Las Raíces, con una longitud de 4,528 metros, y en la actualidad, también está bajo la supervisión de la Dirección de Vialidad

Figura 2

Túnel Vial las Raíces, Temuco



Nota. *Ruta por el túnel de las Raíces* [Fotografía], Turismo i, 2021.  
<https://turismo.cl/tours/ruta-por-el-tunel-de-las-raices-desde-temuco>

En Santiago, se finalizó en 1943 el túnel de Matucana con una longitud de 2,300 metros, conectando las estaciones ferroviarias Central y Mapocho bajo tierra. Entre las obras ejecutadas en las últimas dos décadas, se destaca la construcción del túnel Cristo Redentor en 1980, ubicado en la Ruta Internacional 60 CH en la V región, con una extensión de 3,080 metros (1,564 metros en el lado chileno). En 1984, se construyó el túnel El Farellón en Coyhaique, XI región, con 240 metros de longitud, y en 1994, en el norte de Chile, Antofagasta, se llevó a cabo la construcción del túnel Pedro Galleguillos de 793 metros de longitud. La construcción del túnel El Melón en 1995, mediante el sistema de concesión, se ubica en la Ruta 5, V región, con una longitud de 2,500 metros y facilita la evitación de la cuesta del mismo nombre. Finalmente, el túnel La Calavera, recientemente inaugurado en la misma ruta. En la Ruta 68, mediante concesiones, se construyeron dos túneles adicionales, uno en Lo Prado y otro en Zapata, con el objetivo de asegurar un servicio más eficiente, reducir los tiempos de viaje y mitigar la congestión vehicular durante la temporada estival.

Figura 3

Túnel Lo Prado



Nota. *Los 50 años de la construcción del Túnel Lo Prado* [Fotografía], ADN, 2020.

<https://www.adnradio.cl/gastronomia/2020/11/20/ciudadano-a-pata-por-las-carreteras-de-chile-los-50-anos-de-la-construccion-del-tunel-lo-prado-y-de-la-ruta-5.html>

Esta creciente actividad de construcción de túneles en el país ha suscitado un marcado interés por parte de la ingeniería chilena, que aplica continuamente nuevas técnicas en el diseño y la construcción de infraestructuras viales.

## **2.2. Túnel Trinchera y Minero, Principales Tipos de Sistemas Empleados en el Desarrollo de Túneles de Metro en Santiago**

La evolución del sistema de construcción de túneles en Santiago a lo largo del tiempo, inicialmente, fueron las primeras líneas del Metro construidas utilizando el método de "tajo abierto" o trinchera, lo que implicaba abrir la calle para construir la infraestructura. Este proceso afectaba la vialidad urbana y los comercios locales, ya que los tramos de las vías intervenidas permanecían paralizados durante la construcción, generando molestias en la ciudad.

Las primeras líneas del Metro de Santiago, también conocido como ferrocarril metropolitano, fueron construidas mediante el sistema de “tajo abierto”, el cual consistía principalmente en abrir la calle para construir la infraestructura. Durante el período de construcción, los tramos de las vías intervenidas permanecían paralizadas, afectando comercios, servicios y alterando la vialidad urbana. Una vez terminada dicha operación, la calle era cubierta para entrar nuevamente en funcionamiento sin que se observaran mayores vestigios del sistema constructivo. Todo esto responde a que la infraestructura construida quedaba únicamente bajo la superficie y no intervenía sitios aledaños.

Figura 4

Plano de estaciones construidas con el método de tajo abierto



Nota. *Líneas 1 y 2, periodo 1975-1987* [Plano], Amigo, 2016.

[https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0717-69962023000200138](https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0717-69962023000200138)

Figura 5

Trabajos de Excavación Método Trinchera



Nota. *Segundo tramo línea 1 extensión a estación Salvador* [Fotografía], Archivo Metro de Santiago, 1977.

[https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0717-69962023000200138](https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0717-69962023000200138)

Figura 6

Trabajos de Excavación Método Trinchera



Nota. *Segundo tramo línea 1 extensión a estación Salvador* [Fotografía], Archivo Metro de Santiago, 1977.

[https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0717-69962023000200138](https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0717-69962023000200138)

A medida que Santiago creció y se densificó, paralizar sus vías principales y su funcionamiento era cada vez menos viable. Debido a esto y a la implementación de nuevas tecnologías, a partir de 1997, Metro de Santiago cambió su forma de construcción subterránea tanto para las líneas como las estaciones. El Nuevo Método Austriaco (N. A. T. M.) empezó a utilizarse para construir estaciones e Inter estaciones mediante piques -perforaciones- y túneles, evitando paralizar la ciudad. Este sistema implica la expropiación u ocupación de terrenos colindantes a la red para acceder al túnel principal a través de un pique lateral. Así, la construcción sólo interviene puntos específicos sin necesidad de ocupar la superficie total de la calle, como ocurría en el sistema de “tajo abierto”.

Figura 7

Plano de estaciones construidas con el método de tajo abierto

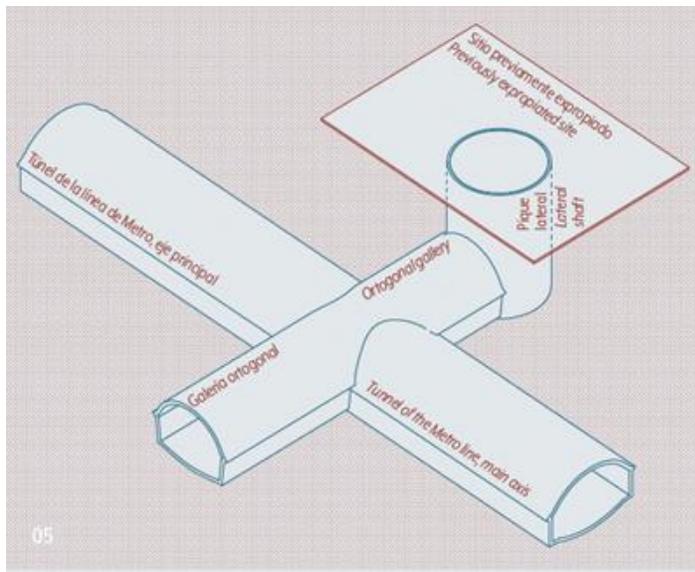


Nota. *Estaciones construidas con el método de pique y túnel. Líneas 1, 2, 4 y 5* [Plano], Amigo, 2016.

[https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0717-69962023000200138](https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0717-69962023000200138)

Figura 8

### Diseño de Piques y Túneles en la Construcción de Infraestructura de Metro



Nota. *Esquemas de Construcción de Piques y Túneles de Metro* [Figura], Amigo, 2016.

[https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0717-69962023000200138](https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0717-69962023000200138)

Figura 9

### Implementación de Obras para el Pique Cuevas



Nota. *Construcción pique Cuevas, instalación de faena Línea 3* [Fotografía], Archivo Metro de Santiago, 2016.

[https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0717-69962023000200138](https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0717-69962023000200138)

La superficie de los sitios expropiados o áreas públicas utilizadas como parque y/o plazas no se adquieren o utilizan únicamente para la construcción de los piques laterales, que tienen un diámetro estándar de 15, 18, 20 o 25 m, sino que también se utilizan para la instalación de faena, por lo que el área requerida dependerá de ambos factores. Cabe mencionar que, además de los piques necesarios para la construcción de la estación, se realizan piques entre estaciones -o Inter estación- con el objetivo de disminuir los tiempos de construcción. Con frecuencia, estos piques se utilizan posteriormente como ventilación del sistema. Por lo tanto, existen dos tipos de pique: estación e Inter estación.

### **CAPÍTULO 3: DEFINICIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE UN PROYECTO DE TÚNEL**

La construcción de túneles es una de las tareas más desafiantes en el ámbito de la ingeniería civil, especialmente cuando se trata de controlar las filtraciones de agua. Este problema no solo puede comprometer la estructura del túnel, sino que también puede afectar la seguridad y la operación del mismo. Los túneles representan construcciones singulares, desde su concepción y diseño hasta su edificación y subsiguiente operación, especialmente aquellos destinados al tránsito de vehículos y personas, por lo tanto, es imperativo garantizar una operación segura y fluida para quienes transitan por ellos.

En primer lugar, se gestan en un entorno natural oculto a la vista humana y generalmente impredecible en términos estrictos, lo que plantea diferencias fundamentales con las estructuras exteriores. Previo a su construcción, se deben considerar todos los métodos que garanticen y puedan anticipar las condiciones dentro del macizo rocoso indirectos y aproximados, las condiciones reales solo se revelan al concluir la construcción. Además, aunque la mayoría de los fenómenos durante la construcción son conocidos, determinar con certeza dónde y cuándo ocurrirán, así como su magnitud e impacto exactos, no es sencillo. Durante la operación, la condición de espacio confinado, carente de ventilación y luz natural, exige la implementación de numerosos elementos para compensar dicha situación. A su vez, esta característica confinada proporciona una excelente protección contra los riesgos asociados a obras viales al aire libre, como la inestabilidad de taludes y condiciones climáticas adversas, especialmente relevantes en

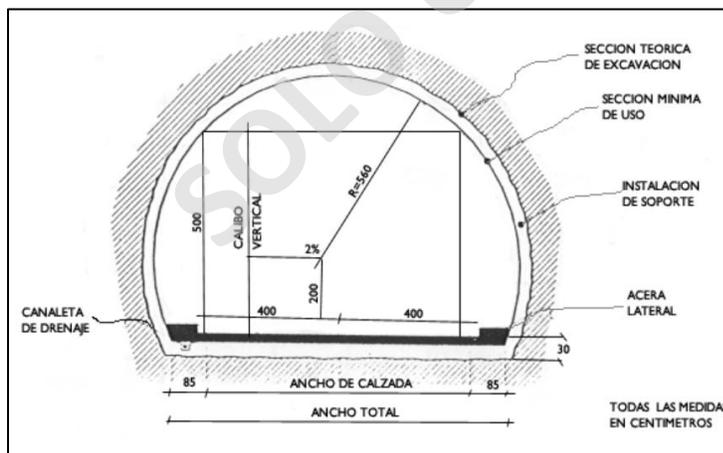
geografías como la de Chile, así, los túneles son en muchas condiciones una alternativa más segura a diferencia de una obra vial en superficie.

Se establece que las estructuras subterráneas complementarias, como galerías auxiliares, piques de ventilación y cavernas, deben cumplir con los mismos estándares aplicables a los túneles viales propiamente dichos. Con frecuencia, se recurre a la construcción de túneles como una alternativa viable a las opciones a cielo abierto. La compleja topografía de Chile, marcada por imponentes sistemas montañosos, ha impulsado la edificación de túneles viales de considerables longitudes. Estos túneles buscan agilizar la conexión entre ciudades o lugares estratégicos, facilitando la movilidad de diversos tipos de transporte. El crecimiento significativo de la actividad económica en el país ha generado la necesidad de explorar nuevas alternativas de tránsito, incluyendo la implementación de túneles paralelos, con el propósito de mejorar los niveles de servicio de las infraestructuras viales existentes.

