

# Gestión de Riesgos Geotécnicos en los Nuevos Estándares de Túneles Viales de Chile

Management of geotechnical risks in the new road tunnel standards of Chile

**Matías Egaña**

*Consultor Experto en Túneles, asesor de la Dirección de Vialidad, Chile, [matiasegan@gmail.com](mailto:matiasegan@gmail.com)*

**Carlos Mathiesen**

*Consultor Experto en Túneles y Energía, Chile*

**Nelson Toro**

*Jefe Departamento Proyectos Viales Interurbanos, Dirección de Vialidad, Chile*

**RESUMEN:** El año 2023, la Dirección de Vialidad del Ministerio de Obras Públicas de Chile publicó nuevos estándares para el diseño y construcción de túneles viales. Estos abarcan una variedad de aspectos, incluyendo requisitos geométricos, diseño de soporte, estrategias contractuales, normas de seguridad y equipamiento vial. Este artículo explora la relevancia de los riesgos geotécnicos en obras subterráneas, con un enfoque especial en los nuevos estándares y sus estrategias para abordar estos riesgos de manera eficiente, tanto durante el diseño como durante la construcción.

Los nuevos estándares ya se están aplicando en el diseño de varios túneles viales en Chile y se implementarán en la construcción de nuevos túneles como Caracoles y La Grupa 2. Los autores esperan que este artículo motive a otros países de la región y a otras industrias, como la minería y la energía, a adoptar estas prácticas en sus proyectos subterráneos.

**PALABRAS CLAVE:** Túnel, riesgos geotécnicos, estándares viales, obras subterráneas.

**ABSTRACT:** In 2023, the Road Authorities of the Ministry of Public Works of Chile published new standards for the design and construction of road tunnels. The standards covers various aspects, including geometric requirements, support design, contractual strategies, safety, and road equipment. This article explores the importance of geotechnical risks in underground works, with a special focus on the new standards and their strategies to efficiently address these risks during both the design and construction phases.

The new standards are already being applied in the design of several road tunnels in Chile and will be implemented in the construction of new tunnels such as Caracoles and La Grupa 2. The authors hope that this article will encourage other countries in the region and other industries, such as mining and energy, to adopt these practices in their underground projects.

**KEYWORDS:** Tunnel, geotechnical risks, road standards, underground works.

## 1 INTRODUCCIÓN

Una de las principales características de las obras subterráneas es que resulta prácticamente imposible conocer de antemano las reales condiciones del terreno que se encontrarán durante la construcción. En este sentido, los cambios en las condiciones geotécnicas, respecto a lo previsto en la etapa de estudios, constituye la norma y no la excepción. Esto genera un escenario de riesgo que obliga a contemplar metodologías de diseño y estrategias de contratación especiales para obras subterráneas. El objetivo es lograr que se cumpla con las condiciones de estabilidad y seguridad que la vialidad requiere, minimizando el conflicto entre las partes (dueño y contratista) derivados de los cambios en las condiciones del terreno.

En el año 2023, la Dirección de Vialidad (DV) del Ministerio de Obras Públicas (MOP) de Chile emitió un manual de estándares para túneles viales. Este documento consta de 11 capítulos y cubre diversos aspectos, incluyendo la evaluación geológica y geotécnica, la definición del sistema de soporte, la impermeabilización y drenaje, el diseño geométrico (sección y pendientes), requisitos de seguridad operacional y recomendaciones contractuales, entre otros.

Los nuevos estándares recogen el estado del arte de la industria tunelera a nivel mundial, adaptados en algunos aspectos, a la realidad local. Estos estándares reemplazan a las recomendaciones entregadas en el Manual de Carreteras, que en temas de túneles se encontraba incompleto y desactualizado. Adicionalmente, la falta de un estándar adecuado generaba que los proyectos de túneles del MOP variaran significativamente dependiendo del consultor que se adjudicara el proyecto, generando falta de uniformidad en criterios mínimos tan importantes como, por ejemplo, el galibo vertical libre o la durabilidad de los elementos de soporte.

El presente documento discute los aspectos del manual de estándares referentes a los riesgos geológicos y geotécnicos de los proyectos de túneles, tanto en la etapa de diseño como de construcción. Estos aspectos, a diferencia del diseño geométrico y la seguridad vial, son aplicables para todo tipo de túnel, y no exclusivos al ámbito vial. Por tanto, el propósito de este artículo es presentar y discutir las buenas prácticas que propone el nuevo estándar en el ámbito geotécnico y contractual, y promover su uso en otras industrias y en otros países de la región.

