

# La construcción del túnel minero “Sur, Los Bronces” en Los Andes, con TBM Doble Escudo

The construction of the mine tunnel “Sur, Los Bronces”,  
in Andes with Double Shield TBM

**Pablo Ruiz Parrilla.** Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

Director Zona Cono Sur DRAGADOS. Santiago (Chile). pruizp@dragados.cl

**Julio Espinoza.** Ingeniero Civil

Gerente General BESALCO CONSTRUCCIONES. Santiago (Chile). jespinoza@besalco.cl

**Alejandro Palma.** Ingeniero Civil

Gerente General SRK Consulting Chile S.A. Santiago (Chile). apalma@srk.cl

**Enrique Fernández González.** Ingeniero de Minas

Dirección Técnica Obras Subterráneas DRAGADOS. Madrid (España). efernandezg@dragados.com

**Resumen:** En 2008 se desarrolló un nuevo tipo de tuneladora (Doble Escudo compacto) para la excavación de túneles en geologías diversas. Este tipo de TBM fue seleccionado para excavar el túnel para exploración geológica, de 8 km de longitud, de la mina Los Bronces, en Chile, una de las mayores explotaciones de cobre del mundo y propiedad de Anglo American. El túnel, de 4,5 m de diámetro, se sitúa a 3.600 m sobre el nivel del mar y atraviesa una serie de formaciones geológicas duras y compactas alternadas con algunas fallas. Las limitaciones de espacio en el portal, la climatología y la flexibilidad en el diseño de los sostenimientos han sido los mayores retos de este proyecto.

**Palabras Clave:** Tuneladora; Sostenimientos; Climatología

**Abstract:** In 2008 a new type of TBM system (Double Shield Compact) was developed for the excavation of tunnels in variable rock conditions. This type of TBM was selected to excavate the 8 km long exploration tunnel in Chile for Los Bronces mine, one of the largest copper mines in the world owned by Anglo American. The 4.5 m diameter tunnel runs at an elevation of 3.600 m a.s.l. and crosses a series of geological formations of hard, compact rock crossed by several faults. The restricted area for the tunnel entrance, the climate and the required flexibility in rock support design posed the main challenges for this project.

**Keywords:** TBM; Support; Climatology

## 1. Introducción

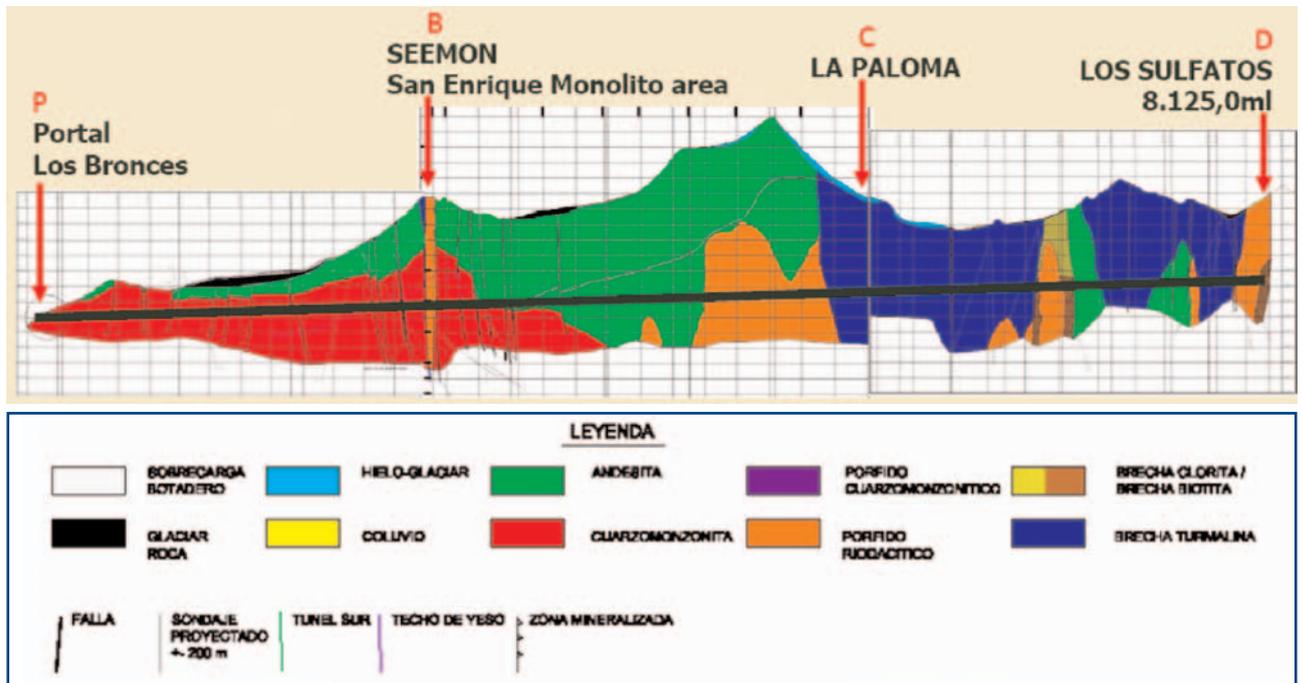
La División de Exploración de la empresa Anglo American, dedicada a la minería y el aprovechamiento de recursos naturales, tomó la decisión en 2006 de realizar un túnel para exploración geológica en la búsqueda de nuevos recursos mineros, en la mina Los Bronces, mina a cielo abierto de cobre y molibdeno, situada al Este de Santiago de Chile. El túnel, de 8 km de longitud y 15,9 m<sup>2</sup> de sección, se encuentra en el corazón de los andes chilenos y su portal de ataque se ubica a 3.600 m sobre el nivel del mar.