Para determinar la mejor solución, es imperativo llevar a cabo un estudio previo de manera sistemática. Este análisis permite proponer una solución, o a veces varias, así como el momento óptimo para su implementación. Posteriormente, se inicia la fase de anteproyecto de la o las soluciones recomendadas y, finalmente, se desarrolla el proyecto completo de la obra.

Figura 10

Sección Transversal de un Túnel



Nota. *Dimensiones Sección Transversal de un Túnel* [Figura], dirección de Vialidad, 2013.

<https://vialidad.mop.gob.cl/areasdevialidad/tuneles/Paginas/M%c3%a9tododeExcavaci%c3%b3n.aspx>

### **3.1. Características de un Proyecto de Túnel**

Las características de un proyecto de túnel comprenden una extensa y detallada gama de aspectos técnicos, ambientales y operativos que deben ser cuidadosamente considerados para garantizar el éxito del proyecto. A continuación, se describen en detalle los principales elementos y consideraciones a tener en cuenta durante las distintas fases de desarrollo de un túnel.

### **3.2. Estudios iniciales**

#### **3.2.1. Estudio Geotécnico**

Es fundamental realizar un estudio detallado del suelo y la roca en la zona donde se construirá el túnel para identificar posibles riesgos geológicos y determinar las técnicas de excavación más adecuadas. Este estudio evalúa la estabilidad del terreno, las condiciones geológicas y la presencia de agua subterránea.

### **3.3. Diseño del Túnel**

#### **3.3.1. Diseño Estructural**

El diseño debe ser realizado por ingenieros especializados en obras subterráneas, considerando la estabilidad estructural, resistencia a las cargas, durabilidad, y las condiciones geológicas adversas. Esto incluye la selección de materiales y la planificación de los métodos de construcción.

#### **3.3.2. Geometría y Trazado**

La geometría del túnel y su trazado se definen según las necesidades específicas de la obra, como el tipo de tráfico, la velocidad de circulación, curvatura de las secciones y altura útil. Estos factores influyen directamente en la eficiencia y seguridad del túnel.

### **3.4. Aspectos Ambientales y Normativos**

#### **3.4.1. Impacto Ambiental**

Es crucial considerar las regulaciones ambientales y normativas relacionadas con la construcción de túneles. Esto incluye la evaluación del impacto ambiental y social de la obra, así como la implementación de medidas para mitigar cualquier efecto negativo.

### **3.5. Métodos de Construcción**

#### **3.5.1. Técnicas de Excavación**

Dependiendo del tipo de terreno y las condiciones geológicas, se seleccionan las técnicas de excavación más adecuadas, como el uso de tuneladoras, perforación y voladura, o excavación manual. La elección del método influye en la eficiencia del proyecto y la seguridad del personal.

#### **3.5.2. Sostenimiento y Revestimiento**

Una vez excavado el túnel, se deben instalar sistemas de sostenimiento y revestimiento para garantizar su estabilidad. Esto puede incluir hormigón proyectado, anclajes, mallas de sostenimiento, y otros sistemas de refuerzo.

### **3.6. Seguridad y Operatividad**

#### **3.6.1. Seguridad en la Construcción**

Durante la construcción, se deben implementar medidas de seguridad para proteger a los trabajadores y asegurar la integridad estructural del túnel. Esto incluye sistemas de ventilación, iluminación, drenaje y equipos de emergencia.

### **3.6.2. Operatividad del Túnel**

Una vez finalizado, el túnel debe estar equipado con sistemas que garanticen su operación segura y eficiente. Esto incluye sistemas de control de tráfico, señalización, monitoreo de condiciones estructurales y de seguridad, y mantenimiento regular.

## **3.7. Topografía y Monitoreo**

### **3.7.1. Topografía de Apoyo**

La topografía es esencial tanto para el diseño inicial como para el monitoreo continuo del túnel. Se utilizan diversas herramientas y técnicas, como emisores láser, plomadas ópticas y perfilómetros, para asegurar que la construcción se ajuste al diseño planimétrico y altimétrico.

### **3.7.2. Monitoreo de Deformaciones**

Durante y después de la construcción, se monitorean posibles deformaciones del túnel para detectar y corregir cualquier problema estructural que pueda surgir con el tiempo.

Estas características detallan la notable complejidad y los numerosos factores que se deben considerar a lo largo de todas las fases de un proyecto de túnel, desde la planificación inicial hasta la operación final, para garantizar su éxito. La naturaleza multifacética de estos proyectos requiere una atención meticulosa a una serie de aspectos interrelacionados, cada uno de los cuales desempeña un papel crucial en la viabilidad y eficiencia del túnel.

## **CAPITULO 4: PRINCIPALES CAUSAS DE FILTRACIONES EN TÚNELES**

Las filtraciones de agua en túneles representan un problema común y significativo que puede comprometer tanto la seguridad como la funcionalidad de estas estructuras subterráneas. Estas filtraciones no solo afectan la integridad del túnel, sino que también pueden poner en riesgo la seguridad de los usuarios y el mantenimiento de la infraestructura. Existen múltiples causas que contribuyen a la aparición de estas filtraciones, cada una con sus propias particularidades y desafíos.

La frecuencia de estas fallas puede variar dependiendo de una serie de factores, como la ubicación geográfica, las condiciones geológicas, el diseño y la edad de la estructura del túnel, así como la calidad de los materiales utilizados en su construcción.

En general, la presencia de aguas subterráneas alrededor de un túnel es un fenómeno natural, ya que el agua tiende a infiltrarse a través de las capas de suelo y roca circundantes. Esta infiltración puede deberse a la presión hidrostática del agua subterránea, a la presencia de acuíferos cercanos, a la permeabilidad del terreno o a la existencia de grietas y juntas en la estructura del túnel.

La filtración de aguas subterráneas en túneles puede acelerar el deterioro de la estructura y provocar problemas como la corrosión de las armaduras, la degradación de los materiales de construcción y la inestabilidad de la infraestructura. Por lo tanto, es fundamental abordar de manera efectiva este problema mediante la implementación de medidas correctoras adecuadas, en resumen, si bien la filtración de aguas subterráneas en túneles es un problema frecuente, su prevención y corrección son aspectos clave para garantizar la seguridad, durabilidad y funcionalidad de las estructuras subterráneas a lo largo del tiempo.

A continuación, se presentan las principales causas de las filtraciones de agua en túneles:

### **4.1. Condiciones Geológicas y Geotécnicas**

#### **4.1.2. Terreno Subterráneo**

La naturaleza del terreno en el que se construye el túnel es uno de los factores más determinantes para la aparición de filtraciones. Terrenos con altas concentraciones de agua subterránea, zonas de saturación o en la franja capilar presentan un mayor riesgo. Los tipos de suelo y roca,

especialmente aquellos que son porosos o fracturados, permiten el paso de agua con mayor facilidad.

#### **4.1.3. Presencia de Fallas Geológicas**

Las fallas y fracturas en las formaciones rocosas pueden servir como conductos para el agua, facilitando su entrada al túnel. Estas fracturas pueden ser naturales o inducidas por la construcción y la presión del terreno.

### **4.2. Deficiencias en la Impermeabilización**

#### **4.2.1. Materiales y Técnicas Inadecuadas**

El uso de materiales impermeabilizantes de baja calidad o inapropiados para las condiciones específicas del túnel puede resultar en filtraciones. Además, técnicas de instalación deficientes pueden comprometer la efectividad de la impermeabilización. Por ejemplo, una mala aplicación de geomembranas, geotextiles o selladores puede dejar huecos y grietas a través de los cuales puede filtrarse el agua.

#### **4.2.2. Fallas en el Sistema de Impermeabilización**

Incluso con materiales adecuados, la falta de mantenimiento o la instalación incorrecta puede llevar a fallas en el sistema de impermeabilización. El deterioro natural de estos materiales con el tiempo también puede contribuir a la aparición de filtraciones.

### **4.3. Defectos en el Revestimiento del Túnel**

#### **4.3.1. Grietas y Juntas Mal Selladas**

Las grietas y juntas en el revestimiento del túnel son puntos comunes de entrada de agua. Estas grietas pueden ser el resultado de movimientos del terreno, asentamientos diferenciales, o la presión hidrostática. La falta de sellado adecuado en estas áreas permite que el agua se infiltre en el túnel.

### **4.3.2. Degradación del Revestimiento**

El revestimiento del túnel puede degradarse con el tiempo debido a la acción del agua, productos químicos, y la erosión. Este deterioro reduce la capacidad del revestimiento para actuar como barrera contra el agua, permitiendo que esta se infiltre.

## **4.4. Drenaje Inadecuado**

### **4.4.1. Sistemas de Drenaje Ineficientes**

Un sistema de drenaje inadecuado o mal diseñado puede ser incapaz de manejar el volumen de agua subterránea, lo que lleva a acumulaciones de agua que eventualmente se infiltran en el túnel. La falta de mantenimiento de estos sistemas también puede obstruir el flujo de agua, aumentando la presión sobre las estructuras del túnel.

## **4.5. Condiciones Hidrológicas Cambiantes**

### **4.5.1. Variaciones Estacionales**

Las variaciones estacionales en los niveles de agua subterránea pueden afectar significativamente la presión hidrostática sobre el túnel. Durante épocas de lluvias intensas o deshielos, el aumento en el nivel del agua subterránea puede superar la capacidad del sistema de drenaje del túnel, llevando a filtraciones.

## **4.6. Erosión y Desgaste**

### **4.6.1. Acción del Agua**

El agua que se infiltra y circula dentro del túnel puede causar erosión del revestimiento y desgaste de los materiales de construcción. Con el tiempo, este desgaste compromete la integridad del túnel y facilita la aparición de filtraciones. Este problema es especialmente común en túneles antiguos o que no reciben un mantenimiento adecuado.

## CAPÍTULO 5: SISTEMAS DE IMPERMEABILIZACIÓN

### 5.1. Geomembranas

Las geomembranas son láminas sintéticas que actúan como barreras impermeables. Están hechas principalmente de materiales como PVC (cloruro de polivinilo), PE (polietileno) y EPDM (etileno propileno dieno monómero). Se utilizan ampliamente debido a su flexibilidad, resistencia química y durabilidad. son láminas flexibles fabricadas a partir de resinas sintéticas, aditivos y plastificantes, cuya flexibilidad le permite adaptarse con facilidad a la forma del terreno o a cualquier superficie.

Figura 11

Geomembranas en Túneles



Nota. Sistemas de impermeabilización de túneles. [Fotografía], TDM Chile, 2017.

<https://www.tdmchile.cl/products-geosinteticos-geomembranas-pvc/>

### 5.2. PVC (Cloruro de Polivinilo)

El PVC es otro material muy utilizado para la impermeabilización de túneles debido a su resistencia y flexibilidad. Ofrece buena resistencia química y flexibilidad, lo que permite su adaptación a las deformaciones del terreno.

### **5.2.1. Características del PVC**

**Resistencia a la corrosión:** El PVC es altamente resistente a la corrosión, lo que lo hace ideal para ambientes subterráneos donde puede haber exposición a productos químicos y agua.

