



Construcción de túneles con tuneladoras TBM en América del Sur

Tunnel construction using tunnelling machines TBM in South America

Fecha de entrega: : 16 de Marzo 2010

Fecha de aceptación: 27 de Mayo 2010

Alejandro Palma, John Hughes y Diego Gajardo

SRK Consulting, Apoquindo 4001, piso 7, Las Condes, Santiago, Chile, apalma@srk.cl, jhughes@srk.cl, dgajardo@srk.cl

El uso y aplicación de tuneladoras TBM, 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, no así el caso de Chile, en que la aplicación de esta tecnología ha sido bastante reducida. El presente artículo tiene por objetivo exponer experiencias de las que se tiene registro de túneles ejecutados con TBM en América del Sur, centrando la atención en los proyectos de excavación con TBM en Chile. Los presentes y futuros proyectos que se tienen en carpeta en Chile, 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 en plazos más reducidos, permiten vislumbrar posibilidades para un cambio tecnológico en lo que a excavación de túneles se refiere en el país.

Palabras clave: tuneladora TBM, perforación y tronadura, proyectos de túneles

The use of Tunnel Boring Machines (TBMs) in South America has been and still is significant. There have been two or more major and successful projects using TBMs in countries such as Peru and Ecuador but not yet in Chile, where the application of this technology has been until very recently almost non-existent. This article aims to explain those tunnels in South America excavated with TBMs, focusing on recent Chilean TBM projects. The need to implement more quickly 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: Tunnel Boring Machine TBM, drill and blast, tunneling projects

Uso de tuneladoras TBM en Sudamérica

Es una realidad que la TBM es ahora el método de tunelería preferido en casi todo el mundo. Han habido tantos proyectos de túneles con TBM que sería difícil incluso enumerarlos.

En América del Sur, existen proyectos de envergadura hidroeléctricos y urbanos donde se han utilizado y se siguen utilizando TBM. Entre los países Sudamericanos se pueden citar Venezuela, Brasil, Perú, Ecuador, Colombia y Argentina. En este último país se encuentra actualmente en curso el proyecto "Arroyo Maldonado" en Buenos Aires, con dos TBM

EPB (Earth Pressure Balance, tipo de TBM escudada con estabilización bajo presión en el frente de excavación para suelos o macizos débiles, ver Figura 4). Las TBM EPB marca Lovat son usadas para suelo y próximamente en el túnel para el arroyo Tigre, dos importantes obras en el ámbito urbano.

En el caso particular de excavaciones 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.

Tabla 1: Proyectos de túneles con *TBM* ejecutados y en ejecución en la Cordillera de los Andes (modificada y actualizada de Brox *et al.* 2009).

Nombre del Proyecto	Ubicación	Año	Longitud km	Diámetro m
Yacambu Quibor	Venezuela	1975-2008	24,0	4,5
Carhuaquero	Perú	1990-1992	6,52	3,8
Rosales ¹	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 ¹	Ecuador	2000-2002	11,4	4,0
Yucan	Perú	2000-2005	6,7	4,1
San Francisco ¹	Ecuador	2006-2007	9,7	7,1
Trasvase Olmos	Perú	2008-en curso	13,8	5,3
Los Bronces ¹	Chile	2009-en curso	8,0	4,5
CH Chacayes (Túnel Desvío Cipreses)	Chile	2010-en curso	2,45	5,0

¹Proyectos con *TBM* doble escudo

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, actualmente en ejecución.

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 retrasos. No obstante, únicamente en dos proyectos, las *TBM*s fueron abandonadas (Yacambú Quibor en Venezuela y Yucán en Perú) pero como se ha indicado, el mayor porcentaje de estos túneles finalizaron con éxito, incluso con rendimientos records.

Tipos de tuneladoras

A continuación las Figuras 1 a 4 presentan los tipos principales de *TBM*s (Maidl *et al.* 2008). Los tipos de *TBM* abierta, escudada y doble escudo son para rocas y el tipo EPB es para suelos blandos, en general bajo la napa freática.