La ingeniería básica del Proyecto fue desarrollada por SRK Consulting Chile S. A. El proceso de licitación

de la obra se realizó durante los meses de julio y agosto de 2007, adjudicándose su construcción a la UTE Besalco - Dragados S.A. en el mes de diciembre de 2007. El Proyecto incluye ejecutar aproximadamente 20 anclajes desde donde podrán realizarse los sondeos de investigación de nuevos yacimientos de mineral.

Considerando los condicionantes de altitud, climatología, escasez de espacio en el portal de ataque y antecedentes en túneles similares ejecutados en la zona, el método de excavación previsto en la fase de ingeniería básica fue mediante perforación y voladura. Durante la fase de licitación, la agrupación constructora propuso como alternativa el empleo de una máquina tuneladora tipo Doble Escudo

Fig. 1. Corte geológico longitudinal del túnel.



Híbrido, capaz de colocar ya sea un sostenimiento convencional a base de bulones y malla electrosoldada, o dovelas prefabricadas metálicas cuando fuesen necesarias, reduciendo de este modo el plazo de ejecución y contando además con la seguridad que proporciona una tuneladora tan versátil.

Para solventar las dificultades inherentes a la climatología y escasez de espacio se propuso excavar los primeros metros de túnel por medios convencionales y ejecutar una caverna a continuación, en la que se colocarían las instalaciones principales de apoyo a la tuneladora.

Seguidamente se describen en detalle las circunstancias que incidieron en la toma de decisiones final acerca de la elección del proceso constructi-

vo, las dificultades encontradas a lo largo de la excavación y las lecciones aprendidas que, sin duda, serán de gran ayuda en el planteamiento de futuros proyectos subterráneos.

## 2. Geología y geotécnica

Los terrenos dominantes en los primeros 3.000 m son cuarzomonzonitas, lo que supone casi el 35% del trazado. El resto de las formaciones rocosas son andesitas, pórfidos y brechas turmalinas, discurriendo una parte significativa del túnel bajo un glaciar.

Las características principales de la roca prevista se resumen en el cuadro 1.

Cuadro 1.

TIPO DE ROCA	Longitud Total (m)	UCS (Mpa)	Densidad (ton/m <sup>3</sup> )	QTBM medio	QTBM más frecuente	CLI
Cuarzomonzonita	3150	200	2,75	12,45	35,6	10
Andesita	1700	80-150	2,75 - 2,8	2,14	2,61	55
Pórfido Riodacítico	1300	130-200	2,55 - 2,75	8,66	8,33	10
Brecha Turmalina	1850	75-150	2,55 - 2,75	11,16	17,81	10
Brecha Clorita / Brecha Biotita	100	125	2,75	11,16	12,5	25
Fallas	25 (6 fallas)	25-100	2,6	0,13	0,06	15



Fig. 2. Condiciones climáticas adversas.



Fig. 3. Ubicación del portal de ataque.

Donde CLI "Cutter Life Index" es un parámetro que indica la durabilidad de las herramientas de corte en función de la abrasividad de la roca, indicando los valores altos una alta durabilidad, situándose la abrasividad media en torno a valores de 10 a 15. Del cuadro se deduce que en general se trata de roca muy dura y de abrasividad media, salvo en el caso de la andesita.

### 3. Condicionantes locales: Climatología, avalanchas, altitud y espacio disponible

En la climatología de alta montaña de los Andes y más concretamente en la zona del portal de ataque, son frecuentes las nevadas importantes, además de temperaturas de hasta  $-40^{\circ}\text{C}$  y vientos extremos de más de 200 km/h, favorecidos por el efecto Venturi al estar ubicado en un punto estrecho del valle. Por ello es habitual que el túnel esté aislado cerca de mes y medio cada año.

Por ello y dada la importante zona de acumulación de nieve por encima del mismo, se corre peligro de sufrir avalanchas, razón por la que se han previsto estructuras de contención.

A 3.600 metros de altitud sobre el nivel del mar, la falta de oxígeno es notable, con la consiguiente repercusión en el rendimiento del equipo humano. Por otra parte, la densidad del aire disminuye con la altitud, influyendo en el funcionamiento de la ventilación, red de aire comprimido, motores de combustión, etc.

Otra limitación a la hora de plantear el proceso constructivo ha sido la plataforma disponible en la boca del mismo que, con unas dimensiones de  $20 \times 60 \text{ m}^2$  aproximadamente, es un espacio muy reducido para montar las instalaciones específicas, máxime si se trata del empleo de tuneladora. Por el contrario, el material excavado del túnel se vería directamente en el talud del portal al tratarse de una zona de rellenos del estéril de la mina, lo que ha simplificado esta operación.

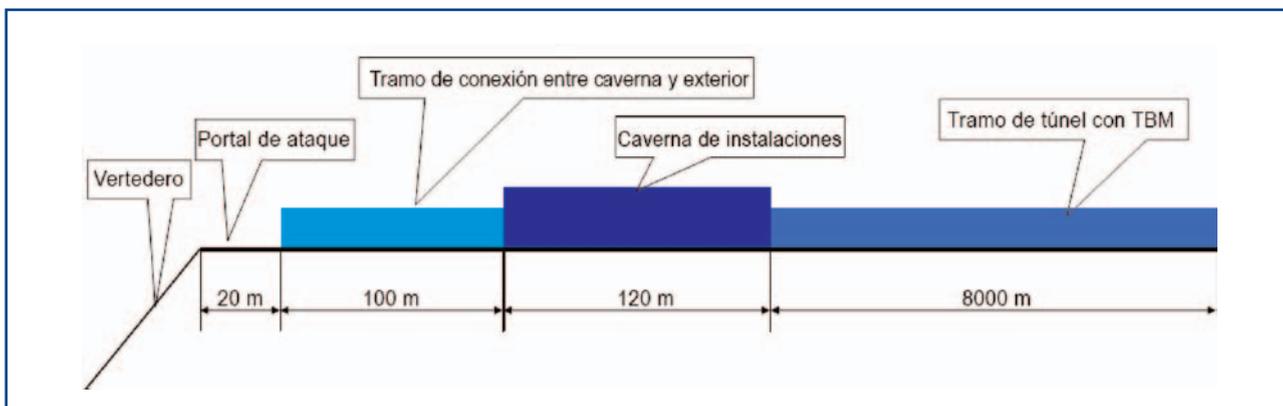


Fig. 4. Esquema de la solución propuesta.