**Flexibilidad:** Mantiene su flexibilidad en un amplio rango de temperaturas, lo que permite que se adapte a los movimientos y asentamientos del terreno.

**Durabilidad:** Tiene una larga vida útil y requiere poco mantenimiento.

**Impermeabilidad:** Proporciona una barrera eficaz contra el agua, lo que ayuda a mantener los túneles secos y seguros.

#### **Aplicación en Túneles**

**Preparación de la Superficie:** Al igual que con otros sistemas de impermeabilización, la superficie debe estar limpia y libre de contaminantes.

**Sistema de Membrana:** Las membranas de PVC se instalan generalmente en grandes hojas que se sueldan térmicamente para formar una barrera continua. Esto asegura una impermeabilización efectiva incluso en condiciones difíciles.

**Capas y Componentes:** Los sistemas de impermeabilización de PVC pueden incluir varias capas, como una capa base, una membrana impermeable y una capa protectora, para asegurar una durabilidad y eficiencia óptimas.

Figura 12

Geomembranas en Túneles



Nota. *Geomembrana de PVC* [Fotografía], Geocomercial, 2022.

<https://www.geocomercial.pe/producto/geomembrana-de-pvc-std/>

### **5.3. PE (Polietileno)**

El Polietileno (PE) es un material ampliamente utilizado en la impermeabilización de túneles debido a sus excelentes propiedades físicas y químicas. Aquí hay una descripción detallada de cómo se utiliza y las ventajas que ofrece:

#### **5.3.1. Características del PE**

**Resistencia a la corrosión y productos químicos:** El PE es altamente resistente a la mayoría de los productos químicos, lo que lo hace ideal para entornos subterráneos donde puede haber exposición a sustancias corrosivas.

**Flexibilidad y durabilidad:** El PE mantiene su flexibilidad a diversas temperaturas y condiciones, lo que permite que se adapte a los movimientos del terreno y las estructuras sin perder su integridad.

Impermeabilidad: Proporciona una excelente barrera contra el agua, evitando la infiltración y protegiendo la estructura del túnel.

#### Aplicación en túneles

Preparación de la Superficie: La superficie del concreto debe estar limpia y libre de contaminantes para asegurar una buena adhesión de la membrana de PE.

Instalación de la Membrana: Las membranas de PE se instalan generalmente en grandes hojas que se pueden soldar térmicamente para crear una barrera continua. Este proceso de soldadura asegura que las juntas sean herméticas y efectivas contra la entrada de agua.

Capas y Sistemas: Los sistemas de impermeabilización de PE a menudo incluyen una capa base, la membrana de PE y una capa protectora. Estos sistemas pueden ser aplicados tanto en la cara positiva (post-concreto) como en la cara negativa (pre-concreto) de las estructuras de los túneles.

Figura 13

#### Geomembranas en Túneles



Nota. *Geomembrana de Polietileno* [Fotografía], Soluciones ambientales Integrales, 2023.

<https://geosai.com/es/productos/geomembrana-de-polietileno-pe/>

## **5.4. EPDM (Etileno Propileno Dieno Monómero)**

Conocido por su alta elasticidad y resistencia a la intemperie, se usa en aplicaciones donde se requieren propiedades mecánicas superiores. El EPDM un material comúnmente utilizado en la impermeabilización de túneles debido a sus excelentes propiedades de resistencia y durabilidad.

### **5.4.1. Características del EPDM**

Resistencia a la intemperie y ozono: El EPDM es altamente resistente a la exposición a los rayos UV, el ozono y las condiciones climáticas extremas.

Elasticidad y flexibilidad: El EPDM mantiene su flexibilidad incluso a bajas temperaturas, lo que lo hace ideal para ambientes subterráneos.

Durabilidad: Este material tiene una vida útil prolongada, lo que reduce la necesidad de mantenimiento y reparaciones frecuentes.

Resistencia química: Es resistente a una amplia gama de productos químicos, lo que lo hace adecuado para entornos donde puede haber contacto con sustancias corrosivas.

### **Aplicación en Túneles**

Preparación de la Superficie: Al igual que con otros sistemas de impermeabilización, la superficie del concreto debe estar bien preparada, limpia y libre de contaminantes para asegurar una buena adhesión del EPDM.

Sistema de Membrana: Las membranas de EPDM se aplican generalmente en grandes hojas, que se pueden unir mediante adhesivos o soldadura de costuras para formar una barrera continua.

Compatibilidad y Capas: Es esencial que los componentes del sistema de impermeabilización sean compatibles entre sí y se apliquen en la secuencia correcta para asegurar la impermeabilidad y la durabilidad del sistema.

Figura 14

Geomembranas en Túneles



Nota. *Geomembrana de Etileno Propileno Dieno* [Fotografía], Soindus Comercial, 2021.  
<https://www.soindus.cl/index.php/noticias/item/32-elastomero-epdm-etileno-propileno-dieno>

Estas geomembranas se instalan en el revestimiento del túnel y se pueden combinar con geotextiles para proporcionar una mayor protección mecánica y química.

## **5.5. Sistemas de Inyección**

### **5.5.1. Lechadas y Resinas de Inyección**

Las lechadas y resinas se inyectan en las grietas, juntas y cavidades del túnel para sellar las filtraciones de agua. Los tipos más comunes incluyen:

### **5.5.2. Lechadas de Cemento:**

Las lechadas de cemento son ampliamente utilizadas en la construcción para la impermeabilización y estabilización de estructuras subterráneas, como túneles. Estas lechadas se componen de cemento, agua y, en algunos casos, aditivos que mejoran sus propiedades, utilizadas para sellar grandes grietas y cavidades. Ofrecen una buena adherencia y pueden soportar movimientos estructurales moderados.

### **5.5.3. Composición y Tipos de Lechadas de Cemento**

1. Lechada de Cemento Pura: Compuesta únicamente de cemento y agua. Es sencilla y económica, ideal para aplicaciones básicas de impermeabilización y consolidación.
2. Lechada con Aditivos: Se añaden aditivos para mejorar la fluidez, reducir la segregación, aumentar la resistencia y controlar el tiempo de fraguado. Los aditivos comunes incluyen superplastificantes, retardantes y acelerantes.

### **5.5.4. Aplicaciones de las Lechadas de Cemento**

1. Impermeabilización de Fisuras y Juntas:
  - Las lechadas de cemento se inyectan en fisuras y juntas para sellarlas, previniendo la filtración de agua.
  - Proporcionan una barrera efectiva contra el ingreso de agua y ayudan a proteger la estructura del túnel.
2. Estabilización del Suelo:
  - Utilizadas para mejorar la cohesión y estabilidad del suelo alrededor del túnel.
  - Se inyectan en el terreno circundante para rellenar vacíos y consolidar el suelo, lo que aumenta su capacidad portante y reduce el riesgo de asentamientos.

### 3. Relleno de Cavidades:

- Empleadas para rellenar cavidades y huecos en el concreto o en el terreno.
- Esto es esencial para la estabilización de estructuras antiguas y la mejora de la integridad estructural.

#### **5.5.5. Ventajas de las Lechadas de Cemento**

1. Económicas y Eficaces: Son una solución rentable para muchos problemas de impermeabilización y estabilización.
2. Versatilidad: Pueden ser adaptadas para diferentes aplicaciones y condiciones del sitio.
3. Fácil de Aplicar: La tecnología de inyección es relativamente sencilla y rápida de implementar.

#### **5.5.6. Procedimiento de Aplicación**

1. Preparación de la Superficie:
  - Es fundamental que las superficies estén limpias y libres de contaminantes antes de la inyección.
  - Las superficies irregulares o con fisuras deben ser tratadas adecuadamente para asegurar una buena adhesión de la lechada.
2. Mezcla y Preparación de la Lechada:
  - La proporción de cemento y agua, junto con los aditivos, se ajusta según las necesidades específicas del proyecto.
  - La lechada se mezcla hasta obtener una consistencia homogénea y fluida.
3. Inyección:

- Se inyecta la lechada bajo presión en las fisuras, juntas o cavidades.
- El proceso de inyección debe ser controlado para asegurar una distribución uniforme y completa de la lechada.

Figura 15

### Sistemas de Inyección



Nota. *Inyecciones de lechada de cemento* [Fotografía], Cimsur, 2023.

<https://cimsur.es/inyecciones-lechada-de-cemento/>

### 5.6. Resinas de Poliuretano

Las resinas de poliuretano son altamente efectivas para la impermeabilización y la reparación de estructuras subterráneas como túneles. Estas resinas se expanden al contacto con el agua, creando una barrera impermeable eficaz, son ideales para grietas finas y áreas con alta humedad.

### 5.6.1. Uso de Resinas de Poliuretano en Túneles

### 5.6.2. Aplicaciones Comunes

- Sellado de Grietas y Juntas: Las resinas de poliuretano se utilizan para sellar grietas de más de 0.02 pulgadas en concreto y juntas móviles o no móviles, proporcionando una barrera efectiva contra el agua.
- Estabilización y Relleno de Vacíos: También se utilizan para rellenar vacíos y estabilizar suelos en proyectos de construcción subterránea, lo que ayuda a prevenir asentamientos y otros problemas estructurales.

#### 1. Ventajas de las Resinas de Poliuretano:

- Expansión de Espuma: Las resinas como DE NEEF® CFL PRe pueden expandirse hasta 20 veces su volumen original, lo que asegura un sellado completo de las grietas y vacíos.
- Durabilidad y Resistencia Química: Estas resinas son resistentes a la mayoría de los solventes orgánicos, ácidos suaves, álcalis y microorganismos, lo que las hace ideales para entornos subterráneos exigentes.
- Fácil Aplicación: Son productos de un solo componente, lo que simplifica su uso y reduce el tiempo de preparación y aplicación. Además, ofrecen tiempos de reacción controlables para adaptarse a diferentes condiciones del sitio.).

#### 2. Procedimiento de Aplicación:

- Preparación de la Superficie: La superficie debe estar limpia y libre de contaminantes. Las grietas activas más grandes deben sellarse con un método aprobado antes de la inyección.
- Inyección: Se recomienda usar bombas separadas para el agua y la resina para evitar contaminación cruzada. La inyección debe comenzar a baja presión y ajustarse según sea necesario para asegurar una buena penetración del producto.

Figura 16

## Sistemas de Inyección



Nota. *Inyecciones de Poliuretano* [Fotografía], Lemara, 2019.

<https://www.lemara.es/inyecciones-poliuretano/>

### 5.7. Resinas Epoxi

Utilizadas en situaciones donde se requiere una alta resistencia mecánica y adhesión, son menos flexibles que las resinas de poliuretano, pero proporcionan una excelente durabilidad en ambientes secos, las resinas epoxi son altamente eficaces para la impermeabilización y la reparación estructural en túneles debido a su capacidad de adherirse a superficies de concreto, incluso en condiciones húmedas, y su excelente resistencia mecánica.

