

Etapas del proceso

# Construcción de túneles mineros

Alfredo Saavedra L.  
PERIODISTA CONSTRUCCIÓN MINERA

» Definidos como un paso abierto artificialmente para establecer comunicación, los túneles son pieza fundamental del entramado de un proyecto minero. Para su gestión integral se deben privilegiar los aspectos técnicos y la oportuna resolución de diferencias que surjan durante su desarrollo.

» Dentro de las fases que se consideran en el proceso de construcción, se encuentran los estudios geológicos, la elección del método de perforación, la tronadura, carguío y transporte y fortificación.

» Esta última puede llevarse a cabo con diferentes elementos que ofrece el mercado: pernos de anclaje, mallas de acero y hormigón proyectado.



**D**E ACUERDO A SU DEFINICIÓN, un túnel es un paso subterráneo abierto artificialmente para establecer una comunicación. Entre las partes que lo componen, se distinguen: los extremos por los que se abre al exterior (bocas), su techo curvado (denominada bóveda), su pavimento o piso y sus frentes de ataque y contraataque (el primero se refiere al punto por donde avanza la perforación, mientras que el segundo es el otro frente cuando se perfora el túnel por ambos lados). Para poder llevar a cabo su construcción, se realizan una serie de etapas, comenzando con un estudio detallado del lugar donde se planea ejecutar la obra.

Según Alexandre Gomes, director y gerente general de Geoconsult Latinoamérica, para este tipo de obras, además, es imperiosa la consideración de un marco contractual justo y adecuado a su naturaleza, donde la gestión de riesgos sea un aspecto fundamental. “El mandante normalmente debe hacerse cargo de los riesgos geológicos, mientras que el contratista debe cumplir con la productividad considerada en su propuesta técnico-económica para las condiciones de borde previamente establecidas”, indica el ingeniero, agregando que es importante que este marco contractual establezca condiciones técnico-económicas “realistas para el proyecto y que no induzcan a los contratistas proponentes a asumir rendimientos no alcanzables y precios muy ajustados, pues eso potencia el surgimiento de conflictos y reclamos que no colaboran con los objetivos mayores del proyecto”.

De este modo, una gestión integral debería privilegiar los aspectos técnicos y la oportuna resolución de problemas de esta índole y administrativos y de eventuales conflictos y diferencias que surjan durante el desarrollo.

GENTILEZA CODELCO



La excavación, utilizando la perforación y los explosivos, produce una operación cíclica donde se realiza la perforación del frente, siguiendo un patrón y con la profundidad adecuada para el avance previsto en la voladura (plan de voladura o tiro).



### MÉTODOS DE TRABAJO

Para llevar a cabo la construcción de túneles es necesario realizar una investigación previa y detallada, que implica estudios geológicos de los terrenos, sondeos y túneles de reconocimiento. Esta etapa de estudios se sigue realizando, incluso, durante la construcción de la misma obra. El objetivo de la investigación geológica es poder caracterizar el terreno que será excavado, sean estos depósitos fluviales, macizos rocosos, zonas de fallas, y sus respectivos parámetros geotécnicos, así como las condiciones hidrogeológicas del sector de interés.

Tras esta etapa, se pasa a definir el método y la estrategia de construcción más adecuada para determinado proyecto. "Aquí se incluye, además del método de excavación, la cantidad y ubicación de los frentes, las técnicas de excavación y fortificado, control del agua subterránea, sistemas de transporte de marina, instalaciones de fauna, logística de acceso y ubicación de botaderos, entre otros", señala Gomes.

Los métodos de avance que se utilizarán en la excavación y soporte deben ser el resultado de una análisis multicriterio donde se tomen en cuenta todos los aspectos relevantes, incluyendo el tipo de terreno, la longitud y disposición del trazado del túnel, entre otros factores. En líneas generales, Gomes indica que los métodos de excavación y soporte se dividen en métodos denominados convencionales y métodos mecanizados. "La excavación convencional se puede definir como la construcción de cavidades subterráneas de forma arbitraria utilizando la perforación y tronadura o con excavadoras mecánicas de frente parcial (retroexcavadoras, picadores o rozadoras), con instalación de soporte primario mediante hormigón proyectado, pernos y marcos metálicos, entre otros elementos", señala.