## 2 SOBRECOSTOS Y RETRASOS EN OBRAS SUBTERRÁNEAS

Los proyectos de obras subterráneas suelen presentar sobrecostos y retrasos importantes en su etapa de construcción. Esto ocurre en todas las industrias que tienen túneles (principalmente minería, transporte y energía), y aplica tanto para proyectos públicos como privados.

En Chile existen varios megaproyectos emblemáticos en la última década con grandes retrasos y sobrecostos, tales como los proyectos hidroeléctricos Alto Maipo y Los Cóndores, y los proyectos mineros Nuevo Nivel Mina de El Teniente y Chuquicamata Subterráneo. Los desafíos de cada proyecto son diferentes, y pueden no incluir exclusivamente aspectos geotécnicos, sino que también otros de tipo contractual, social y seguridad, entre otros.

En el caso de Alto Maipo, que incluye casi 75 km de túneles y dos cavernas, entre los años 2014 y 2022 el presupuesto estimado para el proyecto había aumentado un 71% y la obra ya tenía un retraso de 5 años (Kolic 2022). A la fecha de este artículo, Alto Maipo no se encuentra en operación.

El proyecto Los Cóndores incluye 14 km de túneles, un pique en presión, una chimenea de equilibrio y una caverna de máquinas. En el año 2014 se estimaba que este proyecto tendría una inversión de 662 millones de dólares y entraría en operación el año 2018 (Endesa Chile, Memoria 2014). El año 2022 se informaba una inversión total casi 100% superior y un retraso de 5 años (ENEL Chile, Memoria 2022).

En el caso de El Teniente, el mayor desafío ha estado asociado a los altos esfuerzos. Se estima que las zonas que presentan este riesgo conllevan costos por metro lineal de hasta 3,6 veces el costo de un túnel sin altos esfuerzos (Ritter 2018). Este sobrecosto está en el mismo rango del proyecto Olmos en Perú, que también sufrió grandes desafíos relacionados a estallidos de roca (Lewis 2020). Los sobrecostos en El Teniente se asocian principalmente a medidas adicionales de fortificación, el uso de técnicas de precondicionamiento y la necesidad de largos períodos de aislación post tronadura, entre otros. De acuerdo con información publicada recientemente por Codelco, el capex de la cartera de proyectos de El Teniente y Chuquicamata Subterránea ha aumentado en un 75% y 53%, respectivamente (Pacheco 2023).

Anterior a la última década, otros proyectos emblemáticos, como por ejemplo La Higuera y La Confluencia, también presentaron grandes desafíos asociados a la geotecnia.

Los sobrecostos y retrasos en ningún caso son exclusivos de la industria chilena. Flyvbjerg (2007) realizó un estudio estadístico que incluyó 258 proyectos de infraestructura de transporte, en los cinco continentes, concluyendo que el fenómeno de sobrecostos es global. En dicho estudio, el 90% de los proyectos presentó sobrecostos, para la categoría de túneles, se observó un sobrecosto promedio de 35%. Uno de los ejemplos más emblemáticos es el Eurotunnel en el canal de la mancha, Flyvbjerg menciona que antes de su construcción, los desarrolladores del proyecto estimaron un potencial de sobrecosto del proyecto de un 10%. El sobrecosto final fue de un 80% (Paraskevopoulou y Boutsis, 2020). Quizás el dato más interesante del estudio de Flyvbjerg es que la subestimación del costo de los proyectos no ha disminuido en el tiempo, siendo constante los últimos 70 años previos al estudio. Es decir, no hubo un aprendizaje del proceso por parte de la industria. El autor indica que parte de la subestimación de los proyectos es “estratégica”, i.e., intencional por parte de los tomadores de decisión para que se aprueben y financien los proyectos.

Como se mencionó anteriormente, los sobrecostos no son solo por riesgos geotécnicos, pues puede haber factores ambientales, sociales, legales y contractuales, entre otros. Sin embargo, el aspecto geotécnico suele ser el más relevante y su impacto económico se ve agravado si la estrategia contractual no es la adecuada. Los autores de este artículo creen que este ha sido el

caso en varios proyectos en Chile. En este sentido, la tentación de utilizar contratos tipo “Llave en Mano” o “Suma Alzada” resulta perjudicial y suele traducirse en más conflictos contractuales y complejos arbitrajes.

Los números aquí presentados deberían invitar a quienes participamos en proyectos de túneles a revisar los criterios de evaluación de riesgos y definición de contingencias. Adicionalmente, estos números resaltan la importancia que se le debe dar a la etapa de exploración geotécnica. No hay duda de que una buena caracterización del terreno permite estimar con mayor certeza los costos y plazos de un proyecto de obras subterráneas. Como muestra de ello, la Figura 1 presenta los sobrecostos en la construcción de túneles hidroeléctricos financiados por el Banco Mundial en función de los metros de sondajes relativos a la longitud del túnel. A pesar de la alta dispersión, la tendencia es clara y demuestra que una exploración adecuada suele ser una excelente inversión para el proyecto.

