

FUNDACIÓN



**PRIMERA CONFERENCIA MAGISTRAL
"ING. FERNANDO HIRIART BALDERRAMA"**

**EXCAVACIÓN MECÁNICA MEDIANTE
MÁQUINAS PERFORADORAS DE TÚNELES DE
FRENTE COMPLETO EN ROCA DURA.**

Ernest Büchi

30

CUADERNOS FICA

M É X I C O
1 9 9 9

Consejo Directivo de Fundación ICA.

Presidente.

Ing. Bernardo Quintana.

Vicepresidentes.

Dr. José Sarukhán Kérmez

Dr. Guillermo Soberón Acevedo

Ing. Guillermo Guerrero Villalobos

Ing. Raúl López Roldán

Director Ejecutivo.

Ing. Fernando O. Luna Rojas

Cuerpos Colegiados de los Programas Operativos.

Comité de Becas.

Ing. José Manuel Covarrubias Solís

Dr. Francisco Yeomans Reyna

Ing. Miguel Angel Parra Mena

Comité de Premios.

Dr. Luis Esteva Maraboto

M.I. Mario Ignacio Gómez Mejía

Ing. Gregorio Farias Longoria

Comité de Publicaciones.

Ing. José Iber Rojas

Dr. Oscar González Cuevas

Dr. Horacio Ramírez de Alba

M.I. Gabriel Moreno Pecero

Ing. Santiago Martínez Hernández

Comité de Investigación.

Dr. José Luis Fernández Zayas

Dr. Bonifacio Peña Pardo

Dr. Ramón Padilla Mora

Dr. Roberto Meli P.

FUNDACIÓN



**PRIMERA CONFERENCIA MAGISTRAL
"ING. FERNANDO HIRIART BALDERRAMA"**

**EXCAVACIÓN MECÁNICA MEDIANTE
MÁQUINAS PERFORADORAS DE TÚNELES DE
FRENTE COMPLETO EN ROCA DURA.**

Ernest Büchi

30

CUADERNOS FICA

M É X I C O
1 9 9 9

**Derechos Reservados 1999
Fundación ICA, A.C.**

**Av. del Parque 91
Colonia Nápoles
03810 México, D.F.**

**Tel. 669 39 85, 272 99 91 y 272 99 15
Ext 4000-4001
Fax 4083**

**e-mail: lunaf@fundacion-ica.org.mx
<http://www.fundacion-ica.org.mx>**

**ISBN 968-7508 52-3
ISSN 1405-387X**

Impreso en México.

ÍNDICE.

- 1. Excavación mecanizada de roca mediante máquinas perforadoras de túneles a sección completa.**

Dr. Ernest Büchi

- 2. Experiencia de excavación mecanizada en formaciones volcánicas (del pliocuaternario)**

Ing. Enrique Lavin Higuera.

- 3. Causas que pueden provocar paros no programados, durante la excavación mecanizada de túneles en roca.**

Ing. Juan J. Schmitter M.

- 4. Comentarios a la conferencia del Dr. Büchi.**

Ing. Fernando Hiriart Balderrama

**PRIMERA CONFERENCIA MAGISTRAL
"ING. FERNANDO HIRIART BALDERRAMA"**

**1. EXCAVACIÓN MECANIZADA DE ROCA MEDIANTE MÁQUINAS
PERFORADORAS DE TÚNELES A SECCIÓN COMPLETA.**

Ernest Büchi

Conferencia magistral organizada por la Asociación Mexicana de Ingeniería de Túneles y Obras Subterráneas, y la Fundación ICA, A.C., el día 28 de enero de 1998.

Resumen

El trabajo presenta una descripción general de las máquinas perforadoras de túneles, para roca dura (hard rock Tunnel Boring Machines TBM) y de su actual estado del arte: abiertas y con escudo. Esta presentación acerca de los discos cortadores, de la cabeza y del diseño básico de la TBM es acompañada por la descripción de las pre-investigaciones geológicas y geotécnicas requeridas para un proyecto de túnel con excavación mecanizada. Se discuten brevemente los accidentes geológicos encontrados, relacionados con la selección de equipos y técnicas de túneleo adecuadas, considerando las TBM abiertas contra las TBM con escudo. Finalmente se realizan algunos comentarios con respecto a la información geológica que se debe incluir en los documentos de concurso.

INTRODUCCIÓN. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA MÁQUINA.

La TBM típica para roca dura consiste de tres partes principales:

- La cabeza cortadora.
- El soporte de la cabeza cortadora, con las unidades motrices y el rodamiento principal.
- El sistema sujetador y de empuje.

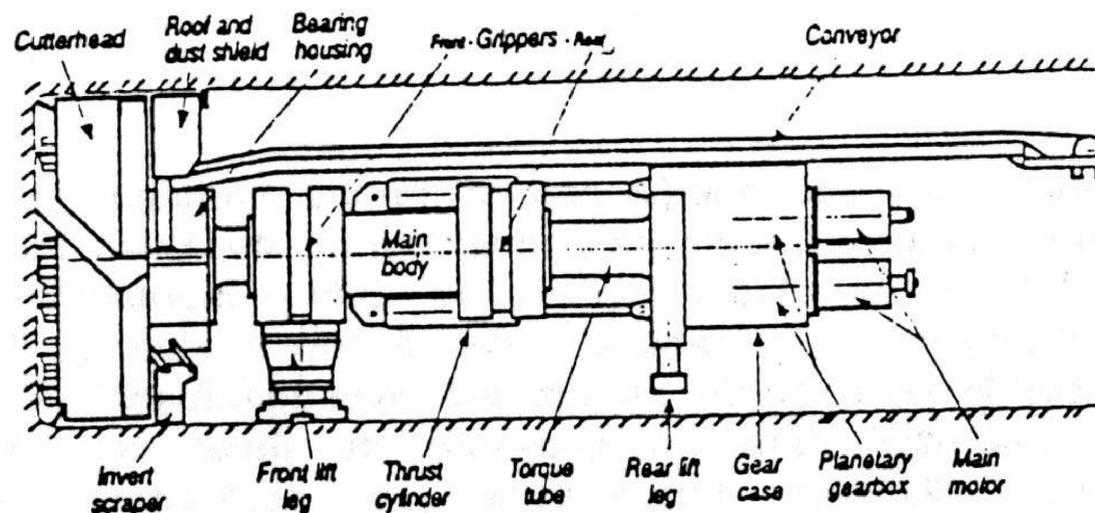


Figura 1. Esquema estándar de una TBM abierta para roca dura.

Este esquema corresponde al llamado diseño abierto -contrario al de las máquinas con escudo- y su aplicación general es en formaciones rocosas competentes, de medianas a duras.

La cabeza cortadora es un pesado disco de acero o bien una caja estructural soldada, que es soportada por un rodamiento de gran diámetro.

La cabeza cortadora es plana y/o en forma de domo, con un radio relativamente pequeño en su extremo exterior para cortar el área del gálibo, cuyo diseño particular depende del fabricante de la TBM y de las condiciones específicas de la roca del proyecto. La cabeza cortadora es accionada por motores eléctricos con engranajes reductores o mediante motores hidráulicos, montados justo detrás de la cabeza cortadora o conectados con la flecha principal al final de la TBM.

La rezaga (escombros de la roca excavada) cae a la plantilla y es levantada por medio de canjilones construidos en la periferia de la cabeza cortadora. La rezaga permanece en los canjilones hasta alcanzar la clave, donde es

descargada hacia la banda transportadora, de la máquina. La combinación de raspadores (de acero) y canjilones, en número y tamaño suficientes, proveen una carga continua de la rezaga, así como una plantilla de tunel, limpia.

El diseño de la cabeza cortadora es producto de la experiencia acumulada a largo plazo por el fabricante de la TBM. Dando por resultado no solo la forma del frente y del área del gálibo, sino también del número y distribución de los cortadores, su espaciamiento y ángulos de corte, el número y tamaño de los canjilones de rezaga y sus canales. Todos estos aspectos contribuyen al éxito económico del proceso de excavación en roca dura. Generalmente el fabricante de la TBM propone el diseño más adecuado de la cabeza cortadora para las condiciones específicas esperadas de la roca en un nuevo proyecto, permaneciendo abierto a discusiones con el contratista o con el dueño. Esto puede llevar a compartir los riesgos del diseño técnico, entre el proveedor y el usuario, dando lugar en caso de falla a una situación contractual delicada.

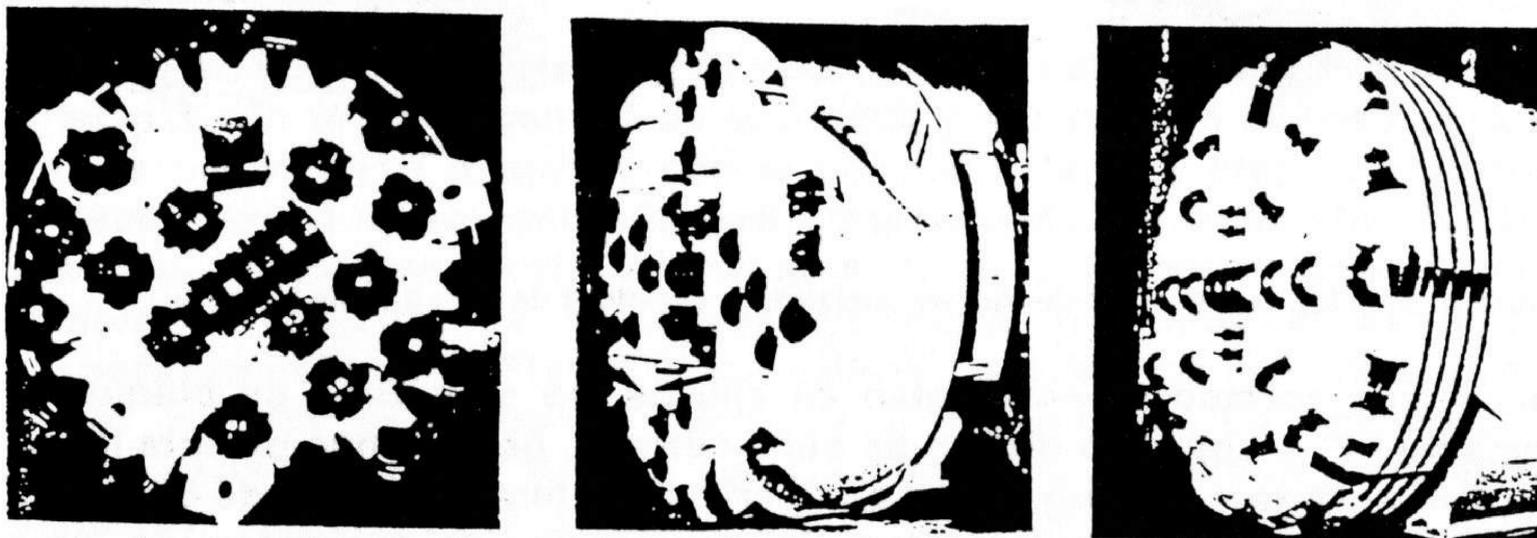


Figura 2. Diferentes diseños de la cabeza cortadora para TBMs abiertas para roca dura.

