

# Construcción de Túneles con Tuneladoras TBM

## Experiencias, Desafíos y Oportunidades en Chile



• Av. Apoquindo 4001 Piso 7, Las Condes, Santiago  
• Tel. 56 2 489 0800 • Fax. 56 2 489 0801  
• Email. [santiago@srk.cl](mailto:santiago@srk.cl) • [www.srk.cl](http://www.srk.cl)

# Construcción de Túneles con Tuneladoras TBM

## Experiencias, Desafíos y Oportunidades en Chile

### **Alejandro Palma**

General Manager  
SRK Consulting Chile

### **John Hughes**

Tunnelling Consultant  
SRK Consulting Chile

### **Diego Gajardo**

Geotechnical Engineer  
SRK Consulting Chile

## Introducción

El uso y aplicación de Tuneladoras - TBMs, Tunnel Boring Machine, en Sudamérica ha sido y está siendo bastante significativo.

Países como Perú y Ecuador ostentan dos o más proyectos exitosos de envergadura con TBM, y en Chile, la aplicación de esta tecnología ya está mostrando resultados.

El presente artículo tiene por objetivo exponer en términos generales las experiencias de las que se tiene registro de túneles ejecutados con TBM en la Cordillera de los Andes

Sudamericanos, centrando la atención en los proyectos de excavación con TBM en Chile.

Los presentes y futuros proyectos que se tienen en carpeta en el país, tanto en la industria minera, energética, vial y de transporte de pasajeros, junto con la necesidad cada vez más creciente de poner en marcha proyectos subterráneos en plazos más reducidos y con mayor seguridad durante la excavación, permiten vislumbrar posibilidades para un cambio tecnológico en lo que a excavación de túneles se refiere en el país.

*The use of Tunnel Boring Machines (TBMs) in South America has been and is still significant. There have been two or more major and successful projects using TBMs in countries such as Peru and Ecuador. In Chile, the application of such technology is already showing results.*

*This article aims to explain in general terms those tunnels in the South American Andes excavated with TBMs, focusing on recent Chilean TBM projects.*

*The need to implement more quickly and more safety during the excavation of current and future projects with underground construction elements in the Chilean mining, electrical generating industries together with underground transport schemes, dictate a need for continuing adoption of this technology for the construction of tunnels.*

### **Keywords**

TBM, Tuneladora, Tunnel Boring Machine

# Uso de Tuneladoras TBM en Sudamérica

Para todos es una realidad que la TBM es ahora el método de tunelería preferido en todo el mundo. Existen innumerables proyectos de túneles con TBM en diferentes diámetros y longitudes.

En América del Sur, existen proyectos de envergadura hidroeléctricos y urbanos donde se han utilizado y se siguen utilizando TBM. Entre los países de Sudamérica se pueden citar Venezuela, Brasil, Perú, Ecuador, Colombia y Argentina actualmente en curso el proyecto “Arroyo Maldonado” en Buenos Aires, con dos TBM EPB<sup>1</sup> marca Lovat para suelo y próximamente con el túnel para el arroyo Tigre, dos importantes obras en el ámbito urbano.

En el caso particular de la excavación en la Cordillera de los Andes, varios proyectos de túneles con TBM han sido completados desde 1980. Brox et al (2009) reportan que de un total de 12 proyectos, únicamente en 2 se tuvieron inconvenientes que produjeron significativos retrasos o incluso llevaron al abandono de la TBM.

La *Tabla 1* presenta una lista de los proyectos más relevantes desarrollados y en desarrollo en la Cordillera de los Andes de los que se tiene información.

Proyecto	Ubicación	Año	Longitud (km)	Diámetro (m)
Yacambu Quibor	Venezuela	1975 - 2008	24,0	4,5
Carhuaquero	Perú	1990 - 1992	6,5	3,8
Rosales	Colombia	1991 - 1992	9,1	3,5
Río Blanco	Chile	1992 - 1993	11,0	4,6
Pappallacta	Ecuador	1988 - 1990	6,2	3,2
Misicuni	Bolivia	1998 - 2003	19,5	3,5
Chimay	Perú	1998 - 1999	4,0	5,7
Manubi	Ecuador	2000 - 2002	11,4	4,0
Yucan	Perú	2000 - 2005	6,7	4,1
Sn. Francisco <sup>2</sup>	Ecuador	2006 - 2007	9,7	7,1
Trasvase Olmos	Perú	2008 - en curso	9,7	7,1
Los Bronces <sup>2</sup>	Chile	2009 - en curso	8,0	4,5
CH Chacayes (T. Desvío Cipreses)	Chile	2010 - finalizado	2,5	5,0

**Tabla 1<sup>3</sup>.** Túneles terminados y en ejecución con TBM, ubicados en la Cordillera de Los Andes Sudamericana.

Se tiene un total cercano a 114 km de túneles ejecutados con TBM, este total excluye al proyecto Trasvase Olmos, Túnel Sur de Los Bronces y Chacayes, finalizado recientemente. A pesar de que son un centenar de kilómetros de túneles los que se tienen a la fecha ejecutados con TBM, existe una creencia entre constructores de túneles y empresas del rubro local en relación a un posible fracaso o relativo escaso éxito de los

proyectos ejecutados con TBM en Sudamérica. No obstante las cifras demuestran lo contrario.

No se puede desconocer, que muchos de los proyectos ejecutados tuvieron inconvenientes que causaron demoras significativas. Sin embargo, solo dos tuneladoras fueron abandonadas: Proyectos Yacambú-Quibur, en Venezuela y Yucán en Perú. El resto de los túneles finalizaron con éxito, incluso con rendimientos records.

<sup>1</sup> EPB - Earth Pressure Balance: Tipo de TBM escudada, con estabilización, por presiones, de la frente de excavación en suelos o macizos débiles (ver Figura 4).

<sup>2</sup> Proyectos con TBM doble escudo.

<sup>3</sup> Modificada y actualizada de Brox et al (2009).

# Tipos de Tuneladoras

En las figuras 1 a 4, se presentan los tipos principales de TBMs (extraído de Maidl y otros, 2008). Los tipos de TBM abiertas, escudada y doble escudo se usan en rocas y las tipo EPB son usadas en suelos blandos, en general bajo la napa freática.

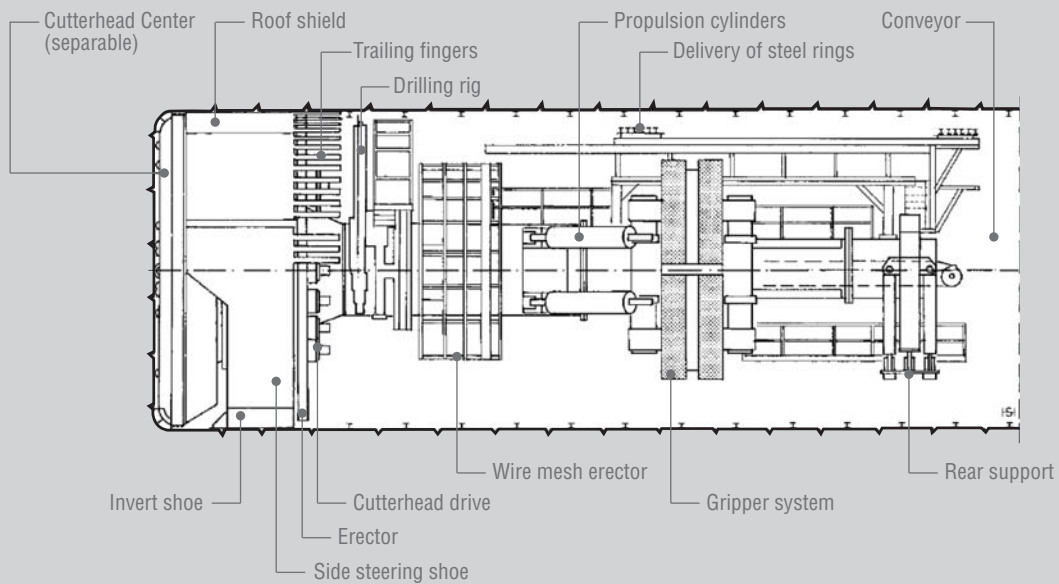


Figura 1. TBM Abierta (Open TBM).