Fig. 5. Montaje de tuneladora en caverna.

La utilización de una tuneladora con los condicionantes expuestos previamente de climatología extrema y escasez de espacio, propició la búsqueda de diferentes alternativas para resolver estos problemas con garantías de seguridad, llegando así a la propuesta final consistente en excavar los primeros metros de túnel por medios convencionales y ejecutar una caverna a continuación, en donde se montaría la tuneladora y se colocarían las instalaciones específicas.

El objetivo de la caverna es evitar al máximo el trabajo en el exterior, permitir el montaje de la tuneladora y el montaje del mayor número de equipos de apoyo posible, quedando en el exterior los elementos imprescindibles como el ventilador y la cinta de desescombro, protegidos debidamente mediante cubiertas prefabricadas ancladas al terreno.

Procediendo de este modo, en caso de avalancha de nieve las personas y equipos están a salvo en la caverna, pudiendo contar incluso con los medios necesarios para su evacuación desde el interior del túnel, por lo que, además de mejorar las condiciones de seguridad, se mejoran los rendimientos ya que las condiciones climatológicas adversas podrían provocar interrupciones en la producción pero no averías importantes con grandes paradas.

Para definir el ancho de la caverna se han tenido en cuenta los siguientes requisitos:

- Disponer de espacio suficiente a ambos lados de la tuneladora para permitir el acceso del personal que realiza el montaje y la aproximación de las piezas o módulos premontados hasta situarlos junto a la tuneladora y montarlos a continuación.
- Disponer del espacio suficiente para montar doble vía de circulación de trenes en un tramo de la caverna, necesaria para la gestión de los trenes de suministro a la tuneladora.
- Disponer del espacio suficiente para colocar los equipos de apoyo a la tuneladora como son centros de transformación, cuadros de distribución, depósitos de agua y grupos de presión, compresores, depósito de gasóleo para el abastecimiento de las locomotoras, etc.
- Disponer del espacio suficiente para acopio de materiales, tanto el que se utiliza en el sostenimiento del túnel como las redes, carriles, y consumibles de la tuneladora, principalmente grasas, aceites y cortadores.



Fig. 6. Gestión del acopio de materiales en la caverna de instalaciones.

#### 4. Análisis de alternativas constructivas

En general, los túneles en roca de pequeña sección y elevada longitud localizados en zonas montañosas son ejecutados mediante perforación y voladura o mediante máquinas tuneladoras, ya sean tipo Doble Escudo, o tipo abiertas de *grippers*. Éste suele ser el caso de túneles hidráulicos o de túneles mineros. En ambas tipologías de túnel, el nivel de acabado que se requiere es muy diferente, pasando del extremo de los túneles mineros en los que su finalidad es facilitar el acceso y por tanto disponer del gálibo suficiente para su tránsito, siendo además éste de carácter temporal, hasta los túneles hidráulicos, en los que el agua tendrá una pérdida de carga determinada a su paso por el túnel en función del acabado del mismo. Este acabado tiene gran importancia en la futura producción de energía de la central a la que alimenta.

Por tanto, en una búsqueda de reducir la inversión inicial y la economía global del proyecto de construcción, en muchos casos de túneles mineros se opta por plantearlos con sostenimientos lo más livianos posibles sin pretender un buen acabado.

Los equipos que habitualmente colocan este tipo de sostenimiento son los equipos de excavación convencional y las tuneladoras llamadas Topos. Tras los fracasos cosechados recientemente en diversos túneles ejecutados con Topos en los que se han tenido que abandonar máquinas e incluso proyectos enteros, la elección del método de excavación suele decantarse por la técnica de perforación y voladura con equipos convencionales o bien por el empleo del Doble escudo, el cual supone una mayor inversión al requerir el revestimiento del túnel con dovelas prefabricadas.

#### 5. Planteamiento de ejecución con Doble Escudo Híbrido

Para el proyecto de Los Bronces, SELI, s.p.a ha diseñado una máquina tipo Doble Escudo Híbrido, capaz de perforar en formaciones de rocas duras que exigen altos empujes por cortador, gracias al sistema de *grippers* que opera en el escudo posterior, y además debido al elevado par que desarrolla la cabeza de corte es también adecuada para avanzar con seguridad en terrenos inestables y en formaciones blandas



Fig. 7. Doble escudo híbrido.

o poco cohesivas. Se trata de la última generación de máquinas tuneladoras de roca, disfrutando de las ventajas de los Dobles Escudos y de los topos.

Para los tramos en los que las características del terreno son buenas, se ha buscado la posibilidad de colocar un sostenimiento ligero a base de bulones y malla. Para ello, la tuneladora, dispone de dos brazos perforadores que pueden ejecutar los taladros necesarios para la colocación de bulones.

En los terrenos que así lo requieren, es posible colocar un anillo de dovelas metálicas de revestimiento del túnel al amparo del escudo trasero con lo que las garantías de seguridad en el trabajo son prácticamente totales. En este caso, gracias a los cilindros auxiliares que se apoyan en estas dovelas metálicas se pueden superar las zonas de falla sin necesidad de recurrir a los *grippers* que no son operativos ante dichas circunstancias. De este modo se superan los peores terrenos con el mínimo de demoras o retrasos.