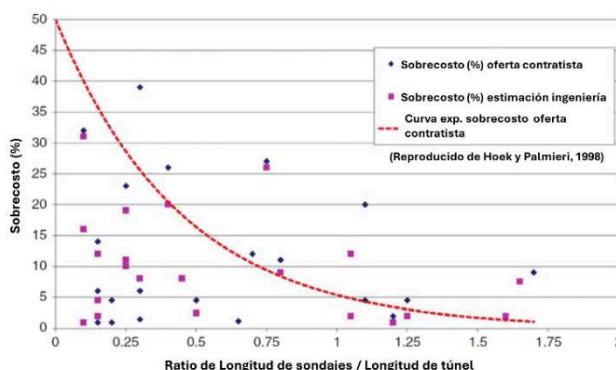


Figura 1. Sobrecostos en túneles en función de los sondajes realizados (Brox 2017).

## 3 NUEVO ESTÁNDAR DE TÚNELES VIALES. ASPECTOS GEOLOGICOS Y GEOTÉCNICOS.

### 3.1 Estrategia contractual

Para enfrentar la incertidumbre geotécnica de mejor manera, el nuevo estándar de túneles viales propone un contrato de riesgo compartido.

En el modelo propuesto, las variaciones en las cantidades de obra que sean producto de las condiciones geológicas del terreno serán de responsabilidad del mandante. Es decir, el mandante asume el riesgo de las condiciones del terreno. Esto es relevante, entre otras cosas, porque es el mandante quien selecciona el trazado del túnel y quien define y ejecuta los estudios de exploración del terreno. El mandante deberá desembolsar más si las condiciones geológicas son peores a lo que el consideró, o podrá ahorrar, si estas son mejores.

Por otra parte, el contratista asume todos aquellos riesgos propios de su gestión, incluyendo la seguridad de los trabajadores, la calidad de las obras en relación a las especificaciones del contrato, y los tiempos de ejecución de los trabajos. Si el contratista es más eficiente, podrá terminar antes, aumentando así sus utilidades por menores gastos generales.

La división del riesgo se realiza mediante un contrato de construcción a serie de precios unitarios y tiempos equivalentes para todos aquellos ítems dependientes de la geología. Estos son, principalmente, los aspectos asociados a la excavación, el drenaje, las inyecciones, los elementos de fortificación y sostenimiento, la investigación e instrumentación durante la construcción, y la impermeabilización. Por ejemplo, ítems como un perno, un metro cúbico de shotcrete, un kilo de inyección de lechada, o un extensómetro, entre muchos otros, tienen asociados en el contrato un precio unitario y un tiempo equivalente.

El diseño del túnel se va definiendo durante la construcción en base al método observacional, ajustándose a las condiciones de roca encontradas. Esto permite que el mandante compense al contratista, tanto por costo como por plazo, por cada unidad de trabajo efectivamente ejecutada.

Adicionalmente, en el caso de la Dirección de Vialidad, el mandante cuenta con apoyo externo especializado para la Inspección Técnica de Obras (ITO) y para el seguimiento geológico. Este último, debe aprobar el soporte inicial propuesto por el contratista, proponer las investigaciones necesarias para caracterizar el terreno, definir el soporte final, y documentar las condiciones observadas después de cada disparo y al final de la obra (as built), entre otras cosas.

Este tipo de contrato busca eliminar gran parte de los conflictos contractuales por condiciones o cambios no previstos del terreno. Para esto es necesario contar con un Cuadro de Precios (BoQ) completo, que incluya todos elementos que puedan ser requeridos durante la construcción, con una estimación de cantidades, y sus respectivos precios unitarios y tiempos equivalentes. El tiempo equivalente corresponde al tiempo contractual que se le asigna a cada unidad de trabajo durante la construcción. De esta forma, los plazos del proyecto pueden ser ajustados de acuerdo con las condiciones geológicas encontradas, y el contratista es compensado no solo por el precio unitario, sino también por los gastos generales dependientes del tiempo, asociados a mayores plazos de construcción. Este modelo de contrato ha sido ampliamente utilizado en otros países, particularmente en Escandinavia (NFF, 2012). También se utilizó en Chile, por primera y única vez según conocen los autores de este documento, para la construcción de la central hidroeléctrica Alfalfal, que incluyó la excavación de 35 km de túneles. Alfalfal finalizó en 1985 de forma exitosa, no obstante que parte importante de sus túneles estaban sometidos a grandes presiones hidráulicas, de hasta 350 m, y sin revestimientos particulares por este concepto, sea de blindajes de acero u hormigón armado, además de otros riesgos geotécnicos relevantes que debió enfrentar el proyecto.

