



Excavación de frentes mixtos altamente abrasivos y su relación con los parámetros de avance de un escudo del tipo EPB.

Excavation of highly abrasive mixed fronts and their relationship with the operating parameters in a EPB Shield.

Adrián Lombardo Aburto, Constructora Mexicana de Infraestructura Subterránea, COMISSA
José Anselmo Pérez Reyes, Constructora Mexicana de Infraestructura Subterránea, COMISSA

RESUMEN: Sin duda, los principales retos de ingeniería que se presentan en la construcción de túneles con tuneladora se refieren a la excavación de frentes mixtos –suelo + roca- altamente abrasivos. 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 maquinaria debido a la complejidad de la interacción entre herramienta de corte y terreno. En este trabajo se usarán datos de un caso real de túnel en terrenos mixtos suelo-roca para examinar el resultado de algunas metodologías de predicción de desgaste, daño y avance de la TBM. También se describirá un procedimiento para la evaluación de la abrasividad y atacabilidad del terreno a excavar a partir de los parámetros de avance del control de procesos considerados en el estudio y los cuales desempeñan un papel esencial para la correcta ejecución de la obra en todas sus etapas de construcción. Por lo tanto, para afrontar estos problemas, se expondrán técnicas de análisis y procesos constructivos ad hoc que han mostrado su eficiencia en los últimos avances del caso en estudio y por lo cual se abordarán las características principales del proyecto y se resumirán algunos aspectos como la estratigrafía atravesada, las propiedades mecánicas de los materiales a excavar, los parámetros operacionales asignados a la TBM y el comportamiento como resultado de ellos.

ABSTRACT: Undoubtedly, the main engineering challenges that arise in the tunnel construction with TBM refer to mixed fronts -soil+rock- highly abrasive. This is due, among other things, because the wear of cutting tools is more difficult to calculate than the other parameters of the machine due to the complexity of the interaction between the cutting tool and soil. In this paper we will use the data from a real case of tunnel in mixed front to examine the result of some methodologies for predicting wear, damage and advancement of the TBM. Also, will be described a method for evaluation of the soil abrasiveness and excavation feasibility from the parameters of process controlling considered in the study and which play an essential role in the proper execution of the work in all construction stages. Therefore, to address these problems, will be expose the analysis techniques and ad hoc construction processes that have proven their efficiency in recent developments of this study case and finally will be addressed the main features of the project and aspects such stratigraphy, geotechnical properties of the materials to be excavated, the operating parameters assigned to TBM and the behavior as result.

1 INTRODUCCIÓN

Debido a que el empleo de tuneladoras TBM -Tunnel Boring Machine- es cada día más frecuente, se requiere de una evaluación precisa de las variables geotécnicas que intervienen en el proceso de excavación; entre otras cosas y como parámetro más relevante se encuentra el efecto de la abrasividad del suelo en el coste y planificación de un proyecto. Cabe señalar que 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 y el terreno; por lo tanto, la mayor dificultad durante el proceso de excavación radica en el grado de incertidumbre del terreo a excavar, inherente a las obras subterráneas que, en algunos casos, presentan condiciones verdaderamente imprevisibles.

Así, uno de los aspectos más relevantes durante el proceso de excavación es el deterioro de las herramientas de corte, por lo que su revisión y sustitución eventual representa un elemento crítico del avance, al considerar que involucra una parada de la TBM y la intervención en

el frente de excavación originando una operación lenta y complicada. Por lo tanto, es deseable que dichas intervenciones estén programadas con la mayor precisión posible partiendo de la correcta identificación de los valores límite de penetración y que esto permita la generación de un modelo que admita visualizar el desgaste y posible daño de las herramientas dependiendo de los valores operacionales que a la TBM se ejerzan.

Partiendo de que el rendimiento de una excavación mecanizada depende de dos conceptos: penetración y avance, en este trabajo se utilizarán datos de un caso real para un túnel emplazado en terrenos mixtos suelo-roca, en donde se abordarán predicciones de desgaste y algunas metodologías para el cálculo de los valores operacionales aceptables, con principal énfasis en dichos conceptos y los consecuentes rendimientos de excavación.

2 CASO DE ESTUDIO: TÚNEL EMISOR ORIENTE, TRAMO 3.

2.1 Descripción general del proyecto.

El Túnel Emisor Oriente (TEO) se localiza al Nororiente de la Ciudad de México, con una longitud de 63km, un diámetro interior de 7m y exterior de 8.4m para los primeros 21km y de 8.6m para el resto del túnel; con una pendiente descendiente inicial hacia el Norte de 0.19% y, a partir del km 13+460, de 0.16% (Figura 1).

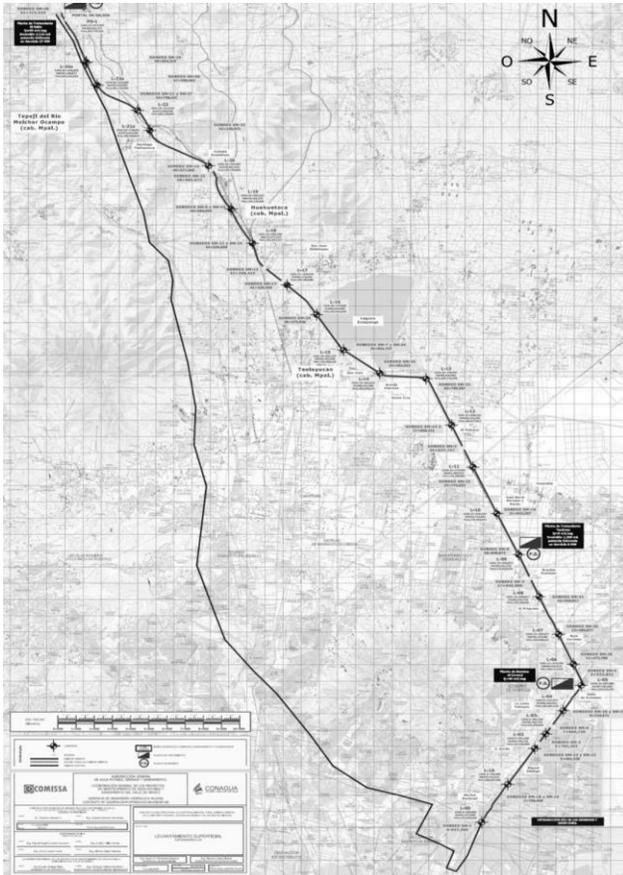


Figura 1. Localización en planta del Túnel Emisor Oriente (Fuente: COMISSA, 2014).