La TBM seleccionada ha permitido tres formas de trabajo diferentes:

- Trabajo como Doble Escudo: la instalación del sostenimiento de dovelas prefabricadas, en nuestro caso metálicas, es simultánea a la excavación.
- Trabajo como Simple Escudo: el montaje de las dovelas es alternativo a la excavación.
- Trabajo como Topo: el sostenimiento convencional a base de bulones, malla electrosoldada y cerchas se coloca simultáneamente a la excavación.



Fig. 8. Cabeza de corte de la TBM seleccionada.

La tuneladora consiste fundamentalmente en un escudo delantero que incorpora la cabeza de corte, otro escudo trasero, con los *grippers* de apoyo al terreno, una sección telescópica que conecta el escudo delantero y trasero, y una cola que alberga el erector para la colocación de dovelas metálicas y sostenimiento convencional. Este escudo de cola está conformado por pletinas flexibles, también llamadas espadines, que permiten la perforación de los bulones que configuran el sostenimiento a través de las mismas. Con ello se puede colocar un sostenimiento ligero en los casos que sea posible. El escudo de *grippers* y el de cola se encuentran en prolongación del telescópico, lo que imprime al equipo una gran conicidad que permite reducir los riesgos de atrapamiento. Por el mismo motivo, se ha procurado que la longitud total de la TBM sea la menor posible compatible con un correcto diseño, para que en las zonas en las que se encuentran terrenos muy pobres o en los que se pueden dar casos de fluencia por las importantes coberteras, las posibilidades de que la máquina quede atrapada sean mínimas.

Para facilitar el desmontaje en caverna al final del túnel, se ha concebido una máquina autoabatible, es decir, que se desmonta hacia el interior gracias a la división en sectores de los elementos principales de mayores dimensiones. De este modo, se reduce el trabajo "manual" a realizar en el interior del túnel y en altitud.

La cabeza de corte incorpora cortadores de 19" encargados de excavar la roca. Los cortadores de

19", en lugar de los habituales de 17", son capaces de soportar más altas presiones de contacto, proporcionan un mayor volumen de material de desgaste y menor coeficiente de resistencia a la rodadura.

Dispone de 28 cortadores con una carga máxima por cortador de 300 kN, lo que requiere un empuje máximo de contacto de 8.400 kN al que, si se le adiciona un empuje habitual para roca dura del 10% por pérdidas friccionales, se tiene que la cabeza de corte está sometida a un empuje total máximo de 9.240 kN ejercido por los gatos de empuje.

En cuanto al par requerido por la rueda de corte, es función del cuadrado del diámetro de excavación, y se calcula modernamente aplicando valores de correlación hasta de 60, con lo que se obtendría un par necesario de 1.215 kNm. La máquina diseñada dispone de un par de 2.600 kNm a 4 r.p.m. y hasta 3.900 kNm de par de desbloqueo.

La cabeza es de perfil plano para conseguir una mejor estabilización del frente. Los soportes de los cortadores son parte de la misma y están rebajados al objeto de que únicamente sobresalga por delante de la cabeza una parte de los discos. De esta forma, se limita la posibilidad de bloqueo en la cabeza. La sustitución de cortadores se realiza desde el interior de la cámara (*backloading*) a fin de realizar esta operación con total seguridad, sin necesidad de acceder al frente de excavación para la sustitución.

El escombros producido lo recogen los cangilones y entra dentro de la cámara que, al girar, lo vierten en una tolva que alimenta a la cinta primaria de desescombros.

Los escudos de la tuneladora garantizan la seguridad del personal y la integridad de los equipos durante la excavación y sostenimiento del túnel. Consisten en diversas chapas de acero que envuelven a la tuneladora y que al estar en contacto con el terreno excavado impiden el avance de las posibles inestabilidades creadas durante la excavación, protegiendo así las paredes del túnel y por tanto al personal y equipos de posibles caídas de bloques y derrumbes. En el caso de la tuneladora elegida el espesor de los escudos oscila entre los 30 milímetros del escudo delantero y los 20 milímetros del escudo de cola.

El escudo delantero incorpora en su interior el módulo de accionamiento de la cabeza de corte y

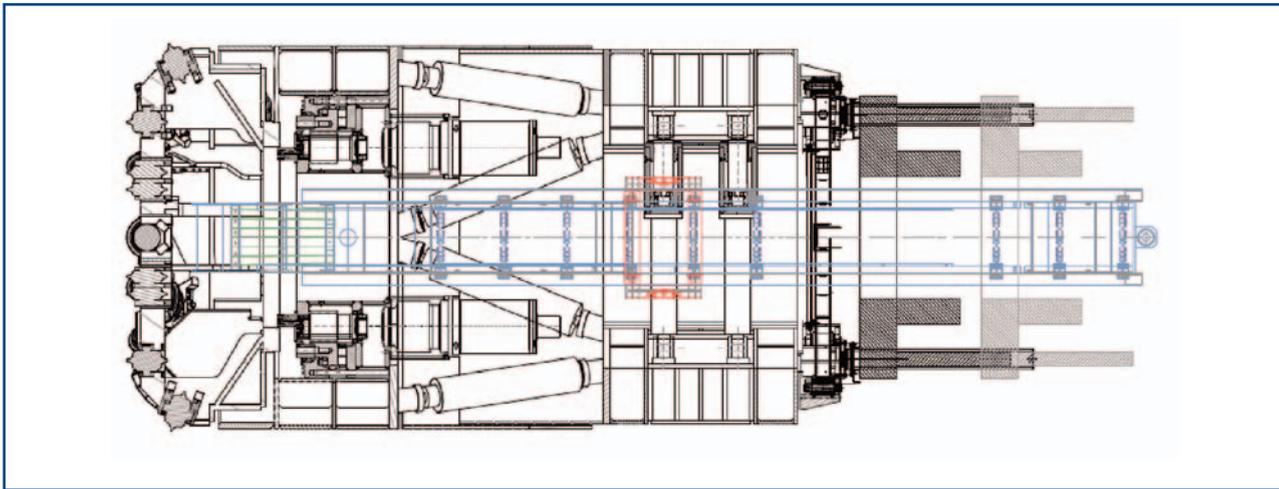


Fig. 9. Sección en planta de la tuneladora.

está conectado al escudo trasero mediante los cilindros de empuje. Estos cilindros, están dispuestos en cuatro grupos para poder dirigir la máquina en cualquier dirección.