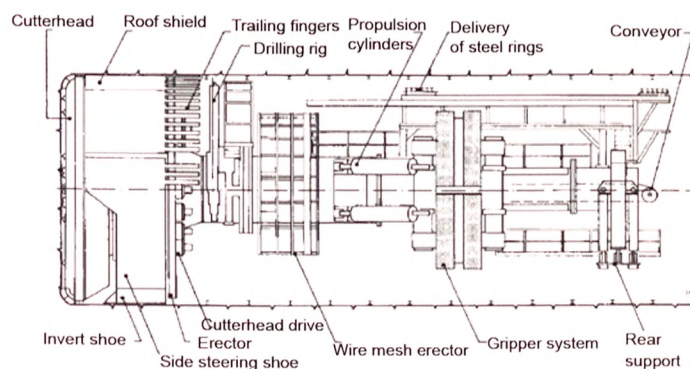


Figura 1: *TBM* abierta

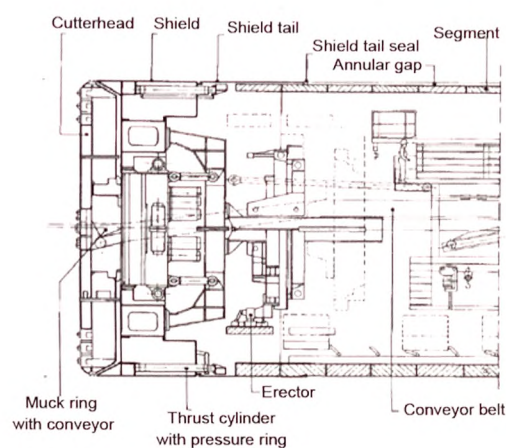


Figura 2: *TBM* escudada

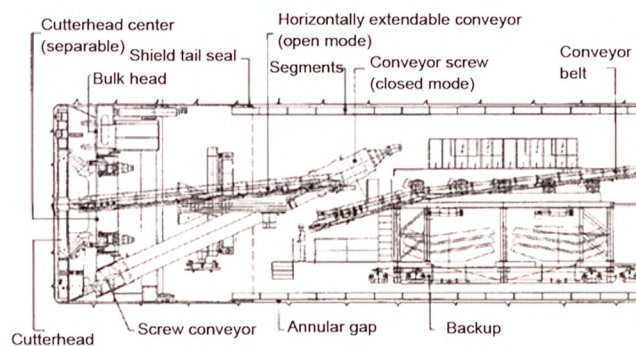


Figura 3: *TBM* doble escudo

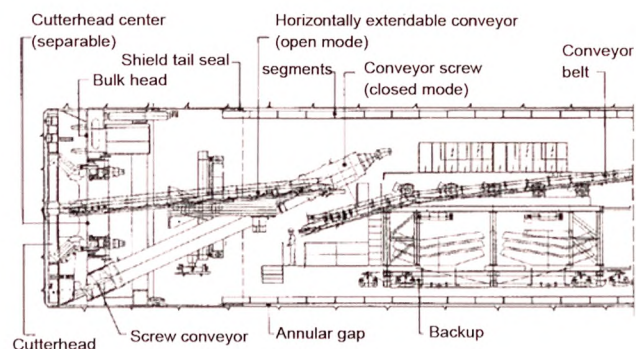


Figura 4: Earth Pressure Balance *TBM*

TBM en la Cordillera de Los Andes

La Figura 5 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 *TBM*s 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, es decir, excavación con perforación y tronadura o *drill & blast*.



Figura 5: Clásica foto que documenta el cierre de la sección del túnel por squeezing de las filitas. Proyecto Yacambú-Quibor

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 zona de falla geológica 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 máximos 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).

El túnel de aducción de 9,25 km de longitud del Proyecto Hidroeléctrico Chimay en el departamento de Junín en Perú, 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 (Cartellone 2000). En la Figura 6 se muestra el montaje de la *TBM* usada en este proyecto.