La excavación mecanizada, por otro lado, se hace con el uso de máquinas tuneladoras de frente completo o parcial, así como son las TBM (tunnel-boring-machines) que pueden ser de varios tipos: desde máquinas sin protección periférica y soporte del frente (TBM gripper, con empuje mediante mordazas laterales), hasta máquinas con escudo periférico y soporte activo del frente, con propulsión mediante gatos hidráulicos longitudinales. Existen también TBM con doble escudos telescópicos, los cuales presentan ambos sistemas incorporados. El tipo de má-

**El carguío y transporte son operaciones de gran influencia en el ciclo total de la excavación del túnel, por lo que es importante mantener las vías en buen estado de conservación y realizar una adecuada elección del sistema de cambio de vagones en el frente.**

quina debe ser definida en función de las condiciones de borde y riesgos geotécnicos identificados.

En Chile, los túneles aún se construyen mayormente según una metodología de excavación convencional, con el uso de la perforación y tronadura (drill & blast). Recientemente, se utilizaron tuneladoras en los proyectos del túnel de exploración de la Mina Los Bronces de Anglo American y del túnel de aducción de la Central Chacayes, de Pacific Hydro/SN Power. Hay que tener presente que este tipo de solución solo se aplica a túneles con largos desarrollos longitudinales, dado que las máquinas tuneladoras generan una sección circular continua y no pueden sortear radios de curvatura muy pequeños, como los que son necesarios en los desarrollos horizontales de minas subterráneas.

Según la naturaleza del terreno se puede atacar la excavación del túnel a sección completa, en el caso de roca dura, mientras que los suelos blandos solo permitirán avanzar en secciones más pequeñas o con la consideración de una excavación diferida de galerías de menor dimensión.

Dentro de los métodos de excavación más utilizados está el método inglés, usado principalmente en túneles de pequeña sección (menos de 15 m<sup>2</sup>). Aquí se extrae cualquiera de los lados hasta la clave, se alzaprima y se concreta el muro y un cuarto de arco, luego se repiten las mismas operaciones en la otra mitad.

Por su parte, el método belga, consiste en desarrollar el avance del trabajo en el túnel en dos etapas: un avance

que se realiza en la mitad superior en el sector denominado frente, que corresponde al medio arco de la parte superior de la sección y luego, el trabajo se desarrolla en la parte inferior (o banco) lo que permite remover y extraer el material en forma más rápida por existir una gran cara libre por arriba apta para un mejor resultado de la tronadura.

El método austríaco, en tanto, se caracteriza por el empleo de una galería de avance en el eje y base del túnel, donde se instala una vía de evacuación que se utiliza durante toda la obra. Cuando la galería ha avanzado cierta longitud se perfora un pozo hacia arriba y se excava en los dos sentidos una segunda galería. Una vez perforada la galería superior se sigue como en el método belga. Tiene la ventaja de que el transvase de los escombros a la galería inferior se hace por los pozos y sin modificaciones desde su situación original. También, que los múltiples frentes de ataque aceleran la construcción del túnel.

El denominado método alemán, se caracteriza por la conservación del banco hasta la terminación de los muros y la bóveda. Este banco sirve de apoyo para todos los apuntalamientos y cimbras y evita el empleo de andamios de gran luz.

#### ETAPAS DE CONSTRUCCIÓN

Dentro de las principales etapas del proceso de construcción de túneles en roca, según el método convencional (drill & blast) están: la perforación y tronadura, carguío y transporte y la fortificación. En el caso de las dos prime-

ESTAREMOS EN  
**EXPONOR 2015**  
STAND EXTERIOR B N°57



INGENIERIA VENTILACION SOPORTE

**CALIDAD  
Y TECNOLOGIA  
AL SERVICIO DE LA  
MINERIA**

**COMERCIAL IVS S.A.**

Los Coigues 701, módulo 19,  
Parque Industrial Aeropuerto,  
Quilicura, Santiago de Chile  
(56 2) 2739 2827 – (56 2) 2739 1408

[www.ivs.cl](http://www.ivs.cl)



PERNOS



DUCTOS



RESINAS



**En toda mina subterránea se deberá disponer de circuitos de ventilación, ya sea natural o forzado a objeto de mantener un suministro permanente de aire fresco y retorno del aire viciado.**



ras, la perforación hace referencia a la cavidad donde serán alojadas las cargas explosivas y accesorios de iniciación, mientras que la tronadura se refiere a la liberación de energía mediante los explosivos que permiten fragmentar la roca y desplazarla.