- A. Cabeza cortadora abierta con picas y cortadores de acceso - frontal.
- B. Cabeza cortadora con cara falsa (escudo soportador) y cortadores de acceso- frontal.
- C. Cabeza cortadora cerrada con cortadores de acceso-posterior.

Cortadores: La cabeza está vestida con discos cortadores de diferentes tipos: gemelos para la parte central y sencillos para el frente y para el gálibo. Las dimensiones estándar actuales para los discos cortadores corresponden a un diámetro de 17". En 1989 se construyó por primera vez una TBM con cortadores de 19" para perforar en granito y gneiss duro y abrasivo, en Svartisen, Noruega (1), la cual fue seguida en 1991 por la primera TBM con cortadores de 20", para un proyecto hidroeléctrico en

Klippen, Suecia (2). Desde entonces a la fecha, se han entregado 12 TBMs con cortadores de 19 y 20"; menos del 20% de las TBMs fabricadas durante ese mismo periodo (3).

La continua investigación y desarrollo de los discos cortadores, la metalurgia y el tratamiento térmico de sus anillos de corte han dado por resultado productos altamente confiables, que han alcanzado distancias rodantes de varios millones de kilómetros con un sólo anillo de corte. Sin embargo, la vida de un anillo de corte se encuentra fuertemente relacionada con la abrasividad de la roca.

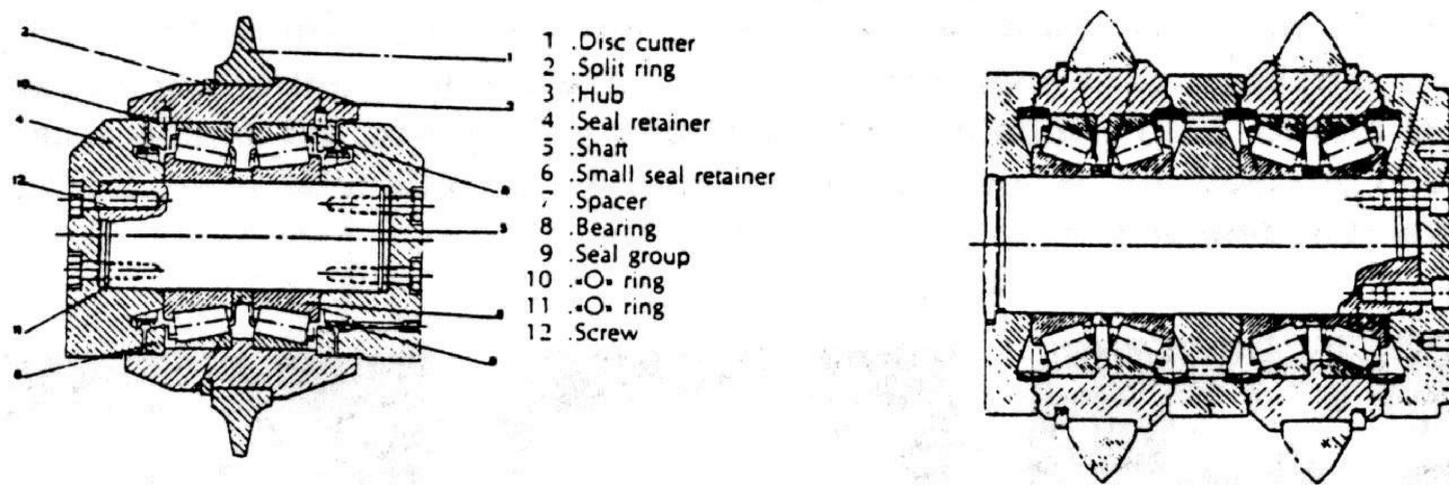


Figura 3: Sección transversal de discos cortadores estándar de 17", simple y doble.

Los discos cortadores se montan en silletas, ya sea como un bloque en forma de "V" o como un diseño de cuña cerrada, permitiendo de esta forma un fácil montaje y recambio desde la parte delantera o trasera, de la cabeza cortadora. Debido a reglamentos de seguridad, las máquinas de gran diámetro son construidas con un sistema de montaje trasero (montaje posterior). Los cortadores incorporan anillos de corte removibles. Los anillos desgastados o dañados pueden reemplazarse sin tener que desmontar totalmente el cortador, obteniéndose un uso mas económico.

El tiempo promedio perdido para el cambio de un cortador es en general de 20 a 50 minutos. Se han hecho pruebas con los llamados "Split-Set-Rings" "anillos de ajuste partido" con el propósito de cambiar el anillo de corte en la cabeza cortadora sin remover el cortador, y en consecuencia ahorrar parte del tiempo requerido para cambiar discos cortadores. Sin embargo, tales pruebas aún no han logrado el ahorro en tiempo y costo esperados (4).

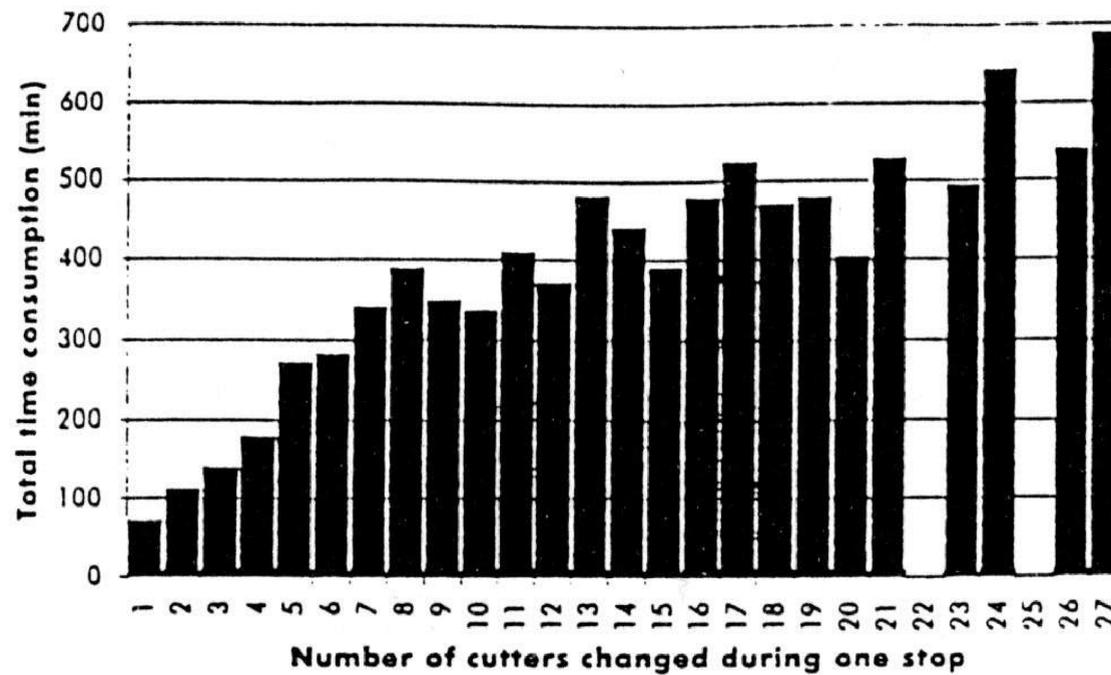


Figura 4. Tiempo promedio perdido en los cambios de cortadores: tiempo total perdido contra número de cortadores que han sido cambiados durante el paro de la excavación; TBM con un diámetro de 7.95 m, excavando en gneiss y esquisto.

Soporte de la cabeza cortadora: El soporte de la cabeza cortadora y la viga principal son la parte central de una TBM y constituyen la base para las demás partes de la máquina, con la porción delantera proporcionando el espacio para el rodamiento principal. Dependiendo del diseño básico de la máquina, los motores accionadores se instalan en el área delantera o en la trasera del soporte de la cabeza cortadora, (ver alternativas A y B respectivamente, de la Figura 5). La cabeza cortadora es accionada por un cierto número de motores eléctricos o hidráulicos. La velocidad de accionamiento variable para la cabeza cortadora es factible para ambos sistemas, el eléctrico y desde luego el hidráulico, sin embargo, ambos sistemas poseen sus ventajas y desventajas típicas.

Sistema sujetador y de empuje: Existen dos sistemas básicamente diferentes: las máquinas de asimiento doble con dos sistemas sujetadores fijos, y las máquinas de asimiento único con sujetadores adicionales frontales deslizantes (zapatas de soporte expandibles). Estas últimas avanzan simultáneamente con el proceso de perforación, el cual es responsable del proceso de estabilización de la cabeza cortadora. Estas zapatas de soporte lateral cubren una gran superficie de la pared del túnel, con el fin de eliminar deformaciones del terreno, causando de esta forma cierta fricción en la pared del túnel que debe ser compensada con el empuje de la máquina (aproximadamente un 10% del empuje total). En ambos sistemas los sujetadores fijos son responsables de compensar la reacción del par de torsión.

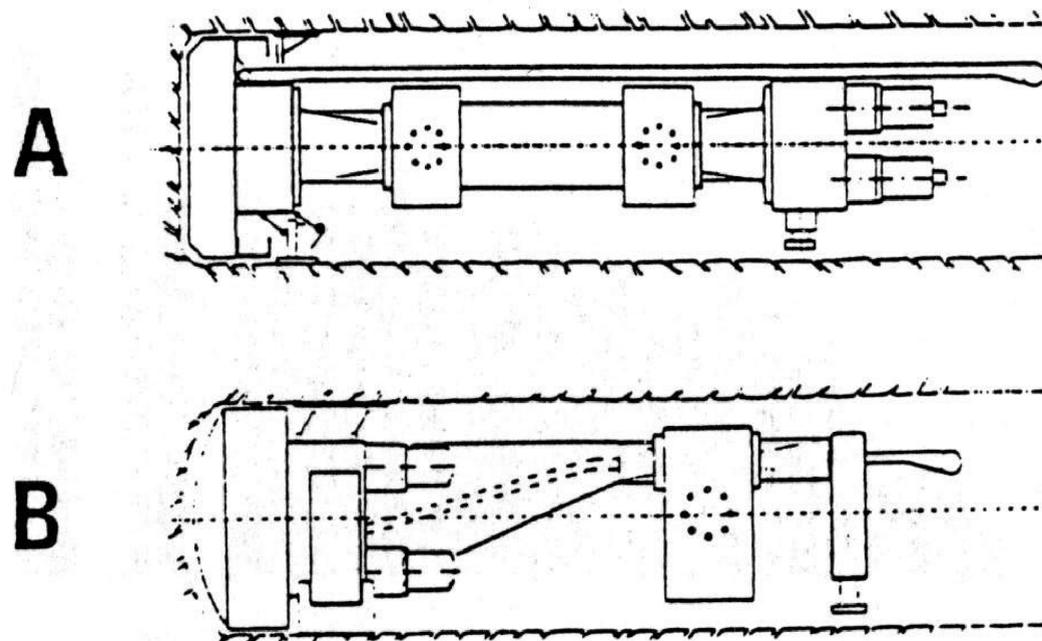


Figura 5: Dos diferentes arreglos de TBM.