Figura 6: Montaje de la *TBM* Proyecto Chimay, Perú.

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 *TBM*s 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 *TBM*s 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 *TBM*s 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 (Tunnels & Tunnelling International 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 geológica 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, según el Gerente del Proyecto por Skanska. Increíblemente se tardó más de nueve meses en reanudar las actividades por este frente realizando inyecciones de consolidación, las que terminaron por dañar definitivamente la *TBM* al no haber sido debidamente protegida, forzando a continuar con método convencional.

En la Figura 7 se muestra la cabeza de una de las dos *TBM* usadas en este proyecto en su fase final de montaje (Giraldo y Ortiz 2008).

En Ecuador, entre los años 2000 y 2002 fue ejecutado el proyecto Manubí 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 fue 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 en la ejecución del túnel de aducción de este proyecto con *TBM*. En la Figura 8 se muestra la plataforma de montaje de la *TBM* doble escudo del proyecto San Francisco.



Figura 7: Cabeza de Corte de la *TBM* en su fase de montaje del Proyecto Yucán, Perú

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



Figura 8: Montaje *TBM* Doble Escudo Central Hidroeléctrica San Francisco, Ecuador.

Túneles actualmente en ejecución

Actualmente en la Cordillera de Los Andes 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



Figura 9: Montaje subterráneo de la cabeza de corte de la TBM abierta Robbins del túnel de trasvase de Olmos, Perú

de Lambayeque. En la Figura 9 se muestra el montaje subterráneo de la TBM Abierta usada en este proyecto.

En Chile:

- El túnel Sur en la Mina Los Bronces de Anglo American, de 8 km de longitud y 4,50 m de diámetro en el que la TBM Doble Escudo ha comenzado en Agosto del año 2009 y habiendo pasado el periodo de puesta en marcha ya se encuentra en plena producción. SRK está desarrollando la inspección técnica en este proyecto.

- El Túnel Cipreses del complejo de túneles de la Central Hidroeléctrica Chacayes, que está siendo construido con una TBM abierta reacondicionada de 5 m de diámetro.

Mención aparte, por tratarse de túneles en suelo en áreas urbanas, son 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 TBMEPB Lovat ME310SE Escudo Simple 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 más largo de casi 10 km, ambos de 7 m de diámetro. Ambos túneles consideran revestimiento de dovelas prefabricadas de hormigón H-38 de 35 cm de espesor en forma simultánea al avance de la excavación. El anillo de revestimiento es del tipo universal constituido por 7 dovelas trapezoidales. En la Figura 10, se muestra una vista interior de uno de los túneles. En esta obra SRK es parte del panel de expertos en geotecnia que asesoran al Banco Mundial, organismo que financia este proyecto.

El túnel de saneamiento del arroyo Tigre es otro de los proyectos que se consideran con tuneladora en la ciudad

de Buenos Aires, actualmente se encuentra en etapa de proyecto. SRK actuó de revisor de modelos numéricos desarrollados entregando recomendaciones para los tipos de modelos de comportamiento del suelo a usar y los respectivos parámetros tenso deformacionales.



Figura 10: Vista de uno de los túneles del Arroyo Maldonado, justo atrás de la TBM. Se puede observar el revestimiento en base a dovelas prefabricadas de hormigón

Uso de 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 las máquinas TBM que están siendo empleadas en el túnel Sur de Los Bronces y en el túnel Cipreses de la central Chacayes, 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

Este túnel es de 4.6 m de diámetro y 11 km de largo (en total) y fue excavado por TBM en una longitud de 10 km y 1 km con 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), la Formación Farellones (mayoritariamente lavas andesíticas) y la Formación Coya-Machalí (lavas andesíticas y aglomerados volcánico clásticos). Todas estas formaciones están en roca primaria, principalmente Diorita y Andesita. En la Figura 11, se presenta el perfil geológico del túnel (Budini 1994).