Existe bastante evidencia en la literatura de los beneficios de este tipo de contrato en obras subterráneas. Dos aspectos claves en los que vale la pena profundizar, son los mencionados por Kleivan (1987).

Primero, el costo. Si el contratista asume todo el riesgo de las condiciones geológicas, entonces tenderá a presentar una oferta de alto valor con el objetivo de asegurarse en caso de condiciones adversas. Por tanto, la oferta muy probablemente esté por sobre el valor real del trabajo, lo que perjudica al dueño del proyecto. En caso contrario, es decir, si la oferta está por debajo del valor real del proyecto, el contratista enfrentará problemas económicos que dificultarán la cooperación entre las partes, y que en peor caso podrían incluso llevar a la quiebra del contratista, situación que tampoco beneficia al dueño del proyecto.

Segundo, la judicialización. Conceptualmente, al compensar con costo y tiempo equivalente, se debiera poder resolver casi cualquier contingencia producto de cambios en las condiciones del terreno. De esta manera, se evita procesos judiciales largos y costosos, que suelen ser producto de pérdidas económicas del contratista.

Adicionalmente, este tipo de contratos ofrece la flexibilidad necesaria para adaptarse a cambios de diseño que puedan ser requeridos producto de situaciones inesperadas en los proyectos.

Desde el punto de vista del costo, la Figura 2 conceptualiza de buena manera la distribución de riesgos entre las partes y el costo esperado para el proyecto. Todo el riesgo en el contratista llevaría a mayores costos, como se comentó anteriormente, mientras que todo el riesgo en el dueño generaría falta de incentivos en el contratista e ineficiencias en el proyecto, que también se traducirían en mayores costos. Como indica la figura, el modelo de riesgo compartido con precios unitarios y tiempos equivalentes ha mostrado los mejores resultados.

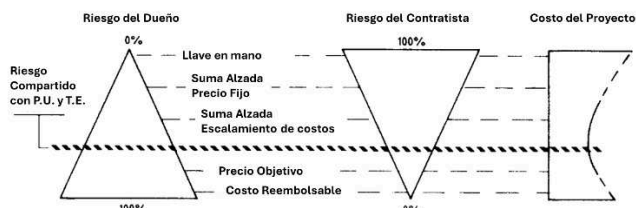


Figura 2. Distribución de riesgos de construcción y costo esperado del proyecto (Kleivan 1987).

Corresponde destacar que el año 2019, la Asociación Internacional de Túneles y Espacios Subterráneos (AITES) y la Federación Internacional de Ingenieros Consultores (FIDIC) presentaron en el Congreso Mundial de Túneles de Nápoles el llamado Libro Esmeralda, que es un modelo de contrato específico para obras subterráneas. Dicho modelo, es también de riesgo compartido y permite ajustar los costos y plazos del proyecto de acuerdo con las condiciones realmente encontradas en terreno. Sin embargo, el mecanismo es diferente al utilizado por la DV. El Libro Esmeralda es una adaptación del Libro Amarillo de FIDIC (Plant and Design-Build contract), y mantiene algunos aspectos relevantes de él, incluida la responsabilidad del diseño en el contratista. Adicionalmente, el Libro Amarillo establece el derecho del contratista a ser compensado en caso de condiciones del terreno “imprevisibles” (unforseeable ground conditions). Para definir que es “imprevisible”, el Libro Esmeralda utiliza un documento contractual denominado Línea Básica Geotécnica, o GBR, por sus siglas en inglés (Geotechnical Baseline Report). Este documento debe definir claramente las condiciones del terreno a encontrar, siendo la base para la preparación de las ofertas de los contratistas. Durante la construcción, si se presentan variaciones en las condiciones del terreno dentro de los rangos establecidos en el GBR, existe un mecanismo establecido para ajustar cantidades y plazos de obra. Si las variaciones se encuentran fuera de los rangos definidos en el GBR, el contratista deberá reclamar “condiciones imprevisibles del terreno”, para lo cual existe otro mecanismo de resolución.

Tanto la responsabilidad del diseño como el uso del GBR, marcan dos diferencias relevantes con el modelo de contrato de la DV, donde la responsabilidad del diseño es del dueño y la información geológica, tanto factual como interpretativa, es solo una referencia para el contratista y no constituye una línea base con carácter contractual, pues el ajuste de costos y plazos se hace exclusivamente mediante la aplicación de precios unitarios y tiempos equivalentes.