El escudo telescópico conecta los escudos delanteros y traseros y su función principal es la de permitir que la máquina excave e instale el sostenimiento simultáneamente. Los cilindros telescópicos conectan ambas secciones de forma que se pueden transmitir las fuerzas de empuje.

El escudo trasero aloja los cilindros de empuje auxiliares y el conjunto de zapatas de agarre o *grippers*, pasantes a través de la coraza. Estas zapatas están dimensionadas para limitar las presiones ejercidas sobre la pared del túnel, lo cual es muy importante cuando se trabaja en terrenos poco consistentes.

Los cilindros de empuje auxiliares están dispuestos en cuatro zonas para poder dirigir la máquina sin utilizar los *grippers*, y cada uno de ellos está conectado a zapatas individuales. Estos cilindros auxiliares son los que se apoyan en el anillo de dovelas colocado para avanzar en terrenos poco competentes. La fuerza de empuje total del escudo trasero es suficiente para aplicar la carga necesaria en la cabeza de corte y para superar todas las fuerzas de fricción que se producen en la totalidad de la máquina.

Alrededor de toda la circunferencia de esta coraza, existen una serie de orificios, a través de los cuales se pueden realizar taladros de reconocimiento o tratamientos por delante del frente de excavación.

El escudo de cola protege las paredes del túnel durante la colocación del sostenimiento. Está formado por un forro metálico en su parte más próxima al escudo trasero y unas tiras metálicas también llama-

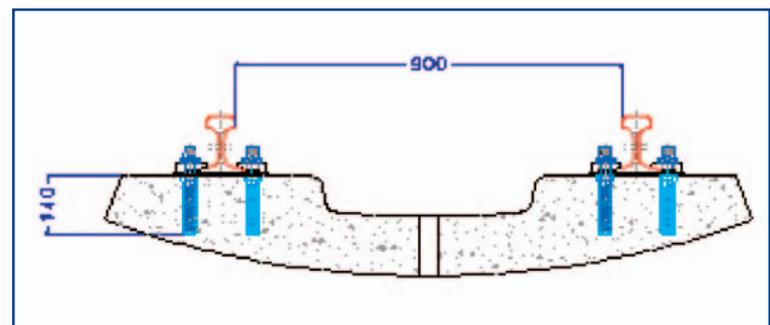
das espadines que se ubican en la zona más alejada de la cabeza de corte. En el interior de este escudo y bajo su protección se colocan las dovelas metálicas en los casos de terreno más inestable, al abrigo del forro metálico continuo, al igual que las cerchas cuando son de aplicación.

En la zona inferior de la estructura anterior, bajo el escudo de cola, se dispone del espacio necesario para situar la dovela de solera directamente sobre el fondo de la tuneladora. Esta dovela, con un desarrollo de unos 40° y una longitud de 1,4 metros correspondiente a un avance, permite disponer de un camino de rodadura adecuado para el material móvil y back up durante la ejecución del túnel y al mismo tiempo sirve como apoyo del anillo de sostenimiento definitivo, quedando integrada como parte del mismo.

### 5.1. Sostenimiento

La colocación del sostenimiento se realiza en la zona habilitada al efecto ubicada en el escudo de cola. Para la elección del tipo de sostenimiento a

Fig. 10. Sección de la dovela de solera.



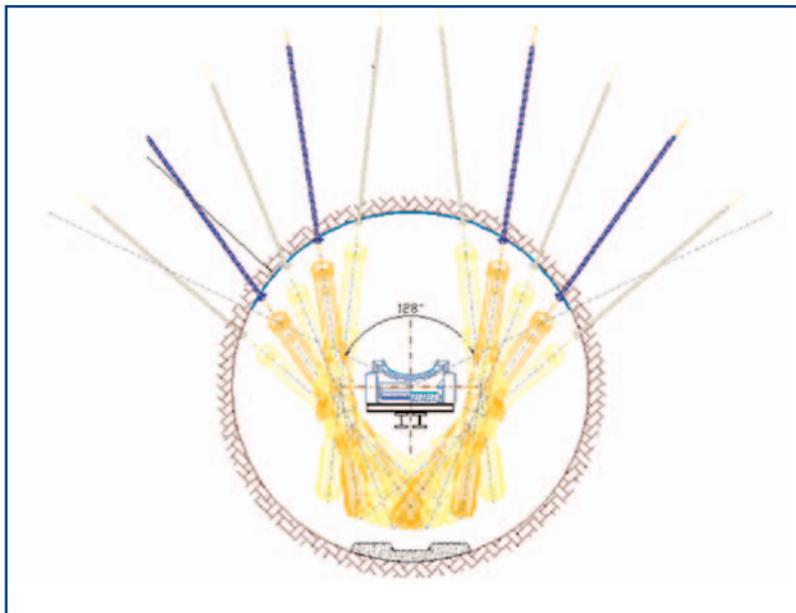


Fig. 11. Colocación del sostenimiento tipo SC2.

colocar se ha tenido en cuenta que se trata de un túnel minero por el que únicamente circularán equipos de prospección durante su explotación, el cual se prevé que tenga una vida de servicio relativamente corta, por lo que se ha buscado un sostenimiento lo más liviano posible acorde con las condiciones de seguridad de la mina.

Se han definido cinco tipos de sostenimientos en base a la calidad del macizo rocoso según el criterio de Barton.