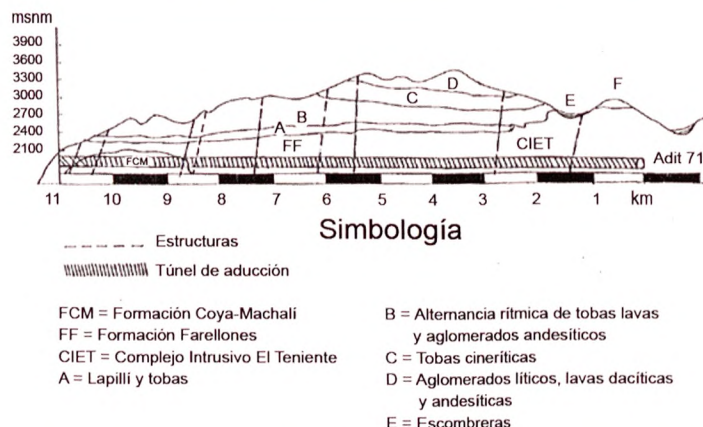


Figura 11: Perfil geológico del túnel de aducción Río Blanco (Budini 1994)

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

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

Diámetro de la cabeza de perforación	4,58 m
Potencia de funcionamiento	4x240 kW
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
N° de cilindros de avance	4
Potencia total instalada	1500 kW

Equipo de apoyo: back up con 13 carros, longitud de 120 m.
 Logística y transporte: En base a locomotoras eléctricas de 10 ton. con vagones de 8 m³ para la evacuación de la marina.

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 (zapatas con que cuenta la *TBM* a ambos lados, puede ser más de una, las que reaccionan contra las paredes de la excavación), tal como los mostrados en la Figura 12, 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 al tipo de roca. Durante el tiempo que transcurrió hasta que la *TBM* volvió a operar con cortadores especialmente traídos de Europa, se avanzó por el portal Río Blanco con método convencional.

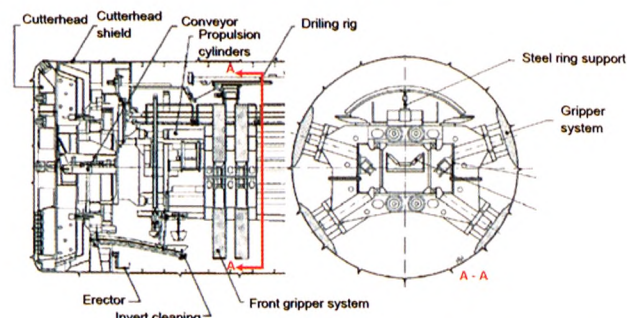


Figura 12: Esquema de los X Grippers (Maidl et al. 2008)

El túnel se completó 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 kilómetros 6 y 9 se deterioró rápidamente, causando colapsos en las paredes y bóveda. Esto fue debido a la absorción de agua por parte de minerales arcillosos presentes en la andesita. Los trabajos de reparación del sostenimiento se prolongaron hasta 1996.

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

¿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 *TBM*s.
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 *TBM*s. 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 es que se ha completado el portal, el tramo inicial del túnel con *drill and blast*, la sala de montaje de la TBM y luego de haber pasado el período de montaje y puesta en marcha, se llevan más de 1,5 km de túnel con TBM. El inicio de la excavación con TBM comenzó en Agosto del 2009. La Tabla 3 entrega detalles de la TBM mostrada en las Figuras 13 y 14.