Sus coberturas son variables y van desde los 28m, en la Lumbre 0, hasta los 155m en su lumbre más profunda, que es la número 20. Considerando su longitud y emplazamiento y a partir de diversos estudios geológicos y geotécnicos que se han realizado a lo largo de su trazo, se han determinado una importante variedad de formaciones geológicas que se deberán atravesar y que van desde arcillas de alta plasticidad, suelos arenarcillosos de origen pluvial, depósitos de origen volcánico de mediana a alta resistencia y suelos arcillosos fuertemente consolidados con lentes de boleas empacados

en arcilla y limos. En el tramo 3 –motivo de estudio del presente trabajo– y a nivel de excavación, existen derrames basálticos empacados en una formación de depósitos lacustres arcillo-arenosos originando frentes mixtos con diferentes proporciones de roca y de baja a mediana permeabilidad con presiones hidrostáticas que aumentan hacia el Norte hasta los 5.3 bar.

Así mismo, el proyecto se construye con seis máquinas tuneladoras del tipo EPB (Earth Pressure Balance -- Presión de Tierra Balanceada) y cuenta con 24 lumbres profundas: seis para el montaje de los escudos y con un diámetro interno de 16 m; el resto con 12m de diámetro diseñadas para la operación y mantenimiento del túnel. La distancia entre lumbres es de 2.5km en promedio y su profundidad varía entre 28 y 155m. El Portal de Salida se ubica cerca de la salida del antiguo Túnel Emisor Central (TEC), descargando en el municipio de “El Salto”, en el Estado de Hidalgo.

2.2 Marco Geológico del Tramo 3.

El tramo 3 del TEO, comprendido de la lumbre L- 10 a L-13, está constituido por 11 unidades estratigráficas de las cuales intervienen 8 en la zona de influencia del túnel; en este tramo los materiales se encuentran muy estratificados y en espesores muy pequeños. Desde la superficie y hasta los 40m de profundidad los estratos tienen mayor espesor y en la zona norte, arribando a L-13, aumentan hasta 60 m aproximadamente, originando frentes mixtos de excavación para la máquina; de manera general, se presentan materiales intercalados con basalto masivo y fracturado y abanicos aluviales en diferentes proporciones; en algunas zonas puntuales se han determinado frentes completos de basalto (Figura 2).

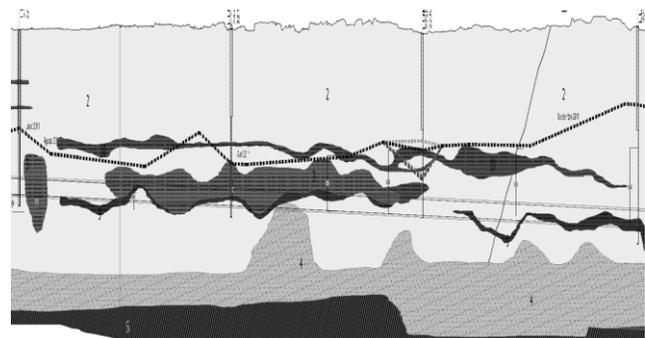


Figura 2. Esquema del perfil geológico del tramo 3, Túnel Emisor Oriente.

Así, de manera particular y en sentido de avance, a nivel de excavación se atravesarán los materiales descritos a continuación:

Tabla 1. Geología a nivel de excavación.

LONGITUD (m)	DESCRIPCIÓN GEOLÓGICA	PRESIONES (bar)	PARTICULARIDADES
65	Depósitos lacustres arcillo-arenosos	0.7	-
352	Basaltos permeables.	0.8	Importantes flujos de agua.
877	Depósitos lacustres arcillo-arenosos con horizontes de arena y ceniza volcánica.	0.8	Importantes flujos de agua.
772	Frente mixto de depósitos arcillo-arenosos y basaltos permeables fracturados con estratos de ceniza volcánica.	0.9	-
530	Frente de basaltos permeables con limos arenosos y ceniza volcánica en la zona de la rasante del túnel.	1.5 - 1.9	Se estiman importantes entradas de agua entre las fracturas de la roca y en los contactos con los depósitos arenosos.
867	Frente mixto de basaltos permeables, depósitos lacustres arcillo-arenosos e intercalaciones de ceniza volcánica en la mitad superior del frente.	3.9	Roca masiva o fracturada en contacto con la parte superior; se esperan considerables entradas de agua en este contacto.
251	Frente completo de basaltos.	1.9 - 2.5	-
1257	Frente mixto de basaltos permeables con estratos de cenizas volcánicas, depósitos lacustres arcillo-arenosos y gravas fluviales.	2.9 - 5	Aporte de agua variable.
201	Frente completo de depósitos lacustres arcillo-arenosos.	2.9 - 5	-
485	Frente mixto de basaltos, ceniza volcánica y depósitos lacustres arcillo-arenosos.	3.9	Roca masiva en la parte superior.
794	Depósitos lacustres arcillo-arenosos y gravas fluviales.	2.9 - 5	Aporte de agua variable.
2731	Depósitos lacustres arcillo-arenosos, gravas fluviales y cenizas volcánicas.	2.9 - 5	-

Por lo tanto, el túnel avanzará sobre una distancia del orden de 11km cortando y rozando cenizas basálticas y lavas intercaladas entre los limos y arcillas lacustres presentándose, en ocasiones, fuertes entradas de agua al frente de excavación debido a que las lavas están fracturadas y las cenizas son muy poco cementadas. La distribución de materiales a lo largo del tramo es representada mediante la siguiente gráfica (Figura 3):