La excavación se puede realizar por varios métodos: manuales, con los ya mencionados explosivos y de manera mecanizada.

El primero, que incluye el uso de herramientas de potencia ligera o media, se utiliza en secciones de túneles pequeñas (3 o 4 m<sup>2</sup>), mientras que el uso de explosivos es el preferido cuando el terreno es roca ya que se adapta a cualquier tipo de dureza. Oscar Ormeño, gerente general de Constructora Conpax, explica que las excavaciones son subterráneas y se realizan en distintas secciones que pueden ser frontones de seguridad de 2x2 m a secciones mayores de hasta 12 m de ancho por 10 m de alto. “En la minería la sección más común es 4x4 m, aproximadamente. Estas se realizan en avances cuya longitud dependerá del equipo a utilizar y la longitud de barra de perforación. Por lo general en Chile se usa excavación tradicional y explosivo para realizar la cavidad”, señala el experto, indicando que la longitud de avance más usada es de 3,5 metros.

La excavación utilizando la perforación y los explosivos produce una operación cíclica donde se realiza la perforación del frente, siguiendo un patrón y con la profundidad adecuada para el avance previsto en la voladura (plan de voladura o tiro). Luego viene la retirada del equipo perfor-

rador, la carga del explosivo y posterior retirada del personal. Así, se da paso a la detonación de las cargas, tras lo cual es fundamental realizar la correspondiente ventilación para eliminar el humo, polvo y vapores. “Este paso es muy importante pues se extraen los gases tóxicos y nocivos producto de la tronadura. Se monitorea el área constantemente con instrumentos para medir concentraciones de gases hasta que se cumplan las condiciones para poder entrar a la zona sin riesgo alguno”, detalla Johan Nilsson, gerente general de Züblin International GmbH Chile SpA.

Finalmente se desprende la roca suelta y de ser necesario, se realiza una entibación provisional. Para elegir el tipo de explosivo a utilizar (dinamita, emulsiones, ANFO, entre otros) se deben considerar las condiciones del terreno y las variables de operación.

En cuanto a la maquinaria usada en estas etapas, para la perforación del frente por ejemplo, se utilizan perforadoras neumáticas que operan con aire a presión y que pueden ser de percusión, rotación o una combinación de ambas, así como máquinas pesadas montadas sobre grúas móviles de caballete (jumbos). “El jumbo de perforación horizontal se utiliza para realizar perforaciones en la frente del túnel, que posteriormente son cargadas con explosivos, para fragmentar el material a través de la tronadura”, explica Luis Parada, gerente de Operaciones Sur de Constructora Gardilic.

Por otra parte, al hablar de “métodos mecanizados”, se hace referencia al uso de maquinaria convencional (tractores dotados de ripper (bulldozer) y palas cargadoras para terrenos de mayor dureza), tuneladoras y rozadoras.

La siguiente etapa, corresponde al carguío y transporte, cuyas operaciones tienen gran influencia en el ciclo total de la excavación del túnel, por lo que es de suma importancia mantener en buen estado de conservación las vías y realizar una adecuada elección del sistema de cambio de vagones (vacíos-cargados) en el frente.

Como ejemplos de máquinas usadas en esta fase, Parada menciona los dumper: camiones de bajo perfil, empleados para el transporte del material removido de las labores de construcción. “También se puede usar equipo de carguío y transporte LHD (Load Haul Dump), así como plataformas de levante, que se utilizan para las labores unitarias de acuñadura, fortificación y carguío con explosivo”, detalla el experto.

## FORTIFICACIÓN

Con las otras etapas completas, se da paso a la fortificación, que es el proceso de recubrir o reforzar el entorno de una labor subterránea, mediante elementos de soporte como marcos, mallas, pernos, hormigón proyectado o una combinación de todos. El objetivo de este paso es proteger a los trabajadores y evitar derrumbes en las faenas subterráneas.