A: Máquina con doble sistema sujetador y con unidades motrices en la parte trasera.

B: Máquina de asiento único con zapatas frontales expandibles y deslizantes, y unidades motrices detrás de la cabeza cortadora.

MÁQUINAS PERFORADORAS DE TÚNELES, CON ESCUDO.

Si las condiciones de la masa rocosa son poco favorables y demandan soporte sistemático, existe una alternativa para las TBMs abiertas para roca dura: las TBMs con escudo. Las TBMs con escudo pueden dividirse en TBMs de escudo sencillo y de escudo doble (ó telescópicas). Con la cabeza cortadora al frente, la parte restante de estas máquinas se integra en una "estructura cilíndrica de acero". En la sección final del escudo -cola o faldón- que es una área protegida, se instala el soporte inicial del túnel mediante un anillo de dovelas de concreto, y algunas veces el revestimiento final del túnel.

Las TBMs de un solo escudo no tienen sistema sujetador. La reacción de la TBM -para empujar el escudo hacia adelante y para presionar la cabeza cortadora- se apoya en el revestimiento de dovelas de concreto detrás de la TBM, y se hace efectiva mediante un cierto número de cilindros de empuje (ó gatos hidráulicos) posicionados circunferencialmente. El funcionamiento típico se da de la siguiente manera:

1. Perforar la longitud de un sólo avance (la TBM con escudo es empujada hacia adelante por los cilindros de empuje o gatos hidráulicos).
2. Parar la máquina y retraer los cilindros de empuje.

3. **Instalar las dovelas prefabricadas de concreto, en el espacio libre que se encuentra en el faldón del escudo para formar un anillo completo de dovelas.**
4. **Apoyar los cilindros de empuje contra el nuevo anillo de dovelas instalado y empezar a perforar el siguiente avance.**

El espacio dejado como tolerancia entre la pared del túnel y el anillo de dovelas de concreto erigido se llena con mortero y/o gravilla, ya sea a través de agujeros de inyección prefabricados en las dovelas o a través de aberturas de inyección instaladas en el faldón del escudo.

El proceso de tunelaje con una TBM de un solo escudo es un procedimiento típico de paro y avance, con el paro dedicado a la erección de las dovelas de concreto prefabricadas y el avance exclusivo para la colocación del siguiente anillo. El tiempo promedio para instalar un anillo es de 20 a 40 minutos.

Este paro y avance típico se optimiza a un procedimiento casi continuo con la TBM de escudo doble. Este procedimiento de tunelaje casi coincide con el procedimiento ya conocido de las TBMs abiertas: sólo perforando y resujetándose. Las TBMs de escudo doble consisten de un escudo frontal, que incluye el soporte de la cabeza cortadora y las unidades motrices, y el escudo posterior con los dispositivos de sujeción y de reacción.

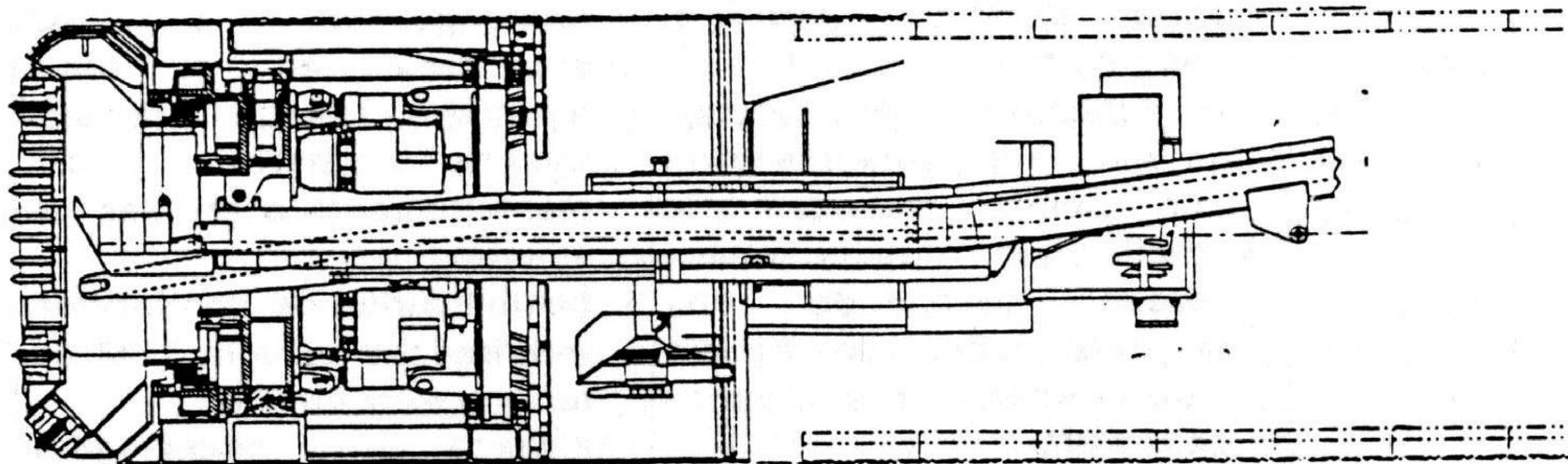
Los dos escudos se combinan por medio de la sección telescópica permitiendo de esta forma que el escudo frontal avance conforme al proceso de perforación, mientras que el escudo posterior permanece en el mismo lugar, ofreciendo el tiempo necesario para la erección del anillo de dovelas, sin que exista una interrupción del proceso de perforación. Avance tras avance el escudo posterior se resujeta de la misma forma en que lo hace una TBM abierta.

Las TBMs de escudo doble tienen una ventaja adicional, en caso de un terreno muy pobre -cuando la sujeción a las paredes laterales por parte de los sujetadores del escudo posterior ya no es posible- la TBM puede ser accionada como una TBM de un solo escudo. De esta forma la TBM reacciona directamente contra el revestimiento de dovelas, mediante los cilindros auxiliares de empuje que se encuentran posicionados circunferencialmente, sin la activación de la parte telescópica del escudo.

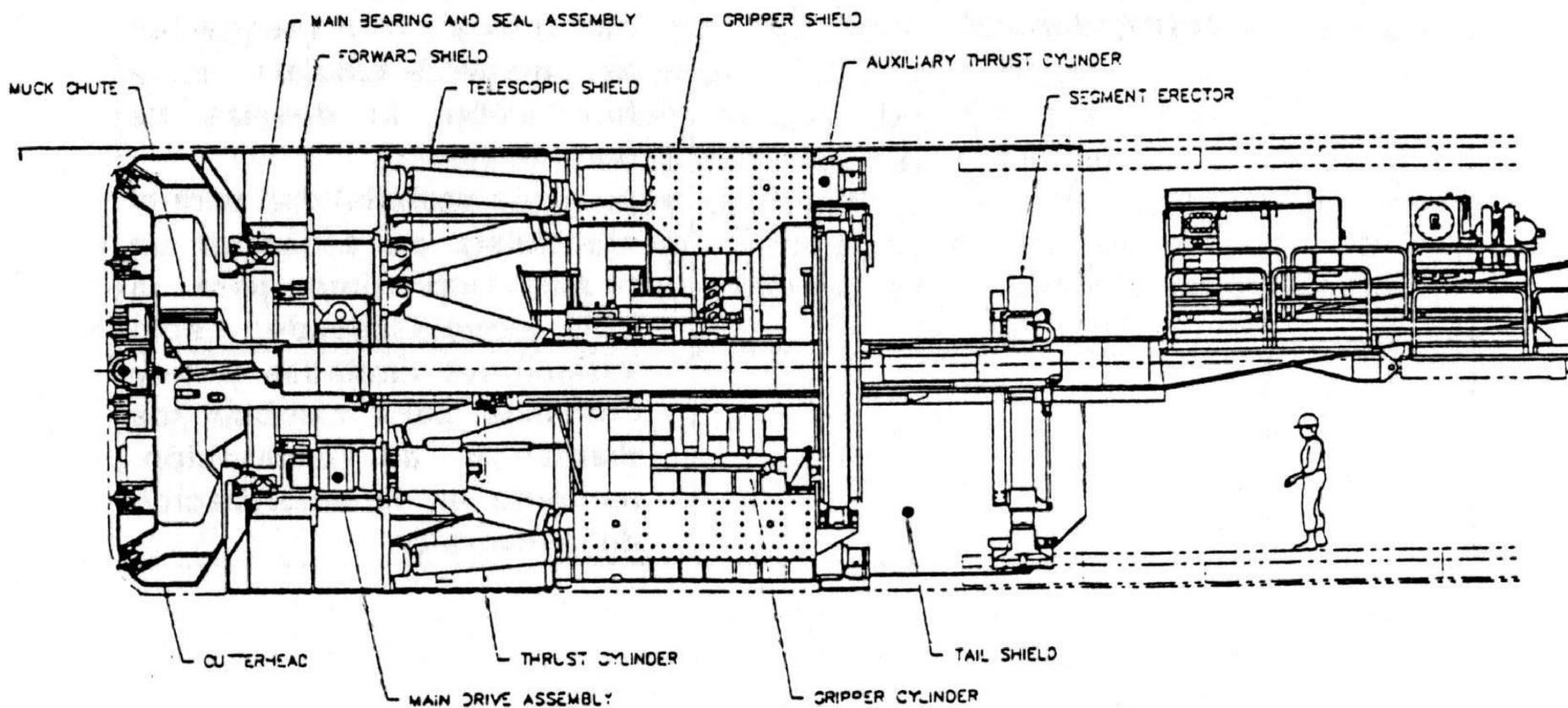
Ventajas y desventajas generales de las TBMs abiertas y las TBMs con escudo.