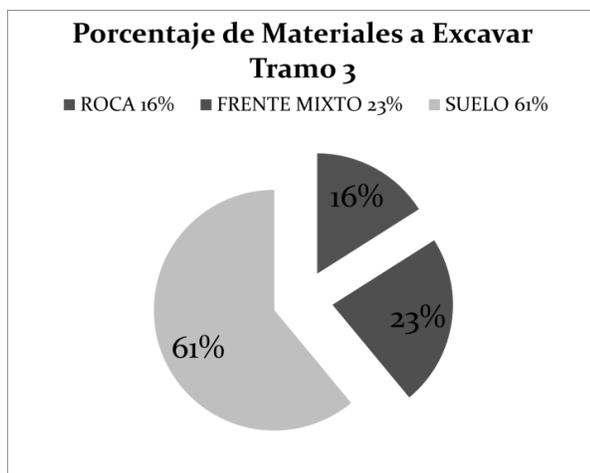
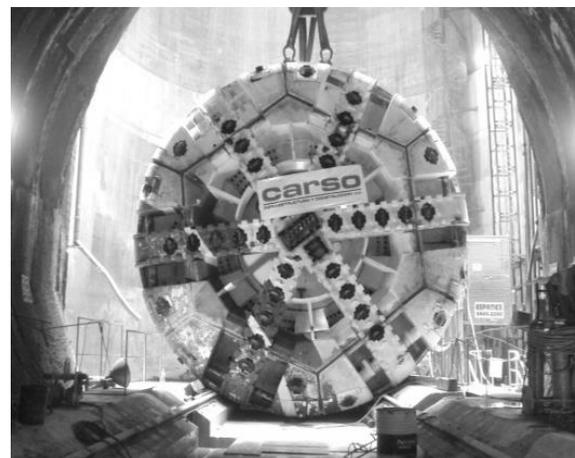


Figura 3. Distribución de materiales a lo largo del tramo 3.

3 PREDICCIÓN DE RENDIMIENTOS.

3.1 Escudo presurizado tipo "EPB" con cabeza de tipo mixto.

La excavación del tramo 3 del TEO se realiza con un escudo tipo EPB \varnothing_{exc} 8.91m (extracción con tornillo), cabeza de corte tipo mixto, con aberturas del orden de un 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) (Figura 4).

Figura 4. Escudo Robbins Hidalgo tipo EPB (\varnothing_{exc} 8.91m) del Túnel Emisor Oriente, Tramo 3.

La solución determinada para la excavación del tramo 3 (modalidad EPB) considera:

- La **extracción de la rezaga** por tornillo, tanto si se trabaja en modo abierto como cerrado.
- La **presurización (EPB)**; que permite evitar la generación de frentes inestables.
- **Cabeza de corte:** $RPM_{max}=3$; Torque Nominal=1416kNm, Torque de Ruptura=17900 kNm; Presión estática_{max}=10 bar.
- **Empuje Total** =78000 kN.
- **Tornillo Sinfín:** Dos tornillos, ambos de 900 mm; tamaño de triturados manejables=600mm.
- **Presión Máxima del Tornillo**=10 bar.
- **Cámara Hiperbárica:** Presión de aire=3 bar; Tip =2 cámaras, capacidad 2+3 personas.
- **Potencia Total del Accionamiento**=1900 kW.
- **Anillo de Dovelas:** Diámetro exterior=8600mm; diámetro interior=7800mm; espesor =400mm; longitud=1500mm; número de segmentos=7+K.

Considerando las condiciones geológicas del tramo y las del diseño de la TBM, es importante mencionar que la seguridad operativa de las máquinas depende sustancialmente de los trabajos de reconocimiento del terreno previamente trazado y, en su defecto, de dimensionar holgadamente las características mecánicas de los escudos. Cabe señalar que el coste de extracción por tornillo es muy elevado cuando se trata de materiales muy abrasivos como los descritos para el tramo 3 del TEO.

3.2 Excavación en condiciones mixtas.

Las condiciones del terreno descritas con anterioridad como la presencia de accidentes geológicos, la alta abrasividad de los materiales a excavar y la característica de frente mixto en donde bloques de roca dura aparecen junto con materiales blandos en diferentes proporciones y competencias, han determinado 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.

3.2.1 Rueda de corte.

La rueda de corte fue diseñada de tal modo que fuera capaz de excavar tanto suelo como roca y con una determinada optimización para suelos considerando que en el tramo 3 la proporción de éstos es mayor (ver figura 3).

Debido a que la cabeza de corte no está equipada con palas (Drum-Type), el suelo debe ser empujado a través de las aberturas de la propia rueda y la cámara de excavación, hasta la entrada al tornillo sinfín. A su vez, para la excavación en suelos, la rueda de corte puede ser equipada con cuchillas y rippers; el grado de abertura de la cabeza (35%) tiene como objetivo evitar la pegajosidad del terreno excavado, sin embargo, el alto porcentaje reduce el área disponible para el posicionamiento de las herramientas de corte lo cual puede ocasionar dificultades durante la excavación de roca ya que el posicionamiento de los discos se da únicamente sobre los radios disponibles de la rueda y la zonas reforzadas de su perímetro, implicando que la cantidad de discos colocados no llegue a ser suficiente e incrementando el riesgo de ingreso de bloques grandes de roca a la cámara de excavación que no pueden ser transportados por el tornillo sinfín; cabe señalar que el espaciamiento de las herramientas es de aproximadamente 101.6mm; un espaciamiento elevado conduce a una reducción de la producción de excavación debido a que la energía que se puede transmitir a través de los discos de corte hacia la roca, disminuye. De igual modo, en roca fracturada es común que bloques de considerable tamaño caigan del frente de excavación y lleguen a la cámara, ocasionando un aumento del desgaste de las herramientas, daños por impacto y el bloqueo del tornillo sinfín.

De acuerdo a lo anterior, lógicamente la optimización de la cabeza de corte para suelos conlleva importantes desventajas cuando se excava en roca, impactando considerablemente al desgaste de las herramientas de corte, al desempeño de la TBM y la consecuente reducción de los rendimientos.

Una alternativa que se llevó a cabo para impedir el paso de grandes bloques a la cámara de excavación fue la reducción del área de las ventanas de la rueda de corte mediante la implementación de “grizzly bars”, lo cual permite que los bloques de roca más grandes sean triturados delante de la rueda de corte hasta que sea posible su paso a la cámara de excavación (Figura 5).

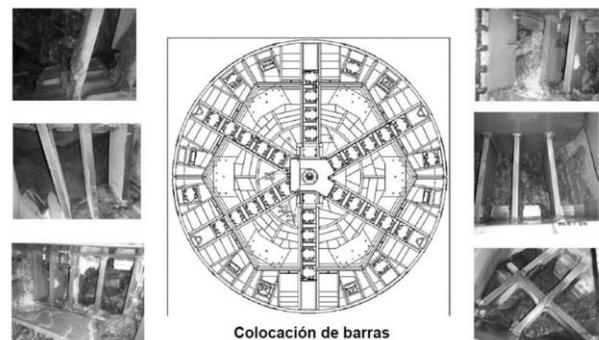


Figura 5. Colocación de barras en la cabeza de corte.