Los sostenimientos SC1, SC2 y SC3 se definen para funcionamiento de la tuneladora como escudo

abierto de *grippers*, mientras que los sostenimientos SC4 y SC5 se definen para funcionamiento como doble escudo. Estos últimos consisten en la colocación anillos de dovelas metálicas conformadas por un forro metálico reforzado con perfiles de acero. El anillo se compone de 8 paneles de acero, cada uno de los cuales con un desarrollo angular de 40°. Cada panel tiene una longitud de 1,4 metros y la conexión entre cada una de las dovelas que componen el anillo se realiza con pernos a través de unos orificios diseñados al efecto en los perfiles laterales. El anillo metálico se completa en la parte inferior con la pieza de contrabóveda ejecutada en hormigón armado, realizando la conexión entre la estructura metálica y de hormigón con la ayuda de conectores.

El anillo de acero ha sido calculado para soportar la presión de los cilindros trabajando a 400 bares de presión de aceite, transmitiendo una carga total al anillo de 11.085 kN.

En cualquiera de los casos, el diseño de la tuneladora permite la realización simultánea de diversas actividades. Por ello, el ciclo de trabajo queda condicionado por aquella actividad o grupo de actividades de mayor duración.

## 6. Dificultades encontradas durante la excavación

Una vez realizado el montaje de tuneladora y equipos auxiliares en la caverna y tras excavar unos



Fig. 12. Anillo metálico de sostenimiento para el tipo SC4 y SC5 (2).



Fig. 13. Vista del brazo perforador de la TBM colocado sobre un erector giratorio



Fig.14. Aspecto del frente en los primeros metros.



Fig. 15. Material caído tras el escudo de cola.

pocos metros en buen terreno, éste manifestó un cambio radical adverso lo que motivó continuos colapsos del frente. Básicamente el frente estaba compuesto de bloques de reducidas dimensiones, centimétricos, sin cohesión. En consecuencia, la excavación se realizaba sin gran empuje (1).

Inmediatamente se procedió a instalar los anillos de dovelas metálicas como sostenimiento, si bien la capacidad portante del terreno permitía avanzar en modo doble escudo, apoyándose en los *grippers*.

Adicionalmente, esta falta de cohesión del terreno hacía que el material se desprendiera por detrás de los escudos, dificultando la colocación del anillo

de dovelas y obligando a sanear a mano de forma continuada. Recuerde el lector que este tipo de máquinas dispone de un escudo de cola con espaldines, solamente en su tercio superior lo que facilita la entrada de material suelto por ambos lados.

La solución para estabilizar estos terrenos y avanzar con la excavación ha consistido en el empleo intensivo de espumas bi componentes, no inflamables, con un coeficiente de expansión de 10:1. El tiempo de reacción es de 30 segundos y el de endurecimiento de 2 a 5 minutos. Estas espumas no se ven afectadas en su funcionamiento por la presencia de agua (1).



Fig. 16 - Relleno de una cavidad en el frente.



Fig. 17. Surgencia de agua.

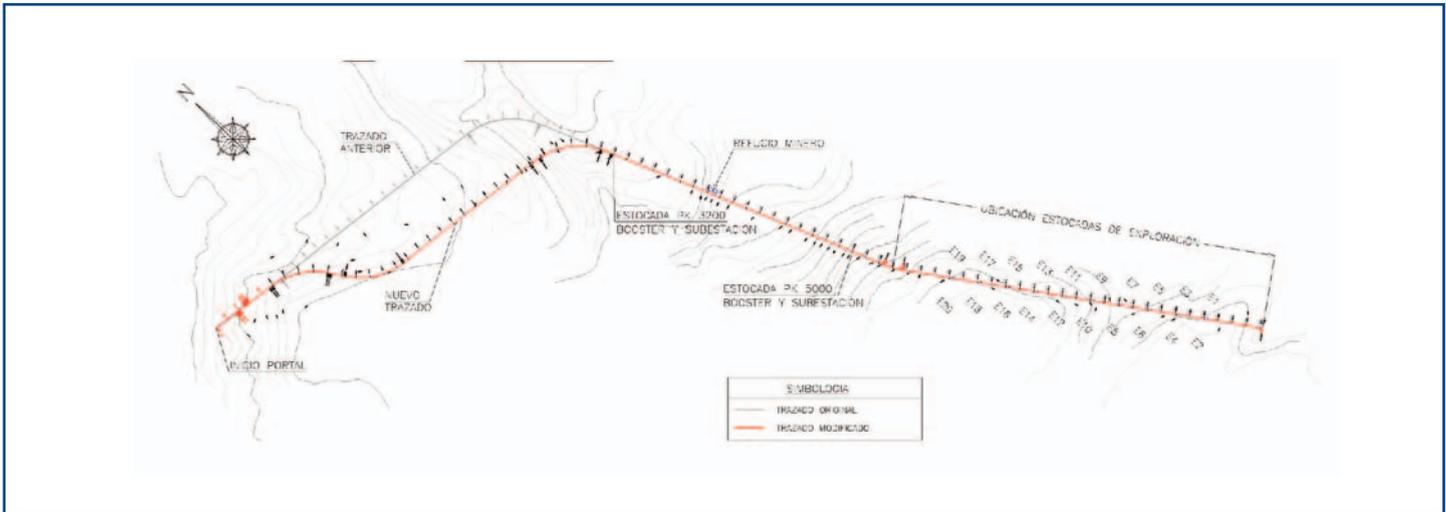


Fig. 18. Trazados en planta original y real del túnel.

Así mismo, en las zonas más difíciles, se procedió al avance por el sistema de medio *regripping*, minimizando de este modo los riesgos de colapso. En total se colocaron 224 anillos en esta zona con un rendimiento de 2,9 m/día lo que da idea de las dificultades encontradas.