	Ventajas	Desventajas
TBM abierta	<ul style="list-style-type: none"> • lista para un rendimiento óptimo de tunelaje y avance • soporte temporal de la roca de acuerdo a la demanda real local, con la posibilidad de ser reforzada en una etapa posterior si se considera necesario • un acceso más fácil a la frente del túnel y paredes laterales, para consolidación e inyección o trabajos de sellamiento • un fácil control del comportamiento de la masa rocosa en combinación con mediciones geotécnicas, opción para optimizar el diseño del revestimiento final • opción para un diámetro variable de excavación • la inversión en equipo de tunelaje puede distribuirse en varios proyectos de túneles, con una fácil reconstrucción de la TBM para diferentes diámetros 	<ul style="list-style-type: none"> • procedimiento de tunelaje que demanda una gran flexibilidad para acomodar el trabajo de apoyo al túnel, así como la logística de la situación real • el soporte integral (costoso) temporal de la roca a pesar del recubrimiento final • bajo rendimiento de producción en condiciones de masa rocosa de calidad pobre, comparada con las TBMs con escudo • no existe un 100% de garantía de no atascarse con la TBM en zonas con fallas o con grandes convergencias • problemas de sujeción y conducción en terrenos de calidad pobre o en formaciones de roca muy blanda

	Ventajas	Desventajas
TBM con escudo	<ul style="list-style-type: none"> • proceso de tunelaje muy sistemático que permite una "curva de aprendizaje" de corta duración para el contratista • el desempeño del tunelaje es casi independiente para una amplia variedad de condiciones de la masa rocosa, resultando una eficiente rutina de trabajo para la operación y logística de la TBM • acceso sistemático y seguro para el revestimiento del túnel, no hay discusiones para seleccionar las diferentes clases de soporte de la roca y sus variaciones locales • condiciones seguras de trabajo laboral 	<ul style="list-style-type: none"> • riesgo de quedar atorado con el escudo debido a fenómenos de gran convergencia o de expansión, en el túnel excavado (riesgo principal durante paros para mantenimiento o en días de asueto) • posibilidades de conducción restringidas para la TBM en terreno muy blando • alcance conservador (costoso) en el diseño del soporte del túnel (dovelas): relacionado a la cobertura de condiciones pobres de la masa rocosa, y en consecuencia sobre-diseño en las secciones más favorables del túnel • aumento en la investigación del equipo de tunelaje y en la fabricación de dovelas de concreto • pequeña probabilidad para el contratista de encontrar un proyecto próximo para la TBM con escudo, sólo variaciones limitadas y muy costosas para cambiar los diámetros de excavación: aumento en la amortización de la inversión



TBM de un solo escudo
(Diámetro de excavación 4.3 m)



TBM de doble escudo
(Diámetro de excavación 6.5 m)

Figura 6. Secciones transversales típicas para TBMs de uno y de doble escudo, debiéndose colocar en ambas un revestimiento de dovelas prefabricadas de concreto.

PRE-INVESTIGACIONES GEOLÓGICAS Y GEOTÉCNICAS PARA LA EXCAVACIÓN DE TÚNELES MEDIANTE TBM.

Existe la misma demanda estándar para pre-investigaciones de tunelaje con TBM como para el método convencional de barrenación y voladura, sin embargo, con algunos aspectos adicionales específicos que deben considerarse. Los estudios previos no sólo deben permitir un diseño adecuado del proyecto, incluyendo la valoración preliminar del método de tunelaje, el programa de construcción y el costo global del proyecto, para conocimiento general del dueño del proyecto, sino los estudios también deben dar por resultado un trabajo exhaustivo de los documentos de concurso, de una manera adecuada para el tunelaje con TBM.

Clasificación de la masa rocosa: La masa rocosa debe ser clasificada en base a lo encontrado en las investigaciones de campo y en las perforaciones exploratorias a lo largo del trazo del túnel. Se recomienda utilizar sistemas de clasificación que sean bien conocidos como el "Rock Mass Rating", (RMR-System) de BIENIAWSKI (5) o el Sistema "Q", (Q-system) de Barton (6), a pesar de que estos sistemas estén basados en el método de barrenación y voladura (ByV). La experiencia de muchos proyectos TBM ha mostrado que, cuando se utiliza el tunelaje mediante TBM en vez de ByV, la clasificación de la masa rocosa por encontrarse, es generalmente mejor por una clase, debido esto a un proceso de excavación más preciso y cuidadoso por parte de los cortadores de la TBM en comparación contra las vibraciones rudas de la voladura. Para definir las diferentes clases de masa rocosa en un túnel excavado por una TBM, es sin embargo algo más difícil, debido a que existe un acceso limitado a la información necesaria de las discontinuidades y en consecuencia la valuación precisa de la clase, es a menudo más difícil.

Perforabilidad de la roca: Este es el principal aspecto específico relacionado con el tunelaje mediante TBM. Esto significa que los estudios previos tienen que describir la perforabilidad de la roca a través de parámetros mecánicos específicos de la roca y análisis petrográficos, con el fin de permitir la asignación correcta del rendimiento de la TBM: la relación de penetración de la TBM y el consumo de cortadores debido a la abrasividad de la roca.

Generalmente se recomienda aplicar los parámetros mecánicos estándar de la roca, como la resistencia a la compresión no confinada, la resistencia a la tensión medida indirectamente por la prueba Brasileña o el Índice de Carga Puntual, -ambas siguiendo los procedimientos de prueba recomendados por la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas ISRM. La relación entre los esfuerzos de compresión y tensión de un tipo de roca: la tenacidad de la roca presenta una información interesante sobre su perforabilidad: a mayor tenacidad de la roca menor perforabilidad.

El objetivo de los ensayos de laboratorio durante la etapa de pre-investigación es realizar un número representativo de pruebas para determinar el valor medio y el rango de variación de los diferentes parámetros mecánicos de la roca y que éstos se encuentren disponibles para cada tipo relevante de roca en el proyecto de tunelaje. En el caso de que falten resultados de pruebas, pueden aceptarse valores estimados de la resistencia de la roca y su rango de variación. Estos datos pueden ser estimados por el geólogo del proyecto o cualquier otra persona bien experimentada. Esta información incluida en los documentos de concurso tiene que permitir al postor basar su propio cálculo para el desempeño del tunelaje con la TBM y el costo de los cortadores, mediante valores medios relevantes.

ASPECTOS BÁSICOS DEL DISEÑO PARA PROYECTOS DE TUNELAJE CON TBM.

El diseño inicial para un proyecto de túnel se basa normalmente en una TBM abierta y en combinación con medidas del soporte inicial de la roca, seguida por el revestimiento final mediante concreto colado en el sitio. Tal procedimiento permite una observación cuidadosa del comportamiento de la masa rocosa y la instalación pertinente para el soporte inicial de la roca. Esto último generalmente consiste de pernos de anclaje, malla de alambre y concreto lanzado, y en terreno muy pobre o convergente, así como en zonas de falla, soporte mediante marcos de acero.

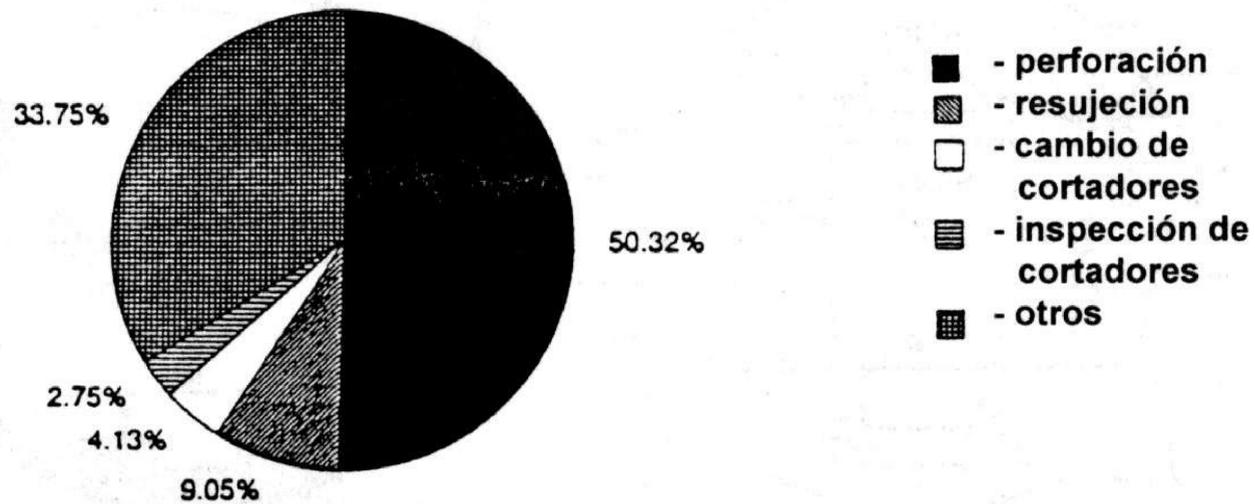
Las diferentes clases de soporte inicial de roca pueden ser definidas por el Ingeniero diseñador, describiendo el lugar y la cantidad de material de soporte inicial para roca que debe ser instalado por el contratista. En consecuencia estas clases son incluidas dentro del presupuesto, para su pago.

Para el trabajo de soporte se recomienda dividir, por una parte las medidas a tomar en el área de la TBM (detrás de la cabeza cortadora) tan rápido y cerca como sea posible, detrás de la frente del túnel y por otra parte, para aquéllos que pueden ser instalados desde una plataforma detrás de la TBM, aproximadamente de 12 a 15 m detrás de la frente del túnel.

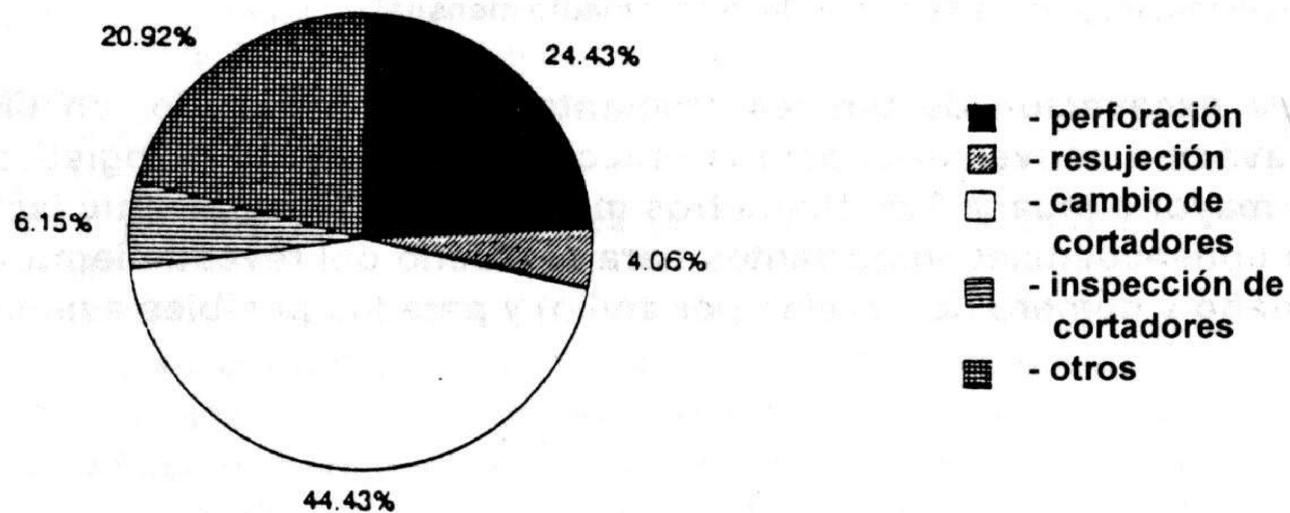
La colocación de abundante soporte que se debe realizar inmediatamente detrás de la cabeza cortadora puede llevar a tiempos de espera considerables para la TBM, especialmente cuando se combina con el lanzado de concreto. La colocación sistemática de pernos de anclaje, aún en grandes cantidades, puede ser posible durante las operaciones normales de perforación, de la TBM eliminando tiempos de espera. La experiencia de muchos proyectos ha mostrado que es más productivo y presenta una mejor solución económica, especificar un sistema de diseño de soporte que

básicamente demande instalaciones sistemáticas, de pernos de anclaje, malla de alambión y aún marcos de acero detrás de la cabeza cortadora, pero seguido de concreto lanzado desde la plataforma de trabajo que está detrás de la TBM.