### 5.7.1. Uso de Resinas Epoxi en Túneles

#### 1. Aplicaciones Comunes

- Sellado de Grietas y Juntas: Las resinas epoxi como Denepox I-40 son ideales para sellar grietas capilares y grietas horizontales por gravedad, proporcionando una barrera duradera contra la penetración de agua.
- Impermeabilización de Cabezas de Pilotes: PREPRUFE® Grout EG 75 se utiliza para impermeabilizar cabezas de pilotes y penetraciones estructurales, asegurando la continuidad del sistema de impermeabilización.

Figura 17

Sistemas de Inyección



Nota. *Resina de inyección epóxica Denepox 40* [Fotografía], Resapol 2022.

<https://www.resapol.com/product/de-neef-denepox-40-part-a-23kg/>

## 2. Ventajas de las Resinas Epoxi

- **Alta Adherencia:** Las resinas epoxi tienen una excelente adherencia al concreto, superando la cohesión del concreto mismo.
- **Resistencia Química:** Son resistentes a ácidos, álcalis, aceites, grasas y derivados del petróleo, lo que las hace adecuadas para entornos exigentes.
- **Larga Vida Útil:** Ofrecen una vida útil prolongada y son compatibles con aplicaciones en condiciones húmedas y secas.

## 3. Procedimiento de Aplicación

- **Preparación de la Superficie:** La superficie debe estar limpia y libre de contaminantes. Para obtener los mejores resultados, se recomienda que el concreto esté seco, aunque las resinas epoxi pueden aplicarse en superficies húmedas.
- **Mezcla y Aplicación:** La resina y el endurecedor se mezclan en las proporciones especificadas. Para la inyección, se utilizan bombas manuales o mecánicas. Las resinas se aplican en grietas y juntas mediante inyección a baja presión.

## 5.8. Hormigón Proyectado y Revestimientos

### 5.8.1. Uso de Hormigón Proyectado y Revestimientos en Túneles en Chile

#### Definición y Aplicación

El hormigón proyectado, también conocido como shotcrete, es una técnica ampliamente utilizada en la construcción y estabilización de túneles. Este método implica la aplicación de una mezcla de hormigón a alta velocidad sobre una superficie preparada, utilizando equipos especializados. Se emplea tanto para el sostenimiento temporal como para el revestimiento permanente de túneles.

## **Diseño de Mezcla**

Las mezclas de shotcrete se diseñan para cumplir con requerimientos específicos de desempeño y facilitar la constructibilidad. Comparado con el hormigón convencional, las mezclas de shotcrete tienen un contenido más alto de materiales cementicios y aditivos para mejorar la trabajabilidad, reducir el rebote y facilitar el bombeo y la proyección del material. Los aditivos utilizados incluyen cenizas volantes, humo de sílice y escoria, que mejoran la resistencia y durabilidad.

## **Acelerantes y Fibras**

El uso de acelerantes libres de alcalinos es común para acelerar el fraguado y el desarrollo de resistencia temprana, crucial para el sostenimiento del terreno. Las fibras de polipropileno y acero se incorporan para mejorar la tenacidad y la ductilidad del shotcrete, proporcionando una mayor resistencia a las fisuras y mejorando la capacidad de absorción de energía.

### **5.8.2. Revestimientos de Túneles**

#### **5.8.3. Tipos de Revestimientos**

Los túneles generalmente se revisten en dos etapas: el sostenimiento primario y el revestimiento secundario. El sostenimiento primario utiliza shotcrete reforzado con mallas o fibras para estabilizar temporalmente la excavación. El revestimiento secundario, que puede ser de shotcrete o concreto lanzado, proporciona la protección final y duradera contra la infiltración de agua y otros factores deteriorantes.

#### **5.8.4. Innovaciones y Tecnología**

En proyectos como el Túnel San Cristóbal en Santiago, se han implementado innovaciones en el uso de shotcrete para enfrentar desafíos específicos del terreno. Se realizaron pruebas con diferentes mezclas de hormigón y aditivos para determinar la más adecuada en términos de resistencia y absorción de energía. Este enfoque permitió optimizar el proceso de construcción y mejorar la calidad del revestimiento del túnel.

Figura 18

## Sistemas de Inyección



Nota. *Aplicación de Shotcrete en Talud* [Fotografía], Hormigón al día, 2015.

<https://hormigonaldia.ich.cl/obra-destacada/tunel-san-cristobal-innovacion-y-tecnologia-de-punta-para-un-proyecto-de-clase-mundial/>

### 5.9. Sistemas de Drenaje

En la construcción de túneles, los sistemas de drenaje y saneamiento juegan un papel fundamental en la gestión del agua y la prevención de daños estructurales. La presencia de agua en los túneles puede derivar de diversas fuentes, como aguas subterráneas, infiltraciones de lluvia, o el propio uso del túnel, especialmente en el caso de túneles de servicios públicos que pueden estar sujetos a derrames o fugas de agua de diversas instalaciones. Para enfrentar estos desafíos, se emplean varios sistemas de drenaje y saneamiento diseñados específicamente para controlar y redirigir el agua de manera eficiente, garantizando así la integridad estructural del túnel y la seguridad de su operación. A continuación, se describen algunos de los sistemas más utilizados en la construcción de túneles.

Figura 19

## Sistemas de Drenaje



Nota. *Sistemas de drenaje ACO para túneles* [Fotografía], ACO iberia & Sudamérica, 2015.  
<https://www.aco.es/es/actualidad/sistemas-de-drenaje-aco-para-tuneles>

### 5.9.1. Ranuras y canaletas de recogida

Estas se utilizan para recoger líquidos como el agua superficial, estas ranuras permiten que el agua y otros líquidos sean dirigidos hacia los sistemas de saneamiento como sumideros, colectores, drenes etc.

### 5.9.2. Colectores y depósitos

Los colectores específicos son vitales para manejar líquidos peligrosos, como los tóxicos e inflamables, especialmente en túneles donde se permite el transporte de mercancías peligrosas. Los depósitos y las bombas se sitúan generalmente en las bocas y puntos bajos del túnel para facilitar la recolección y eliminación de estos líquidos.

### 5.9.3. Sistemas de separación de aceite y agua

Estos sistemas son cruciales para separar los contaminantes del agua recogida, permitiendo que el agua sea tratada adecuadamente antes de ser liberada al medio ambiente o reutilizada. Se utilizan separadores de aceite-agua para manejar derrames y prevenir la contaminación del agua.

### 5.9.4. Láminas drenantes y tubos de drenaje

Estos materiales son comunes en la instalación de sistemas de drenaje en túneles. Las láminas drenantes ayudan a canalizar el agua hacia los sistemas de recolección, mientras que los tubos de drenaje facilitan su evacuación desde el interior del túnel hacia puntos de salida específicos.

Estos sistemas combinados aseguran una gestión eficiente del agua, previniendo problemas como filtraciones, humedades y daños estructurales que pueden comprometer la seguridad y durabilidad del túnel.

Figura 20

Sistemas de Drenaje



Nota. *Lamina drenante Fondaline* [Fotografía], Onduline, 2017.

<https://es.onduline.com/es/profesional/sistemas-cubierta-y-tejado/drenaje-y-proteccion-soterrados/lamina-drenante-fondaline>

## CAPITULO 6: NORMATIVAS Y ESTANDARES

### 6.1. Normativa Chilena

En Chile, la normativa relacionada con las filtraciones de agua en obras subterráneas no está específicamente detallada en una única regulación, pero sí existen varias normativas y recomendaciones que se aplican en el contexto de la ingeniería civil y la construcción. Estas normativas se enfocan en aspectos como la seguridad, la impermeabilización y el control de aguas subterráneas y están regidas principalmente por el Ministerio de Obras Públicas (MOP), específicamente la normativa que aborda estos temas incluye:

Figura 21

Ministerio de Obras Publicas



Nota. *Logo Institucional Ministerio de Obras Publicas* [Figura], MOP, 2018.

<https://www.mop.gob.cl/declaracion-publica-ministerio-de-obras-publicas/>

### **6.1.1. Manual de Carreteras Volumen 5**

El documento "Volumen N°5 Manual de Carreteras" aborda de manera detallada la problemática de filtraciones en túneles y proporciona especificaciones técnicas para su control en el contexto de la construcción de carreteras en Chile.

En relación a las filtraciones en túneles, se destaca la importancia de implementar técnicas de control como inyecciones de impermeabilización, barbacanas de drenaje y drenajes en perforaciones. Estas medidas buscan interceptar y conducir las aguas antes de que alcancen la superficie del revestimiento del túnel, evitando daños y garantizando la seguridad de la infraestructura.

Se establecen procedimientos específicos para el control de filtraciones, incluyendo la utilización de tubos de policloruro de vinilo (PVC) que cumplan con las normativas pertinentes. Se enfatiza la necesidad de drenar las filtraciones de manera efectiva antes de proceder con el hormigonado o la aplicación de hormigón proyectado, asegurando un buen resultado final en la construcción del túnel.

Además, se menciona la importancia de la aprobación del Inspector Fiscal en la selección y aplicación de las técnicas de control de filtraciones, así como en la supervisión de los trabajos realizados para garantizar su eficacia y cumplimiento de las normativas vigentes.

En resumen, el "Volumen N°5 Manual de Carreteras" ofrece una guía detallada sobre aspectos normativos y técnicos relacionados con el control de filtraciones en túneles en el contexto de la construcción de carreteras en Chile.

### **6.1.2. Manual de Recomendaciones de Estándares Generales Básicos para Proyectos de Túneles Viales (MOP)**

Las filtraciones de agua en túneles representan una problemática importante durante la construcción y operación de estas estructuras subterráneas. La presencia de agua puede afectar la estabilidad del macizo rocoso, comprometer la seguridad de la infraestructura y aumentar los costos de mantenimiento. Para abordar esta situación, es fundamental implementar medidas adecuadas de control y tratamiento de filtraciones de agua en túneles.

El manual de recomendaciones de estándares generales para túneles viales ofrece directrices específicas para gestionar las filtraciones de agua de manera efectiva. Se recomienda realizar sondajes exploratorios para anticipar la necesidad de inyecciones de impermeabilización, controlar la presencia de agua durante la construcción del túnel y aplicar diferentes técnicas de impermeabilización según la clasificación de las condiciones de agua en la frente del túnel.

Además, se destaca la importancia de considerar las restricciones ambientales del entorno, evitar la degradación de la napa freática y garantizar la estanqueidad del túnel para prevenir posibles filtraciones. Estas medidas buscan asegurar la durabilidad, seguridad y funcionalidad de los túneles viales frente a la problemática de las filtraciones de agua, minimizando riesgos y optimizando la gestión de recursos en la construcción y operación de estas infraestructuras subterráneas.

## 6.2. Normativa internacional

Aunque no existe una norma específica para la impermeabilización de obras, sí hay normas que establecen los requisitos que deben cumplir los distintos productos utilizados en estos procesos. Entre ellas se destacan la norma española UNE-EN 13491:2013, titulada "Barreras Geo sintéticas: Requisitos para su utilización como membranas de impermeabilización frente a fluidos en la construcción de túneles y estructuras subterráneas", y la norma UNI EN 13969:2005, denominada "Láminas flexibles impermeables – Definición y características".

Figura 22

Normalización Española



Nota. *Logo Institucional Normalización Española* [Figura], UNE, 2007.

