

# IC

INGENIERIA  
CIVIL

NUM 552 / AÑO LXX / ABRIL 2015 \$60



XLW  
M  
as  
Z  
KO  
QJ  
IP  
G  
F  
U  
Y  
G  
D  
R  
B  
E  
C  
H  
A  
C  
U  
N  
Y  
T

# Responsabilizarnos de nuestra ingeniería civil

Diálogo abierto y autocritica obligada

# Excavación mecanizada de frentes mixtos con escudo de tipo EPB

El presente estudio aborda uno de los principales retos de ingeniería que se presentan durante la excavación con tuneladora en frentes mixtos suelo-roca. Esto se debe, entre otras cosas, a que el desgaste y deterioro de las herramientas de corte es más difícil de calcular que el resto de parámetros de la TBM debido a la complejidad de la interacción entre herramienta de corte y terreno. Se abordarán algunas metodologías de predicción de desgaste, daño y avance de la TBM que desempeñan un papel esencial para la correcta ejecución de la obra en todas sus etapas de construcción.

ADRIÁN LOMBARDO ABURTO

Ingeniero civil con especialidad en Túneles mecanizados. Director general del Consorcio Constructora Mexicana de Infraestructura Subterránea, S.A. de C.V. Fue director ejecutivo de la AMITOS y es miembro de la SMIG y del CICM.

JOSÉ ANSELMO PÉREZ REYES

Ingeniero geofísico. Desde 2005 ha sido responsable de las áreas de geofísica, geología e instrumentación de proyectos en los sectores público y privado. Es gerente de Instrumentación y Control de Procesos en COMISSA para el TEO.

**Debido a que el empleo de tuneladoras TBM** (*tunnel boring machine*) es cada día más frecuente, se requiere una evaluación precisa de las variables geotécnicas que intervienen en el proceso de excavación. Entre otras cosas, y como parámetro más relevante para el caso de estudio, se encuentra el efecto de la abrasividad del suelo en el costo y planificación de un proyecto. El desgaste de las herramientas de corte es el parámetro más difícil de calcular debido a la complejidad de la interacción entre las propias herramientas de corte y el terreno. Así, el deterioro de dichas herramientas representa uno de los aspectos más relevantes durante el proceso de excavación, por lo que su revisión y sustitución eventual constituye un elemento crítico del avance, al considerar que involucra un detenimiento de la TBM y la intervención en la cámara de excavación; por lo tanto, es deseable que las intervenciones estén programadas con la mayor precisión posible partiendo de la correcta identificación de los valores límite de penetración.

## Antecedentes y descripción del caso de estudio

En el presente trabajo se abordará el caso de un túnel emplazado en terrenos mixtos suelo-roca en donde se determinarán, de manera teórica y empírica, predicciones de desgaste y algunas metodologías para el cálculo de los valores operacionales aceptables.

El tramo en estudio está constituido por 11 unidades estratigráficas de las cuales ocho intervienen en la zona de influencia del túnel. De manera general, se presentan materiales intercalados con basalto masivo y fracturado

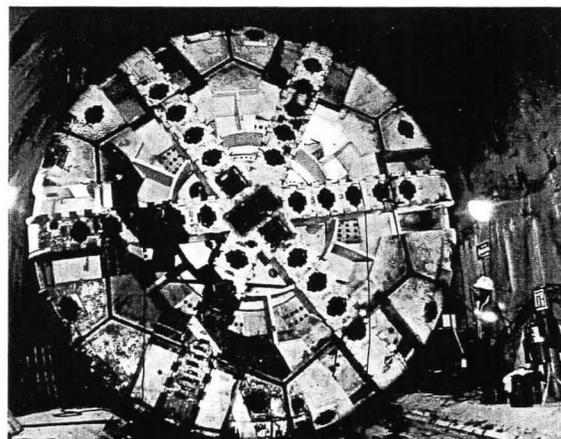


Figura 1. Escudo tipo EPB Øexc 8.91 m.

y abanicos aluviales en diferentes proporciones; en algunas zonas puntuales se determinaron frentes completos de basalto. A nivel de excavación se atravesarán los materiales descritos en el cuadro 1.