Todas éstas definiciones para las clases de soporte de la roca deben prepararse por el ingeniero proyectista y por lo tanto deben ser incluidas en los documentos de la oferta. La siguiente figura ilustra el significado de los principales aspectos como: resistencia de la roca, condiciones de la masa rocosa, abrasividad de la roca.



Proyecto de roca suave (filita) con condiciones favorables de la masa rocosa, pero con problemas de logística (otros).



Roca dura y de gran abrasividad (cuarcita) con una cantidad extremadamente alta de cambios de cortadores.

Figura 8: Gráficas típicas de desempeño para proyectos de tunelaje con TBMs abiertas.

Desde luego que hay algunos aspectos limitantes en cuanto a las dimensiones que se deben considerar para el éxito de una excavación en túnel. El diámetro de la excavación para TBMs abiertas debe ser mayor o

igual a 3.0 m para proyectos de túnel de gran longitud. Este diámetro permite un sistema de apoyo de doble vía y en consecuencia un manejo eficiente de materiales y logística en general, para el trabajo en el túnel incluyendo el espacio suficiente para una línea de ventilación con un tamaño mínimo de 600 mm, instalada a lo largo del túnel. Los diámetros menores a 1.8 m son factibles, pero el reducido espacio disponible para transporte y ventilación, prácticamente pondrá límites a la longitud del túnel, así como a los posibles avances diarios del tunelaje.

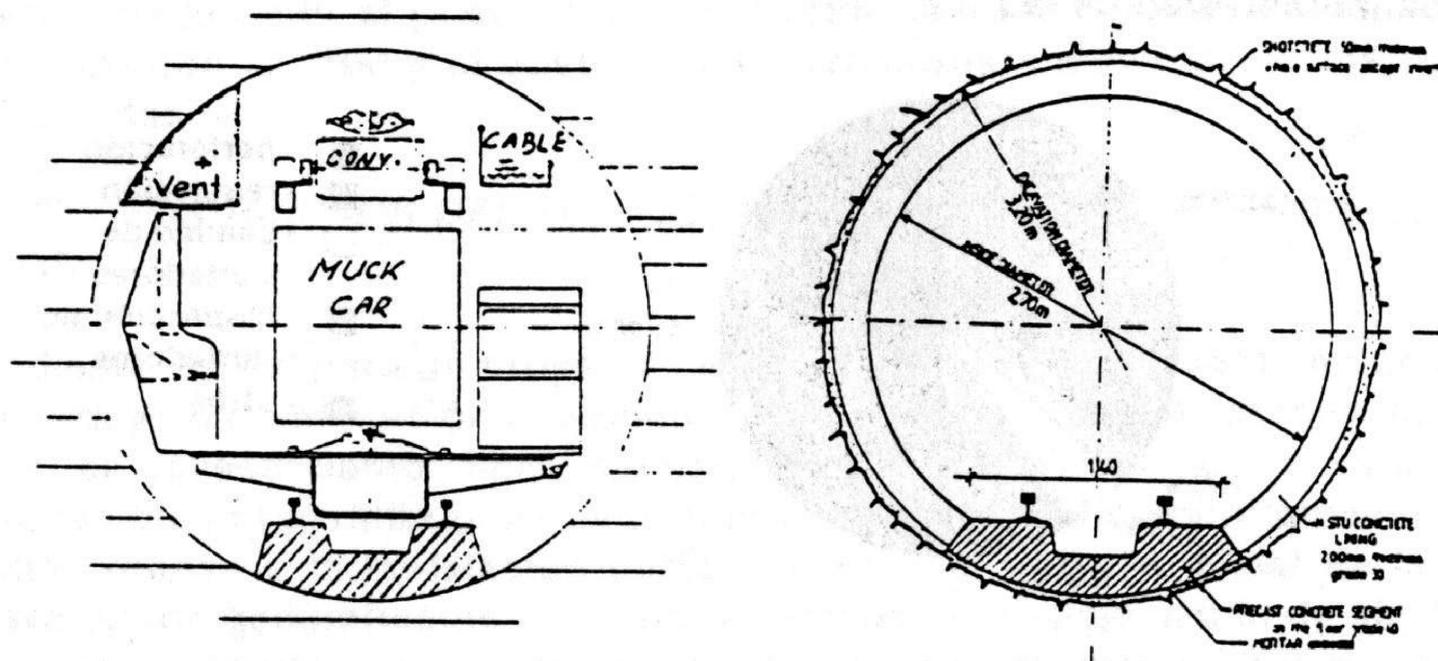


Figura 9: Sección transversal típica para diámetros pequeños de tunelaje con una TBM abierta (\varnothing 3.2 m) con sistema de doble vía de apoyo, permitiendo altos rendimientos de producción, mayores a 40 m por día, en promedio mensual.

En la excavación de túneles mediante TBM con escudo, un diámetro de excavación conveniente para la erección de dovelas y la logística, se juzga sea mayor o igual a 5 m. Diámetros menores son técnicamente factibles pero con consecuencias importantes para el diseño del revestimiento de dovelas (tamaño y número de dovelas por anillo) y para los posibles avances.

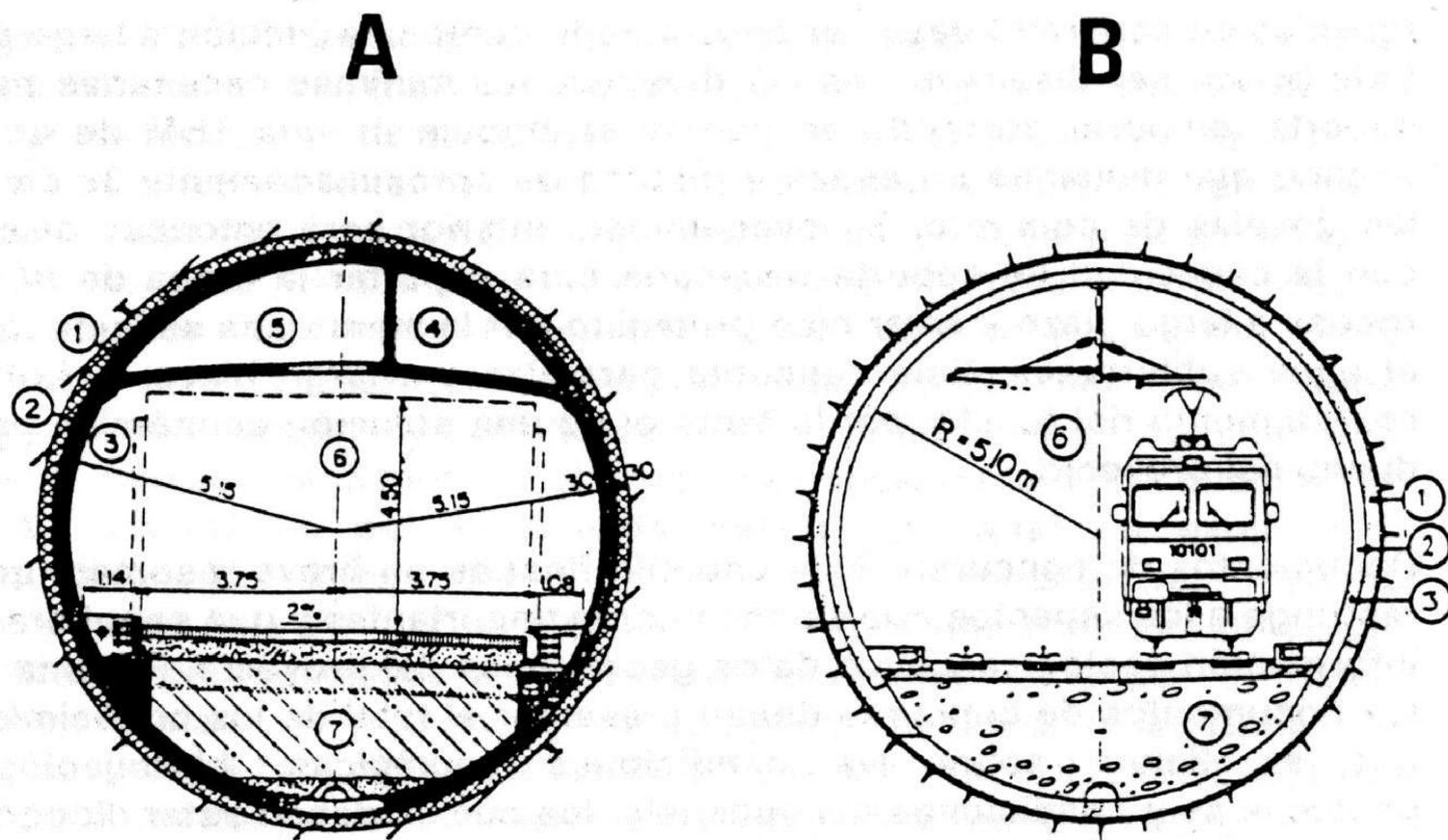


Figura 10: Sección transversal típica para:

A: Túnel carretero para autopista en Suiza (N8.- Sachsein). Excavación mediante TBM de un solo escudo, de 11.7 m de diámetro

B: Túnel de ferrocarril en Suiza (Zürichberg), excavación mediante TBM de un solo escudo, de 11.7 m de diámetro

1. Soporte de la roca mediante dovelas de concreto precolado
2. Membrana selladora
3. Revestimiento de concreto colado en sitio
4. Canal del aire fresco
5. Canal del aire viciado
6. Área del gálibo
7. Cubeta del túnel rellena con roca producto de la excavación, que incluye drenaje.