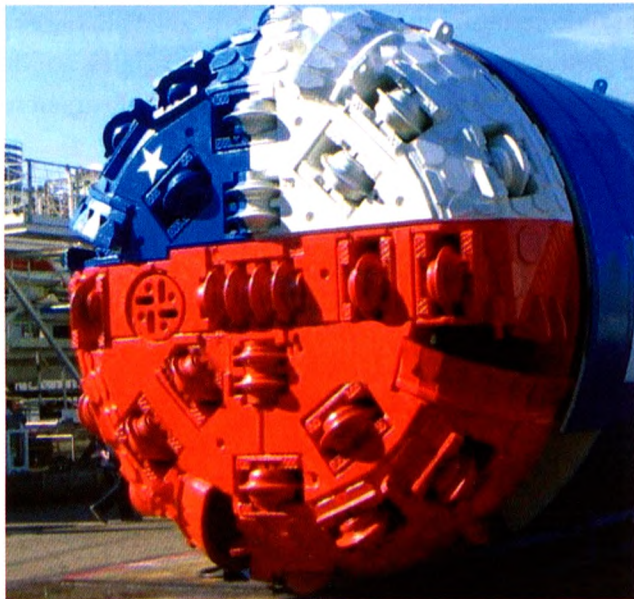


Figura 13: Máquina de doble escudo SELI antes de su envío a Chile

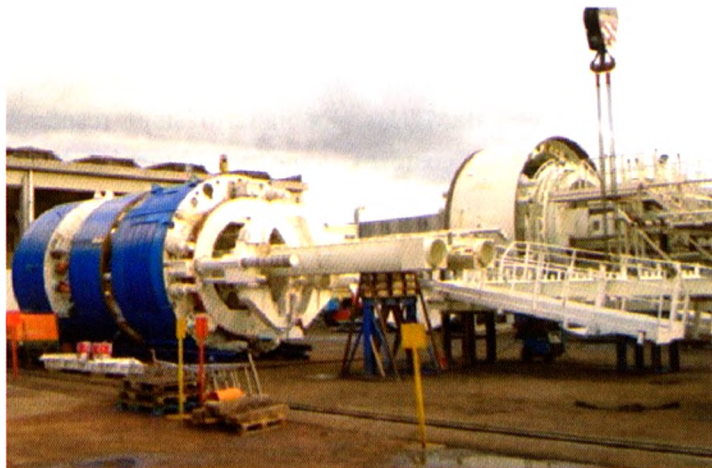


Figura 14: Montaje de la TBM en las instalaciones SELI del fabricante en Aprilia, Italia

Tabla 3: Características técnicas principales de la TBM SELI Doble Escudo Universal Compacto DSU 450 usada en el proyecto de Los Bronces

Diámetro de excavación:	4,500 mm
Longitud de avance:	1,400 mm
Cortadores – 28 de 19” de diámetro (máx 300 kN/cortador) instalados por atrás de la cabeza, sin tener que acceder a la frente.	
Empuje máximo principal:	15,700 kN
Empuje máximo auxiliar:	14,300 kN
Potencia de la cabeza cortadora:	1,575 kW
Velocidad de rotación de la cabeza cortadora – 0.7 a 4.0 rpm	
Torque de la cabeza cortadora – 2,612 kNm (3,395 kNm de desbloqueo)	
Capacidad de la cinta de transporte:	320 ton/h
Máxima tasa de penetración:	120 mm/min
Longitud total de la TBM incluyendo back up de 90 m, ventilación con ducto plegable de 800 mm alimentados desde atrás	

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 es 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 Figuras 15 a 18 se muestran diferentes aspectos de la excavación de este túnel.

La fortificación del túnel es esencialmente de una naturaleza primaria. No están contemplados otros elementos de soporte después del revestimiento primario. El revestimiento primario está compuesto por pernos de anclaje y malla. En terreno de mala calidad se utilizan dovelas de revestimiento como se muestra en la Figura 16. En la Figura 17 se muestra una sección de buena calidad.

Como ya se indicó, el túnel comenzó a excavar en Agosto 2009. 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. En este periodo han sido necesarias algunas modificaciones a la TBM y

a la metodología de trabajo. Situaciones no previstas han contribuido a desarrollar soluciones efectivas, para después de los primeros meses, en el caso de este túnel, cerca de 4 meses, el progreso ha comenzado a normalizarse.