### 3.2 Estudios previos a la construcción

Para la etapa de estudios previa a la construcción, el nuevo estándar de túneles viales se enfoca principalmente en lo siguiente:

- Evaluación geológica geotécnica del terreno.
- Selección de trazado y método constructivo.
- Definición de medidas de soporte.

El objetivo de esta evaluación geológica geotécnica es caracterizar las propiedades del terreno donde se proyecta el túnel en la forma más detallada posible y así disminuir la incertidumbre y el riesgo del proyecto, en línea con los rangos aceptables definidos para cada etapa de ingeniería. Por tanto, los estudios geológicos son parte fundamental del manejo de riesgos de un proyecto y tienen un rol clave en la selección del trazado, el método constructivo y el diseño del soporte, entre otros.

Dado que la naturaleza de los riesgos geotécnicos puede variar enormemente entre un proyecto y otro, no existe una regla que

permita definir de antemano la cantidad y tipo de investigaciones a ejecutar en cada etapa. Es decir, éstas se deben diseñar independientemente para cada proyecto y cada etapa, considerando las características del túnel, las condiciones geológicas esperadas, la topografía, la accesibilidad del terreno, el clima, el método constructivo a utilizar y las restricciones medioambientales del sector, entre otros aspectos. El documento de estándares no detalla las distintas herramientas de exploración, pues para eso existe una amplia bibliografía.

Las principales características geológicas y geotécnicas estimadas a lo largo del trazado en cada etapa de ingeniería deben resumirse en un perfil geológico que contenga, a lo menos, lo siguiente:

- Litología
- Sobrecarga (cobertura) y riesgo de sobreesfuerzos
- Nivel freático y riesgo de infiltración de aguas
- Resistencia a la compresión uniaxial (UCS)
- Fallas geológicas
- Exploraciones realizadas
- Clase de roca de acuerdo con el índice Q
- Indicación de la incertidumbre de la información disponible y de las estimaciones realizadas.

Los aspectos antes mencionados son clave para poder estimar adecuadamente los costos y plazos de un proyecto de túnel.

Para la estimación de la calidad del macizo rocoso, el estándar solicita el uso del método Q en su versión más actualizada (NGI, 2022), de acuerdo a rangos que la DV considera se ajustan bien a túneles en la región andina (Tabla 1).

Tabla 1. Rangos de índice Q por clase de roca definidos en el nuevo estándar de túneles viales de Chile.

Índice Q	Clase de Roca	
	Q > 10	Muy Buena
4 < Q < 10	Buena	R2
1 < Q < 4	Regular	R3
0,1 < Q < 1	Mala	R4
0,01 < Q < 0,1	Muy Mala	R5a
Q < 0,01	Extremadamente Mala	R5b

Los soportes definidos para cada clase de roca son los indicados en Tabla 2 y se basan en un túnel de dos pistas, con dimensiones excavadas de aproximadamente 10 m de ancho y 7 m de alto.

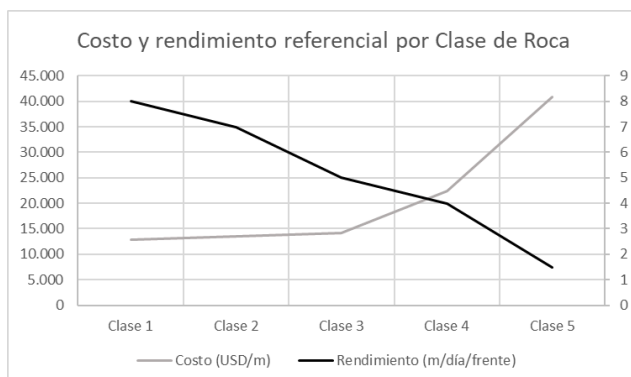
Tabla 2. Soporte definido en el nuevo estándar de túneles viales de Chile para el diseño de un túnel de dos pistas.

La tabla anterior fue definida por el equipo de ingeniería de la DV, y si bien se basa en el método empírico de Q, tiene varios aspectos que han sido modificados. Debe tenerse en cuenta que este soporte no es necesariamente el que se instalará durante la construcción del túnel para cada tipo de roca, sino que corresponde a una estimación de las cantidades a incluir en el Cuadro de Precios, con el único objetivo de estimar los costos y plazos del proyecto.

Como regla general y excepto casos particulares, no se considera necesario el uso de revestimiento de hormigón en el túnel como soporte definitivo, pues la tecnología actual del shotcrete permite cumplir ese objetivo de igual o mejor manera, para lo cual existe amplia literatura (ITA, 2020). Finalmente, salvo situaciones excepcionales, todos los elementos que se seleccionen para el sostenimiento inicial deberán formar parte del soporte definitivo, por lo que deben cumplir con los requisitos de calidad y durabilidad definidos de acuerdo con la vida útil y características del proyecto.