En túneles de gran diámetro (mayores a 10.0 m) las TBMs con escudo se vuelven cada vez más populares, debido principalmente al soporte temporal para la roca, necesario y demostrable y a los aspectos de seguridad para los trabajadores y el equipo. Al soporte inicial de la roca mediante dovelas de concreto le sigue una membrana selladora (si esto es necesario) y finalmente el revestimiento definitivo de concreto colado en sitio. Este último incluye la plataforma alejada y las instalaciones auxiliares necesarias como el sistema de ventilación, drenaje e instalaciones de seguridad, etc. Tal diseño es muy común en grandes túneles carreteros y también de ferrocarril, cuando atraviesan estratos rocosos portadores de agua.

La experiencia de proyectos recientes ha mostrado, que el soporte inicial

(dovelas de concreto) debe ser considerado como una función a largo plazo. Este puede ser diseñado con las dimensiones mínimas necesarias para el soporte temporal, tomando en cuenta el empuje de una TBM de un solo escudo que demanda un espesor mínimo de aproximadamente 30 cm para las dovelas de concreto. El revestimiento interior será entonces diseñado con la capacidad de soporte necesaria para soportar la carga de la masa rocosa a largo plazo y estar bien protegido por la membrana sellante, contra el agua subterránea. Este concepto garantizará a largo plazo el éxito del revestimiento del túnel y por lo tanto el de una solución económica para el dueño del proyecto.

Documentos de concurso: Este capítulo final es un breve resumen, que se restringe a los aspectos que se consideran importantes y que se refieren a la información geológica y a los datos geotécnicos del proyecto. Por una parte los documentos de concurso deben presentar el total de los conocimientos que se tienen sobre las condiciones geológicas, hidrogeológicas, geotécnicas y condiciones del subsuelo, los cuales deben estar disponibles para el dueño del proyecto y sus representantes, en el momento de la propuesta. Esta información refleja los resultados de las pre-investigaciones del proyecto. El contratista, por otra parte, debe pedírsele que base su propuesta en los datos que se han puesto a disposición del dueño del proyecto y en su propia inspección y examen.

Muchas de las demandas legales en los proyectos de tunelaje con TBM están relacionadas principalmente con “cambios en las condiciones geológicas divulgadas”.

En otras palabras, el modelo esperado de la geología como se presenta y describe en la etapa propuesta por el dueño del proyecto difiere de la situación real encontrada durante la excavación del túnel. Es entendible que un modelo nunca pueda describir la naturaleza tan precisa como esta es en realidad, por lo que las diferencias tienen que aceptarse. Pero estas diferencias tienen que juzgarse en base a las consecuencias que tienen sobre los trabajos a desarrollar por parte del contratista, algunas son significativas mientras que otras pueden no tener un mayor efecto sobre los costos y el trabajo de tunelaje.

La variación en las condiciones de la masa rocosa generalmente son cubiertas por las diferentes clases de soporte de roca por asignar. Pueden darse excepciones mediante la ocurrencia de suelo inestable o desgranable en el área de la frente del túnel, demandando un túnel de paso, alterno y/o la consolidación exhaustiva del suelo, o trabajos de drenaje. Tales puntos no son incluidos comúnmente en el presupuesto, o en su precio unitario.

Las diferencias en la ocurrencia relativa (porción respecto a la longitud total

de tunelaje) de los tipos de roca encontrados pueden ser cubiertas en el presupuesto por diferentes clases de perforabilidad, pero podría resultar en documentos muy exhaustivos para proyectos de túnel con una gran variedad de tipos de roca. Sin embargo, si el valor medio de la resistencia y/o abrasividad de la roca de un tipo específico de roca difiere del valor indicado en los documentos de propuesta -situación que ocurre frecuentemente- entonces las consecuencias para el desempeño de la excavación y los costos (conceptos de pago) pueden ser recalculados, basándose en reglas y publicaciones internacionales generalmente aceptadas que se relacionen con el problema considerado. En el inicio de un proyecto importante, se recomienda definir un panel de expertos - representantes del dueño del proyecto y del contratista- para discutir amigablemente este tipo de problemas y encontrar una solución sin litigar. Este mismo procedimiento es comúnmente recomendado por el Banco Mundial, como adición a la obligación de aplicar las Condiciones Generales Contractuales del FIDIC (FEDERATION INTERNATIONALE DES INGENIEURS-CONSEILS), el cual presenta bases muy útiles para un contrato de tunelaje.

6. Engineering Practice, ASTM STP 664, 1986, pp 17-24
7. BARTON N.: Rock Mass Classification and Tunnel Reinforcement Selection Using the Q-System, ASTM STP 664, 1986, pp 33-49
8. NTH: Hard Rock Tunnel Boring, University of Trondheim - The Norwegian Institute of Technology, Project Report No. 1-84, 1984
9. VALANTIN A.: Test Centre pour la durée et de l'abrasivité des roches; Annexes de l'exposé aux Journées de Information "Technique de Creusement", Nov. 1973 Luxembourg
10. SCHMAZER J.: Der Einfluss des Gesteinsaufbaus auf die Schnittgeschwindigkeit und den Messelverschleiß bei Streckenortfahrbauarbeiten; Ostschweiz 1979
11. NATAU O.: Estimation of the cutting rates and the bit wear of parallel face tunnelling machines; ISBN - Intern. Kongress Aachen, Deutschland 1981, pp 1591 ff.
12. BEHRING K.H.: Leistungs- und Verschleißprognosen an maschinellen Tunnelbau; Felsbau 13 1985 Nr. 6 pp 436-448
13. BÜCHER E., MATHER J.F., WYSS Ch.: Gesteinsabtrag mit ein bedienter Kostenträger beim mechanischen Abbau von Fest- und Lockergestein; Tunnel 1985 (1986), pp 33-44
14. STROCKFISER A.: Die Klassifikation der Erdbestände; Geol.

BIBLIOGRAFIA

- 1 **DEERING K.:** Five TBMs on Svartisen Hydro Project; R&D Tunnel Division, The Robbins Company, 1992
- 2 **BÜCHI E.:** New TBM generation with 20" cutters - Tunnelling experience at Klippen Hydropower Sweden; TBM Symposium - Lucia 1992 Stockholm, Sweden
- 3 **BÜCHI E.:** TBM Schneidrollen - Einflüsse auf die Vortriebsleistung; TBM Know How zum Projekt NEAT - Symposium Luzern - Atlas Copco Robbins, 16. März 1995
- 4 **BÜCHI E.:** Hydropower Project at Klippen - Sweden, TBM Tunnelling Results - Final Report; Nr. A9278-7, 25 January 1995, not published
- 5 **BIENIAWSKI Z. T.:** The Rock Mass Rating (RMR) System in Engineering Practice; ASTM STP 984. 1988, pp 17-34
- 6 **BARTON N.:** Rock Mass Classification and Tunnel Reinforcement Selection Using the Q-System; ASTM STP 984. 1988, pp 59-88
- 7 **NTH:** Hard Rock Tunnel Boring; University of Trondheim - The Norwegian Institute of Technology, Project Report No. 1-94, 1994
- 8 **VALANTIN A.:** Test Cerchar pour la dureté et de l'abrasivité des roches; Annexe de l'exposée aux Journée de Information "Technique de Creusement", Nov. 1973 Luxembourg
- 9 **SCHIMAZEK J.:** Der Einfluss des Gesteinsaufbaus auf die Schnittheschwindigkeit und den Meisselverschleiss bei Streckenvortriebsmaschinen; Glückauf 106, 1970
- 10 **NATAU O.:** Estimation of the cutting rates and the bit wear of partial-face tunnelling machines; ISRM - Intern. Kongress Achen, Deutschland, 1991, pp 1591 ff
- 11 **GEHRING K.H.:** Leistungs- und Verschleissprognosen im maschinellen Tunnelbau; Felsbau 13 1995 Nr. 6 pp 439-448
- 12 **BÜCHI E. MATHIER J.F. WYSS Ch.:** Gesteinsabrasivität - ein bedeutender Kostenfaktor beim mechanischen Abbau von Fest- und Lockergestein; Tunnel 5/95 (1995) pp 38-44
- 13 **STRECKEISEN A.:** Die Klassifikation der Eruptivgesteine; Geol.

Rundschau Bd. 55, pp 478-491, 1965

- 14 **STRECKEISEN A.: Classification and Nomenclature of Volcanic Rocks, Lamprophyres Carbonates and Melititic Rocks; Jahrbuch für Mineralogie Bd. 134, 11 -14, 1978**
- 15 **SUANA M. PETERS Tj.: The Cerchar Abrasivity and its relation to rock mineralogy and petrography; Rock Mechanics 15, 1-8, 1982**
- 16 **NTH: Hard Rock Tunnel Boring; University of Trondheim - The Norwegian Institute of Technology, Project Report No. 1-83, 1983**
- 17 **NTH: Borbarhet - Katalog over borbarhetsindekser; University of Trondheim - The Norwegian Institute of Technology, Project Report No. 13-90, 1990**

2. EXPERIENCIA DE EXCAVACIÓN MECANIZADA EN FORMACIONES VOLCÁNICAS (DEL PLIOCUATERNARIO)

Ing. Enrique Lavín Higuera

La experiencia a la cual me referiré, es relativa al Túnel 5 del Acuaférico, en su tercera etapa. Está ubicado al Sur de la Cd. de México, en las Delegaciones de Tlalpan y Xochimilco, y tiene una longitud de 10.6 km.

El portal de entrada se localiza en las faldas del Xitle por el lado de la carretera al Ajusco, y el portal de salida se encuentra entre los poblados de Topilejo y San Francisco Tlanepantla.

ESCENARIO GEOLÓGICO.

El túnel 5 del Acuaférico se encuentra alojado en la Sierra del Chichinautzin, formación que tuvo una gran actividad volcánica.

PERFIL GEOLÓGICO.

En la extensión del túnel se tiene dos domos los cuales aparecieron hace aproximadamente tres millones de años. Estos domos llamados Tlalpuente y Mirador, están formados de lavas dacíticas de consistencia media.

Hace aproximadamente 700 mil años, hubo intensa actividad eruptiva de lava basáltica, con intercalaciones entre flujos, sucesivos, le sobreyacen las lavas del Xitle: y al domo del Mirador le sobreyecen: al Este, las lavas del Oyameyo al Oeste, las lavas del Olican.

DETERMINACIÓN DEL PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO.

El contratante de la Obra la Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica del Departamento del Distrito Federal, desarrolló el proyecto y con esa información, convocó a concurso.