## Descripción de la problemática de excavación

La excavación del tramo en estudio se realiza con un escudo tipo EPB Øexc 8.91 m (extracción con tornillo), cabeza de corte tipo mixto, con aberturas del orden de 35% de la superficie de la rueda, giro en ambos sentidos, herramientas para roca dura (48 discos cortadores de 17") y suelos (72 unidades tipo *scrapers* en el frente y la periferia). El escudo se muestra en la figura 1.

**Cuadro 1.** Descripción de los diferentes frentes de excavación a lo largo del tramo

Longitud (m)	Descripción geológica	Particularidades
65	Depósitos lacustres arcilloarenosos	-
352	Basaltos permeables	Importantes flujos de agua
877	Depósitos lacustres arcilloarenosos con horizontes de arena y ceniza volcánica	Importantes flujos de agua
772	Frente mixto de depósitos arcilloarenosos y basaltos permeables fracturados con estratos de ceniza volcánica	-
530	Frente de basaltos permeables con limos arenosos y ceniza volcánica en la zona de la rasante del túnel	Importantes entradas de agua entre las fracturas de la roca
867	Frente mixto de basaltos permeables, depósitos lacustres arcilloarenosos e intercalaciones de ceniza volcánica en la mitad superior del frente	Roca masiva o fracturada y considerables entradas de agua
251	Frente completo de basaltos	-
1,257	Frente mixto de basaltos permeables con estratos de cenizas volcánicas, depósitos lacustres arcilloarenosos y gravas fluviales	Aporte variable de agua
201	Frente completo de depósitos lacustres arcilloarenosos	-
485	Frente mixto de basaltos, ceniza volcánica y depósitos lacustres arcilloarenosos	Roca masiva en la parte superior
794	Depósitos lacustres arcilloarenosos y gravas fluviales	Aporte de agua variable
2,731	Depósitos lacustres arcilloarenosos, gravas fluviales y cenizas volcánicas	-

Cabe señalar que el costo de extracción por tornillo es muy elevado cuando se trata de materiales muy abrasivos como los descritos para el caso de estudio. Así, las condiciones del terreno descritas con anterioridad determinan diversos problemas de trabajo y los siguientes efectos sobre el avance de la TBM:

- Impacto excesivo sobre las herramientas de corte
- Bloqueo de los discos por ingreso de suelo a los rodamientos
- Desgaste excesivo del tornillo sinfín debido a la abrasividad del terreno excavado

A su vez, la rueda de corte está diseñada de tal modo que es capaz de excavar tanto suelo como roca y con una determinada optimización para suelos considerando que la proporción de éstos es mayor. Dicha optimización conlleva importantes desventajas cuando se excava en roca, con un desgaste considerable de las herramientas de corte, impacto al desempeño de la TBM y la consecuente reducción de los rendimientos.

El tornillo sinfín de la TBM en cuestión tiene las siguientes características:

- Se trata de un tornillo sinfín doble con la primera parte inclinada y la segunda horizontal, o tornillos 1 y 2 (véase figura 2)
- La parte inclinada sólo dispone de hélice y no de un eje sinfín (sinfín tipo *ribbon*)
- Diámetro de 900 milímetros

El uso de tornillo sinfín está enfocado en suelos y rocas acondicionables; para el caso de rocas fracturadas o duras existen diferentes riesgos, entre los que destacan:

- La obstrucción debido al diámetro de los bloques de roca que pretenden ingresar al elemento.

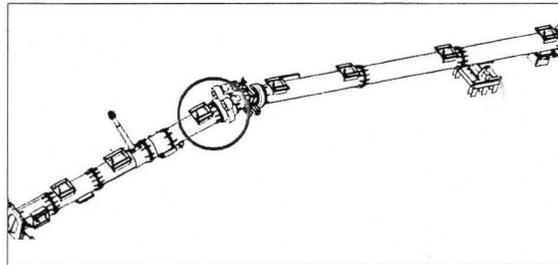
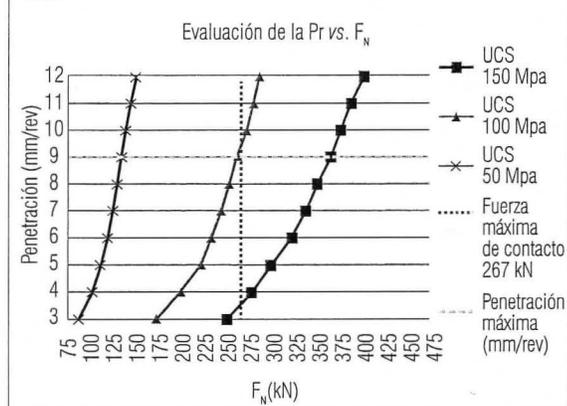


Figura 2. Tornillos sinfín 1 y 2.