De acuerdo a la Guía Metodológica para Sistemas de Fortificación y Acuñadura del Servicio Nacional de Geología y Minería (Sernageomin), existen dos tipos de fortificaciones: rígidas y flexibles. Las primeras corresponden a las que sostienen sin permitir ningún movimiento de la roca y deben ser resistentes para sujetar los bloques que puedan caerse, usadas solo en las bocas de las minas o



**La fortificación se puede realizar mediante marcos, mallas, pernos, hormigón proyectado o una combinación de todos. El objetivo es poder proteger a los trabajadores y evitar derrumbes en las faenas subterráneas.**



sectores donde, por razones tectónicas, de mala calidad de la roca o explotaciones hundidas antiguas, se han perdido totalmente las propiedades resistentes de la roca. Las flexibles, en tanto, permiten deformaciones de la roca con lo que se alivian los esfuerzos y, según indica el documento, al deformarse mejoran sus propiedades resistentes.

Para realizar este proceso se utilizan diversos elementos, siendo el empernado el método más aceptado para sostenimiento provisional o definitivo. Para esto, se utilizan diferentes tipos de pernos de anclaje, que se clasifican en pernos anclados mecánicamente, anclados con resina o cemento y anclados por fricción.

Los primeros (de anclaje con cabeza de expansión), utilizados en rocas medianamente duras, son los más comunes tanto en labores mineras como de ingeniería civil.

En cuanto a los pernos anclados con resina o cemento, el más común es el de barra de fierro o acero tratado que utiliza la resina o el cemento como un adherente. Dentro de los pernos anclados por fricción existen los Split set y Swellex. En ambos sistemas, la resistencia a la fricción para el deslizamiento entre la roca y el acero, sumado a la acción mecánica de bloqueo, es generada por la fuerza axial entre la superficie del barreno y el perno. Aunque los dos sistemas están descritos bajo un mismo denominador, solo el Split set es de fricción. En el caso del Swellex, combina la fuerza de fricción sumada al mecanismo de expansión del perno al interior del barreno que habitualmente tiene paredes irregulares. Esta situación genera una acción de bloqueo que permite

obtener alta resistencia a la tracción.

Para el uso de estos elementos, empresas como IVS, ofrecen servicios ("Pull test") que permiten certificar en terreno la instalación de los pernos. "Se trabaja bajo la norma ASTM 4435 (2008), que permite asegurar la estabilidad de los túneles y se recomienda probar el 5% de los pernos instalados en forma mensual", señala Robinson Jara, jefe del departamento Técnico y de Operaciones de Comercial IVS S.A., agregando además que en el caso de su servicio, los equipos utilizados están calibrados en laboratorios certificados bajo norma ISO 17025.

Para la fortificación, también se utilizan mallas de acero, fabricadas con alambre de acero especial de alta resistencia, en diferentes grosores, que permiten una mayor distancia entre anclajes. Su uso es especialmente indicado en zonas comprometidas por estallidos de rocas o donde el macizo rocoso está muy alterado y, por lo tanto, fragmentado. El alambre está protegido contra la corrosión por una aleación especial cuatro veces superior al galvanizado habitual. En la construcción minera subterránea habitualmente se utilizan las mallas mineras electro-soldadas y las tejidas, trenzadas o de "bizcocho". Las primeras se caracterizan por tener medidas y pesos conocidos, uniones más sólidas y terminaciones de alta calidad, mientras que las segundas se identifican por su flexibilidad y capacidad de absorber importantes cantidades de energía, dependiendo de su instalación, siendo muy eficiente en la retención de bloques pequeños inestables, provocados por eventos sísmicos, activaciones estructurales y otros.

Para su instalación, se apegan a las paredes de la labor, siendo afirmadas con pernos de anclaje o con lecha-



## Tuneladora de alta tecnología

Una de las tendencias en construcción de túneles, es el uso de máquinas tuneladoras o Tunnel Boring Machine (TBM). Utilizadas para excavaciones en roca de dureza baja, media o alta, logran excavar el frente de roca a plena sección mediante la acción combinada de la rotación y el empuje continuado de una cabeza provista de herramientas de corte distribuidas en su superficie frontal. En Chile, se ha utilizado esta tecnología en mina Los Bronces para la construcción del Túnel sur, un pasadizo de 8.125 m de longitud, ejecutado solo por el frente pues se trató de un túnel ciego. En esa oportunidad, se trabajó con una TBM de 4,5 m de diámetro y 90 m de longitud. Dentro de sus ventajas se contaba una mayor seguridad, en el sentido que con su uso se evitaban aproximadamente 3.500 tronaduras con explosivos, lo que a su vez redundaba en no tener que transportarlos ni manipularlos; también se evitaba la presencia de gases producto de los explosivos y las detonaciones, mejorando la ventilación en el interior.