<https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0038867>

### **6.2.1. Norma UNE-EN 13491:2013**

La norma UNE-EN 13491 establece los requisitos para el uso de barreras geosintéticas como membranas de impermeabilización en la construcción de túneles y obras subterráneas. Su objetivo es controlar la fuga de fluidos a través de la construcción, garantizando la calidad y seguridad de las estructuras subterráneas. Se especifican características y métodos de ensayo para evaluar el desempeño de las barreras geosintéticas. Esta norma no cubre aplicaciones donde la barrera geosintética esté en contacto con agua tratada para consumo humano.

### **6.2.2. Norma UNI EN 13969:2005**

La norma UNE-EN 13969:2005/A1 aborda las láminas flexibles para impermeabilización, incluyendo láminas bituminosas para la estanqueidad de estructuras enterradas. Proporciona definiciones y características de estas láminas, así como pautas para resistencia al impacto y frecuencia de ensayo. Esta norma es relevante para prevenir filtraciones de agua en estructuras subterráneas como túneles, garantizando su impermeabilización adecuada.

Dado que hoy en día hay numerosas obras que han transformado los espacios subterráneos en áreas de uso frecuente, y considerando la amplia oferta de productos para la impermeabilización, es recomendable buscar asesoría de un organismo especializado. Esto garantiza la elaboración de un Proyecto de Impermeabilización que especifica el tipo de producto a utilizar según las condiciones de la estructura y su entorno, asegurando así la estanqueidad de los recintos y la durabilidad de la obra.

## CAPITULO 7 CONCLUSIÓN PARCIAL DEL ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO Y DE NORMAS

En base a lo revisado en la bibliografía, casos y normativas hasta este momento, se pueden extraer las siguientes conclusiones parciales que justifican la necesidad de un protocolo de inspección para abordar las filtraciones en obras subterráneas:

1. **Identificación de Causas:** La investigación ha permitido identificar las principales causas de filtraciones en túneles, destacando la importancia de contar con un enfoque integral para prevenir y resolver este problema de manera efectiva.
2. **Ausencia de Estándares:** Se ha evidenciado la falta de procedimientos estandarizados y únicos para la prevención y contención de filtraciones en obras subterráneas, lo que resalta la necesidad de establecer un protocolo específico para abordar esta problemática.
3. **Costos Futuros:** Las fallas asociadas a filtraciones pueden resultar en altos costos futuros y representar un riesgo para la seguridad y durabilidad de las estructuras subterráneas, subrayando la importancia de implementar medidas preventivas adecuadas.
4. **Relevancia de la Investigación:** La investigación ha demostrado la relevancia de profundizar en el desarrollo de nuevas tecnologías y métodos para mejorar la resistencia a las filtraciones y prolongar la vida útil de las infraestructuras subterráneas, lo que respalda la necesidad de contar con un protocolo de inspección actualizado.
5. **Impacto en la Seguridad:** La implementación de un protocolo de inspección no solo contribuirá al conocimiento académico sobre las filtraciones en túneles, sino que también impactará positivamente en la seguridad, durabilidad y eficiencia de las

infraestructuras subterráneas, garantizando un entorno más seguro para los usuarios y trabajadores.

En base a estas conclusiones parciales, se justifica la imperiosa necesidad de desarrollar y aplicar un protocolo de inspección específico para la prevención y resolución de filtraciones en obras subterráneas, con el fin de garantizar la integridad estructural, la durabilidad de las construcciones y la seguridad de las personas involucradas en proyectos de construcción subterránea.

Es fundamental para la elaboración de este protocolo, conocer previamente la experiencia de profesionales que han trabajado en los procesos de resolución de estas situaciones, ya que como hemos visto hasta este punto, la normativa les entrega a ellos la responsabilidad de la aplicación de las normas técnicas. Su experiencia empírica es la que requiere ser recogida, transmitida y estandarizada en función de mejorar las posibilidades de éxito ante los eventos de filtraciones de agua en túneles.

## **CAPITULO 8: PROTOCOLOS EN OBRAS DE CONSTRUCCION**

Un protocolo es un reglamento o instrucciones fijadas por convenio o tradición, en construcción es un documento que establece las pautas, procedimientos, normas y especificaciones técnicas que deben seguir los profesionales y trabajadores durante la ejecución de una obra de construcción. Este protocolo tiene como objetivo garantizar la seguridad, calidad y correcta realización de la obra, así como el cumplimiento de las normativas y reglamentos vigentes.

En un protocolo de construcción se pueden incluir aspectos como la planificación de la obra, la secuencia de trabajos, las medidas de seguridad y prevención de riesgos laborales, los controles de calidad, los materiales a utilizar, las especificaciones técnicas de los elementos constructivos, entre otros aspectos relevantes para el desarrollo exitoso de un proyecto de construcción.

Es importante que el protocolo de construcción sea elaborado por profesionales competentes y actualizado de acuerdo a las normativas vigentes en el lugar donde se llevará a cabo la obra. Este documento sirve como guía para todos los involucrados en el proceso constructivo y contribuye a

asegurar que la obra se realice de manera eficiente, segura y conforme a los estándares de calidad establecidos.

### **8.1. Ley General De Urbanismo Y Construcciones Ministerio De Vivienda Y Urbanismo**

Según el Decreto 458 que aprueba la nueva Ley General de Urbanismo y Construcciones en Chile, un protocolo de construcción se refiere a un conjunto de medidas de gestión y control de calidad que deben implementarse durante la ejecución de una obra. Estas medidas están destinadas a garantizar que la construcción se realice conforme a las normas técnicas obligatorias, la legislación vigente y los planos y especificaciones del proyecto.

Además, menciona que, durante la ejecución de una obra, el constructor a cargo debe velar por adoptar medidas de gestión y control de calidad para asegurar que la construcción cumpla con las normas técnicas obligatorias, la Ley General de Urbanismo y Construcciones, y la Ordenanza General correspondiente. Esto implica que se deben seguir procedimientos específicos para garantizar la calidad y seguridad de la obra en todas sus etapas.

Además, se establece que, en casos específicos, como edificios de uso público, es obligatorio contar con un inspector técnico de obra (ITO) independiente del constructor. Este profesional tiene la responsabilidad de supervisar que la obra se ejecute conforme a las normas de construcción aplicables, al permiso de construcción aprobado y sus modificaciones, así como a los proyectos de arquitectura, cálculo estructural y especialidades. El ITO debe registrar la supervisión de las partidas que determina la Ordenanza General y las especificaciones técnicas correspondientes.

Por lo tanto, se puede concluir que un protocolo de construcción, en el contexto de la Ley General de Urbanismo y Construcciones en Chile, se refiere a un conjunto de medidas, procedimientos y controles que deben aplicarse durante la ejecución de una obra para garantizar su cumplimiento con las normativas vigentes, la calidad de la construcción y la seguridad de la misma. Este protocolo incluye la supervisión por parte de un inspector técnico de obra, el cumplimiento de normas técnicas y de seguridad, y la adopción de medidas de gestión y control de calidad en todas las fases de la construcción.

## **CAPÍTULO 9: METODOLOGÍA**

Para corroborar la idoneidad y aplicabilidad de los mecanismos de control propuestos en este proyecto, se llevará a cabo una metodología que incluirá la consulta y contrastación con profesionales con experiencia previa en obras de construcción de túneles. Esta etapa consistirá en la realización de entrevistas estructuradas a estos profesionales, quienes aportarán su visión experta sobre la eficacia de los métodos y normas previamente mencionados. Las entrevistas se diseñarán para abordar aspectos clave del protocolo, incluyendo la implementación de medidas preventivas, la identificación temprana de filtraciones y la efectividad de las soluciones propuestas. Se procurará incluir a ingenieros, supervisores de obra y técnicos que hayan trabajado en proyectos similares, con el fin de obtener una perspectiva amplia y fundamentada.

Durante estas entrevistas, se buscará obtener testimonios detallados que permitan identificar oportunidades de mejora y nuevas recomendaciones a incluir en el protocolo propuesto. Los profesionales entrevistados compartirán sus experiencias prácticas, destacando los desafíos y soluciones efectivas que han encontrado en su trayectoria. Esta retroalimentación será crucial para ajustar y perfeccionar los procedimientos, asegurando que el protocolo no solo cumpla con los estándares teóricos, sino que también sea práctico y aplicable en el terreno. Además, la recopilación de estas perspectivas permitirá adaptar el protocolo a condiciones específicas de los proyectos de túneles, garantizando una mayor relevancia y eficacia en su aplicación.

## 9.1. Entrevistas a Profesionales con Experiencia en Obras de Construcción de Túneles

### Viales

#### 9.1.1. Entrevista 1

|                             |  |
|-----------------------------|--|
| <b>Nombre:</b>              | Luis Uribe   |
| <b>Profesión/Cargo:</b>     | Ingeniero Civil- Gerente Técnico Proyecto AVO II                                     |
| <b>Años de Experiencia:</b> | 30 años  |
| <b>Obras:</b>               | Línea 2 del Metro de Santiago, Centrales Hidroeléctricas Pangué, Ralco, entre otras. |

#### Pregunta 1

¿Durante su carrera profesional, le ha tocado trabajar en la resolución de estos problemas de filtraciones en túneles?

Si, he trabajado en diversos proyectos de construcción de túnel, desde la construcción de túneles de metro, túneles de alta montaña y actualmente en la construcción del túnel vial de la autopista AVO II y en relación al tema del agua es muy variable el tipo de resolución, por lo general se van adoptando las soluciones dependiendo del avance del proyecto.

#### Pregunta 2

¿Como detectan las fallas durante la etapa de diseño y posteriormente en la puesta en obra?

En la etapa de diseño es importante realizar un buen estudio hidrogeológico previo para poder detectar posibles napas de agua subterráneas, en la puesta en obra es importante tener en cuenta sectores críticos los cuales pueda atravesar el túnel, como canales, algún acueducto de agua potable instalaciones, etc.,

En estas situaciones se recomienda realizar sondajes de avance, por ejemplo si quedaran 20 metros de la zona de potencial filtración se hacen unos sondajes hacia la frente horizontales de manera de ver si mas adelante te vas a encontrar con flujos de agua, es una manera de adelantarse a la problemática, si este monitoreo de avance detectara agua puedes prepararte con

tiempo, pero en las zonas donde sabes que podrías tener potenciales filtraciones, también se puede dar la condición de encontrarse con agua repentinamente, para ambos casos el proyecto define un procedimiento que esta basado en como poder captar y canalizar esas aguas como primera medida, pero siempre va a ser más fácil canalizar que eliminar, ya que el agua siempre busca una salida o por donde meterse, de esta manera puedes controlarla mientras colocas el sostenimiento del túnel, hay varios productos para estos, pero la idea fundamental es llevarlas al piso y bombearlas de manera que no te molesten durante el avance de la excavación, también hay situaciones donde aparecen napas colgadas, bolsones de agua que están atrapados, estos pueden ser drenados durante algunos días y normalmente se corta el flujo de agua, pero si no desapareciera, en ese momento hay que pensar en la impermeabilización del túnel, porque en un túnel vial no te puedes dar el gusto de que el agua caiga a los autos de forma permanente, y hay varios diseños para solucionar.