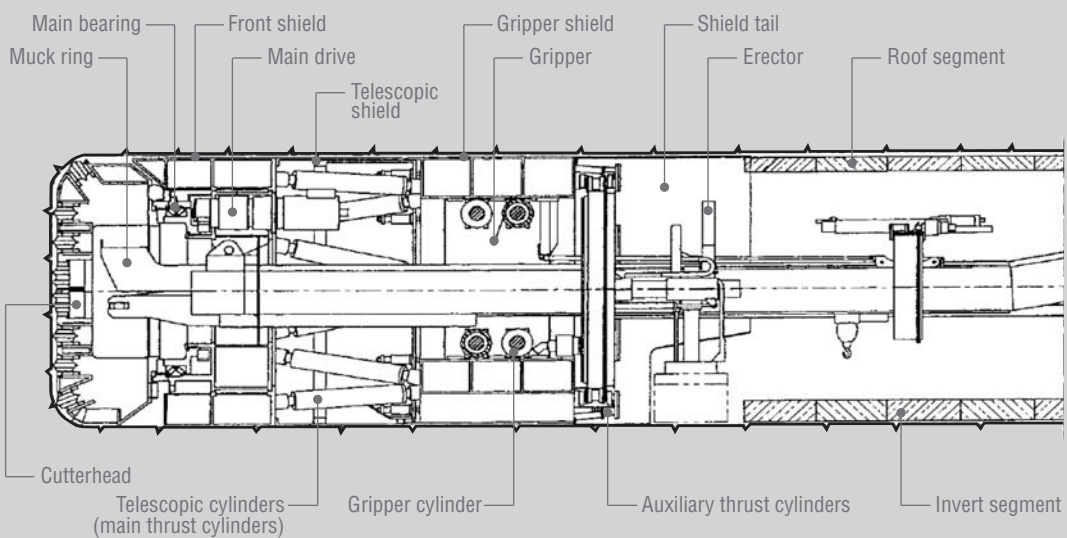
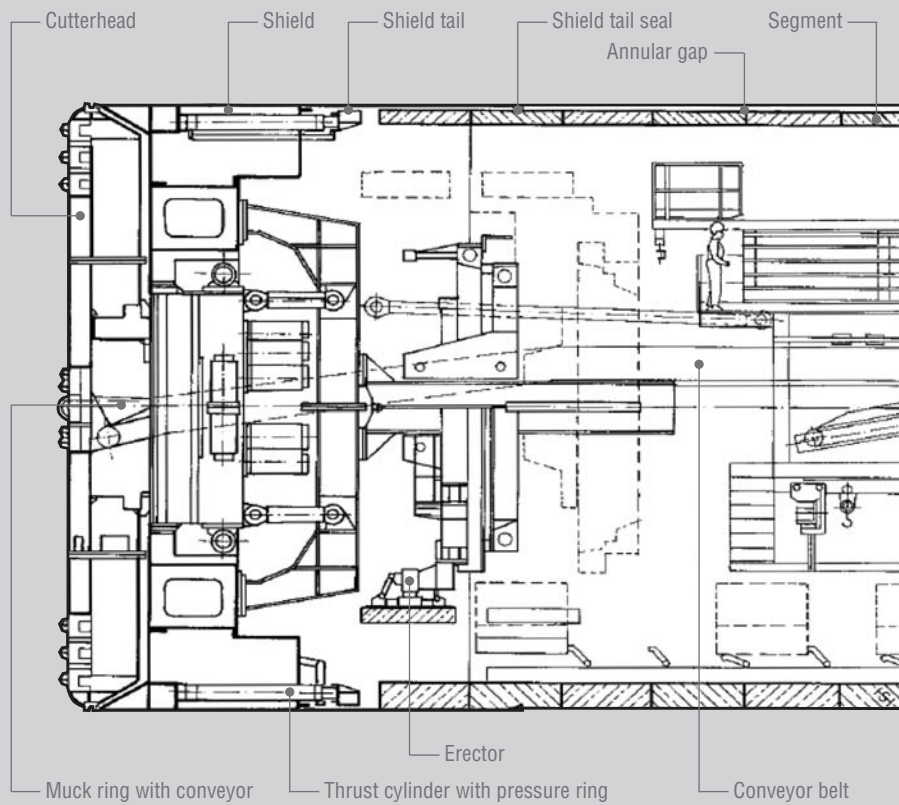
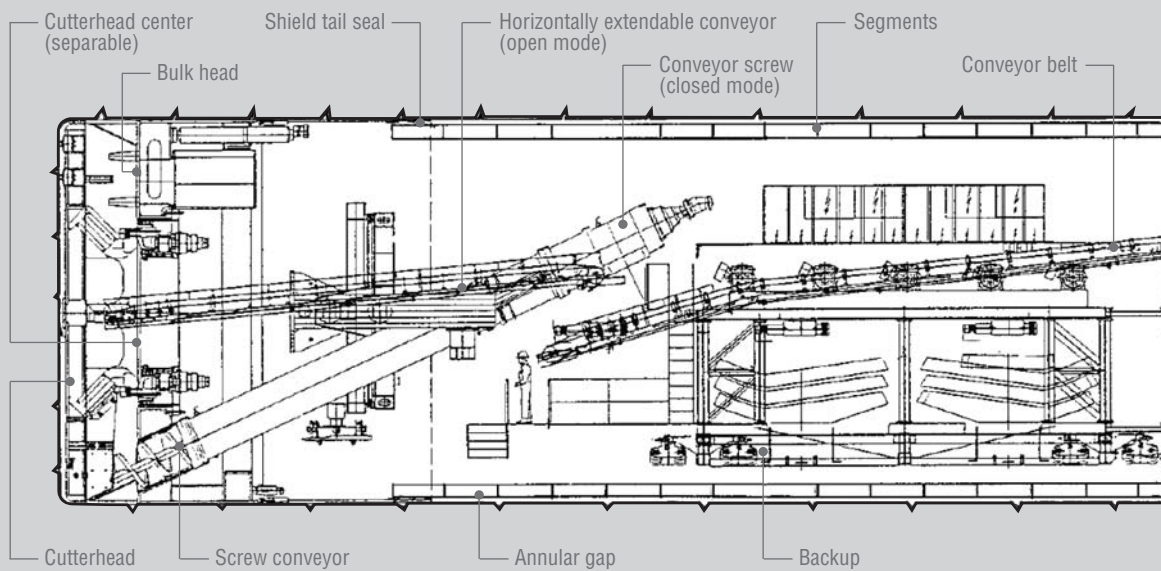


Figura 2. TBM doble Escudo (Double Shield TBM).



**Figura 3.** TBM Escudada (Shielded TBM).



**Figura 4.** TBM EPB (Earth Pressure Balance).

# TBMs en los Andes sudamericanos



**Foto1.** Clásica Foto que documenta el cierre de la sección del túnel por squeezing de las filitas. Proyecto Yacambú-Quibor, Ecuador.