**Por cada avance, las condiciones geotécnicas encontradas deben ser evaluadas, junto con el efectivo comportamiento de la excavación, haciéndose los debidos ajustes y optimizaciones a la excavación y soporte.**

da (dependiendo de la durabilidad) y afianzadas a la superficie de la roca con planchuelas y tuercas. Entre una malla y otra deben ser traslapadas en sus bordes periféricos.

Por último está el hormigón proyectado o shotcrete, que es un material transportado a través de una manguera, que se lanza neumáticamente, a alta velocidad, contra una superficie. La fuerza con que el hormigón o mortero llega a esta, hace que la mezcla se compacte logrando que se sostenga a sí misma, sin escurrir, incluso en aplicaciones verticales y sobre la cabeza. A pesar de ser un sistema relativamente nuevo, la tecnología de los equipos va avanzando y ya hay productos enfocados a mejorar la productividad, la facilidad de operación y fiabilidad. “Tenemos un equipo (MEYCO Versa) que cuenta con una plataforma de soporte 4x4 crab steering y es alimentado por un motor diésel Tier 4. Además, de tener un nuevo brazo, un compresor de 75 kW opcional a bordo, una bomba de hormigón de baja pulsación de 20m<sup>3</sup>/h y un sistema de dosificación de alta precisión”, indica Germán Castro, product manager de Atlas Copco MEYCO.

Durante el proceso de fortificación, se puede utilizar la técnica del shotcrete para mejorar la impermeabilidad del túnel. “Para cuando se realiza la primera capa de proyección de hormigón se dejan barbacanas (tipo planzas 1”) para liberar presiones de agua entre la pared de roca y el hormigón y se puede seguir avanzando”, explica Ormeño, agregando que ya para la fortificación final, se coloca una pintura impermeabilizante o una tela que cubra todo el perímetro del túnel para luego proyectar la segunda capa de shotcrete.

La teoría del sostenimiento por hormigón proyectado se basa en que todo macizo rocoso tiene una tensión interna estable, la que se ve alterada cuando, por efecto de la construcción del túnel, se efectúa una perforación en él y por tanto, el ahora inestable punto de la excavación tratará de desplazarse en dirección de la menor fuerza, o sea, hacia el interior del túnel. Por eso, si las rocas quebradas alrededor del túnel están ligadas entre sí, la estabilidad se recupera, logrando que la roca se autosoporte.

### **OBRAS DE ACCESO Y VENTILACIÓN**

Si bien ya hablamos sobre el desarrollo horizontal del túnel, es importante hacer hincapié en algunos detalles de infraestructura que se realizan durante las etapas de construcción. La infraestructura de acceso, por ejemplo, es una labor permanente (vida útil mayor a 1 año), por lo que debe tener una fortificación con un mayor factor de seguridad, ventilación adecuada, pasos peatonales de la manera en que lo indica la norma, cunetas bien definidas y limpias e instrumentos de rescate, entre otras instalaciones. “Para los accesos, se construyen galerías de mayor sección utilizando fortificación sistemática y rigurosa, dependiendo del tiempo que permanecerá en funcionamiento de acuerdo al proyecto ejecutado”, explica Parada.

Cuando el acceso se realiza a los pies de un cerro, es necesario resguardar el área desde el perímetro del túnel hacia afuera. “Para esto, se utilizan pernos de mayor longitud, malla galvanizada y hormigón proyectado. Si no es posible resguardar todo el sector sobre el túnel, es necesario proyectar un túnel falso hacia fuera, que se realiza con marcos metálicos de la misma sección del túnel y revestido con hormigón”, explica Ormeño, señalando que la longitud de este debe dar la seguridad que no se proyecte ninguna roca desde la parte superior del cerro y dañe al personal y equipos que transiten por él.