### **Pregunta 3**

¿Existe algún tipo de protocolo que se use para enfrentar este tipo de situaciones?

No existe un protocolo específico, pero sí hay procedimientos de trabajo base que se aplican según las necesidades específicas del terreno. Estos procedimientos son flexibles y se adaptan a las condiciones que se presentan durante la construcción. En caso de aparición de agua, se implementan soluciones en el momento, basadas en la evaluación y el juicio del equipo en terreno. Estas soluciones pueden variar desde la instalación de sistemas de drenaje temporales hasta la aplicación de métodos de impermeabilización específicos según el tipo y la cantidad de agua encontrada.

#### **Pregunta 4**

En caso de que existiera, como se aplica, procedimientos, ejecución, mitigación de la problemática.

Aunque no existe un protocolo específico, se aplican procedimientos de trabajo base para enfrentar situaciones de filtraciones de agua en obras subterráneas y se deben adaptar a las necesidades específicas del terreno.

#### **Pregunta 5**

¿Qué estándares se usan para el diseño y reparaciones posteriores, existe alguna norma chilena o internacional que regule esto?

No hay normativa impuesta para esto, ya que son casos particulares que se analizan a medida que va avanzando el proyecto, y en caso de que existiera presencia de agua se toman las decisiones para resolver, son más que nada recomendaciones, y podrían varias desde membranas, aditivos impermeabilizantes o colocar algún tipo de aditivo que se proyecte al igual que el hormigón, pero todo va a depender del flujo de agua, de los litros por minuto y definir bien un sistema de impermeabilización.

#### **Pregunta 6**

¿En su experiencia profesional que tan costosos ha sido la reparación en estas situaciones de filtraciones en túneles viales?

En el Caso particular del proyecto de construcción del túnel vial AVO 1, tuvieron un problema posterior de filtraciones de agua, impermeabilizaron pero no se esperaban que tuvieran filtraciones tan grandes y no tenían un sistema de saneamiento o de drenaje que pudiera canalizar esa potencial agua , después vino la crecida del Mapocho y se les inundó el túnel, que hicieron ellos, implementaron pozos de agotamiento para bajar la napa y poder bombear el agua y no se concentre una masa mayor que pueda seguir infiltrándose hacia el túnel, producto de esto se debieron hacer reparaciones que consistieron en la construcción de nuevo drenes, cortar pavimento inyectar producto de manera de reducir el flujo de agua, ya que lamentablemente se les metió por muchos sectores, el costo varia caso a caso pero no es menor ya que al reparar tienes que pasar por una serie de etapas como la demolición, cortar pavimento, construcción de

drenes, inyecciones, a eso súmale que no pudieron cobrar la tarifa completa de los tag ya que el MOP se los impidió mientras no solucionaran el tema, sumando las pérdidas y los costos pueden dar sumas super importantes entonces es super variable, por eso siempre es mejor invertir en la etapa de proyecto en un buen estudio hidrogeológico, para aplicar los sondajes adecuados, también realizar un rastreo superficial para saber qué cosas te cruzan que cosas tienes cerca, todo con el fin de poder dimensionar los futuros gastos.

### **Pregunta 7**

Según su criterio y experiencia, ¿Un protocolo de calidad efectivamente podría prevenir fallas a futuro así evitar gastos adicionales, accidentes, demandas etc.?

Sí, en experiencia, la implementación de un protocolo de calidad podría significativamente prevenir fallas a futuro y evitar gastos adicionales, accidentes y demandas. Aunque actualmente no existe un protocolo específico para el manejo de filtraciones de agua en túneles, establecer un conjunto de procedimientos bien definidos y adaptables a las condiciones específicas del terreno sería muy beneficioso.

### 9.1.2. Entrevista 2

|                             |                                     |
|-----------------------------|-------------------------------------|
| <b>Nombre:</b>              | Alex Valenzuela M.                  |
| <b>Profesión/Cargo:</b>     | Topógrafo                           |
| <b>Años de Experiencia:</b> | 22 años                             |
| <b>Obras:</b>               | Túneles, Carreteras y Obras Civiles |

#### **Pregunta 1**

¿Durante su carrera profesional, le ha tocado trabajar en la resolución de estos problemas de filtraciones en túneles?

Sí, durante mi carrera profesional he tenido la oportunidad de trabajar en la resolución de problemas de filtraciones en túneles, específicamente en las obras de construcción del metro en Santiago. Este tipo de proyectos presenta desafíos únicos debido a las complejas condiciones geológicas y a la necesidad de mantener un entorno seguro tanto para los trabajadores como para los futuros usuarios del metro.

#### **Pregunta 2**

¿Como detectan las fallas durante la etapa de diseño y posteriormente en la puesta en obra?

Se realizan sondajes de estudio hidráulico que permiten generar un mapa detallado de las napas subterráneas. Estos sondajes implican la perforación del terreno en diversos puntos estratégicos para obtener muestras y datos sobre la composición del suelo, la presencia de agua subterránea y sus flujos. Con esta información, se elabora un mapa hidrogeológico que muestra las diferentes capas de agua subterránea. Este mapa es esencial para identificar posibles riesgos de filtraciones y fallas estructurales antes de iniciar la construcción. Durante la puesta en obra, este conocimiento permite implementar medidas de mitigación adecuadas, como sistemas de drenaje y sellado.

### **Pregunta 3**

¿Existe algún tipo de protocolo que se use para enfrentar este tipo de situaciones?

Los documentos de control o supervisión de los procesos constructivos de obras, son de elaboración propia de las diferentes constructoras, por lo que no existe o desconozco si existiera un documento base para ejecutar estas labores.

### **Pregunta 4**

En caso de que existiera, como se aplica, procedimientos, ejecución, mitigación de la problemática.

Dentro de algunos procedimientos recomendados en caso de existir una problemática de filtraciones de agua, se pueden mencionar la construcción de pozos de absorción para desviar el agua antes de que ingrese al túnel, reduciendo así la presión hidrostática sobre la estructura. Estos pozos actúan como sistemas de drenaje que captan y redirigen el flujo de agua subterránea. Además, se puede optar por el sellado de las filtraciones con resinas epóxicas. Este procedimiento consiste en inyectar la resina en las fisuras o puntos de entrada de agua, donde se expande y endurece, formando una barrera impermeable que impide el paso del agua y refuerza la integridad estructural del túnel. Ambos métodos combinados pueden proporcionar una solución eficaz para controlar y mitigar las filtraciones en túneles subterráneos.

### **Pregunta 5**

¿Qué estándares se usan para el diseño y reparaciones posteriores, existe alguna norma chilena o internacional que regule esto?

Los estándares básicamente son los estudios previos al diseño y desarrollo de las obras, Desconozco si existe una norma.

### **Pregunta 6**

¿En su experiencia profesional que tan costosos ha sido la reparación en estas situaciones de filtraciones en túneles viales?

La reparación a veces resulta sumamente costosa puesto que controlar las filtraciones de agua es una de las tareas más complejas y elevadas en términos de presupuesto dentro de los proyectos de construcción. Este tipo de reparaciones no solo requiere materiales especializados y tecnología avanzada, sino también mano de obra altamente cualificada. Además, cualquier intervención en un túnel operativo puede implicar interrupciones en el tráfico y otros inconvenientes, lo que incrementa aún más los costos. Por lo tanto, el manejo eficiente y preventivo de las filtraciones es crucial para minimizar el impacto económico en los proyectos de túneles viales.

### **Pregunta 7**

Según su criterio y experiencia, ¿Un protocolo de calidad efectivamente podría prevenir fallas a futuro así evitar gastos adicionales, accidentes, demandas etc.?

Un protocolo o manual que se desarrolle, sería de mucha utilidad, en el hallazgo, en la contención y en la mantención, puesto que podría prevenir fallas futuras y evitar gastos adicionales, accidentes.

### 9.1.3. Entrevista 3

|                      |  |
|----------------------|--|
| Nombre Completo:     | Francisco Uribe Escobar                                  |
| Cargo/Profesión:     | Ingeniero en Geomensura                                  |
| Años de Experiencia: | 12 años  |
| Obras:               | Carreteras, Puentes, Túneles de Metro, Mineros y Viales. |

#### **Pregunta 1**

¿Durante su carrera profesional, le ha tocado trabajar en la resolución de estos problemas de filtraciones en túneles?

Si, me ha tocado ver como resuelven estos problemas, pero no he sido el encargado directo de la resolución.

#### **Pregunta 2**

¿Como detectan las fallas durante la etapa de diseño y posteriormente en la puesta en obra?

En el diseño se pueden detectar si los sondajes en la etapa de ingeniería no se perforaron dentro de la sección, en la etapa de construcción cuando el sostenimiento se comienza a descascarar ya es una advertencia si no se corrigen ya en el revestimiento o pavimento sufran daños.

#### **Pregunta 3**

¿Existe algún tipo de protocolo que se use para enfrentar este tipo de situaciones?

Desconozco la existencia de algún protocolo, pero, si se detectan a tiempo se pueden realizar parches o algún tratamiento de evacuación de estas aguas.

#### **Pregunta 4**

En caso de que existiera, como se aplica, procedimientos, ejecución, mitigación de la problemática.

La ejecución de la solución más común en la puesta de obra es la ejecución de perforaciones para llevar el flujo de agua a piso y poder agotarla mediante bombas de drenaje.

### **Pregunta 5**

¿Qué estándares se usan para el diseño y reparaciones posteriores, existe alguna norma chilena o internacional que regule esto?

En los estudios de ingeniería debiesen estar los procedimientos y la norma debe ser el manual de carretera volumen 5.

### **Pregunta 6**

¿En su experiencia profesional que tan costosos ha sido la reparación en estas situaciones de filtraciones en túneles viales?

No manejo mucho esta área, pero donde lo he visto y los comentarios a estos son bastante elevados.

### **Pregunta 7**

Según su criterio y experiencia, ¿Un protocolo de calidad efectivamente podría prevenir fallas a futuro así evitar gastos adicionales, accidentes, demandas etc.?

La verdad que en estos casos se debe construir tal cual está en el diseño y no tratar de ahorrar reemplazando las capas de impermeabilización por otro elemento.



# **Protocolo de Inspección, Prevención y Resolución de Filtraciones en Construcción de Túneles**

## **1. Título**

Protocolo de Inspección, Prevención Y Resolución de Filtraciones en Construcción de Túneles

## **2. Objetivo**

Este protocolo busca establecer procedimientos estándar para prevenir fallas de diseño que causen filtraciones en túneles y resolver eficazmente cualquier filtración que ocurra, garantizando la seguridad estructural y la durabilidad de las obras subterráneas,

## **3. Alcance**

Este protocolo se aplica a todos los ingenieros, supervisores y personal de mantenimiento involucrados en la construcción y mantenimiento de túneles. Incluye a los departamentos de ingeniería civil, gestión de proyectos, control de calidad, y medio ambiente. Además, se extiende a los contratistas y subcontratistas que participen en cualquier fase del proyecto de túneles, garantizando que todos los actores involucrados comprendan y sigan los procedimientos establecidos para la prevención y solución de filtraciones. Asimismo, abarca a los equipos de inspección y auditoría encargados de verificar el cumplimiento de estas normativas.