Así, la reducción del tamaño de las aberturas de la rueda de corte ha permitido romper más material mediante el proceso de trituración, sin embargo, esto reduce la fuerza de contacto entre los discos de corte y el frente de excavación (fuerza de empuje), con la consecuente reducción de la penetración y los rendimientos de excavación, originando también un elevado desgaste de las herramientas de corte debido a que el recorrido de éstas aumenta. El efecto conjunto de todos factores origina la reducción del grado de utilización de la TBM. Aunado a lo anterior, la reducción de los espacios también implica que la roca sea molida con un alto consumo de energía y desgaste al incrementarse el torque de la cabeza de corte.

3.2.2 Tornillo sinfín.

El transporte de material a través del tornillo sinfín se da mediante el tránsito longitudinal dentro del “tubo sinfín” por causa del empuje que la hélice ejerce al material en dirección de avance; su funcionamiento es eficiente debido a la componente de fricción normal a la cara anterior del tubo y que se da a consecuencia de la fricción por peso propio entre el material excavado y la cara anterior del tubo; dicha fricción impide que el material rote dentro del tubo con el giro de la hélice, lo cual permite el recorrido en sentido longitudinal al tornillo. Como consecuencia del paso del material excavado y la fricción que éste ejerce, se genera determinado desgaste el cual se reduce mediante la implementación de algunos productos que permiten el incremento de la componente rotacional y la disminución de la fricción entre ambos elementos, con la consecuente mejora del transporte de material a lo largo del tornillo. Si se transporta material líquido baja el rendimiento de transporte y se origina un aumento del desgaste debido al flujo de material líquido que tiene lugar entre las cámaras que conforman cada paso de hélice (Figura 6).

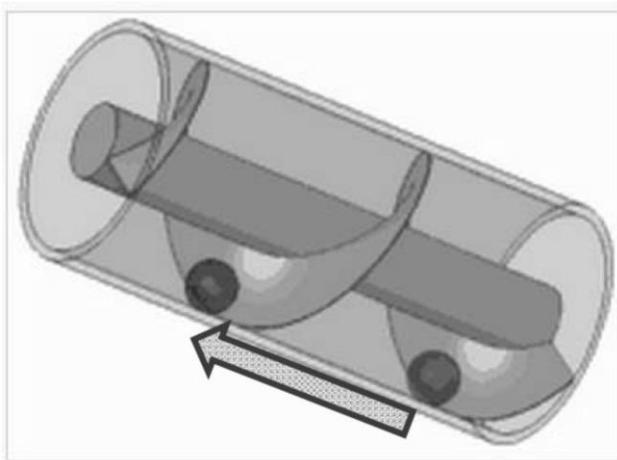


Figura 6. Esquema de transporte de material por tornillo sinfín (Fuente: Wikipedia).

El tornillo sinfín de la tuneladora Robbins, para el tramo 3 del Túnel Emisor Oriente, se caracteriza por los siguientes aspectos:

- Cuenta con un tornillo sinfín doble con una primera parte inclinada y la segunda horizontal – tornillos 1 y 2- (Figura 7).
- El sinfín inclinado sólo dispone de hélice y no de un eje sinfín (sinfín tipo Ribbon) (Figura 8).
- Diámetro = 900 mm.

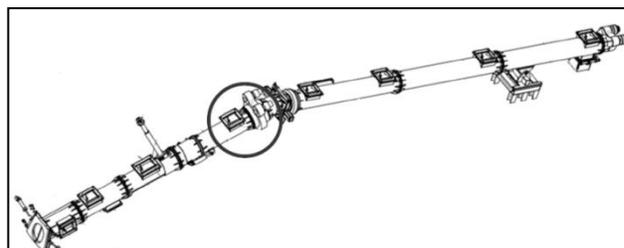


Figura 7. Tornillos sinfín 1 y 2 de la tuneladora Robbins; Túnel Emisor Oriente.



Figura 8. Tornillos sinfín sin eje tipo Ribbon.

Considerando lo anterior, se deduce que este tornillo fue diseñado con la intención de favorecer la reducción de gradientes hidráulicos; esto debido a su diámetro y longitud total de 35m. Además, el principio de tornillo sinfín doble permite generar una compresión del material a través de la posibilidad de aplicar rotaciones opuestas. Un tornillo sin eje favorece el transporte de clastos de mayor diámetro.

Sin embargo, el concepto de tornillo sinfín está enfocado a su uso en suelos y rocas acondicionables; para el caso de rocas fracturadas y/o duras existen diferentes riesgos, entre los que destacan: a) el de obstrucción por el diámetro de los bloques de roca que pretenden ingresar al elemento; b) la condición de doble tornillo implica a dos elementos de desgaste que, para el caso de materiales altamente abrasivos como los característicos del tramo 3, originan un doble deterioro con las consecuentes dificultades durante

el procedimiento de excavación debidas a la necesidad de revisión y mantenimiento.

Cabe mencionar que, con el tornillo sinfín tipo Ribbon, no fue posible la extracción continua del material de la cámara de excavación incluso con un alto grado de llenado, por lo que fue necesario equiparlo con un eje falso (Figura 9) que permitió el llenado pero que también disminuyó su diámetro y originó bloqueos en repetidas ocasiones por causa de los clastos de roca. Así, el transporte de material mediante el nuevo diseño sólo fue posible mediante la fluidificación completa del material, conseguido mediante la inyección de grandes cantidades de material acondicionante a la cámara de excavación y directamente en el tornillo sinfín.



Figura 9. Eje falso agregado al tornillo sinfín; Túnel Emisor Oriente.

Por lo tanto, bajo las condiciones descritas con anterioridad, la extracción de material sólo ha sido posible mediante la molienda intensiva de la roca y de su posterior fluidificación a través de la inyección de materiales finos; de igual modo, dicha extracción funciona solamente con un alto grado de llenado de la cámara de excavación en detrimento de los tiempos de paro y revisión de los elementos de desgaste.

3.2.3 Acondicionamiento del terreno.

Debido a la complejidad del terreno a excavar, se han determinado diferentes procedimientos de acondicionamiento que permiten la mejora de los rendimientos y, en general, del proceso de excavación.

En el tramo 3 del TEO el acondicionamiento original se ha basado en la inyección de espuma delante de la rueda de corte, la inyección de lodo en la cámara y la inyección de bentonita en el tornillo sinfín; lo anterior a modo de garantizar que éste fuera óptimo, aumentando los rendimientos, disminuyendo la pegajosidad y también el desgaste elevado.