De entre los estudios preliminares, efectuó el reconocimiento geológico la geofísica y 27 sondeos exploratorios con recuperación de núcleos. La calidad geotécnica de las unidades fue clasificada con los métodos de Deere, Barton y Bieniawski.

Con esta información, era evidente que la estabilidad y el comportamiento de las diversas formaciones serían una dura prueba para el desempeño de la tunelera, y que en importante proporción de la longitud del túnel, se tendría inestabilidad en la sección de excavación.

Por la existencia de materiales sueltos no cementados, se previó la

ocurrencia de caídos, desde desprendimientos sistemáticos hasta caídos importantes de alto riesgo y prolongada laboriosidad.

Además se consideró la problemática de los accidentes geológicos tales como: fallas, contactos, derrames y brechas.

Una vez adjudicado el contrato, el procedimiento constructivo fue determinado bajo la rectoría de las siguientes premisas:

- a) Instalación de soporte lo más inmediato posible.**
- b) Certidumbre de la eficiencia del soporte instalado.**
- c) Versatilidad para afrontar todo tipo de situaciones.**
- d) Productividad acorde al programa contractual.**

El procedimiento constructivo óptimo se representa en la siguiente figura, y se denomina "excavación con dovela de piso continua y revestimiento colocado in situ".

PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO.

Definido el procedimiento constructivo y conocidas las diversas solicitudes, se convocó a concurso a varios fabricantes para el suministro de la máquina, habiéndose adjudicado el contrato a la empresa norteamericana Borettec.

RESULTADOS OBTENIDOS.

El túnel constituye la primera experiencia a nivel mundial en excavaciones con topo en formaciones volcánicas de esta naturaleza.

Ha atraído la atención y visita de fabricantes de topes, que concurren para evaluar el comportamiento de la máquina. El personal mexicano que ha llevado a cabo la obra, ha merecido el reconocimiento de connotados técnicos nacionales y extranjeros.

En términos generales los resultados han sido muy satisfactorios tanto para el contratante, la Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica, como para nosotros como propietarios de la máquina.

Las lavas dacílicas de los domos con fracturamiento en varios planos, resultaron competentes para la excavación del topo.

Las lavas basálticas con intercalaciones de escorias, fueron excavadas por el topo a un ritmo medio debido a las precauciones propias del caso por la instalación de soporte, pero sin mayores problemas.

Las brechas de bloques fueron problemáticas con caídos importantes, pero en localizaciones puntuales. Los bloques afectaron y dañaron a la máquina en varias ocasiones.

Por su extensión, la formación más problemática para el avance del topo fue el lahar caliente. Su característica distintiva es la ausencia de cementación entre sus partículas, compuestas de piroclastos: arenas, gravas y bloques.

El desempeño del topo está resumido en la gráfica siguiente. La producción media fue de 350 m/mes.

GRÁFICA DE PRODUCCIÓN MENSUAL.

Las máximas producciones son las siguientes:

los 3 mejores días	87.94 m	81.74 m	77.46 m
las 3 mejores semanas	301.82 m	275.97 m	270.20 m
los 3 mejores meses	764.20 m	748.06 m	701.63 m



3. CAUSAS QUE PUEDEN PROVOCAR PAROS NO PROGRAMADOS, DURANTE LA EXCAVACIÓN MECANIZADA DE TÚNELES EN ROCA.

Juan J. Schmitter M.

INTRODUCCIÓN.

La excavación mecanizada de túneles, se centra en el desempeño de las "Máquinas perforadoras de túneles", (Tunnel Boring Machines, TBM), que actualmente presentan un notable desarrollo, tanto en suelos como en rocas.

Las TBM para rocas, comúnmente llamadas 'Topos', han alcanzado un alto índice de aceptación en muchos de los grandes proyectos tuneleros del mundo, en especial para túneles largos y de sección transversal circular, con diámetros comprendidos entre 1 y 14 metros.

Cuando la roca es sana y estable, los Topos presentan un desempeño muy favorable para la obra en túnel, simplificándose los procedimientos de construcción y acortándose los tiempos de ejecución, lo cual representa una favorable combinación para la reducción de los costos, en especial los indirectos asociados a la duración total de la obra.

Cuando las rocas están alteradas y las condiciones geomecánicas del medio excavado, no garantizan la estabilidad del túnel, los Topos pudieran no representar la mejor alternativa de tuneleo, siendo entonces necesario contemplar alguna otra, no mecanizada.

Reconociendo que la solución mecanizada puede ofrecer notorias ventajas económicas, asociadas a la velocidad de ejecución, aún en la situación de rocas desfavorables, es de entenderse que los fabricantes de Topos los estén dotando ahora de nuevos accesorios y capacidades, para poder construir con efectividad, túneles en terrenos rocosos de estabilidad precaria.

El alto rendimiento que tienen los Topos, con avances mensuales superiores a un kilómetro, (avances diarios superiores a 50 metros), hace aún más notorio el doble efecto negativo de los "paros", ya que al tiempo que se suspende el avance del túnel en ciertos tramos de geología difícil, se cancela la oportunidad de obtener avances significativos en otros.

Es recomendable entonces evitar dentro de lo razonablemente controlable, el que se presenten "paros no programados del Topo", y si irremediablemente tal es el caso, entonces procurar que la duración de aquéllos sea lo más corta posible.

e) Flujos de agua, que arrastran lodo y materiales granulares.

f) Combinación de todo lo anterior, con roca estable.

Para cada una de las desfavorables condiciones mencionadas, existen una o varias soluciones que pueden implementarse sobre la marcha, si previsivamente se han hecho las debidas adecuaciones a la máquina de tuneleo.

Resulta entonces prioritario definir lo más claramente posible el "modelo geológico", y seleccionar en consecuencia el concepto del Topo y sus equipos auxiliares, que mejor resuelva el problema constructivo del túnel.

En la actualidad los fabricantes de Topos, tienen un amplio catálogo que incluye:

a) Máquinas abiertas, con zapatas de agarre

b) Máquinas encamisadas, con escudo simple, doble, o triple

c) Máquinas abiertas, con accesorios para aplicar en la clave, inmediatamente atrás de la cabeza cortadora, el método NATM, a base de concreto lanzado y anclas.

d) Máquinas que pueden reducir su diámetro exterior, para manejar condiciones de roca extruible.

Adicionalmente, muchos fabricantes instalan una muestreadora de rocas para anticipar las condiciones geomecánicas y geohidráulicas, de los siguientes metros de túnel por avanzar, con lo cual se pueden anticipar eventuales problemas y aplicar las soluciones más efectivas.

CONSECUENCIAS NEGATIVAS DE LOS "PAROS"

Las más notorias se asocian al retraso del programa de construcción, con todas las agravantes políticas técnicas y económicas, que sufre la Obra, por su tardía puesta en operación.

Las inmediatas se reflejan en un notorio incremento de la relación: Costo de construcción / Precio de Venta, que tiende hacia el "infinito", al hacerse temporalmente "O", este último.

A manera de ejemplo, se presentan dos casos de historia, tomados de las referencias técnicas listadas al final de este escrito.

El primer ejemplo está tomado del artículo sobre el túnel Gerlos II, cuyos datos generales se presentan en la Tabla I.

En la gráfica que se muestra en la Figura 1, se han dibujado los avances promedio por día para cada una de las diferentes clasificaciones de la masa rocosa (según el sistema GGKL.), observándose que varían desde 35 a 1.3 metros, para las clasificaciones F1 a F7, es decir casi 27 veces.

En la Figura 2 se presenta una relación unitaria del costo diario del equipo, también en función de la calidad GGKL de la roca, utilizando como referencia el costo promediado del equipo por metro de túnel, observándose relaciones variando entre 0.24 y 5.3, para las calidades F1 y F7, respectivamente.

TABLA I. TÚNEL GERLOS II

Ubicación	Planta de fuerza Gerlos en Austria
Uso	Conducción de agua
Longitud	5638 metros
TBM	Robbins
Diámetro	4.25 metros
Potencia	600 kw
Peso	80 ton
Días trabajados	834
Avance promedio por día	6.8 metros
Avance pico por día	60 metros

El segundo ejemplo se ha tomado del túnel de conducción Cleuson Dixence, construido con dos Topos, en sus Lotes B y C, con las características que se muestran en las Tablas II y III.

En el escrito se comenta que paradójicamente el Topo del Lote B, se comportó de mejor manera porque su diseño y atributos le permitían reanudar prontamente su marcha después de un accidente geológico, lo cual no ocurrió con el Topo del Lote C, que aunque tenía atributos para excavar bien en los terrenos malos, cuando se paraba en los terrenos muy malos tardaba mucho tiempo en reanudar su marcha, Figura 3.

TABLA II. TÚNEL CLEUSON DIXENCE, Lote B

Ubicación	Planta de fuerza Cleuson Dixence en Suiza
Uso	Conducción de agua
Longitud	7600 metros
TBM	Wirth
Diámetro	5.63 metros
Potencia	300 kVA
Peso	242 ton
Días trabajados	681
Avance promedio por día	11.2
Avance promedio sin tomar en cuenta los accidentes geológicos	15.0

TABLA III. TUNEL CLEUSON DIXENCE, Lote C

Ubicación	Planta de fuerza Cleuson Dixence en Suiza
Uso	Conducción de agua
Longitud	7400 metros
TBM	Robbins
Diámetro	5.83 metros
Potencia	300 kVA
Peso	392 ton
Días trabajados	404
Avance promedio por día	18.3 metros
Avance promedio sin tomar en cuenta los accidentes geológicos	25.6 metros

CONCLUSIONES.

La excavación mecanizada de túneles en rocas poco competentes, es una realidad en franco proceso de desarrollo que promete agilizar el proceso constructivo de los túneles.

Sin embargo las discontinuidades geológicas que existen en la naturaleza, la presencia de agua en el subsuelo, la combinación entre esfuerzos y deformaciones del medio excavado en túnel, y otros importantes factores geológicos "retrasan" y en algunos casos "paran" el proceso constructivo, ocasionando serios inconvenientes económicos y de programa.

Podría pensarse entonces que el reto de los diseñadores y fabricantes de equipos estriba en incorporarles los accesorios que se consideren adecuados para evitar en lo posible la ocurrencia de "paros", y si éstos ocurren, procurar los medios para la pronta reanudación del proceso constructivo.

REFERENCIAS.

G. Brux, 1994 "The Gerlos II Delivery Tunnel-mechanical Tunnelling stretched to the Limit".

R. Robbins, 1995 "Excavación mecánica de túneles', Conferencia internacional, realizada con el apoyo de AMITOS y de la SMMR.

Botte, Mean y Tournery, 1996 "Galerie D'Amenée de L'aménagement Cleuson Dixence, Traitement des accidents géologiques", Artículo presentado en el No 138 de la revista Tunnels et Ouvrages Souterrains.