En cuanto a la ventilación, el Decreto Supremo N°132, artículo 137, indica que en toda mina subterránea se deberá disponer de circuitos de ventilación, ya sea natural o forzado a objeto de mantener un suministro permanente de aire fresco y retorno del aire viciado. “Este paso se hace siempre, ya que la liberación de gases se produce tanto al realizar la tronadura como por el mismo movimiento de equipos que consumen diésel y generan monóxido de carbono, perjudicial para los humanos”, explica Eduardo Pizarro, gerente sénior de Operaciones de Redpath Chilena Construcciones. El experto, agrega que además, se realiza un riego (“mojar la marina”) para así hacer un equilibrio químico e ir bajando los gases que están en el aire y el polvo en suspensión.

La ventilación se logra a través de ductos destinados a este proceso. "Para situarlos, se debe instalar un ventilador con su respectiva conexión eléctrica y posteriormente, un "mensajero" (piola de acero blando), que permitirá ser la guía de los ductos de ventilación", explica Jara. El experto agrega que hay ductos impelentes en formato de 25 m y se pueden unir a través de anillos, velcro y cierre. "Según los requerimientos el usuario define qué tipo de unión solicitará. Es necesario tener el acople del ventilador al ducto para evitar fugas de aire", detalla.

También se usan chimeneas verticales o inclinadas encargadas de conectar los distintos niveles de construcción a un nivel de ventilación. "Estas chimeneas son construidas utilizando sistemas mecanizados como lo son los métodos Raise Borer y Blind hole o a través de las operaciones de perforación y tronadura", explica Parada.

El DS N°132, indica que en todos los lugares de la mina donde acceda personal el ambiente deberá ventilarse por medio de una corriente de aire fresco de no menos de 3 m<sup>3</sup>/minuto por persona en cualquier sitio del interior de la mina. Dicho caudal será regulado tomando en consideración el número de trabajadores, la extensión de las labores, el tipo de maquinaria de combustión interna, las emanaciones naturales de las minas y las secciones de las galerías. En el caso de aquellas

galerías en desarrollo donde se use ventilación auxiliar, el extremo de la tubería no deberá estar a más de 30 m de la frente. Para distancias mayores se deberá usar sopladores, venturi o ventiladores adicionales, tanto para hacer llegar el aire del ducto a la frente (sistema impelente) como para hacer llegar los gases y polvo al ducto (sistema aspirante).

Así son las etapas de construcción de túneles mineros, cuyas ejecuciones requieren de mucho estudio, planificación, preparación, tiempo y recursos. "En términos generales no se habla de grandes novedades o innovaciones en el sentido que los conceptos de construcción se mantienen. Lo que ha mejorado es la tecnología para hacerlo, es decir, mayor variedad de productos o velocidades de ejecución, por ejemplo", señala Pizarro, agregando eso sí, que un cambio positivo ha sido la constante mejora y preocupación del sector por el tema de la prevención de riesgos, donde se está avanzando hacia una cultura de seguridad.

Si bien, la elección de un método o técnica dependerá en gran parte de las necesidades y del tipo de proyecto que se plantee, lo cierto es que la mayoría de las etapas son extrapolables, lo que permite a los diversos actores involucrados en estas obras continuar con sus avances bajo tierra. //

# GRANDES OBRAS PARA EL PAÍS

**\*Sistema Integrado de Gestión**

CALIDAD	SEGURIDAD Y SALUD	MEDIO AMBIENTE

Con más de un siglo de actividad en el mundo y más de 25 años operando en Chile, la empresa con casa matriz en Alemania, se ha posicionado como un referente en la ejecución efectiva de proyectos de desarrollo y construcción para el rubro de la minería y energía.

Especialidades:

- Minería Subterránea (Servicios, Procesos y Explotación)
- Obras Subterráneas (Túneles, Cavernas, Piques y Galerías)
- Obras Civiles (Hidroeléctricas y Energía)



**OBRAS CIVILES  
MINERÍA  
ENERGÍA**



www.zueblin.de



www.zublin.cl



2 2498 9600



Cerro Portezuelo 9760 | Quilicura - Santiago