Aun cuando este tipo de acondicionamiento basado en lodos permitió el rezagado del material producto de la excavación, debido a su densidad y alto grado de viscosidad y rigidez, se impide la adecuada sumersión de los bloques de roca provenientes del frente. Otro factor relevante en dicho concepto involucra que las arenas habitualmente consisten en partículas de cuarzo que favorecen la abrasión y, por tanto, el desgaste de los elementos mecánicos para la rezaga. Por lo tanto, se evitó la inyección de lodo en la cámara de excavación que implicó un coste considerable y desgaste inducido al equipo.

La teoría indica que un correcto acondicionamiento a partir de espumas es suficiente para lograr el correcto rezagado del material. Así, para las condiciones particulares del material característico del tramo 3, se definió la inyección de una espuma polimérica con FIR (Coeficiente de Inyección de Espumas) 100-200% delante de la rueda de corte; cuanto más espuma se inyecta, mejor resulta el transporte de material a través de las aberturas de la cabeza de corte. El valor del FER (Tasa de Expansión de Espumas) fue fijado de 5 a 7. Esto, por supuesto, consideró la suspensión de inyección de lodo a la cámara de excavación.

3.3 Estimación del grado de penetración.

Son muchos los procedimientos disponibles para el cálculo de la penetración (P). De manera general, los diferentes procedimientos emplean 2 grupos de parámetros para su determinación, estos son:

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

Sin duda, el cálculo de la penetración se dificulta conforme incrementa la complejidad geológica del trazo y, por tanto, el número de parámetros involucrados y su dificultad experimental. De este modo es que los criterios de evaluación deben considerar expresiones teóricas y empíricas con la intención de determinar un modelo capaz de predecir, con la mayor exactitud posible, el comportamiento durante la excavación.

De igual modo, la predicción del desgaste de las herramientas de corte está directamente relacionada con el grado de avance de la TBM. Así, la determinación de la abrasividad de los materiales a excavar y su atacabilidad resultan parámetros esenciales para evaluar, por lo que es determinante el conocimiento preciso de las propiedades mecánicas del frente de excavación, así como su geometría y las propiedades hidrostáticas del medio.

Como ya se ha mencionado, el tramo 3 del TEO se caracteriza por sus condiciones altamente complejas para motivos de excavación y debidas a la presencia de accidentes geológicos, alta abrasividad y, en mayor medida, la característica de frente mixto (Figura 10) en

donde bloques de roca dura conviven con materiales blandos o alterados en diferentes proporciones y competencias. Por lo tanto, el cálculo de la penetración debe ser cualitativamente coherente con dichas condiciones y 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.

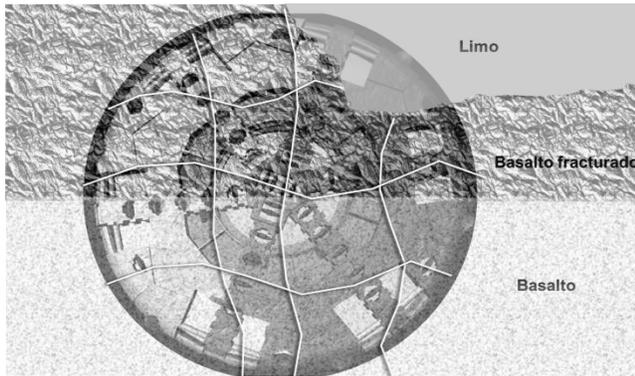


Figura 10. Esquema de frente mixto en el tramo 3 del TEO. Fuente: COMISSA, 2014.

Bajo estas condiciones resulta común encontrar los siguientes problemas durante el avance:

- Daño a los discos cortadores debido a caídas e impacto perpendicular al plano de roca competente.
- Bloqueo de los discos por ingreso de suelo a los rodamientos.
- Desgaste excesivo del tornillo sinfín debido a la abrasividad del terreno excavado.

3.3.1 Determinación de la penetración máxima permisible (P_{max}) de acuerdo a las propiedades mecánicas de los materiales y geométricas de los discos cortadores.

Con la intención de determinar la penetración alcanzable de acuerdo al diseño y distribución de los discos cortadores en la ruda de corte, se propone el siguiente procedimiento que busca determinar la penetración óptima (P_{max}) para el caso en estudio y que considera los siguientes criterios para su desarrollo:

- Una penetración baja aumenta el desgaste de las herramientas de corte debido a que aumenta su recorrido en el frente de excavación.
- Una penetración alta origina daño a los discos cortadores por exceso de carga y también por impacto perpendicular al plano de roca competente.
- Por lo tanto, P_{max} determinará a la penetración máxima permisible que optimice los

rendimientos, minimice el desgaste y elimine, en la medida de lo posible, los daños por impacto.

En base al modelo del Colorado School of Mines (CSM) que considera la resistencia a la tensión y a la compresión de la roca, además de las propiedades geométricas de las herramientas de corte, es posible determinar la fuerza de corte necesaria, que se compone de fuerzas normales y de rotación en los discos cortadores (Figura 11).

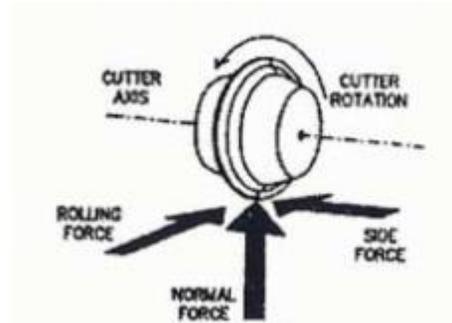


Figura 11. Fuerzas que intervienen en un disco de corte.

La fuerza resultante F_t considera la geometría del disco cortador y las propiedades mecánicas de los materiales a excavar. Así:

$$F_t = \frac{P^\circ \Phi R T}{1 + \Psi} \quad (1)$$

En donde:

F_t Fuerza resultante (lbs).

R Radio del disco cortador (in).

T Ancho de la cuchilla del disco cortador o ancho de corte (in).

Φ Ángulo de contacto entre la roca y disco de corte ($^\circ$)

Ψ Constante en función de la distribución de presión (entre -0.2 y 0.2 decrece con el incremento del espesor de corte).

P° Presión de la zona aplastante (de la geometría del corte y la resistencia de la roca):

$$P^\circ = C^3 \sqrt{\frac{S}{\Phi \sqrt{RT}}} \sigma_c \sigma_t \quad (2)$$

En donde:

$$\Phi = \cos^{-1} \left(\frac{R-P}{R} \right) \quad (3)$$

Con penetración " P " en pulgadas (in) y considerando un coeficiente adimensional $C=2.112$.