La Foto 1 muestra la sección deformada del primer túnel excavado con TBM en la Cordillera de los Andes en 1976 (Brox et al 2009), que corresponde al túnel de aducción de la presa Yacambú Quibor en Venezuela. Este proyecto fue ejecutado en una filita de muy baja resistencia (15 MPa) y una alta cobertura entre los 800 m y 1200 m lo que significó la ocurrencia de *squeezing* causando que una de las dos TBMs que habían

comenzado quedara atrapada luego de excavar sólo 1,5 km. Posterior a esto, los trabajos se paralizaron para finalmente terminar el 2008 con metodología tradicional<sup>4</sup>. El túnel Carhuaquero en Perú, entre los años 1990 y 1992 fue completado con éxito. En el túnel Misicuni en Bolivia, ejecutado en una geología muy compleja junto con altas filtraciones de agua asociados a una falla de 700 m de longitud redujeron notablemente los

avances forzando al contratista a abandonar la obra. El túnel fue terminado por el fabricante de la TBM. No obstante lo anterior, se alcanzaron avances peaks de 840 m/mes (Brox et al 2009). En el túnel del proyecto hidroeléctrico Pappallacta en Ecuador la TBM excavó 5,7 km de los 6,2 km debido a un derrumbe de significativa magnitud lo que obligó a terminar con metodología convencional (Brox et al 2009).

<sup>4</sup> Método tradicional o Convencional significa excavación con perforación y tronadura o drill & blast.



Foto 2. Montaje de la TBM Proyecto Chimay, Perú.

El túnel de aducción del Proyecto Hidroeléctrico Chimay en el departamento de Junín en Perú de 9,25 km de longitud, fue ejecutado entre los años 1998 y 1999 por la empresa de origen argentino José Cartellone Construcciones Civiles S.A. Excavado con método tradicional desde una ventana en 5,25 km de longitud en sección de 7,0 m x 6,15 m. El

resto aproximadamente 4,0 km fue excavado con una TBM de diámetro 5,7 m. El revestimiento usado fue shotcrete, malla de acero y pernos. (José Cartellone Construcciones Civiles 2000). En la foto 2 se muestra el montaje de la TBM usada en este proyecto. Sólo un año después de la TBM del proyecto Chimay, entre los años 2000 al 2005 en el

proyecto hidroeléctrico de Yucán (Paucartambo II) en Perú se utilizaron dos TBM Robbins reacondicionadas para excavar dos de los cuatro túneles del complejo hidroeléctrico. Este proyecto fue adjudicado al consorcio formado por Skansa, Cosapi y Chizaki, sin embargo, durante el primer año de ejecución Skansa tomó prácticamente el control total del contrato de la central.

Dada la urgente necesidad de que este proyecto hidroeléctrico empezara a producir electricidad, Egecen (Empresa Generadora del Perú) favoreció el uso de TBMs no obstante las aprehensiones de Skansa y de Robbins en relación a la escasa información geológica disponible. Por otro lado, a poco empezar surgieron problemas de financiamiento derivados de la difícil situación económica del Perú, lo que incluso llevó a Skansa a dar por terminado el contrato. Luego de negociaciones con Egecen se continuó con el proyecto. No obstante este tipo de problemas continuaron hasta el final del proyecto, influyendo negativamente en su desarrollo.

Los diámetros de las TBMs usadas fueron de 4,10 m y 3,50 m, respectivamente. Se atravesaron distintos tipos de roca, entre ellas rocas alteradas con una importante afluencia de agua. En rocas de buena calidad y autosoporte, el avance promedio obtenido por las TBMs fue de 23 m/día, alcanzando peaks cercanos a 50 m/día, en tanto que en terreno de mala calidad los avances no superaron los 0,3 m/día. Una de las TBM de este proyecto tuvo que ser abandonada debido a un “devastador derrumbe, con tremendas infiltraciones de agua”, como fue descrito en el artículo *Trials and Tumult at Yucán HEP* de T&T<sup>5</sup>, 2003. La decisión de abandonar la TBM no fue por el derrumbe en sí, como será descrito a continuación. Este derrumbe fue ocasionado por el cruce de una falla de 10 m de espesor que trajo consigo importantes infiltraciones de agua por sobre los 120 lt/s a presiones entre 40 a 60 bar. Para continuar se realizó un by-pass alrededor de la TBM, continuando con perforación y tronadura.

La mayor parte del retraso en reanudar los trabajos luego de ocurrido el derrumbe fue debido a la falta de decisión de cómo abordar esta situación, tal como lo señaló a T&T el Gerente del Proyecto por Skansa. Increíblemente se tardó más de nueve meses en reanudar las actividades por esta frente realizando inyecciones de consolidación, las que terminaron por dañar definitivamente a la TBM al no haber sido debidamente protegida, forzando a continuar con método convencional.

En la foto 3 se muestra la cabeza de una de las dos TBM usadas en este proyecto en su fase final de montaje (Giraldo et al 2008).



**Foto 3.** Cabeza de Corte de la TBM en su fase de montaje del Proyecto Yucán, Perú.

<sup>5</sup> T&T: *Tunnelling & Tunnelling International*. Ver Referencias.

En Ecuador, entre los años 2000 y 2002 fue ejecutado el proyecto Manubi en donde se alcanzaron avances records de 1800 m/mes (Brox et al 2009). Entre los años 2006 y 2007, el túnel de la central San Francisco ejecutado por la empresa constructora de origen brasileño Norberto Odebrecht con una TBM doble escudo Wirth reacondicionada y operada por SELI Spa. Este túnel fue completado con avances promedios de 25 m/día (Tricamo 2005). Problemas posteriores al término del túnel de aducción de San Francisco

entre la constructora y el gobierno de Ecuador debido a diferencias técnicas y contractuales han generado una errónea creencia de fracaso de la ejecución del túnel de aducción de este proyecto con TBM. En la foto 4 se muestra la plataforma de montaje de la TBM doble escudo del proyecto San Francisco.

En estos dos proyectos de túneles en Ecuador, el sostenimiento fue en base a dovelas prefabricadas de hormigón del tipo *honeycomb* o hexagonales.



**Foto 4.** Montaje TBM Doble Escudo Central Hidroeléctrica San Francisco (Ecuador).

# Túneles Actualmente en Ejecución



**Foto 5.** Montaje Subterráneo de la Cabeza de Corte de la Open TBM Robbins del Túnel de Traslase de Olmos (Perú).

Actualmente en los Andes Sudamericanos se encuentran en ejecución:

- El túnel trasvase de Olmos, en Perú, el que a partir de aproximadamente los 14 km (de un total de 20 km) ha visto reducir su avance por severos eventos de estallidos de roca. El túnel de Olmos es uno de los túneles con mayor cobertura en el mundo (más de 2 km), después del túnel de San Gottardo en Suiza. El esquema general de este proyecto es la captación, regulación y trasvase de recursos hídricos del río Huamcabamba y de otros ríos de la cuenca amazónica hacia tierras irrigables de la región de Lambayeque. En la foto 5 se muestra el montaje subterráneo de la TBM Abierta usada en este proyecto.

En Chile:

- El Túnel Sur-Los Bronces, en la Mina Los Bronces de propiedad de Anglo American, tendrá una longitud de 8 km y una sección 4,5 m de diámetro. La TBM usada es tipo doble escudo. Comenzó a excavar en agosto del 2009, habiendo pasado el período de puesta en marcha, se encuentra en plena producción. SRK Consulting, junto con realizar toda la ingeniería del proyecto, está desarrollando a la fecha también la inspección técnica.

Por otro lado, recientemente ha finalizado la excavación del Túnel Cipreses del complejo de túneles de la Central Hidroeléctrica Chacayes,



**Foto 6.** Vista de unos de los túneles del Arroyo Maldonado, justo atrás de la TBM. Se puede observar el revestimiento en base a dovelas prefabricadas de hormigón.

excavado con una Open TBM reacondicionada de 5 m de diámetro.