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

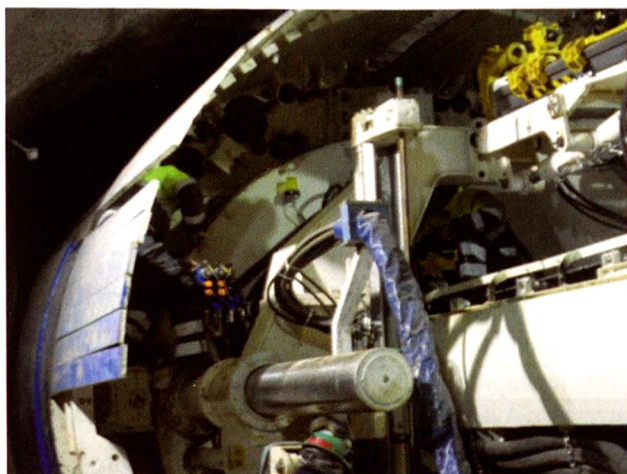


Figura 15: Vista posterior de la *TBM* doble Escudo antes de su ingreso al túnel de arranque desde la caverna de montaje.



Figura 16: Tramo del túnel donde 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.



Figura 17: Tramo del túnel en roca de buena calidad (sólo pernos puntuales en la bóveda)



Figura 18: Tramo del túnel en roca de buena calidad (sólo pernos puntuales en la bóveda)

Otros proyectos de túneles con TBM

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 Valparaíso colectando aguas servidas, con descarga en el extremo sur de la ciudad. En la Figura 19 se muestra un topo de similares características al usado.



Figura 19: Topo triturador de diámetro similar al empleado en Valparaíso

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.

La experiencia obtenida a partir de esta obra es que los proyectos de túneles con pipe-jacking 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 Solétanche 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, que está siendo 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 del 2010. Durante lo que se lleva de excavación, se han alcanzado avances por sobre los 30 m/día (sobre 400 m/mes), alcanzando a la fecha un total cercano a los 1,7 km.

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 Figura 20 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 geológica subparalela al trazado del túnel produjo un influjo de agua por sobre los 160 lt/s, no obstante esta situación ya fue superada (Tunnel Talk 2010).

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



Figura 20: *Open TBM* ingresando al túnel de arranque. Se pueden visualizar los gripper en forma de X de Wirth en el óvalo de color blanco (Tunnel Talk 2010)

Tabla 4: Características técnicas principales de la *TBM* abierta, Wirth modelo TBS III 400/500

Diámetro de la cabeza de perforación	5,01m
Potencia de funcionamiento	4x320 kW
Rotación de la cabeza	0 a 11.2 rpm
Par de la máquina	1295 kNm
Carrera de Avance	1500 mm
Nº de Cilindros de Avance	4
Potencia total instalada	1900 kW

19 cortadores de 19 pulgadas

Ventajas del uso de tuneladoras versus drill and blast

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

- 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, especialmente cuando se usa shotcrete u hormigón proyectado.
- No se requiere el uso de explosivos.
- 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 construcción de túneles se muestran en la Figura 21. 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 (máquina rozadora) 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 5 km ó 6 km.

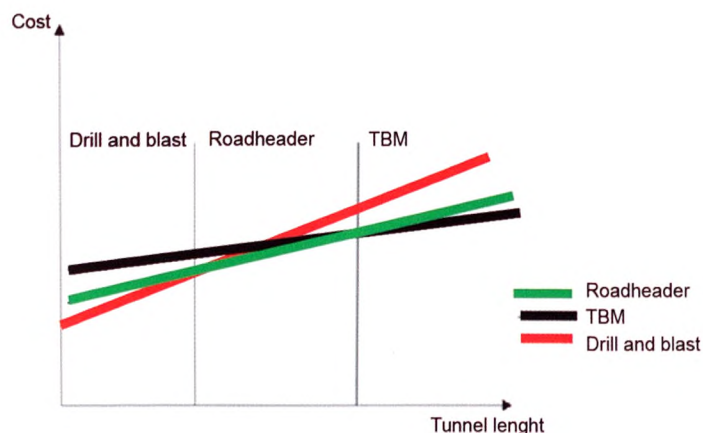


Figura 21: Costos de ejecución de túneles con máquinas comparados con *drill and blast* (Isaksson 2002)