N. Innaurato y D. Peila, 1996 "Statistical Analysis of TBM Performances", Artículo presentado en la reunión Journées D'Etudes Internationales de Chambéry, organizada por AFTES.

D. Chapperon y F. Antonini, 1996 "12.2 km of Tunnel to supply Cadiz with water with a O. D. 4.88 m double shielded TBM", Artículo presentado en la reunión Journées D'Etudes Internationales de Chambéry, organizada por AFTES.

H. Einstein and A. Bobet, 1997 "Mechanized Tunnelling in Squeezing Rock-From basic thoughts to continuous tunnelling", publicado en la conferencia Tunnels for People, Golser, Hinkel & Schubert (eds), Balkema Rotterdam.

P. Schubert, M. Moggioli, J. Brandl y J. Golser, 1997 "Extraordinary Difficulties Driving the Motorway Tunnels through Bolu Mountains, Turkey", revista Felsbau, Rock and Soil Engineering, 5/97 Oktober.

4. COMENTARIOS A LA CONFERENCIA DEL DR. BÜCHI

Ing. Fernando Hiriart Balderrama

28 de enero 1998

Colegio de Ingenieros Civiles de México.

Agradezco a la Asociación Mexicana de Ingeniería de Túneles y Obras Subterráneas el haber denominado a la conferencia bienal, sobre temas relevantes de ingeniería de túneles, con mi nombre, y su invitación para comentar la conferencia del Dr. Ernst Büchi sobre excavación mecanizada de túneles en roca.

Mis comentarios se basan en lo observado en la construcción de túneles relacionados con obras de riego, abastecimiento de agua y drenaje principalmente. He participado en grupos de trabajo encargados de la construcción y diseño de decenas de kilómetros de túneles, realizados con los procedimientos tradicionales de la minería para excavaciones subterráneas en rocas con muy diferentes propiedades geomecánicas. Además, tuve oportunidad de leer cuidadosamente la interesante ponencia del Dr. Büchi.

La experiencia mexicana sobre excavación mecanizada de túneles en roca es muy limitada, he leído algunos libros sobre máquinas tuneleras y escudos. Tenemos buenas realizaciones en la perforación de túneles con escudos en suelos blandos poco profundos, para el drenaje de la Ciudad de México.

Con estos antecedentes, comentaré la conferencia del Dr. Büchi, que presenta una descripción general de las máquinas tuneleras para excavación en roca, los estudios geotécnicos necesarios para especificar el equipo, la participación de los fabricantes del equipo y especificaciones de construcción necesarias para elegir al contratista y el equipo para la perforación del túnel.

Además, hace énfasis en las incertidumbres que se presentan por cambios en las condiciones geológicas y los problemas entre fabricantes de equipo, contratistas y dueños de las obras.

En general el diseño del equipo corresponde al fabricante de éste; en particular el diseño de la cabeza cortadora depende de su experiencia y de la calidad de la información contenida en los estudios geomecánicos; los soportes, motores y sistemas de apoyo y empuje, son diseñados por el fabricante y son problemas de ingeniería electromecánica y de control.

La elección del tipo de máquina para la excavación en roca es una decisión

compleja que depende mucho de la calidad de los estudios geotécnicos para poder definir los costos y tiempos de construcción. El Dr. Büchi menciona en forma muy clara las ventajas y desventajas de las tuneleras abiertas y con escudo. También menciona que para túneles largos conviene que las máquinas abiertas tengan un diámetro de más de 3.0 m y los escudos un diámetro de más de 5.0 m.

Sus comentarios sobre los estudios geológicos y geotécnicos para decidir sobre el método de excavación, requieren analizar aspectos adicionales a los necesarios para usar el método tradicional usando barrenación y explosivos. La clasificación de las rocas a lo largo de un túnel es complicada y necesaria, aunque falle algunas veces. Si se planea usar máquinas tuneleras es indispensable agregar estudios y pruebas para determinar la perforabilidad y abrasividad de la roca, lo que implica más exploración y muestreo que los necesarios para aplicar los métodos tradicionales.

El ponente describe los aspectos básicos del diseño para proyectos de túneles construidos con máquinas tuneleras, haciendo énfasis en el diseño del soporte temporal de la roca y el revestimiento definitivo. El tiempo necesario para colocar el ademe provisional interfiere con el tiempo efectivo de perforación y encarece la construcción. Los diferentes tipos de soporte deben ser definidos en el proyecto e incluidos en los conceptos de trabajo y precios unitarios. El precio de la excavación es muy dependiente de la calidad de la roca, aún suponiendo uniformidad en la formación; si se usan tuneleras abiertas, las diferencias en avances pueden ser de 100% entre una roca suave y una roca dura muy agresiva.

Económicamente, estos estudios son rentables si se trata de túneles largos o de gran diámetro, aunque no sean de gran longitud. Si la calidad de la roca es buena o regular y no muy variable, el costo y el tiempo de construcción son menores usando tuneleras, que empleando los procedimientos tradicionales con barrenación y explosivos.

Las especificaciones técnicas y las listas de precios unitarios deben incluir todos los resultados de los estudios realizados por el dueño sobre geología, geohidrología y geotécnica; por su parte, el contratista debe juzgar si basa su cotización en la información suministrada o si la complementa con datos adicionales.

Aunque la información sea aparentemente suficiente, es frecuente que la realidad difiera del modelo de rocas descrito en las especificaciones técnicas y el contratista reclame por cambios en las condiciones geológicas y solicite modificación de precios. El contrato de obra debe ser suficientemente flexible para realizar las modificaciones necesarias si el

contratista tiene razón en su solicitud y sólo cuando el cambio de condiciones afecta significativamente sus costos. La probabilidad de que las condiciones geológicas descritas en la convocatoria sean exactamente las reales, es cero; las condiciones reales pueden ser mejores o peores, pero no iguales. El contrato debe definir cómo resolver estos problemas mediante discusiones técnicas entre las partes, o recurriendo a la opinión de asesores expertos en el problema específico.

Felicito al Dr. Büchi por su clara exposición y, finalmente, haré algunos comentarios muy breves sobre el uso en México, de la excavación mecanizada de túneles en roca.

Me gustaría estar equivocado; pero creo que en México generalmente estamos lejos de realizar los estudios previos para poder elegir adecuadamente los equipos y métodos de construcción de túneles largos en roca, y que sin estos estudios es muy arriesgado decidir el empleo de máquinas tuneleras para perforar el frente completo en una sola etapa.

Hemos tenido éxito perforando los túneles del drenaje profundo de la ciudad de México debido, en gran parte, a que la exploración del subsuelo, antes de iniciar las obras, era muy completa, cientos de pozos, muestreo y pruebas de laboratorio para determinar las propiedades mecánicas necesarias para diseñar las cimentaciones de edificios en un subsuelo altamente compresible y muy uniforme. Para salir del Valle de México fue necesario perforar un túnel, muy largo (50 km), con condiciones geológicas muy variables, con grandes tramos en roca y con zonas de agua subterránea, se usaron los métodos tradicionales, se construyeron 18 lumbreras para rezagar, bombear y abrir muchos frentes de ataque; el túnel resultó costoso.

Los túneles largos son parte de la infraestructura del País, la decisión de construirlos es del Gobierno y generalmente los recursos para explorar son escasos; además se requiere tiempo para realizarlos.

Cuando las condiciones de la roca son adecuadas, la experiencia mundial muestra que el empleo de máquinas tuneleras es más barato y rápido, reduciendo significativamente los cargos financieros.

Propongo que la Asociación Mexicana de Ingeniería de Túneles y obras subterráneas haga un plan para que sea posible realizar oportunamente todos los estudios y pruebas necesarios para usar con ventaja, en muchos casos, la excavación mecanizada de túneles en roca.

También propongo que no olvidemos que sabemos cuándo se inicia la construcción de un túnel, pero no sabemos cuándo se termina.

Fundación ICA es una Asociación Civil constituida conforme a las leyes mexicanas el 26 de octubre de 1986, como se hace constar en la escritura pública número 21,127 pasada ante la fe del Lic. Eduardo Flores Castro Altamirano, Notario Público número 33 del Distrito Federal, inscrita en el Registro Público de la Propiedad en la sección de Personas Morales Civiles bajo folio 12,847. A fin de adecuar a las disposiciones legales vigentes los estatutos sociales, estos fueron modificados el 17 de octubre de 1994, como se hace constar en la escritura pública número 52,025 pasada ante la fe del Lic. Jorge A. Domínguez Martínez, Notario Público número 140 del distrito Federal.

Fundación ICA es una institución científica y tecnológica inscrita en el Registro Nacional de Instituciones Científicas y Tecnológicas del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, con el número 97/213 del 20 de junio de 1997.

Esta edición de la Primera Conferencia Magistral Ing. Fernando Hiriart Balderrama "Excavación mecánica mediante máquinas perforadoras de túneles de frente completo en roca dura" de Ernest Büchi, se terminó en enero de 1999. Se imprimieron 2,000 ejemplares. La edición estuvo al cuidado de Juan Jacobo Schmitter M., Laura E. Pérez Zavala y Fernando O. Luna Rojas.

Comités del programa de becas de licenciatura en ingeniería civil.

Facultad de Ingeniería de la UNAM

**Ing. José Manuel Covarrubias Solís
M. en I. Gabriel Moreno Pecero
M. en I. Gilberto Sotelo Ávila
Ing. José Gaya Prado
Ing. Enrique Cesar Valdés**

Facultad de Ingeniería de la UAEM.

**M. en I. Ángel Alviter Rodríguez
M. en I. Francisco Becerril Vilchis
M. en I. Raúl Vera Noguez
Dr. HoracioRamírez de Alba**

División de Ciencias Básicas e Ingeniería de la UAM Azcapozalco.

**Dr. Mario Alberto Romero Romo
Ing. Dario Guaycochea Guglielmi
Ing. Luis Antonio Rocha Chiu
Ing. Dante Alcántara García
Dr. Amador Terán Gilmore**

Facultad de Ingeniería de la UA. Querétaro

**M. en I. José Jesús Hernández Espino
Ing. Gerardo René Serrano Gutiérrez
Ing. Jorge Martínez Carrillo**

Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, Zacatenco, IPN

**Ing. José Iber Rojas Martínez
Ing. Felipe Márquez Quintero
Ing. José Luis Castro Montufar
Ing. Jorge Heinen Treviño
Ing. Cornelio Acosta Colorado
Ing. Demetrio Galindez López**

Facultad de Ingeniería Civil de la UMSNHgo.

**M. en I. Fernando Ojeda Torres
Ing. David Hernández Huéramo
Ing. José Muñoz Chávez
M. en I. Daniel Durand Flores
Ing. Efraín Márquez López**