Mención aparte, por tratarse de túneles en suelo en áreas urbanas, son para los proyectos que se están realizando en la ciudad de Buenos Aires: Los Túneles del Arroyo Maldonado y próximamente el túnel para el saneamiento del Arroyo Tigre.

El primero considera el uso de dos TBM EPB Lovat para la construcción de los colectores de aguas lluvias en la cuenca del Arroyo Maldonado. La obra comprende dos túneles, uno de longitud cercana a los 4,6 km y otro mas largo de casi 10 km, ambos de 7 m de diámetro. Ambos túneles consideran revestimiento de dovelas prefabricadas de hormigón en forma simultánea al avance de la excavación. En la foto 6, se muestra una vista interior de uno de los túneles. En esta obra SRK Consulting es parte del panel de expertos en la especialidad de geotecnia que asesoran al Banco Mundial, organismo que financia este proyecto.

El proyecto del túnel de saneamiento del arroyo Tigre, en la ciudad de Buenos Aires, también se excavará con tuneladora. Actualmente se encuentra en etapa de proyecto. SRK Consulting, actuó de revisor de los modelos numéricos desarrollados, entregando recomendaciones para los tipos de modelos de comportamiento del suelo a usar y los respectivos parámetros tenso

# Uso de TBMs en Chile

## Las TBMs en la Minería Chilena

Aunque Chile es uno de los más importantes países mineros del mundo y está dentro de los países que emplean un alto nivel de tecnología minera, la utilización de TBMs ha sido escasa comparada a los países vecinos.

Junto con la máquina TBM que está siendo empleada por en el túnel Sur de Los Bronces, el único ejemplo de empleo de TBM en una mina chilena hasta la fecha fue la construcción del acueducto de Río Blanco, en El Teniente.

## Túnel Acueducto Río Blanco, El Teniente

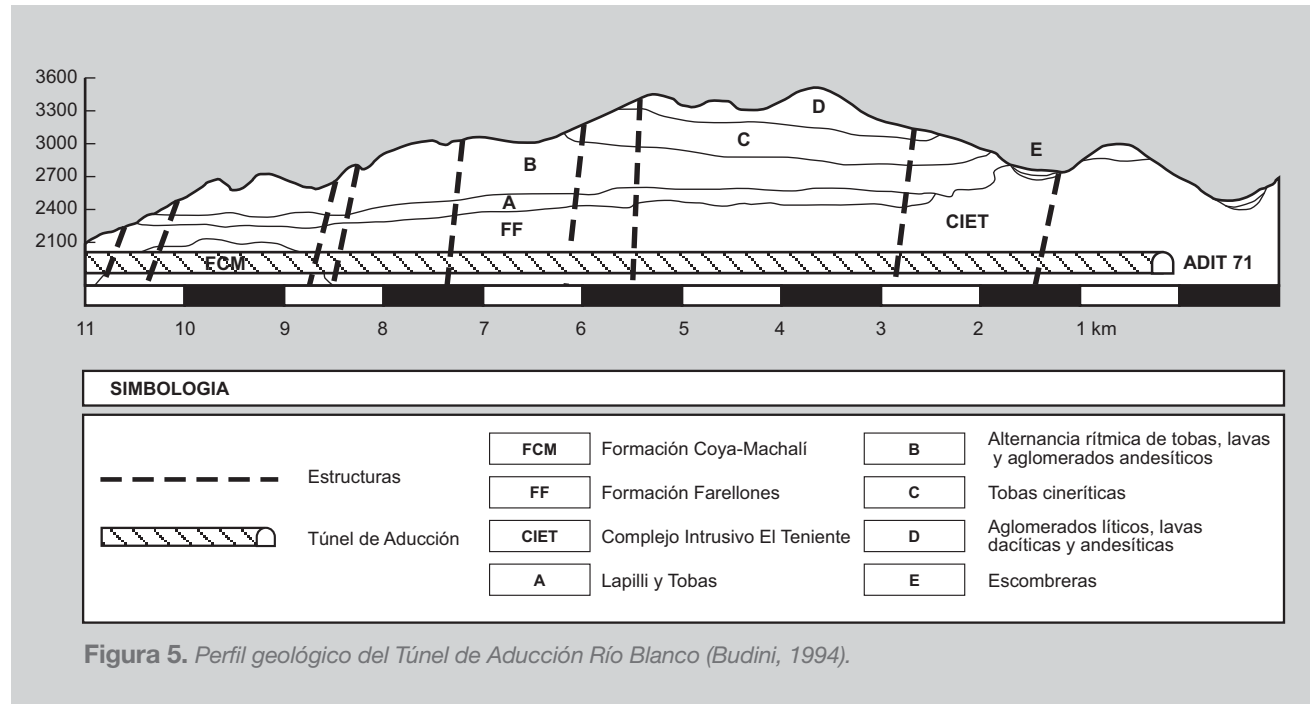


Figura 5. Perfil geológico del Túnel de Aducción Río Blanco (Budini, 1994).

Este túnel es de 4,6 m de diámetro y 11 km de largo (en total), fue excavado mediante una tuneladora en una longitud de 10 km de los 11 totales. Sólo 1 km fue excavado por el método tradicional, desde el portal del Río Blanco.

A lo largo de su trazado se destacan tres unidades geológicas: Complejo intrusivo

El Teniente (mayoritariamente dioritas), Formación Farellones (mayoritariamente lavas andesíticas) y la Formación Coya-Machali (lavas andesíticas y aglomerados volcano-clásticos). Todas estas formaciones se encontrarán en en roca primaria, principalmente Diorita y Andesita. En la Figura 5, se presenta el perfil geológico

del túnel (Budini, 1994).

El túnel fue ejecutado por un consorcio liderado por Spie Batignolles. La TBM era una TBM abierta del fabricante alemán Wirth modelo TBS III 458/480H y ya había realizado al menos un túnel anterior. Las características técnicas de la TBM se presentan en la Tabla 2.

El montaje y ensamblaje de la TBM fue realizado en una sala adyacente al ADIT 71, acceso principal a la mina. El montaje demoró dos meses. El cabezal de corte tenía 43 cortadores de 16 pulgadas de diámetro. Había dos grupos de mordazas (X Gripper<sup>6</sup>), tal como los mostrados en la figura 6, una característica común del diseño de TBM del fabricante Wirth.

A los pocos meses de haber comenzado a operar la TBM, los cortadores debieron ser modificados por su pobre desempeño de acuerdo a la resistencia de la roca. Durante el tiempo transcurrido en tráido de los cortadores desde Europa y la vuelta a la operación de la TBM, se avanzó por el portal Río Blanco con el método convencional.

El túnel se finalizó el 30 de noviembre de 1993, por lo que, habiendo comenzado a principios de enero de 1991, el promedio de avance fue 285 m/mes.

En los años siguientes, el tramo del túnel comprendido entre los Pk 6+000 y 9+000 se deterioró rápidamente, causando colapsos en las paredes y bóveda. Debido a la absorción de agua por parte de minerales arcillosos presentes en la andesita. Los trabajos de reparación del sostenimiento se prolongaron hasta el año 1996.