Para mostrar el impacto que tiene la distribución de clases de roca en los costos y plazos de un túnel, se muestra a continuación un gráfico referencial, donde se puede observar las grandes variaciones asociadas. Esto refuerza la importancia de una

estimación adecuada de las condiciones geotécnicas de un túnel.



Clase de Roca	Disparos Cortos	División en Cabeza y Banco o Avance con Pechuga (espesor=5 cm)	Estabilización de la Frente (espesor=5 cm)	Pernos Paraguas o Spilling tipo Titán 40/16 o similar - % de la longitud (4)
Clase 1	-----	-----	-----	-----
Clase 2	-----	-----	-----	-----
Clase 3	-----	-----	-----	-----
Clase 4	-----	-----	-----	-----
Clase 5	-----	-----	-----	-----

- (1) Nomenclatura para marcos RRS: SX/n Φy
- RRS: Reinforced Ribs of Shotcrete
  - S: una hilera de barras; D: doble hilera de barras
  - X: espesor de shotcrete del marco en centímetros
  - n: número de barras
  - Φy: diámetro de las barras en mm
  - Se consideran marcos de 80 centímetros de ancho

(2) Los marcos noruegos podrán reemplazarse por marcos reticulados

(3) Profundidad excavada del invert o "contrabóveda"

(4) Se asumirá que la cantidad de pernos paraguas o "spilling" se distribuyen en cantidades iguales para laceros de 4m, 6m, 8m y 12m (por tanto el total de cada uno corresponde al

proyecto, requieren un análisis independiente, que debe ir más allá de la clasificación del macizo rocoso estándar. Los principales riesgos que se debe analizar se listan a continuación:

- Fenómenos kársticos por la presencia de minerales solubles al agua;
- Sobresfuerzos que se manifiesten como estallido de roca, en caso de rocas competentes, o deformación plástica (squeezing), en caso de rocas de comportamiento más dúctil;
- Presencia de minerales expansivos como anhidrita, arcillas tipo montmorillonitas u otras, que pudieran generar daños en la fortificación del túnel durante la construcción o la operación;
- Presencia de fallas de gran magnitud y/o potencialmente activas;
- Ingreso de aguas con gran caudal y/o gran presión;
- Presencia de aguas termales y/o agresivas hacia los elementos de sostenimiento;
- Presencia de gases tóxicos.

Todos los estudios deberán abordar los riesgos mencionados con el objetivo de descartarlos o cuantificarlos, incorporando un plan de investigaciones específico para poder acotarlos en cada etapa de ingeniería.

Con el objeto de sistematizar y cuantificar los riesgos asociados al tratamiento de infiltración de aguas en la frente del túnel, el estándar define cuatro categorías de condición de agua (Tabla 3).

Tabla 3. Clasificación de infiltración de aguas definida en el nuevo estándar de túneles viales de Chile.

Es decir, al igual como se clasifica la condición del macizo rocoso, el estándar propone una clasificación para la condición de aguas. Cada una de las clases tiene asociadas medidas correctivas, de acuerdo con lo indicado en Tabla 4.

Tabla 4. Medidas definidas en el nuevo estándar de túneles viales de Chile para cada clase de infiltración de aguas.

Al igual que con el soporte, estas medidas no son necesariamente las que se adoptará durante la construcción, sino que son una aproximación para la estimación de las cantidades, costos y plazos de construcción.

Respecto a las inyecciones, es importante destacar que se asume el uso de preinyecciones. Estas se realizan por delante de la frente, previo al disparo. La alternativa son las postinyecciones (postgrouting), que se ejecutan en un tramo de túnel ya excavado. Por la dificultad que representa el control de un flujo activo, esta última es significativamente menos eficiente y sus costos pueden ser mayores a 20 veces el costo de preinyecciones (Gro, 2012). Además de sus inciertos resultados, representa un riesgo, pues la presión de inyección pudiera tender a inestabilizar bloques del macizo rocoso.

Desde el punto de vista operacional, en general la infiltración de agua no es un problema para los túneles viales, siempre y cuando esta sea canalizada en forma oportuna y no caiga en la calzada. Sin embargo, zonas sensibles desde el punto de vista ambiental o social, pudieran requerir límites de infiltración más exigentes, lo que conlleva costos de inyección que aumentan en forma no lineal, como se ilustra en la Figura 5, que se basa en la experiencia de Noruega.

Figura 5. Costos en preinyección en función del límite de infiltración residual aceptable en proyectos de túneles en Noruega (Gro y Wolmo, 2012).