Estas adversidades geológicas obligaron a tomar tres medidas de mejora en la tuneladora (1):

- Refuerzo de los espadines del escudo de cola a fin de contener el terreno hasta el montaje de las dovelas metálicas.
- Refuerzo de los cangilones de recogida de escombros en la cabeza de corte, a fin de soportar los impactos de los bloques de roca que entran en la cámara.



Figura 19. Paso de sostenimiento tipo 2 a tipo 5.

- Incremento de 2 cm en el diámetro de excavación mediante el empleo de cortadores de gálbo con objeto de limitar la fricción de la roca sobre el escudo.

Otra medida adoptada fue la de modificar el trazado del túnel a fin de separarlo de la ladera de la montaña, ganando cobertura, tal y como se puede apreciar en la figura adjunta. El trazado original se abandonó en el p.k. 0+487 y se añadieron dos curvas de 500 m de radio.

A pesar del cambio de trazado y tras avanzar unos 300 m en buen terreno surgieron súbitas entradas de agua, alcanzando los 100 l/s en el frente. El caudal de agua en sí, no es un problema pero sí lo es la cantidad de finos que arrastra lo que dificulta tremendamente la limpieza de la solera y colocación de dovelas. Por todo ello se adoptó la decisión de ejecutar sondeos al avance de forma continua a fin de detectar y drenar las aguas de forma controlada. Sucesivas surgencias ocurrieron entre los p.k. 1290 a 1600 de hasta 150 l/s y entre los p.k. 1600 a 2340 con caudales de hasta 50 l/s. La totalidad de este tramo, 2236 m, se excavó a una media de 11,8 m/día con una penetración pura de 2,44 m/h.

Para los tramos en roca de buena calidad geotécnica se lograron avances promedio de 17,5 metros/día, obteniendo además el record de excavación de 46 metros en un día. Finalmente se muestra la tabla (Fig. 20) con los rendimientos alcanzados a lo largo de la ejecución del túnel y que prueban como el doble escudo híbrido es capaz de superar las condiciones geológicas más adversas con un retraso mínimo.

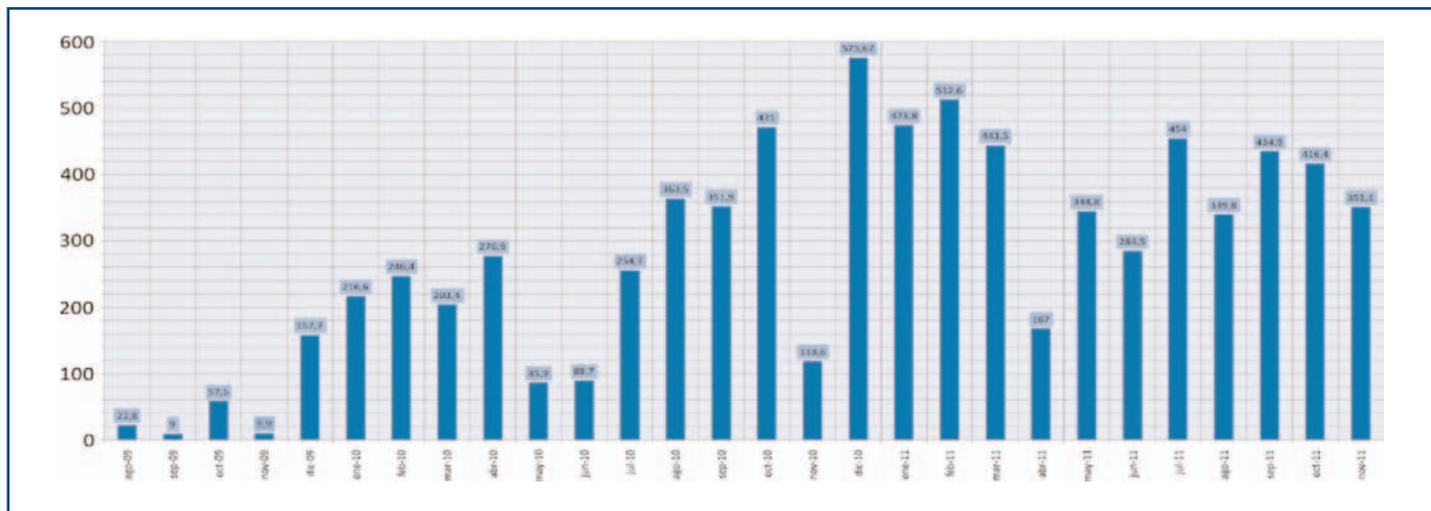


Fig. 20. Rendimientos alcanzados a lo largo de la ejecución del túnel.

## 7. Conclusiones y Enseñanzas

El reto que ha supuesto la excavación del túnel de Los Bronces ha puesto de manifiesto que el doble escudo híbrido es la tuneladora idónea para este tipo de trabajo. La concurrencia de vicisitudes presentes en el proyecto obligaba a la selección de un método constructivo que se alejara de los estándares de ejecución de túneles con el objeto de poder enfrentarse adecuadamente, con buenos rendimientos, adecuada ventilación y a un coste aceptable, a dichos retos. Adicionalmente, durante la ejecución se han obtenido índices de seguridad notables para una obra de esta naturaleza, lo que incrementa considerablemente su idoneidad.

El paso de zonas con  $Q < 0,03$  mediante la colocación de anillos de dovelas metálicas o la instala-

ción de bulones y malla metálica bajo fuertes surgencias de agua se ha ejecutado con éxito.

Por tanto, es una máquina que es capaz de alcanzar muy buenos rendimientos en roca sana, similar a los conseguidos por tuneladoras de *grippers*, pero capaz de enfrentarse a los terrenos de geología adversa en mejores condiciones que éstas.