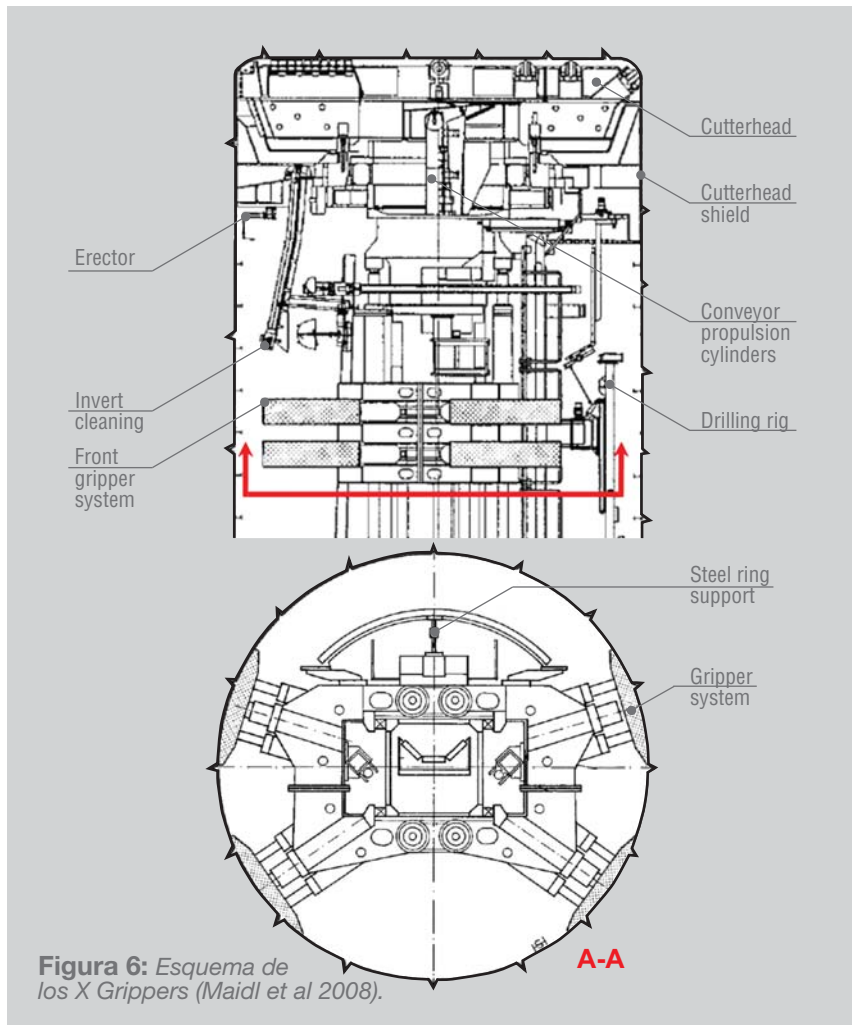
Sin embargo, hay tramos de túnel que se mantienen sin soporte y están perfectamente operativos.

<sup>6</sup> *Grippers se definen las zapatas con que cuenta la TBM a ambos lados (puede ser más de una) con las que reacciona contra las paredes de la excavación.*

### WIRTH TBS III 458/480H

Diámetro Cabeza de Perforación	4.58 m
Potencia de Funcionamiento	4x240kw
Rotación de la Cabeza	0 a 7 rpm
Par de la Máquina	1000 kNm
Presión de Avance	275 bar
Carrera de Avance	1500 mm
Velocidad	0 a 5 m/hr
Nº Cilindros de Avance	4
Potencia Total Instalada	1500 kw
Equipo de Apoyo	Backup con 13 carros. L= 120 m.
Logística y Transporte	En base a locomotoras eléctricas de 10 ton con vagones de 8m <sup>3</sup> para evacuación de la marina.

**Tabla 2:** Características Técnicas Principales de la TBM Wirth TBS III 458/480H usada en Túnel Río Blanco (Chiti, 1994).



**Figura 6:** Esquema de los X Grippers (Maidl et al 2008).

## ¿Qué se puede aprender de este túnel?

- 1.** A pesar de la reputación combinada de este proyecto (si tuvo o no éxito), el promedio de 285 m/mes está por encima de las tasas de avance obtenibles por Drill and Blast. Y se alcanzó un avance de 365 m en un mes. Por lo tanto, las rocas duras y abrasivas (200 MPa) que existen en las minas de la Cordillera de los Andes pueden ser excavadas exitosamente con TBMs.
- 2.** Por lo tanto, incluso con las dificultades que indudablemente se experimentaron durante la construcción de este túnel, es posible disminuir los costos de excavación mediante el uso de TBMs. Es incierto si el resultado hubiese sido menos costoso al construir el túnel por Drill and Blast.
- 3.** Posiblemente el uso de dovelas prefabricadas de hormigón o incluso el revestimiento de acero con pernos habría eliminado las dificultades post-construcción. Sin duda, las obras de reparación fueron muy costosas. Este es un ejemplo real de cómo el uso inicial de revestimientos costosos no siempre resulta tan costoso como podría suponerse.
- 4.** Los problemas posteriores derivados del deterioro de las paredes del túnel han contribuido a alimentar el mito del “fracaso de la TBM del túnel de Aducción de Río Blanco”. Si se revisan las cifras y antecedentes objetivos del desempeño de la TBM se puede ver que fue una experiencia exitosa.

# Túnel Sur Los Bronces

La situación actual de este proyecto, luego de completado el portal de entrada, el tramo inicial del túnel y la “Sala de Montaje” de la TBM, ambos tramos mediante Drill and Blast, y haber pasado el período de montaje de la máquina y la puesta a punto, es de excavación de más de 2 km de túnel con TBM. La Tabla 3 entrega detalles de la TBM mostrada en las Fotos 7 y 8.

Las marinas de la excavación son llevadas a la superficie por una cinta transportadora. El respaldo logístico es a través de una vía férrea usando locomotoras diesel con sistemas de filtros de contaminantes de alta tecnología. La vía férrea es montada sobre las dovelas de piso de hormigón prefabricado.

La longitud total del túnel será de unos 8 km. Al término, la TBM está diseñada para ser desmontada y retirada a través del túnel terminado. Existe un gradiente ascendente de, aproximadamente 2.0%. En las fotos 9 a 12 se muestran diferentes aspectos de la excavación de este túnel.

La fortificación y sostenimiento del túnel es esencialmente de una naturaleza definitiva: No está contemplado otros elementos de soporte, después del revestimiento primario.