Para el caso en estudio, los parámetros de los discos cortadores a ser tomados en cuenta son el diámetro y ancho de corte (Tabla 2).

Tabla 2. Fuerza máxima de contacto para discos de corte empleados en el tramo 3 del TEO.

Diámetro del disco de corte (in)	Fuerza máxima de contacto en el disco (kN)	Ancho de corte (mm)
17	222	15875
	267	1905

Por lo tanto, la fuerza normal y de giro de los discos se calculará de la siguiente manera:

$$F_N(lbs) = F_t \cos \frac{\phi}{2} \quad (4)$$

$$F_R(lbs) = F_t \sin \frac{\phi}{2} \quad (5)$$

Las resistencias a la compresión uniaxial obtenidas en muestras representativas del tramo en excavación están enmarcadas entre los 22 y 95 MPa, con resistencias a la tensión entre 5.78 y 13.3 MPa. La Tabla 3 muestra el resumen de la geometría y características de operación de los discos de la cabeza de corte para la TBM en estudio.

Tabla 3. Hipótesis para el modelo de las herramientas de corte de la TBM en estudio.

TIPO	CANTIDAD	UNIDAD
No. De Discos	48	PZA
Diámetro de la Rueda de Corte.	8.93	m
Diámetro de los discos.	17	in
Velocidad de Giro de los Discos.	150	m/min
Espesor de la cuchilla.	19.05	mm
Espaciamiento (S).	100	mm

Considerando la hipótesis para el modelo y los rangos de compresión axial simple (UCS) esperados, obtenemos la siguiente evaluación de los discos de corte en función de la penetración "P" y la fuerza de contacto "F_N".

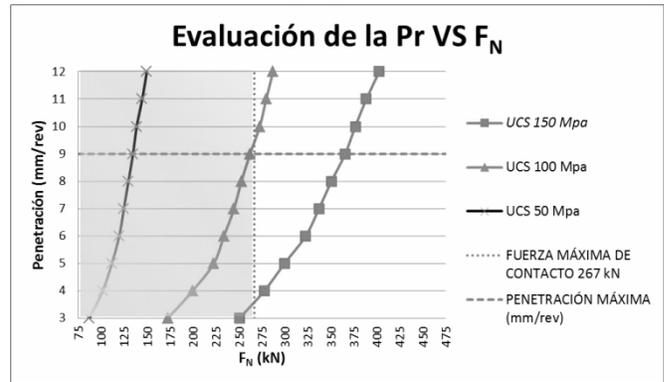


Figura 12. Penetración VS F_N en función del UCS esperado.

Por lo tanto, de la gráfica se concluye que para el rango de resistencias más elevadas (267 kN) las penetraciones alcanzables (P_{max}) son de 9mm/rev; el área sombreada representa el rango de operación aceptable de acuerdo al UCS determinados en los ensayos de laboratorio y su relación con la F_N.

Partiendo del análisis anterior y considerando la distribución y cantidad de los discos de corte en el área de la cabeza de la TBM, además de la sección de roca en el frente de excavación que se considera empíricamente como el punto de apoyo de las herramientas de corte, se puede determinar la fuerza total de empuje máxima aceptable (F_{max}) que la TBM puede ejercer durante su operación antes de superar la condición de fallo de los rodamientos de dichos discos. Una primera aproximación nos indica que, de acuerdo al porcentaje de roca (apoyo) en el frente de excavación (Figura 13), la fuerza de empuje no debe exceder la resistencia máxima de contacto que se obtiene de la suma de las resistencias de cada disco en función del porcentaje de roca en el frente. Dicho de otro modo, la fuerza de empuje no debe exceder la fuerza máxima de contacto de la suma de los discos.

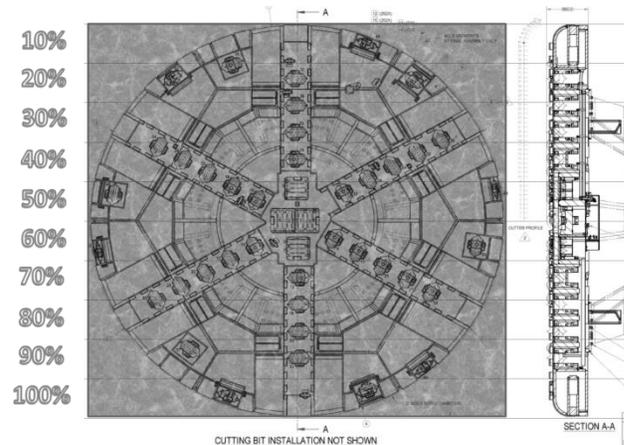


Figura 13. Distribución de las herramientas de corte en función del área de apoyo (roca) en el frente de excavación.

Si la fuerza máxima de contacto por cada disco es de 267 kN y el total de elementos instalados en la rueda de corte es de 48, en función del porcentaje de roca en el frente y la distribución de las herramientas en la cabeza de corte, se puede obtener la fuerza de empuje permisible F_{tmax} aplicable al superar el estado de inercia de la TBM (lograr su avance), como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 4. Fuerza de empuje permisible en función del porcentaje de roca en el frente de excavación.

Porcentaje de Roca en el Frente de Excavación (%)	F_{Nmax} Después de romper estado de inercia de la TBM (kN)
10%	1068
20%	1602
30%	2403
40%	4806
50%	6942
60%	9078
70%	10947
80%	11481
90%	12282
100%	12816

De manera gráfica se observan diferentes cambios de pendiente en la curva que describe el comportamiento de F_{tmax} y que va de acuerdo al porcentaje de apoyo en roca, debido a que la distribución de los discos en la cabeza de corte no es homogénea (Figura 14).

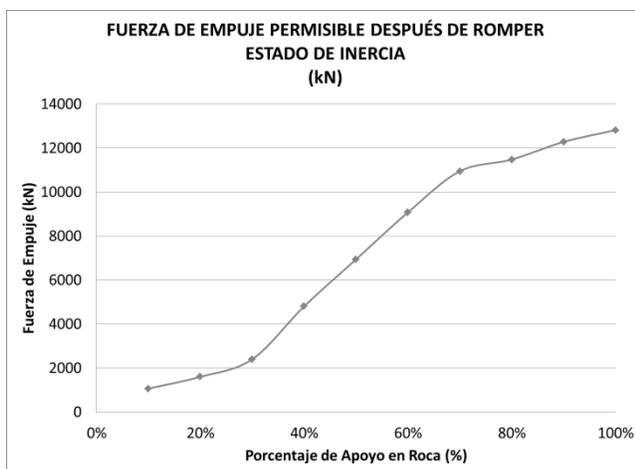


Figura 14. Fuerza de empuje permisible en función del porcentaje de roca en el frente de excavación.