Otros aspectos generales del uso de la TBM

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

- El túnel será circular
- La inversión de capital en el equipamiento de la construcción de túneles será más alta que para los túneles construidos mediante *drill and blast*.
- Los costos de transporte de la *TBM* al sitio y su ensamblado deben ser cuidadosamente evaluados.
- 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 *TBM* y diseño de la correa transportadora (si procede).
- Así como para los túneles construidos con *drill and blast*, las pendientes son gobernadas por el equipamiento de apoyo de la *TBM*.
- 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

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 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 *TBM*, en este caso en suelos. Entre los proyectos que destacan se encuentran:

En la Autopista Vespucio Oriente en Santiago está en estudio la posibilidad de construir un túnel doble desde Avenida Grecia hasta el Salto o en un tramo de 6,8 km en doble túnel 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, donde se plantea incluso una nueva Línea 1 alternativa a la existente.

Túneles de Integración entre Chile y Argentina. El proyecto del túnel trasandino de unos 50 km de largo se encuentra en fase de estudios finales. Permitirá el uso de la vía Valparaíso a Mendoza durante todo el año.

El túnel bajo el Canal de Chacao se ha estudiado como alternativa a un puente colgante para 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.

En este caso, alternativas de solución 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 Juan 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.

Ejemplos de este tipo de solución 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 (Babendererde 2002). En las Figuras 22 y 23 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.



Figura 22: Túneles para el Cruce del Río Weser.

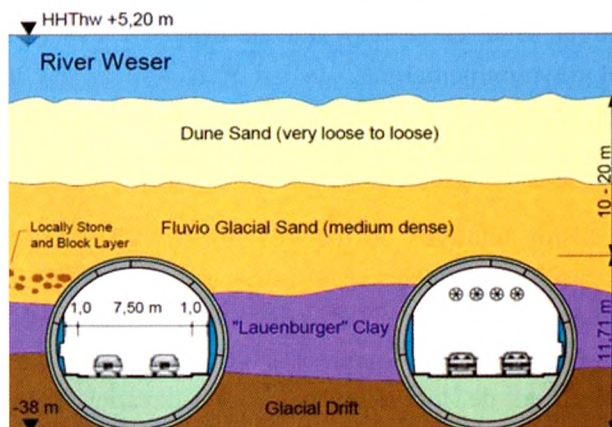


Figura 23: Túneles gemelos de 11,71m de diámetro en el cruce del Río Weser.

Referencias

- Babendererde, L. (2002). Weser Tunnel – Project Brochure Babendererde Engineers
- Brox, D., Valentino, R. and Venturini, G. (2009). Technical Consideration for TBM Tunnelling in the Andes. Canadian Tunnelling Magazine, 32-37
- Budini, N. (1994). Descripción y Aplicación del Sistema de Trabajo del Equipo TBM. Memoria de Título USACH
- Chiti, B. (1994). Excavación con Tunelera, Primera Experiencia en Chile. Memoria de Título, USACH
- Giraldo, M. y Ortiz, O. (2008). Productividad de las Máquinas Tuneladoras Tipo TBM vs tipo de roca. Revista del Instituto de Investigaciones FIGMMG
- 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
- José Cartellone Construcciones Civiles (2000). Ficha Técnica del Proyecto Hidroeléctrico Chimay
- Maidl, B., Schmid, L., Ritz, W. and Herrenknecht, M. (2008). Hardrock Tunnel Boring Machines. Ernst & Sohn
- Tricamo, A. (2005). San Francisco Hydroelectric Project. Class of Support and TBM Operation – Case Hystory
- Tunnels & Tunnelling International (2003). Trials and Tumult at Yucán HEP, June, 16 - 19
- Tunnel Talk (2010). www.tunneltalk.com (reportaje a Central Hidroeléctrica Chacayes – Túnel Cipreses)