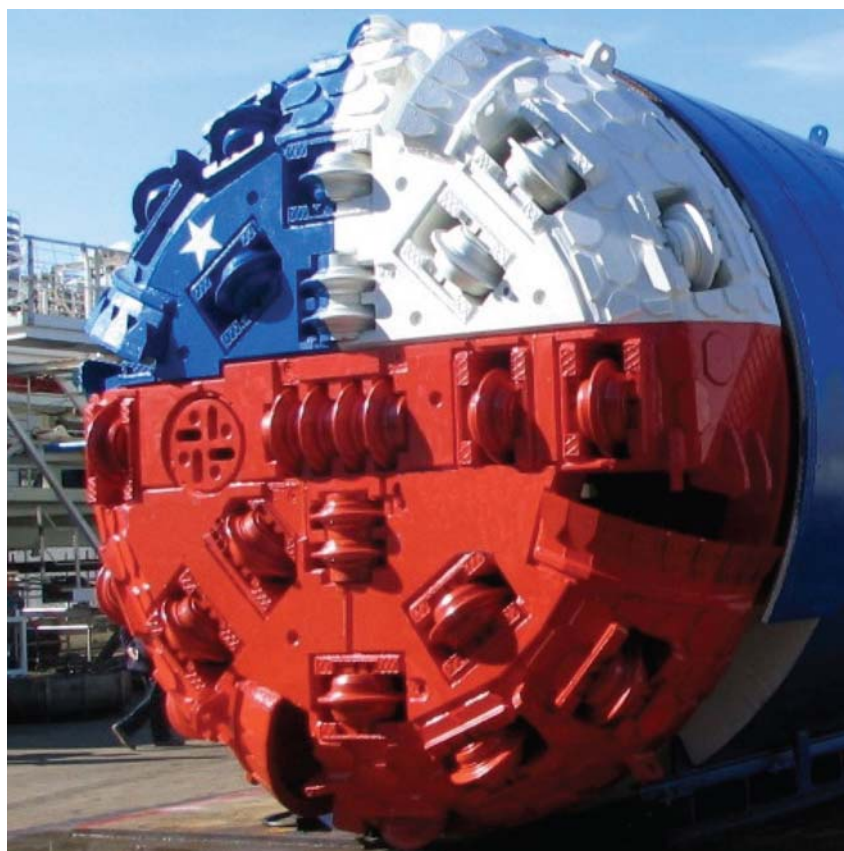


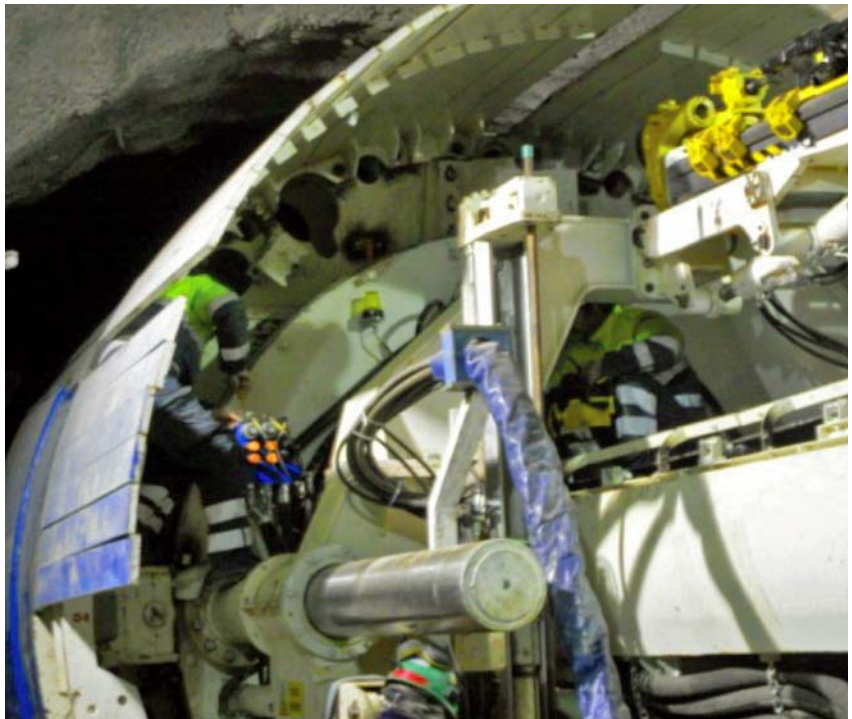
Foto 7: Máquina de doble escudo SELI antes de su envío a Chile.



Foto 8: Montaje de la TBM en las instalaciones SELI en Aprilia, Italia.

El revestimiento primario, está compuesto por pernos de anclaje y malla de acero. En terrenos de mala calidad geomecánica, se utilizan dovelas metálicas de revestimiento, tal como se muestra en la Foto 10. En la Foto 11, se muestra una sección de túnel, con buena calidad geomecánica.

Los primeros meses fueron de puesta en marcha. En un túnel en ejecución, este periodo es esencialmente un proceso donde los operadores estudian y adaptan la TBM a la geología que rodea al túnel.



**Foto 9:** Vista posterior de la TBM doble escudo antes de su ingreso al túnel de arranque desde la caverna de montaje.



**Foto 10:** Imagen del interior del Túnel Sur Los Bronces. Se aprecia el sostenimiento con dovelas metálicas en una zona con macizo rocoso de mala calidad geomecánica. En el extremo superior derecho se observa la cinta transportadora.



**Foto 11:** Imagen del interior del Túnel Sur Los Bronces, en un macizo de regular calidad geomecánica. Con soporte basado, solo en pernos de anclaje y mallas de acero eventuales en la bóveda.

En este período han sido necesarias algunas modificaciones a la TBM y a la metodología de trabajo. Junto con el entrenamiento y adaptación del personal a este cambio de tecnología.

Actualmente, a partir de Enero de 2010, la TBM ha alcanzado roca competente, alcanzando tasas de avance por sobre los 20 m/día, algunas veces llegando a 30 m/día, con avances cercanos a los 400 m/mes, no sin dificultades, pero con una clara demostración de que se pueden obtener avances significativos con esta tecnología.

<b>SELI Doble Escudo Universal Compacto DSU450</b>	
Diámetro de Excavación	4.500 mm
Longitud de Avance	1.400 mm
Cortadores	28 de 19" de diámetro (máx. 300kN/cortador) instalados detrás de la cabeza, sin tener que acceder a la frente.
Empuje Máximo Principal	15.700 kN
Empuje Máximo Auxiliar	14.300 kN
Potencia Cabeza Cortadora	1.575 kW
Vel. Rotación Cabeza Cortadora	0,7 a 4,0 rpm
Torque Cabeza Cortadora	2.612 kNm (3.395 kNm desbloqueo)
Capacidad Cinta Transporte	320 ton/h
Máxima Tasa Penetración	120 mm/min
Longitud Total (incl. backup)	90 m
Ventilación	Ducto plegable de 800 mm, alimentado desde atrás.

**Tabla 3:** Características Técnicas Principales de la TBM SELI Doble Escudo Universal Compacto modelo DSU450 usada en el proyecto Los Bronces.



**Foto 12:** Detalle de fortificación con pernos en la clave del túnel. (Nótese la calidad del corte en roca).



**Foto 13:** Frente de excavación del Túnel Sur Los Bronces, donde se pueden observar los canales dejados por la acción de los cortadores, en andesitas de regular calidad geomecánica.

# TBMS aplicadas en Túneles Civiles

## Topo Colector de Aguas Servidas de Valparaíso

Este proyecto, fue parte del sistema colector de aguas servidas construido a lo largo de la costa de Viña del Mar. Fue diseñado para pasar por debajo de la ciudad de Valparaíso colectando aguas servidas, con descarga en el extremo sur de la ciudad. En la foto 13 se muestra un topo de similares características al usado.

El topo triturador considerado en este proyecto, fue una TBM de aproximadamente 2 m de diámetro que incorporaba una trituradora para rodados en el cabezal de corte. La marina se transportaba luego hasta la superficie en una suspensión de bentonita. El túnel sería revestido con tubos pipe-jackings desde estaciones situadas en la base de los piques excavados a lo largo de la línea del túnel. Estos tubos también proporcionaban los medios para empujar la TBM hacia el frente de excavación.



**Foto 13.** Topo "triturador" de diámetro similar al empleado en Sistema Colector de Aguas en Valparaíso.

La experiencia obtenida a partir de esta obra es que los proyectos de túneles con pipe-jackings en ambientes urbanos tienen que ser muy cuidadosamente planificados debido a los atrasos y problemas urbanos que pueden generar alterando el orden de la ciudad tales como asentamientos de

calles, necesidad de expropiaciones entre otros. En el caso del colector de Valparaíso, el contratista que inició las obras, fue reemplazado por Iseki (el fabricante), quien a su vez fue reemplazado por Soletanche Bachy quien finalizó las obras con un trazado diferente al original.

# Túnel Cipreses – Central Hidroeléctrica Chacayes

El Consorcio entre Astaldi (Italia) y la constructora nacional Fe Grande, está ejecutando por encargo de Pacific Hydro el contrato EPC para la Central de Pasada Chacayes en el Alto Cachapoal.