F_{tmax} debe descartarse de la Fuerza de Empuje total aplicada a la TBM. El empuje necesario para lograr el avance se consigue mediante un sistema de gatos perimetrales que se apoyan en el último anillo de

sostenimiento colocado; así, este sistema debe superar las fuerzas que se manifiestan en sentido contrario al avance y que se refieren a: a) fuerza ejercida por la presión hidrostática + la del terreno y b) fuerza ejercida por la fricción entre el cuerpo del escudo y el terreno circundante (Figura 15).

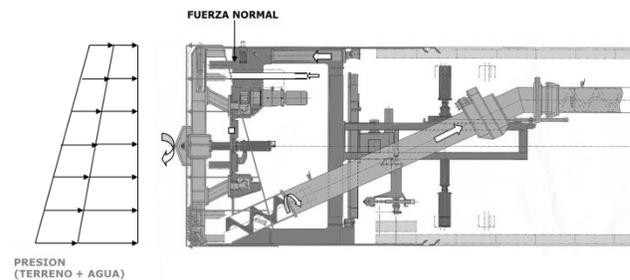


Figura 15. Fuerzas que interactúan en sentido contrario al avance de escudo.

Por lo tanto, la “Fuerza de Empuje” deberá considerar un impulso suficiente para liberar al escudo de su estado de inercia y, finalmente, un esfuerzo adicional para lograr la penetración del terreno y la consecuente excavación. Este efecto se observa claramente mediante el siguiente gráfico (Figura 16) que contiene el análisis de la fuerza de empuje para un anillo determinado, desde el inicio de la excavación hasta completar el volumen requerido para su colocación:



Figura 16. Ruptura del estado de inercia durante el avance de escudo.

La zona sombreada, enmarcada en un círculo dentro del gráfico, delimita el momento justo cuando los gatos de empuje logran romper el estado de inercia de escudo para conseguir su avance y después pasar a una fuerza de empuje nominal para continuar con la excavación. De acuerdo a análisis empíricos para el caso en estudio, la diferencia entre ambas fuerzas oscila en el orden del 8% de la fuerza total.

Actualmente la fuerza de empuje que se transmite a la cabeza de corte se puede determinar de dos maneras:

- Mediante sensores colocados en la rueda de corte que, a través del sistema PLC de la TBM (base de datos del control de procesos de excavación), indican dicho parámetro.

- A través de cálculos teóricos que nos permiten determinar una aproximación de las fuerzas que interactúan en sentido contrario al avance (ver figura 15).

Para el caso de estudio y dado que la TBM Robbins no está equipada con el tipo de sensores descritos, se llevó a cabo un análisis para determinar la fuerza de empuje necesaria para liberar a la TBM de su estado de inercia bajo las 3 condiciones de excavación conocidas en el tramo 3: a) frente completo de roca, b) frentes mixtos (roca+suelo) y c) frente de suelos firmes. Para el caso “b” de frentes mixtos, motivo del presente trabajo, el cálculo arrojó como resultado que se requiere de una fuerza de 33097.57 kN para los fines descritos; ésta puede variar dependiendo de factores como: coeficiente de fricción entre el cuerpo del escudo y el suelo circundante (μ), la fuerza normal y la presión hidrostática.

De esta forma fue posible determinar, teórica y empíricamente, la Fuerza de Empuje máxima para frentes mixtos aplicable al proyecto en cuestión, tal y como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 5. Fuerza de empuje máxima para frente mixto.

Porcentaje de Roca en el Frente de Excavación (%)	F _{max} Después de romper estado de inercia de la TBM (kN)	Esfuerzo total en sentido opuesto al avance "Frentes Mixtos" (kN)	Fuerza de empuje permisible de acuerdo a % de roca en el frente (kN)	Límite superior (+8%) (kN)	Límite inferior (-8%) (kN)
10%	1000	33097.6	34097.6	36825.4	31369.8
20%	1500		34597.6	37365.4	31829.8
30%	2250		35347.6	38175.4	32519.8
40%	4500		37597.6	40605.4	34589.8
50%	6500		39597.6	42765.4	36429.8
60%	8500		41597.6	44925.4	38269.8
70%	10250		43347.6	46815.4	39879.8
80%	10750		43847.6	47355.4	40339.8
90%	11500		44597.6	48165.4	41029.8
100%	12000		45097.6	48705.4	41489.8

Los límites superior e inferior del 8% nos otorgan un margen de operación y surgen de la diferencia entre la fuerza de empuje necesaria para liberar al escudo de su estado de inercia y la fuerza nominal de avance. Así, es posible determinar los valores de operación aceptables en función de la fuerza de empuje y F_{tmax}, como se muestra a continuación:

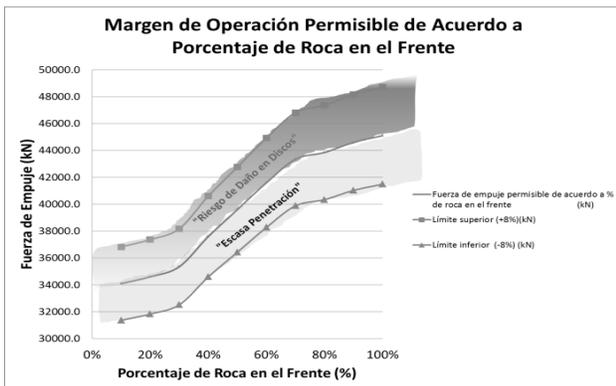


Figura 17. Margen de operación aceptable de acuerdo a porcentaje de roca en el frente de excavación.

Los espacios sombreados representan a la “zona de operación aceptable” partiendo del valor nominal de empuje (curva del centro) o valor objetivo; al respecto se concluye que si se incrementa la fuerza de empuje respecto al valor objetivo, se corre el riesgo de superar F_{tmax} y, por tanto, dañar las herramientas de corte; por el contrario, si se opera por debajo del valor objetivo, la penetración será escasa con la consecuente afectación a los rendimientos de excavación.