**Gráfica 1.** Penetración vs.  $F_N$  en función del UCS esperado


- El uso de doble tornillo implica dos elementos de desgaste que, para el caso de materiales altamente abrasivos, originan un doble deterioro con las consecuentes dificultades durante el procedimiento de excavación debido a la necesidad de revisión y mantenimiento.

### Predicción de rendimientos

De manera general, los diferentes procedimientos para el cálculo de la penetración (P) emplean dos grupos de parámetros de determinación:

- De operación de la TBM
- Parámetros geotécnicos del frente de excavación

El cálculo de la penetración se dificulta conforme se incrementa la complejidad geológica del terreno y, por tanto, el número de parámetros involucrados y su dificultad experimental; así, dicho cálculo debe ser cualitativamente coherente con las condiciones del frente de excavación y estar basado en la competencia de la sección de roca, ya que la de suelo ejerce una resistencia al esfuerzo cortante despreciable para fines de excavación en estas condiciones.

Resulta común encontrar los siguientes problemas durante el avance:

- Daño a los discos cortadores debido a caídos e impacto perpendicular al plano de roca competente
- Bloqueo de los discos por ingreso de suelo a los rodamientos

Con la intención de determinar la penetración alcanzable de acuerdo con el diseño y distribución de los discos cortadores en la rueda de corte, se propondrá un procedimiento que busca determinar la penetración óptima ( $P_{max}$ ) que optimice los rendimientos, minimice el desgaste y elimine, en la medida de lo posible, los daños por impacto.

En primer lugar, la fuerza de corte necesaria debe considerar la resistencia a la tensión y a la compresión de la roca, además de las propiedades geométricas de las herramientas de corte. Los parámetros de los discos cortadores a tomar en cuenta son diámetro y ancho de corte; para el caso de estudio, 17 [in] y 1,905 [mm], respectivamente.

De este modo, es posible evaluar el desempeño de los discos de corte en función de la penetración P y la fuerza de contacto FN (véase gráfica 1).

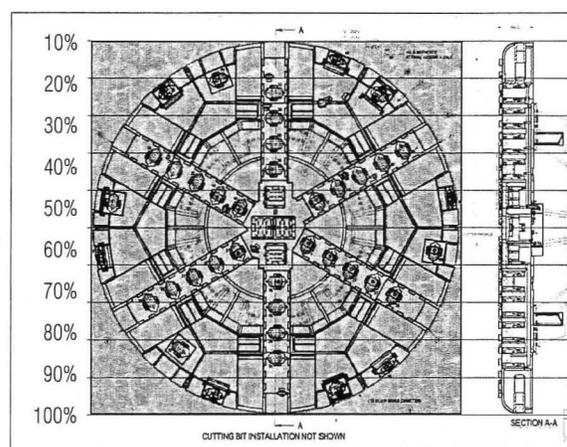


Figura 3. Distribución de los discos de corte en función del porcentaje de apoyo.

Considerando la hipótesis para el modelo y los rangos de compresión axial simple (UCS) esperados, se concluye que para el rango de resistencias más elevadas (267 kN) las penetraciones alcanzables ( $P_{max}$ ) son de 9 mm/rev. Considerando la distribución y cantidad de los discos de corte en el área de la cabeza de la TBM y la sección de roca en el frente de excavación, se deduce que la fuerza de empuje ( $F_{t_{max}}$ ) no debe exceder la resistencia máxima de contacto obtenida de la suma de las resistencias de cada disco en función del porcentaje de roca en el frente (véase figura 3).