La Central hidroeléctrica considera tres túneles que están siendo ejecutados con metodología tradicional.

La excepción la constituye el túnel de desvío Cipreses, con una extensión de 2,45 km, finalizado recientemente (fines de agosto de 2010) ejecutado con una Open TBM Wirth reacondicionada. La decisión del consorcio por optar por una TBM fue principalmente por razones medioambientales al estar el túnel bajo la Reserva Nacional del Río Cipreses. La excavación se inició en Enero de 2010, alcanzando avances por sobre los 30 m/día (sobre 400 m/mes).

El montaje y armado de la TBM se realizó en superficie. Previo al inicio de la excavación con TBM, se realizaron 200 m con metodología tradicional. En la foto 14 se muestra el ingreso de la TBM al túnel.

La marina de la excavación es retirada mediante ferrocarril. Las condiciones de la roca han sido en general buenas, pero una falla subparalela al trazado del túnel produjo un influjo de agua por sobre los 160 lt/seg, no obstante esta situación ya fue superada (tunnel talk – Proyecto Chacayes).

La excavación del túnel ha concluido a fines de Agosto de 2010.

Esta TBM ha sido empleada con éxito en otros seis proyectos desde 1986, en Noruega, Italia y Suiza, totalizando cerca de 20km excavados. La Tabla 4 entrega una descripción de esta máquina.



**Foto14.** Open TBM ingresando al sector de Arranque del Túnel Cipreses, nótese los grippers en forma de “x” de Wirth (círculo de color blanco). Para mayor información ver [www.tunneltalk.com](http://www.tunneltalk.com).

<b>Wirth TBS III 400/500</b>	
Diámetro Cabeza de Excavación	5.01 m
Potencia de Funcionamiento	4 x 320 kW
Rotación de la Cabeza	0 a 11.2 rpm
Par de la Máquina	1295 kNm
Carrera de Avance	1500 mm
Nº cilindros de Avance	4
Nº Cortadores	19 Cortadores de 19 pulgadas
Potencia Total Instalada	1900 kW

**Tabla 4:** Características Técnicas Principales de la TBM abierta, Wirth modelo TBS III 400/500.

# Ventajas y Aspectos Generales del uso y aplicación de Tuneladoras versus Drill & Blast

## Ventajas generales del uso de TBM

Las razones que justifican el uso creciente de máquinas tuneladoras alrededor del mundo, incluyen:

a) La excavación produce una mejor superficie terminada de las paredes del túnel. No existe una zona fragmentada circundante, por lo que la sobreexcavación se reduce y por lo tanto se reduce la necesidad de sostenimiento adicional, especialmente cuando se usa hormigón proyectado.

b) No se requiere el uso de explosivos.

c) Los túneles pueden ahora ser perforados económicamente a través de estratos muy duros. Hace veinte a treinta años, cuando se construyó la máquina Wirth usada en El Teniente, se consideraba que 200 MPa era el límite práctico de excavación. Gracias a la mejora en la tecnología de discos de corte este límite ha crecido a 300 MPa, lo que no significa que muchos

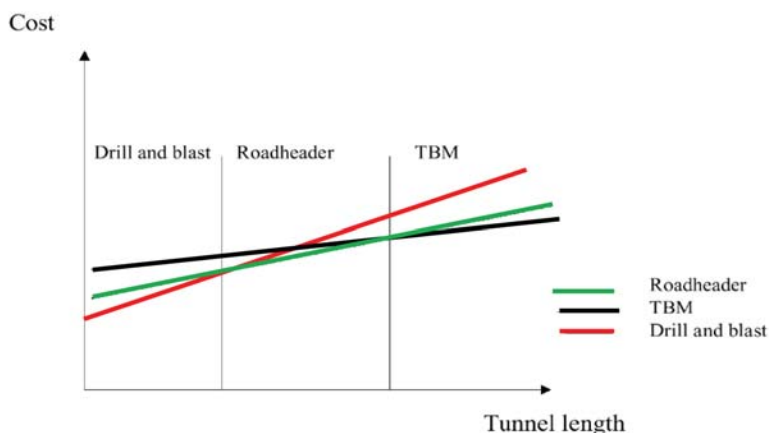
túneles ejecutados a través de ese tipo de material no podrían ser excavados igual o más económicamente mediante Drill and Blast. Sin embargo, existen algunos túneles que requieren una forma regular y circular, por ejemplo los acueductos o túneles de aducción hidráulica, que tienen un gran beneficio en reducción de costos si son perforados con TBM, particularmente porque se reduce de manera importante la sobreexcavación generada por tronaduras.

d) Respecto al costo de la construcción del túnel, existen dos aspectos importantes a considerar, además de la geología. Una, es la velocidad de avance y la otra es el nivel de remuneraciones de los trabajadores del túnel. Estas influencias están ligadas, la segunda impulsando la mejora en tecnología creada por la primera.

Los costos relativos de los tres principales métodos de túneles se muestran en la Figura 7. Tanto la potencia de corte y el costo de capital de una tuneladora se vuelven progresivamente más eficaces con el aumento de longitud de los túneles. Un Roadheader<sup>6</sup> ejerce mucho menos energía y además es mucho menos costosa que una tuneladora y por lo tanto es un sistema intermedio, tanto en su capacidad y costos.

El punto de intersección entre la solución con TBM y Drill & Blast depende en gran medida de las condiciones locales, geológicas, geotécnicas y en términos de costos, especialmente mano de obra y personal de planta. Una regla general es que un túnel con una longitud mayor que 7 km u 8 km será menos costoso al ser ejecutado con TBM. En algunos países donde los costos de mano de obra son más altos, esta longitud disminuirá a 5km ó 6km.

**Figura 7.** Comparación entre los costos de ejecución de túneles mecanizados versus túneles convencionales (drill and blast), tomado de Isaksson (2002).



<sup>6</sup> Roadheader: Máquina rozadora

# Otros Aspectos generales del uso de la TBM

Entre los aspectos generales que un túnel excavado mediante TBM tiene consigo, se encuentran:

- a. El túnel será circular.
- b. La inversión de capital en el equipamiento de la construcción de túneles será más alta que para los túneles construidos mediante Drill and Blast.
- c. Los costos de transporte de la TBM al sitio y su ensamblado deben ser cuidadosamente evaluados.
- d. Los posibles cambios de dirección en el alineamiento del túnel deben ser compatibilizados con los requerimientos de la TBM y sus servicios, entre los que destacan: largo del back up, radio de curvatura mínimo de la máquina, diseño de la correa transportadora (si procede), disponibilidad de agua, fuente de energía, etc.
- e. Así como para los túneles mediante Drill and Blast, las pendientes son gobernadas por el equipamiento de apoyo de la TBM.
- f. Hay otras consideraciones gobernadas por la geología que influenciarán en el diseño de la máquina. Sin embargo, cada proyecto es único y todas las variables que inciden en él deben ser analizadas en su mérito.

# Desafíos Futuros en Tunelería

Los planes de expansión y proyectos integrales que Codelco tiene para sus tres divisiones principales: Chuquicamata con el Proyecto Chuqui Subterráneo, Andina con la expansión PDA Fase I y II y Teniente con el Nuevo Nivel Mina; así como importantes proyectos energéticos de hidroelectricidad entre los que destaca el proyecto Alto Maipo con cerca de 70km de túneles, así como las Centrales Neltume - Choshuenco y Los Cóndores, permiten vislumbrar potenciales usos y aplicaciones de las Tuneladoras-TBM en Chile. De la misma forma, los proyectos viales y de transporte urbanos, permiten visualizar una potencial aplicación de las TBMs. Entre los proyectos que destacan se encuentran:

- Autopista Vespucio Oriente, en Santiago, que está en estudio la posibilidad de realizar un doble túnel desde Avenida Grecia hasta el Salto o en un tramo de 6,8 km en doble túnel (bi-tubo), desde Avenida Bilbao hasta Avenida el Salto, a fin de dar una rápida respuesta a la creciente demanda vehicular por este corredor.