Por esto, es muy importante definir en una etapa temprana el límite de infiltración aceptable para cada proyecto, definición que en muchos proyectos no se hace hasta etapas bastante avanzadas. Como ejemplo, y siguiendo con el caso de Noruega, se suele utilizar los siguientes límites:

- 2-10 litros/minuto/100 m de túnel – túneles urbanos en áreas sensibles;
- 10-30 litros/minuto/100 m de túnel – túneles submarinos y rurales;
- >30 litros/minuto/100 m de túnel – túneles sin requerimientos específicos.

Como parte de los documentos de licitación para la construcción, todos los estudios geológicos y geotécnicos deberán ser compilados en un único informe. La idea de dicho informe es proveer a los contratistas de la manera más transparente posible, de toda la información factual e interpretativa disponible. Sin embargo, el documento es meramente informativo y no representa una línea base contractual, como se mencionó en capítulo 3.1.

### 3.3 Etapa de Construcción

De acuerdo con lo definido en el manual de estándares de túneles viales, el análisis geológico y geotécnico durante la construcción tiene tres objetivos principales que se describen a continuación.

Primero, estimar las condiciones delante de la frente, de modo de prepararse para adoptar las medidas que corresponda, por ejemplo, para zonas de falla o infiltración de aguas. La principal técnica para esto es el uso de perforaciones a roto-percusión desde la frente de excavación efectuadas habitualmente con el

	Caudal (l/min)	Presión (bar)	Observaciones
<b>CAg 1</b>	<15	-	-
<b>CAg 2</b>	15 - 150	< 2	P>2bar pasa a CAg 3
<b>CAg 3</b>	150 - 900	2 - 10	P>10bar pasa a CAg 4
<b>CAg 4</b>	>900	-	-

propio equipo de perforación frontal (jumbo), las que, mediante medición de los parámetros de perforación como avance, presión

	N° Sondajes	Largo (m)	Traslape (N° avances)	Pre-inyección	Impermeabilización (kg/metro túnel)
<b>CAg 1</b>	1 a 2	30	2	-	-
<b>CAg 2</b>	2 a 4	30	2	En 9-15 perforaciones de 15-30m delante del frente	200
<b>CAg 3</b>	3 a 5	30	3	En 15-25 perforaciones de 20-25 m delante del frente + 5-10 perforaciones de monitoreo	500
<b>CAg 4</b>	3 a 5	30	3	En 20-30 perforaciones de 25-30m delante de la frente + 6-12 perforaciones de monitoreo	1.000

y torque (Measurement While Drilling), así como la observación del líquido de retorno, permiten estimar indirectamente la calidad de la roca perforada. El uso de esta técnica será continua durante la construcción de túneles de la DV. En condiciones puntuales se puede utilizar también sondajes con recuperación de testigos, algunas técnicas geofísicas y ensayos in situ, según corresponda.

Segundo, definición del sostenimiento inicial. Después de cada tronadura se realiza un mapeo geotécnico de detalle de la frente del túnel. Esto permite definir los tipos y cantidades de soporte más adecuados para cada ciclo excavado, de modo de asegurar la

estabilidad de la obra durante la construcción y optimizar el proceso constructivo.

Tercero, definición del sostenimiento adicional (definitivo), si es que se requiere, con el objeto de asegurar la estabilidad del túnel durante la operación, es decir, toda su vida útil. Una vez instalado el soporte inicial es necesario hacer un seguimiento de las zonas soportadas, para cuantificar el grado de deformación que éstas presentan y/o el nivel de exigencia al que está siendo sometido el soporte instalado. Esto se hará mediante la inspección visual del túnel, el uso de instrumentación geotécnica (prismas de convergencia, huincha extensométrica, extensómetros, celdas de carga, etc.) y, eventualmente, el uso de otras técnicas como, por ejemplo, ensayos in situ (medición de esfuerzos, módulo de deformación del macizo rocoso, permeabilidad, etc.) y de laboratorio (resistencia a la compresión simple - UCS, ensayos de hinchamiento libre y de presión de hinchamiento, propiedades elásticas, etc.). En base a esto, se definirá la eventual necesidad de soporte adicional. Esta actividad se efectúa en general una vez terminada la excavación.

Adicionalmente, las condiciones geológicas y geotécnicas observadas durante la construcción, así como los afloramientos de agua, los tratamientos de impermeabilización y todo el soporte instalado, deben ser registrados en los planos As Built del proyecto, que deberá elaborar la consultora especializada que apoya a la Dirección de Vialidad durante el proceso constructivo.