#### 4. Definiciones

1. Geotecnia: Disciplina que estudia las propiedades del suelo y rocas en relación con la construcción de túneles.
2. Inyección de Resinas: Procedimiento para sellar grietas y fisuras en la estructura del túnel.
3. Caudalímetro: Dispositivo para medir el caudal de agua que ingresa al túnel.
4. Geomembrana: Material impermeable utilizado como barrera de contención de filtraciones.
5. Drenaje Profundo: Sistema de evacuación de agua subterránea para prevenir inundaciones en el túnel.
6. Análisis Geotécnico: Evaluación de las propiedades del suelo y rocas para prevenir filtraciones.
7. Cota Freática: Nivel del agua subterránea en relación con la superficie del terreno.
8. Aditivo Hidrofugante: Sustancia que se agrega al hormigón para hacerlo resistente al agua.
9. Permeabilidad: Capacidad del suelo para permitir el paso del agua.
10. Cárcava: Erosión en el terreno causada por el flujo de agua, que puede comprometer la estabilidad del túnel.
11. Estabilidad de Taludes: Evaluación de la resistencia de las paredes del túnel ante posibles deslizamientos por filtraciones.
12. MOP: Ministerio de Obras Públicas, entidad reguladora de normativas para proyectos de infraestructura.
13. PVC: Policloruro de vinilo, material utilizado en sistemas de drenaje para controlar filtraciones.
14. Macizo Rocosos: Formación geológica que puede ser atravesada por el túnel, crucial para su estabilidad.
15. Resinas Epóxicas: Materiales utilizados para sellar fisuras y puntos de entrada de agua en estructuras subterráneas, reforzando su integridad.

## 5. Responsabilidades

- Ingeniero a fin: Es responsable de la implementación de medidas preventivas, asegurando que todos los diseños y planes de construcción cumplan con los estándares especificados para evitar filtraciones.
- Supervisor de Obra: Debe verificar que se sigan las medidas preventivas durante la fase de construcción.
- Equipo de Mantenimiento: Es responsable de la detección, evaluación y resolución de cualquier filtración que ocurra, realizando inspecciones regulares y aplicando las soluciones adecuadas.
- Departamento de Control de Calidad: Se encarga de monitorear y auditar el cumplimiento del protocolo.
- Departamento de Medio Ambiente: Velar por que todas las acciones se realicen minimizando el impacto ambiental.
- Los Contratistas y Subcontratistas: Cumplir con las directrices del protocolo y reportar cualquier incidencia de filtración al Supervisor de Obra de manera oportuna.

## 6. Procedimientos

### 1. Prevención de Fallas de Diseño:

#### ➤ Evaluación Inicial:

- Realizar un análisis geotécnico completo antes de la construcción.

#### ➤ Diseño:

- Incorporar sistemas de drenaje y barreras impermeables en el diseño del túnel.

#### ➤ Revisión del Diseño:

- Someter el diseño a una revisión por pares para asegurar la integridad.

### 2. Inspección y Mantenimiento Regular:

#### ➤ Realizar inspecciones periódicas para identificar signos tempranos de filtraciones.

#### ➤ Mantener un registro detallado de todas las inspecciones y reparaciones.

### 3. Detección de Filtraciones:

#### ➤ Monitorear continuamente la estructura del túnel mediante sensores de humedad y otros dispositivos.

### 4. Respuesta a Filtraciones:

#### ➤ Notificación:

- Informar inmediatamente al Ingeniero jefe y al Equipo de Mantenimiento.

#### ➤ Evaluación:

- Evaluar la extensión de la filtración y determinar la causa.

#### ➤ Contención:

- Implementar medidas temporales para controlar la filtración.

#### ➤ Resolución:

- Reparar la fuente de la filtración utilizando técnicas adecuadas.

### 5. Documentación:

#### ➤ Registrar todas las acciones tomadas y las decisiones en un informe detallado.

## 7. Recursos Necesarios

### 1. Herramientas y Equipos de Inspección:

- Cámaras de inspección subterránea
- Dispositivos de detección de humedad
- Sensores de presión y flujo
- Equipos de georradar
- Equipos de termografía infrarroja
- Medidores de fisuras y grietas

### 2. Materiales de Construcción y Reparación:

- Selladores impermeables
- Resinas epóxicas y de poliuretano
- Morteros hidráulicos y cementos especiales
- Membranas y láminas impermeabilizantes
- Materiales de inyección para sellado de grietas

### 3. Equipos de Protección Personal (EPP):

- Cascos de seguridad
- Guantes resistentes a químicos
- Gafas de protección
- Botas impermeables
- Ropa de trabajo impermeable
- Equipos de respiración asistida

4. Equipos de Construcción:

- Perforadoras y taladros neumáticos
- Mezcladoras de cemento y mortero
- Bombas de inyección de alta presión
- Bombas de drenaje
- Andamios y plataformas de trabajo
- Herramientas manuales (espátulas, llana, martillos)

5. Documentación y Soporte Técnico:

- Manuales de procedimientos y guías técnicas
- Planos y especificaciones técnicas
- Documentación de normativas y estándares
- Protocolos de mantenimiento y reparación
- Formularios de registro de inspecciones

6. Recursos Humanos:

- Ingenieros especializados en túneles
- Supervisores de obra
- Técnicos en mantenimiento
- Personal de control de calidad
- Especialistas en medio ambiente

7. Equipos de Seguridad y Emergencia:

- Extintores y sistemas de supresión de incendios
- Kits de primeros auxilios
- Iluminación de emergencia
- Salidas de emergencia señalizadas
- Equipos de evacuación y rescate

8. Suministros y Consumibles:

- Lubricantes y aceites para maquinaria
- Productos químicos de limpieza y desinfección
- Adhesivos y selladores
- Materiales de marcado y señalización
- Baterías y generadores portátiles

9. Capacitación y Formación:

- Programas de entrenamiento para el personal
- Cursos de actualización en técnicas de impermeabilización
- Talleres de seguridad y manejo de EPP
- Simulacros de emergencia y evacuación
- Evaluaciones periódicas de competencias

SOLO USO ACADÉMICO

## **8. Referencias**

- Manual de Carreteras Volumen 5, Ministerio de Obras Públicas.
- Manual de Recomendaciones de Estándares Generales Básicos para Proyectos de Túneles Viales, Ministerio de Obras Públicas.
- UNE-EN 13491:2013, Normalización Española
- UNI EN 13969:2005, Normalización Española

## **9. Revisión y Actualización**

Este protocolo será revisado anualmente por el Comité de Ingeniería y Mantenimiento. La revisión incluirá la evaluación de la efectividad de las medidas implementadas, el análisis de incidentes de filtraciones ocurridos durante el año, y la incorporación de nuevas tecnologías y mejores prácticas del sector. Las actualizaciones se realizarán considerando las normativas vigentes y los avances técnicos. Además, se recogerán sugerencias y retroalimentación del personal involucrado en la implementación del protocolo. El Comité de Ingeniería y Mantenimiento se encargará de comunicar las revisiones y actualizaciones a todo el personal afectado, asegurando que se entienda y se cumpla con las nuevas directrices.

## **CAPÍTULO 10: RESULTADOS**

### **10.1. Resultados de las Entrevistas**

A partir de las entrevistas realizadas se evidencia que no existen protocolos estandarizados para la gestión de filtraciones en túneles, lo que subraya la dependencia en la experiencia y el juicio profesional para abordar estos problemas. La importancia de estudios hidrogeológicos detallados y la adaptabilidad de las soluciones durante la construcción, destacan que cada situación requiere medidas específicas basadas en las condiciones encontradas.

Un protocolo de calidad ayudaría a estandarizar las prácticas, mejorar la gestión de filtraciones y aumentar la eficiencia y seguridad en proyectos subterráneos, minimizando riesgos y optimizando los recursos invertidos en estas obras.

SOLO USO ACADÉMICO

## 10.2. Análisis de los Resultados

La creación del "Protocolo de Inspección, Prevención y Resolución de Filtraciones en Construcción de Túneles" resulta en una guía exhaustiva y sistematizada que aborda de manera integral todos los aspectos críticos para prevenir y manejar filtraciones en túneles. Este protocolo es esencial para garantizar la seguridad y durabilidad de las infraestructuras subterráneas. Al incluir procedimientos estandarizados para el análisis geotécnico, el diseño con sistemas de drenaje, la detección temprana de filtraciones y la respuesta adecuada a incidentes, se establece un marco robusto que puede reducir significativamente los riesgos asociados con filtraciones de agua. Además, la claridad en la definición de responsabilidades y el uso de tecnologías avanzadas para la inspección y mantenimiento aseguran que todos los actores involucrados estén alineados y capacitados para manejar cualquier eventualidad, minimizando así los costos de reparación y el impacto ambiental.

Asimismo, la inclusión de una amplia gama de recursos necesarios, desde equipos de inspección hasta materiales de reparación y formación continua del personal, destaca la complejidad y la necesidad de un enfoque multidisciplinario en la gestión de túneles. La periodicidad en la revisión y actualización del protocolo asegura que se mantenga vigente con los avances tecnológicos y las mejores prácticas del sector, lo que contribuye a una mejora continua en la gestión de filtraciones. Este protocolo no solo proporciona una base sólida para la prevención y resolución de problemas, sino que también promueve una cultura de calidad y seguridad en la construcción de túneles, beneficiando a largo plazo a las empresas constructoras y a la comunidad.

## CAPÍTULO 11: CONCLUSIONES

La creación de un protocolo de inspección para abordar las filtraciones de agua en obras subterráneas representa un avance significativo en la industria de la construcción. Este proyecto de título ha demostrado la importancia de contar con un enfoque integral y aplicable para enfrentar este desafío, contribuyendo así a la eficiencia y seguridad en el desarrollo de proyectos de construcción subterránea. La revisión de información técnica, y experiencias previas ha permitido identificar las principales causas de filtraciones en túneles y proponer soluciones concretas que pueden ser implementadas por empresas constructoras. Además, se ha evidenciado la ausencia de un documento que advierta procedimientos estandarizados y únicos para realizar la prevención y contención de filtraciones, ya que es una materia que no ha sido completamente abordada, por otro lado, se ha evidenciado que las fallas asociadas a filtraciones son difíciles de corregir y podrían significar un alto costo futuro, es por esto que el desarrollo de un protocolo sería de gran utilidad para prevenir estos hallazgos.

Se destaca la relevancia de continuar profundizando en la investigación de nuevas tecnologías y métodos que puedan mejorar la resistencia a las filtraciones y prolongar la vida útil de las estructuras subterráneas. Este proyecto no solo ha aportado un protocolo de inspección, sino que también ha abierto la puerta a la exploración de soluciones innovadoras que fortalezcan la resiliencia de las infraestructuras subterráneas. La combinación de datos técnicos, experiencias prácticas y la opinión de profesionales expertos en el campo de la ingeniería civil ha enriquecido la propuesta presentada, brindando herramientas concretas para abordar y prevenir eficazmente el problema de filtraciones en túneles.