- Las futuras expansiones de la red de metro, también, en Santiago, donde se plantea incluso una nueva Línea 1 alternativa a la existente.

- Túneles de los corredores de integración con Argentina:

- El Túnel Transandino actualmente en fase de estudios finales, en la cordillera de Quinta Región, de unos 50 km de largo, permitiría el uso de la vía Valparaíso - Mendoza, durante todo el año, solucionando los problemas de confiabilidad, capacidad y demanda actualmente existentes.

- El Túnel Aguas Negras, en la cordillera de la Cuarta Región, permitiría la salida de mercaderías desde la ciudad de San Juan en Argentina por el Puerto de Coquimbo, durante todo el año.

- El túnel bajo el Canal de Chacao, se ha estudiado como alternativa a un puente colgante, que permitiría unir Chiloé con Chile Continental.

No se puede desconocer que la

necesaria y urgente rehabilitación de la infraestructura nacional luego del terremoto del 27 de Febrero, puede dar cabida también a esta tecnología.

El caso más claro es el del Gran Concepción, donde se tiene una demanda de más de 30.000 viajes cruzando sobre los puentes existentes en el cauce del río Bío-Bío. Actualmente con el colapso de uno de los puentes y la habilitación parcial del segundo, se ha generado una congestión vehicular y colapso urbano de los sistemas de conectividad actualmente vigentes haciendo necesaria una solución integral y definitiva. Soluciones tales como: dos túneles gemelos o un solo túnel que pueda albergar cuatro pistas en dos niveles, combinando sistemas de transporte serían una alternativa real y en un menor plazo frente a los cuatro puentes (reparación de los dos existentes: Llacolén y San Pablo II y dos viaductos nuevos proyectados: Chacabuco e Industrial) que se requieren para suplir las necesidades urbanas y creciente demanda vehicular del Gran Concepción.

**Foto15.** Revestimiento de dovelas prefabricadas de hormigón. Túnel de la línea 4 - Amarella Sao Paulo.



Ejemplo de este tipo de soluciones hay muchas, se puede citar el Weser Tunnel, para generar el cruce del río Weser, en el noroeste de Alemania, ejecutado entre los años 1998 y 2004, que considera

dos túneles de 1,6 km de longitud y 12 m de diámetro. En la Foto 16 y Figura 8, se muestra el trazado y sección de los túneles gemelos de este proyecto.

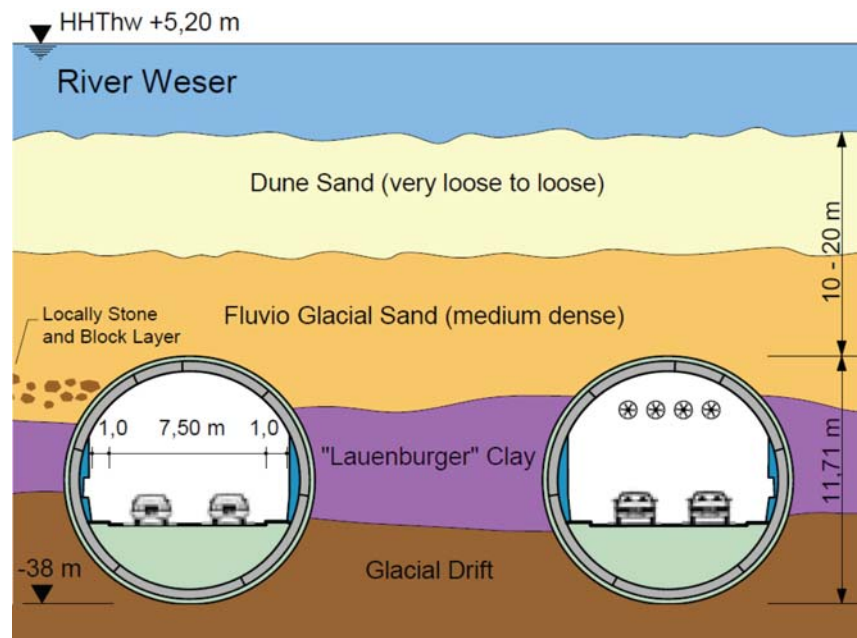
Finalmente, una red planificada

de túneles urbanos en Santiago, permitiría mejorar sustancialmente la calidad de vida de sus ciudadanos y contribuir de manera vertiginosa a la economía con la reducción del tiempo de transporte.

**Foto16.** Túneles para el cruce del Río Weser.



**Figura 8.** Túneles gemelos de 11,71 m de diámetro en el cruce del Río Weser.



**SRK Consulting es la única empresa de consultoría e ingeniería con experiencia probada en el diseño, desde la ingeniería conceptual a detalle e inspección técnica en la construcción de túneles con TBM, en Chile.**

# Referencias

- 1.** Agostilelli, S. 2010. *ITS BsAs. La TBM como Solución en la Construcción de la Nueva Infraestructura en las Grandes Ciudades. Obras Túneles Aliviadores del Emisario Principal del Arroyo Maldonado.*
- 2.** Babendererde, L. 2002. *Weser Tunnel -'96 Project Brochure Babendererde Engineers.*
- 3.** Brox, D., Valentino, R., Venturini, G. 2009. *Technical Consideration for TBM Tunnelling in the Andes, Canadian Tunnelling Magazine.*
- 4.** Budini, N. 1994 *Descripción y Aplicación del Sistema de Trabajo del Equipo TBM. Memoria de Título USACH.*
- 5.** Chiti, B. 1994. *Excavación con Tunelera, Primera Experiencia en Chile. Memoria de Título, USACH.*
- 6.** Forascepi L. y Carrasco A. A. 1991. *Desarrollo Tunel Metodo Excavación a Seccion Completa Mediante TBM, Proc. Instituto de Ingenieria de Minas, Chile.*
- 7.** Giraldo, M., Ortíz, 2008. O. *Productividad de las Máquinas Tuneleras Tipo TBM vs tipo de roca. Revista del Instituto de Investigaciones FIGMMG, 2008.*
- 8.** Isaksson, T. 2002. *Model for Estimation of Time and Cost based on Risk Evaluation Applied on Tunnel Project. Royal Institute of Soil and Rock Mechanics, Stockholm, Sweden.*
- 9.** José Cartellone *Construcciones Civile. 2000 Ficha Técnica del Proyecto Hidroeléctrico Chimay.*
- 10.** Maidl, B., Schmid, L., Ritz, W., Herrenknecht, M., 2008. *Hardrock Tunnel Boring Machines. Ernst & Sohn.*
- 11.** Tricamo, A. 2005 *San Francisco Hydroelectric Project. Class of Support and TBM Operation – Case Hystory.*
- 12.** *Trials and Tumult at Yucán HEP. T&TI-Tunnels & Tunnelling International Magazine, Junio 2003. Páginas 16 a 19.*
- 13.** *Tunnel Talk, 2010. www.tunneltalk.com (reportaje a Central Hidroeléctrica Chacayes – Túnel Cipreses).*



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



• Av. Apoquindo 4001 Piso 7, Las Condes, Santiago  
• Tel. 56 2 489 0800 • Fax. 56 2 489 0801  
• Email. [contacto@srk.cl](mailto:contacto@srk.cl)