#### 4 CONCLUSIONES Y COMENTARIOS.

La incertidumbre geotécnica suele representar el riesgo más relevante en la construcción de obras subterráneas. El impacto que este pueda tener en los costos y plazos de un proyecto está en directa relación con la estrategia contractual que se utilice. A su vez, los objetivos y el desarrollo de cada etapa de ingeniería también están relacionados con la estrategia contractual que se escoja. En el nuevo estándar de túneles viales de la DV, se propone un modelo contractual de riesgo compartido ampliamente utilizado en el mundo y que permite afrontar la incertidumbre geológica de modo tal que se minimicen los costos y los conflictos durante la construcción del proyecto. A su vez, el documento define los aspectos más relevantes a considerar en las etapas de ingeniería previa a la construcción, con el objetivo de estimar de la mejor manera posible el cuadro de precios del proyecto, que es un elemento clave en el modelo de contrato propuesto. Ahí, no solo se define las cantidades de obra esperadas, sino que también el precio unitario y tiempo equivalente asociada a cada unidad de trabajo dependiente de la geología. Esta es la herramienta básica para compensar al contratista de manera justa y generar los incentivos adecuados para la correcta ejecución de la obra.

Finalmente, se debe destacar que la incertidumbre en un proyecto de túnel implica que las condiciones del terreno pueden ser mejor o peor de lo esperado. Sin embargo, este último escenario suele ser el caso. Es decir, frente a la incertidumbre, comúnmente los consultores y/o desarrolladores asumen un escenario más bien optimista. Ésta es una de las causas de los retrasos y sobrecostos en proyectos de túneles. La literatura al respecto es amplia, y como se mencionó anteriormente, algunos autores consideran que hay aspectos estratégicos en esto. Este artículo se limita simplemente a recomendar mayor cautela, particularmente en etapas tempranas, pues que ciertos riesgos no hayan sido reconocidos, no implica que no existan. En línea con esto, los proyectos deben considerar contingencias realistas en el presupuesto, acordes con el nivel de información disponible.

Los nuevos estándares de túneles viales buscan mejorar las prácticas en el diseño y construcción de túneles en Chile. La estandarización permite homogenizar proyectos, simplificar el diseño y además minimizar errores en dicha etapa. La DV espera que las buenas prácticas promovidas en el nuevo estándar sean también utilizadas en otras industrias que hacen uso de las obras subterráneas y en otros países de la región.

#### 5 REFERENCIAS

- Brox D. 2017. Practical Guide to Rock Tunnelling. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315210117>
- ENDESA 2014. Memoria Anual.
- ENELChile 2020. Memoria Anual.
- Flyvbjerg, B., Holm, M. S., and Buhl, S. 2002. Underestimating Costs in Public Works Projects: Error or Lie?. Journal of the American Planning Association, 68(3): 279-295
- International Federation of Consulting Engineers, 2019. Conditions of Contract for Underground Works, Emerald Book, 2019.
- International Tunnelling Association, 2020. Technical Report on Permanent Sprayed Concrete Linings.
- Kleivan E. 1987. NotCos: The Norwegian Tunnelling Contract System. in Norwegian Tunnelling Today, Publication No. 5, Norwegian Soil and Rock Engineering Association.
- Kolic D. 2022. Hydro Scheme Alto Maipo, Chile. Proceeding of Contemporary water management: Challenges and research directions.
- Lewis W. 2020. Megaproyectos: Desarrollo túnel Olmos, Perú. Presentación décima jornada de túneles y espacios subterráneos, Asociación Argentina de Túneles y Espacios Subterráneos.
- Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Vialidad, 2023. Manual de Recomendaciones de Estándares Generales para Proyectos de Túneles.
- NGI, 2022. Handbook - Using the Q system, Rock Mass Classification and Support Design.
- Norwegian Tunnelling Society, 2012. Contracts in Norwegian Tunnelling, Publication 21.
- Pacheco M. 2023. Codelco: Presente y Futuro. Presentación del directorio de Codelco, Enero 2023.
- Paraskevopoulou C and Boutsis G (2020) Cost overruns in Tunnelling projects: Investigating the impact of geological and geotechnical uncertainty using case studies. Infrastructures 5(9), 73. <https://doi.org/10.3390/infrastructures5090073>.
- Ritter E. 2018. Efecto de la constructibilidad en minería subterránea bajo condición de altos esfuerzos, caso proyecto Andes Norte-Nuevo Nivel Mina. Informe de memoria de título, Universidad de Concepción.

# INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



*This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:*

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

*This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.*

*The paper was published in the proceedings of the 17th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (XVII PCSMGE) and was edited by Gonzalo Montalva, Daniel Pollak, Claudio Roman and Luis Valenzuela. The conference was held from November 12<sup>th</sup> to November 16<sup>th</sup> 2024 in Chile.*