Una aproximación adicional a los valores óptimos de operación resulta del empleo del denominado índice Q_{TBM}, que surge del índice de calidad Q de Barton (Barton et al. 1954) para catalogar los macizos rocosos, y que pretende predecir la velocidad neta de avance de una TBM; se expresa de la siguiente manera:

$$Q_{TBM} = \frac{RQD_0}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \cdot \frac{J_w}{SRF} \cdot \frac{SIGMA}{F_n} \quad (6)$$

En donde:

RQD₀ Primer parámetro del índice de Barton pero medido en orientación longitudinal al túnel.

J_n Segundo parámetro de la clasificación de Barton que depende del número de familias de discontinuidades.

J_r Tercer parámetro de la clasificación de Barton que depende de la rugosidad de las discontinuidades que más influyen en el arranque.

J_a Cuarto parámetro de la clasificación de Barton que depende del grado de alteración de las discontinuidades que más influyen en el arranque.

J_w Quinto parámetro de la clasificación de Barton que depende de la presión y caudal de agua en el túnel.

SRF sexto parámetro de la clasificación de Barton relacionado con las tensiones que soporta el macizo rocoso y su resistencia, con el que se trata de tener en cuenta los casos de: fluencia, expansividad y estallidos de roca.

SIGMA Factor dependiente de la resistencia de la roca (UCS-MPa).

F_n Fuerza media por cortador.

A su vez, Barton define a la velocidad de avance como:

$$PR = 5(Q_{TBM}^{-0.2}) \quad (7)$$

En donde:

PR Se refiere a la velocidad de avance expresada en m/h.

Como ejemplo, con los datos obtenidos a partir de ensayos de laboratorio y registros de campo para determinado cadenamiento del proyecto, se obtuvo la siguiente hipótesis para la generación del modelo de velocidad de avance:

Tabla 6. Evaluación de acuerdo a índice Q_{TBM} .

Predicción de la Velocidad Neta de Avance		
RQD	RQD Cadenamiento Actual	34,5
Jn	Una familia de diaclasas.	2
Jr	Diaclasas limpias discontinuas	4
Ja	Con detritos arenosos	4
Jw	Excavaciones secas <1bar	1
SRF	Terreno en Bloques Muy Fracturado	5
SIGMA	Factor dependiente de la resistencia de la roca (UCS-MPa)	95
Fn	Fuerza media por cortador (ton)	26.7

Así:

- $Q_{TBM} = 12.28$
- $PR = 0.61\text{m/h}$ ó 10.23mm/min .

Si ahora se conoce la velocidad máxima de avance (PR_{max}) y la penetración alcanzable (P_{max}) calculada según ecuación (3) es de 9mm/rev , entonces es posible determinar la velocidad angular máxima permisible de la rueda de corte (ω_{max}), mediante la siguiente ecuación:

$$\omega_{max} = \frac{PR}{P_{max}} \quad (8)$$

Por lo tanto: $\omega_{max} = 1.14\text{ rpm}$.

De esta forma se obtiene un modelo que incorpora los procedimientos planteados en el presente trabajo y que pretende determinar, de manera teórica y empírica, los valores de operación aceptable para el caso de estudio, en donde éstos se deberán ajustar consecutivamente y conforme se determinen variaciones en el frente de excavación (Figura 18).

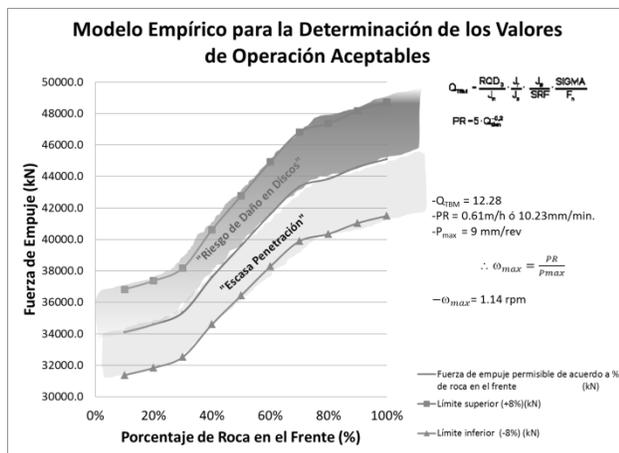


Figura 18. Modelo teórico y empírico para la determinación de los valores de operación aceptable durante el proceso de excavación.

Cabe señalar que en la práctica se ha comprobado la validez de dicho modelo permitiendo la optimización de los rendimientos de excavación a partir de la disminución del desgaste de las herramientas de corte y los daños por

impacto o exceso en la fuerza máxima de contacto en los discos.

4 CONCLUSIONES.

Considerando la incorporación de métodos empíricos y teóricos para el modelo final, se intuye que su aplicación está limitada a condiciones de excavación muy similares a las descritas en el caso de estudio; de igual modo, el modelo base se ha ajustado según se determinaron variaciones en el frente de excavación y de acuerdo al comportamiento de ésta a partir de los parámetros operacionales aplicados en la TBM. Además, se hace notar que dichos modelos proporcionan una idea global y preliminar de los rendimientos esperados, por lo que resulta indispensable contrastarlos con los reales a manera de recalibrar el modelo según se requiera.

También es necesario precisar que 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.

La abrasividad es un factor determinante en el deterioro de las herramientas de corte y elementos de desgaste como el tornillo sinfín; de igual modo, sólo con un correcto acondicionamiento del frente de excavación se desplaza la presión intersticial de agua al frente y se forma la zona de penetración que transfiere las tensiones efectivas sobre el suelo. Por lo tanto, el acondicionamiento del terreno también juega un papel determinante para la optimización de los rendimientos de excavación.

5 REFERENCIAS.

- Barton N. (2005). A critique of Q_{TBM} . Tunnels and Tunnelling International.
- Barton N. (1999). "TBM performance estimation in rock using Q_{TBM} ". Tunnels & Tunnelling International.
- Barton, N. (2000). TBM Tunnelling in jointed and faulted rock. Taylor & Francis.
- Bieniawski, Z. (1989). Engineering rock mass classifications. John Wiley and Sons, New York.
- 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. (2009). La construcción de túneles en terrenos mixtos con tuneladoras de gran diámetro. Experiencias recientes de algunas obras. Revista de obras públicas n° 3498; año 6.
- Mendaña, F. (2007). Tunnel construction with double shield TBMs. Society of Mining, Metallurgy and Exploration.