Lo hasta aquí analizado, sumado a lo expresado por los profesionales que se han entrevistado, confirma la imperante necesidad de establecer un protocolo de inspección específico para abordar las filtraciones en obras subterráneas tipo túneles, lo que valida completamente la hipótesis inicial. El protocolo desarrollado se presenta como una herramienta fundamental para reducir costos futuros, prevenir accidentes y garantizar la durabilidad de las estructuras subterráneas, mejorando significativamente la eficiencia en el desarrollo de proyectos de construcción subterránea.

Es crucial destacar que, si bien el protocolo propuesto representa un avance significativo, es necesario continuar avanzando en la validación de su efectividad en situaciones reales. Por tanto, se recomienda que la investigación siga evolucionando para validar el protocolo en el campo y para realizar mejoras continuas y periódicas en base a la retroalimentación obtenida de su aplicación práctica. Esta validación en la vida real permitirá ajustar y perfeccionar el protocolo, asegurando su relevancia y eficacia en la prevención y control de filtraciones en túneles a lo largo del tiempo.

SOLO USO ACADÉMICO

## CAPÍTULO 12: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

The Clinic. (2023). MOP confirma cierre de la autopista Vespucio Oriente (AVO) por filtraciones de agua y derrumbe. The Clinic. Recuperado de <https://www.theclinic.cl/2023/09/28/mop-confirma-cierre-autopista-vespucio-oriente-avo-filtraciones-agua-derrumbe>

Ministerio de Obras Públicas. (2022) Historia de los túneles en Chile. Ministerio de Obras Públicas. Recuperado de <https://vialidad.mop.gob.cl/areasdevialidad/tuneles/Paginas/historia.aspx>

Peña, A., & Bravo, J. (2023). Propuesta metodológica para el análisis de riesgos en la construcción de túneles. Revista de la Construcción. Recuperado de [https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0717-69962023000200138](https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0717-69962023000200138)

TEC Y RSA. (2017). Rehabilitación de túneles. TEC Y RSA. Recuperado de <https://tecyrsa.com/portfolio/rehabilitacion-de-tuneles/>

Imperhousing. (2021.) Impermeabilizantes para túneles. Imperhousing. Recuperado de <https://imperhousing.com/impermeabilizantes-para-tuneles/>

Civil Geeks. (2016). Drenaje en túneles y errores habituales. Civil Geeks. Recuperado de <https://civilgeeks.com/>

GeoSoluciones. (2022). Impermeabilización de túneles. GeoSoluciones. Recuperado de <https://geosoluciones.com/impermeabilizacion-de-tuneles/>

TECIRSA. (2007). Rehabilitación de túneles. TECIRSA. Recuperado de <https://tecyrsa.com/portfolio/rehabilitacion-de-tuneles/>

Revista Seguridad Minera. (2013). Topografía de los túneles. Revista Seguridad Minera. Recuperado de <https://www.revistaseguridadminera.com/operaciones-mineras/topografia-de-los-tuneles/>

TDM Chile. (2022). Geomembranas de PVC. TDM Chile. Recuperado de <https://www.tdmchile.cl/products-geosinteticos-geomembranas-pvc/>

GCP Applied Technologies. (2016). Bituthene 3000 and Bituthene Low Temp. GCP Applied Technologies. Recuperado de <https://gcpat.com/en/solutions/products/bituthene-post-applied-waterproofing/bituthene-3000-and-bituthene-low-temp>

Agru America. (2015). Agruflex. Agru America. Recuperado de <https://agruamerica.com/es/products/agruflex/>

MBCC Group. (2023). BASF Construction Chemicals ahora es MBCC Group. Sika. Recuperado de <https://mbcc.sika.com/es-es/quienes-somos/noticias-y-comunicacion/basf-construction-chemicals-ahora-es-mbcc-group>

GCP Applied Technologies. (2017). *DE NEEF Waterproofing Injection Solutions*. GCP Applied Technologies. Recuperado de <https://gcpat.com/en/products/de-neef-waterproofing-injection-solutions>

GCP Applied Technologies. (2020). HA Flex LV AF & Flex SLV AF. GCP Applied Technologies. Recuperado de <https://th.gcpat.com/en-gb/solutions/products/de-neef-waterproofing-injection-solutions/ha-flex-lv-af-flex-slv-af>

Vásquez, F. (2018). Estrategias para el control de filtraciones en túneles (Tesis de pregrado, Universidad de Chile). Repositorio Académico de la Universidad de Chile. Recuperado de <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/151756>

Hormigón al Día. (2023). Avances en la tecnología del shotcrete para sostenimiento de terreno en túneles y minas de Norteamérica. Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile. Recuperado de <https://hormigonaldia.ich.cl/recomendaciones-tecnicas/avances-en-la-tecnologia-del-shotcrete-para-sostenimiento-de-terreno-en-tuneles-y-minas-de-norteamerica/>

Hormigón al Día. (2015). Túnel San Cristóbal: Innovación y tecnología de punta para un proyecto de clase mundial. Hormigón al Día. Recuperado de <https://hormigonaldia.ich.cl/obra-destacada/tunel-san-cristobal-innovacion-y-tecnologia-de-punta-para-un-proyecto-de-clase-mundial/>

PIARC. (2011). Manual de túneles de carretera. PIARC. Recuperado de <https://tunnelsmanual.piarc.org/es>

Placomat. (2021). Drenaje e impermeabilización: Importancia en la construcción. Placomat. Recuperado de <https://www.placomat.com/blog/drenaje-e-impermeabilizacion-importancia-construccion/>

Revista EMB Construcción. (2017). Consideraciones para la impermeabilización de túneles y obras subterráneas. EMB Construcción. Recuperado de <https://www.emb.cl/construccion/articulo.mvc?xid=3814&ni=consideraciones-para-la-impermeabilizacion-de-tuneles-y-obras-subterraneas>

MOP-DGOP-DIRECCIÓN DE VIALIDAD-CHILE. (2021). Manual de Carreteras: Ficha Control Dimensional y Esviaje 5.506.303.C (Vol. N°5, junio 2021). EDICIÓN 2021.

Ministerio de Obras Públicas. (2023). Manual de recomendaciones de estándares generales básicos para proyectos de túneles viales. Santiago.

UNE. (s.f.). UNE 104429:2017 IN: Túneles y obras subterráneas. Criterios de estanqueidad. Recuperado de <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0052339>

UNE. (s.f.). UNE-EN 1992-1-1:2013: Eurocódigo 2: Diseño de estructuras de hormigón - Parte 1-1: Normas y normas generales para la edificación (Ratificada por AENOR en febrero de 2014). Recuperado de <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0038867>

Ministerio de Vivienda y Urbanismo. (2020). Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC). Ministerio de Vivienda y Urbanismo. Recuperado de <https://www.minvu.gob.cl/wp-content/uploads/2019/05/OGUC-Junio-2020-D.S.-N%C2%B032-D.O.-13-06-2020.pdf>

SOLO USO ACADÉMICO

## **CAPÍTULO 13: ANEXOS**

### **13.1 Glosario de términos frecuentes en tunelería**

#### **Acuñadora**

Se refiere a la acción de desprender de forma manual o mecánica a las rocas que se puedan caer del techo o cajas del túnel en excavación, con el fin de que se caigan de manera imprevista y pusiesen ocasionar algún tipo de daños o lesiones.

#### **Caverna**

Es una excavación de dimensiones diferentes a las de un túnel convencional se usa comúnmente para albergar salas de máquinas, transformadores, edificios o cualquier tipo de construcción requerida.

#### **Chimenea**

Es un tipo de excavación inclinada o vertical en la roca, que cumple objetivos de extracción ventilación, drenaje, explotación, etc.

#### **Disparo**

Se le llama disparo a la detonación de explosivos mediante iniciadores o cordones detonantes, Se utiliza también como sinónimo de la longitud de avance de cada ciclo de perforación.

#### **Estallido en roca**

Se refiere a la proyección explosiva de rocas desde las paredes, frente o piso de un túnel, como consecuencia de los estados tensionales presentes en el macizo rocoso, en rocas de comportamiento frágil o elástico.

#### **Frente**

Se refiere al sector del túnel donde se realizan los avances en el proceso de construcción.

**Galería**

túnel auxiliar para fines específicos.

**Galibo**

Este término se refiere a las dimensiones máximas en altura y ancho, que se requieren para pasar por un túnel, corresponde a una sección libre de obstáculos.

**Línea de excavación teórica**

Es la referencia que se hace en los planos de construcción y corresponde a aquella dentro de la cual no podrá quedar material sin excavar.

**Marina**

Se refiere a el residuo o escombros de roca fracturada, producto de las tronaduras, excavación, o acción de tuneladoras.

**Material común o suelo**

Se define a este a toda la materia que no corresponde a roca.

**Portal**

Es la entrada a todo túnel por lo general de hormigón armado, destinado a proteger el acceso al túnel de las caídas de rocas desde las laderas.

**Shotcrete**

Hormigón fabricado con áridos finos que se instala por proyección a distancia, se aplica con un equipo de compresión y se usa para fortificar el túnel mediante proyección de este.

**Sobreexcavación**

Corresponde a la excavación por fuera de la línea teórica de excavación definida por los planos de construcción.

### **Sostenimiento o soporte**

Se refiere a todo trabajo de refuerzo, para estabilizar la sección de los túneles.

### **Sostenimiento inicial**

Trabajo de sostenimiento necesario para asegurar las condiciones de trabajo seguras y mantener la forma de la excavación durante el proceso de construcción.

### **Sostenimiento adicional**

Trabajo de sostenimiento complementario para poder asegurar la estabilidad permanente de las excavaciones durante la etapa de operación.

### **Spilling**

Conjunto de pernos de refuerzo, colocados en ángulos bajos (10-15° de la horizontal) por sobre la zona superior del túnel (clave), previo al avance de la excavación como medida de pre soporte.

### **TBM**

Por sus siglas en ingles Tunnel Boring Machine es una máquina capaz de excavar túneles a sección completa, a la vez que colabora en la colocación de la entibación para la sustentación del túnel si ésta es necesaria, ya sea de forma provisional o definitiva.

### **Tronadura**

Es la fragmentación instantánea que se produce en la roca por efecto de la detonación de explosivos depositados en su interior.

### **Tronadura amortiguada**

En este tipo de tronaduras las perforaciones de contorno se ubican relativamente próximas una de la otra y llevan carga detonante liviana. La ignición de las cargas de contorno se hace con posterioridad a la ignición de las cargas principales.

**Tronadura de pre corte**

El principio de precorte difiere del de la tronadura amortiguada, principalmente por su menor carga y su esquema de ignición.

**Túnel**

Vía subterránea, abierta de forma artificial para el paso de personas y vehículos u otros fines.

**Túnel falso**

Se ubican en general en los portales o entrada de los túneles, y se definen como la prolongación de la estructura del revestimiento del túnel propiamente tal.

SOLO USO ACADÉMICO