El valor  $F_{t_{max}}$  debe descartarse de la fuerza de empuje total aplicada a la TBM. El sistema debe superar las fuerzas que se manifiestan en sentido contrario al avance –liberar su estado de inercia– y que se refieren a: a) fuerza ejercida por la presión hidrostática más la del terreno y b) fuerza ejercida por la fricción entre el cuerpo del escudo y el terreno circundante (véase figura 4).

En el caso de estudio se llevó a cabo un análisis para determinar la fuerza de empuje necesaria para liberar la TBM de su estado de inercia. En particular, para el caso de frentes mixtos, el cálculo arrojó como resultado

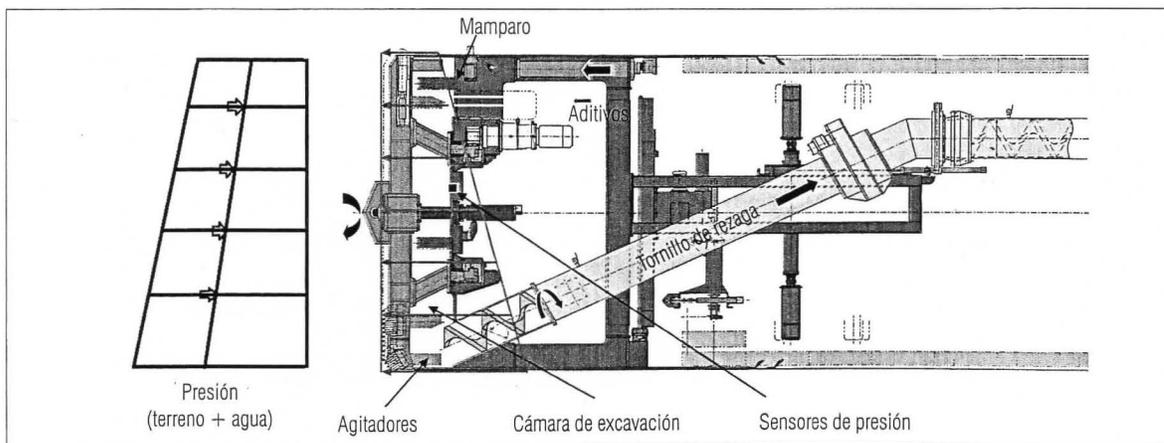


Figura 4. Fuerzas que interactúan en sentido opuesto al avance del escudo.

**Cuadro 2.** Fuerza de empuje máxima para frentes mixtos

Porcentaje de roca en el frente de excavación	Ft <sub>max</sub> después de romper el estado de inercia de la TBM (kN)	Esfuerzo total en sentido opuesto al avance de frentes mixtos (kN)	Fuerza de empuje permisible de acuerdo con el % de roca en el frente (kN)	Límite superior (+8%) (kN)	Límite inferior (-8%) (kN)
10	1,000	33,097.6	34,097.6	36,825.4	31,369.8
20	1,500		34,597.6	37,365.4	31,829.8
30	2,250		35,347.6	38,175.4	32,519.8
40	4,500		37,597.6	40,605.4	34,589.8
50	6,500		39,597.6	42,765.4	36,429.8
60	8,500		41,597.6	44,925.4	38,269.8
70	10,250		43,347.6	46,815.4	39,879.8
80	10,750		43,847.6	47,355.4	40,339.8
90	11,500		44,597.6	48,165.4	41,029.8
100	12,000		45,097.6	48,705.4	41,489.8

que se requiere una fuerza aproximada de 33,097.6 kN (véase cuadro 2).

Los límites superior e inferior del 8% surgen de la diferencia entre la fuerza de empuje necesaria para liberar el escudo de su estado de inercia y la fuerza nominal de avance (véase gráfica 2).

Por lo tanto, si se incrementa la fuerza de empuje respecto al valor objetivo (curva azul), se corre el riesgo de superar Ft<sub>max</sub> y dañar las herramientas de corte; por lo contrario, si se opera por debajo del valor objetivo, la penetración será escasa. Una aproximación adicional a los valores óptimos de operación consiste en emplear el denominado índice Q<sub>TBM</sub>, que surge del índice de calidad Q de Barton (Barton *et al.*, 1974) y que, en adición, considera la fuerza media por cortador (Fn); con él es posible predecir la velocidad neta de avance de una TBM.