Como enseñanzas, cabe reseñar la recomendación de mantener una investigación continua al frente durante la excavación dada la variabilidad de los terrenos que configuran la cordillera andina, la necesidad de valorar adecuadamente la productividad del personal que trabaja a tan altas cotas y la confirmación del acierto en la realización de un diseño equilibrado y a medida de las circunstancias locales en las que se ha desarrollado el proyecto. ♦

### Referencias:

-(1) A. BARIOFFI et al. 2011 "DS Compact TBM dealing with complex and unexpected geology in Los Bronces Exploratory Tunnel"

RETIC San Francisco USA.

-(2) A. PALMA et al. 2010 "Construcción de túneles con tuneladoras TBM. Experiencias, desafíos y oportunidades en Chile" SRK Consulting, Santiago de Chile.

## The construction of a mine tunnel "Sur, Los Bronces", in the Andes with Double Shield TBM

In 2008 a new type of TBM system (Double Shield Compact TBM) was developed for the excavation of exploratory and hydraulic tunnels in variable rock conditions. This type of TBM was selected by the Dragados-Besalco JV to excavate the 8 km long exploratory tunnel in Chile for Los Bronces mine, one of the largest copper mines in the world owned by Anglo American. The 4.5 m

diameter exploratory tunnel runs at an elevation of 3.600 m a.s.l. and crosses a variety of geological formations of hard and sound rock with few predicted faults. The logistic difficulty of accessing the site, the restricted spaces for the portal installations and the required flexibility in relation to geology and rock supports have been the main reasons for the selection of this type of TBM system.

The portal is located in a steep slope with high risk of avalanches during winter and temperatures as low as  $-40^{\circ}\text{C}$ . For these reasons the JV approach was to develop a drill and blast access of some 100 m up to the 120 m long TBM assembly and operation chamber. In this way the personnel would be protected against the weather and its risks.

At the start of excavation (actually after a dozen of meters in relatively good rock) the TBM entered a very disturbed area with adverse geological conditions and continuous face collapses.

The TBM had to cross a very intensively faulted zone with prismatic fragments of rock of just a few centimetres mixed with clayish material. No water inflows were experienced in this area, though the filling material was saturated and there was no cohesion or friction. The TBM excavation was performed without any significant pressure on the main trust cylinders.

The installation of liner plates, as primary support, was immediate as well as the foam injection through the cutterhead to fill the cavity created by the collapsing ground. Despite the high rock instabilities the TBM was always in condition to use gripper pads to advance and it was not necessary to use the Single Shield Mode. The liner plates were composed of 8 "steel panels", with an angular development of  $40^{\circ}$  and a longitudinal length of 1.400mm. Panels were connected among these plates and among adjacent rings by bolts. The liner plates were completed at the bottom by a prefabricated concrete invert segment and the connection between this and the steel panels was guaranteed by a screw anchoring system.

A dedicated mechanical erector boom was used to install the liner plates which ensured that workers were always in a safe position during critical operations. Foam injection was occasionally required to fill the gap between the liner plates and the rock. The use of foam is of great and necessary assistance to overcome difficult conditions when boring in rock formations. The foams were used in this initial faulty area to fill the voids and consolidate/support the tunnel face. The injected material was a fire-resistant bi-component foam (ratio 1:1) with an expansion rate up to 10 times the initial volume and a reaction time of 30 sec. Hardening was reported between 2 and 5 minutes. The expansion reaction was not affected by the presence of water. As an additional precaution, during the crossing of this very difficult stretch the TBM advancing strokes were partialized to reduce risks connected with an "excessively long" TBM. The fault area required the installation of 224 liner plates rings; this being conducted within 110 working days and achieving a production rate of 2,9 m/day, nearly double that of Drill & Blast advance.

Due to the adverse geological conditions, three special mitigation measures were carried on the TBM, namely:

- Extension of the grippers of the tail shield to support the rock while assembling the liner plates.
- Strengthening of the TBM conveyor hopper and supports, to resist the continuous shocks of the rock blocks entering the cutterhead.
- Overcutting by spacing out the three peripheral cutters that were displaced up to 2 cm and increasing the excavation diameter

The adverse geology that was encountered from the beginning of the Los Bronces Tunnel excavation convinced the Project Owner to move the tunnel alignment towards a higher overburden in supposedly better rock conditions. The original alignment was left at km 487 adding two curves of 500m radius.

Despite the alignment modification, the TBM, after having advanced about 300m in reasonably good rock, encountered very heavy water inflows in excess of 100 l/sec at the face. Although it was not a overwhelming quantity, the inflow was carrying a lot of rock debris which complicated the invert cleaning and segment installation. Probe drilling was regularly performed and overlapped to detect and drain water in advance. Similar occurrences (150 l/sec) appeared from km 1290 to 1600. From km 1600 up 2340 minor water inflows (up to 50 l/sec) were recorded.

Considering the available working days (189) this stretch (2236m) of quartzmonzonite was performed at a production rate of 11.8 m/day with a penetration rate of 2.44 m/h. Even though the initial section was excavated in faulty ground and the sections in fissured rock with heavy ground water, the monzonite formation was seen to be very hard and abrasive. On the good ground formations, the average progress rates achieved were 17.5 m/day with a peak production of 46 m in 24 hours.

The challenge to bore an exploratory tunnel in the Andean mountains successfully demonstrated that the DSU Compact TBM was the most adequate machine to face logistic restrictions as well as different rock conditions and supports. The DSU Compact TBM (and crew) proved capable of overcoming situations where a Q factor was calculated as  $< 0,03$  with the erection of liner plates as primary support, as well as performing under constant water inflows with wire mesh and rock bolts as primary support. DSU Compact TBM has the same potentiality in solid rock as an open TBM while maintaining the flexibility of a double shield TBM in bad rock, and this gave full confidence to the Project's participants. The Project Owner was extremely satisfied as far as the safety of the technology was concerned. ♦