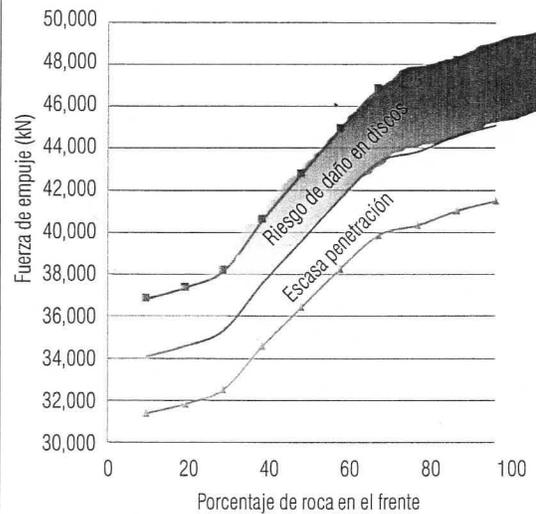
A partir de ensayos de laboratorio y registros de campo se obtuvo un índice Q<sub>TBM</sub> de 12.28 y una velocidad de avance (PR) de 10.23 mm/min. A su vez, se conoce la penetración máxima alcanzable (P<sub>max</sub>) de 9 mm/rev, lo cual permite calcular la velocidad angular máxima permisible de la rueda de corte (ω<sub>max</sub>) de 1.14 rpm e integrar el modelo de la manera que se observa en la gráfica 2.

### Conclusiones

La aplicación de modelos teóricos y empíricos está limitada a las condiciones de excavación descritas en el caso de estudio. De igual modo, el modelo base se ajusta según se determinen variaciones en el frente y de acuerdo con el comportamiento de éste a partir de los parámetros operacionales aplicados en la TBM. Dichos modelos proporcionan una idea global y preliminar de los rendimientos esperados, por lo que resulta indispensable contrastarlos con los reales a fin de recalibrar el modelo según se requiera.

Existen parámetros importantes que no han sido incorporados al modelo, como la posible inclinación o deformación de la cabeza de corte, lo cual repercute en la distribución de esfuerzos en las herramientas de corte.

**Gráfica 2.** Modelo teórico y empírico para la determinación de los valores de operación aceptable durante el proceso de excavación



$$Q_{TBM} = \frac{RQD_n \cdot J_r \cdot J_w \cdot SIGMA}{J_n \cdot J_s \cdot SRF \cdot F_n}$$

$$PR = 5(Q_{TBM}^{-0.2})$$

$$-Q_{TBM} = 12.28$$

$$-PR = 0.61 \text{ m/h o } 10.23 \text{ mm/min}$$

$$-P_{max} = 9 \text{ mm/rev}$$

$$\therefore \omega_{max} = \frac{PR}{P_{max}}$$

$$-\omega_{max} = 1.14 \text{ rpm}$$

La abrasividad es otro factor determinante del deterioro de las herramientas de corte y elementos de desgaste como el tornillo sinfín; de igual manera, el acondicionamiento del terreno también desempeña un papel decisivo en la optimización de los rendimientos de excavación [4].

### Referencias

Barton N. (1999). TBM performance estimation in rock using QTBM. Tunnels & Tunnelling International.  
 (2000). TBM tunnelling in jointed and faulted rock. Taylor & Francis.  
 (2005). A critique of QTBM. Tunnels and Tunnelling International.  
 Barton, N., R. Lien y J. Lunde. (1974). Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mech.*, 6(4):189-239.  
 Bieniawski, Z. (1989). Engineering rock mass classifications. Nueva York: John Wiley and Sons.  
 Maidl, U. (2003). Geotechnical and mechanical interactions using the earth pressure balance shield technology in difficult mixed face and hard rock. RETC Proceedings.  
 Mendaña, F. (2007). Tunnel construction with double shield TBMs. Society of Mining, Metallurgy and Exploration.  
 (2009). La construcción de túneles en terrenos mixtos con tuneladoras de gran diámetro. Experiencias recientes de algunas obras. *Revista de Obras Públicas*, 3498, año 6.

¿Desea opinar o cuenta con mayor información sobre este tema? Escribanos a ic@heliosmx.org