



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL – GEOTÉCNIA

Análisis de rendimientos en las diferentes etapas de excavación de un túnel en suelo firme,
utilizando un escudo EPB

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
DAVID SERRADELL MEJIA

TUTOR PRINCIPAL
ING. CARLOS RENÉ SÁENZ FUCUGAUCHI
COMISSA

Ciudad Universitaria, CD. MX., agosto 2017

JURADO ASIGNADO:

Presidente: M.I. Sánchez Reyes Fermín Antonio
Secretario: M. en I. Moreno Y Fernández Andrés A.
1er. Vocal: Ing. Sáenz Fucugauchi Carlos René
2do. Vocal: M. en I. Suárez Fino José Francisco
3er. Vocal: M. I. D. E. Pérez Reyes José Anselmo

Facultad de Ingeniería, UNAM

TUTOR DE TESIS:

Ing. Sáenz Fucugauchi Carlos René

FIRMA

(Segunda hoja)

DEDICATORIA

A mi amada esposa por su invaluable apoyo, sus palabras de aliento, su paciencia y amor tan grande. Por no cejar en el esfuerzo impuesto para sostenerme ante las vicisitudes que surgieron a lo largo de este trabajo. ¡Gracias!

AGRADECIMIENTOS

Al Ingeniero Carlos Sáenz, por brindarme su valioso tiempo, su atención, su paciencia y su amistad. Agradezco la calidez de su trato que siempre tuvo hacia mi persona.

Al Maestro José Anselmo Pérez Reyes, por su constante y valiosa asesoría, todos sus consejos los tengo en alta estima.

A la Unidad de Posgrado de la UNAM y al CONACYT, que han hecho posible la realización de mis estudios de maestría.

CONTENIDO

Figuras.....	8
Tablas.....	10
INTRODUCCIÓN.....	12
CAPÍTULO PRIMERO: Marco teórico.....	14
1. Importancia de la clasificación de los materiales geotécnicos.....	14
1.1. Suelos.....	15
1.1.1. Suelos blandos.....	16
1.1.2. Suelos firmes.....	16
1.2. Rocas.....	18
1.2.1. Clasificación de las rocas por su origen.....	19
A) Rocas ígneas.....	19
a. Ígneas intrusivas.....	19
b. Ígneas extrusivas.....	19
B) Rocas sedimentarias.....	20
C) Rocas metamórficas.....	20
1.2.2. Mecánica de rocas.....	21
1.3. Frente mixto.....	24
a) Preparación para un frente mixto.....	24
2. Tipos de tuneladoras.....	26
2.1. Tuneladoras para rocas y frentes mixtos.....	28
2.1.1. TBM tipo Topos.....	29
2.1.2. EPB.....	31
2.1.3. TBM tipo Doble escudo.....	33
2.2. Tuneladoras para suelos.....	36
2.2.1. EPB.....	36
2.2.2. Hidroescudos (<i>Slurry</i>).....	38
3. Excavación de lumbreras.....	40
3.1. Lumbrera Flotada.....	40
3.2. Anillos Prefabricados.....	41

3.3. Convencional (Excavación de roca).....	41
3.4. Muro Milán (Técnica Soletanche).....	42
CAPÍTULO SEGUNDO: Ensamble de un escudo de tipo EPB.....	44
1. Procedimiento.....	44
a) Lumbrera con umbilicales.....	44
b) Portal de entrada “Tajo a cielo abierto”.....	47
c) Galería de montaje.....	48
CAPÍTULO TERCERO: Análisis de rendimientos de la excavación con equipo EPB en suelos firmes con Galería de montaje.....	52
1. Condiciones geológicas.....	52
2. Presencia de agua en el frente	57
2.1.Intervenciones hiperbáricas.....	58
3. Parámetros operativos.....	61
3.1.Control de procesos.....	65
3.2.Parametrización de acuerdo al tipo de frente.....	66
3.3.Predicción de rendimientos.....	70
3.4.Diseño del equipo tunelador.....	73
4. Metros iniciales	74
4.1. Procedimiento constructivo.....	74
4.2. Cálculo de rendimientos.....	85
5. Metros subsecuentes.....	88
5.1. Procedimiento constructivo.....	88
5.2. Ciclo de excavación.....	89
5.3. Cálculo de rendimientos.....	91
6. Metros finales.....	95
6.1.Procedimiento Constructivo.....	95
6.2.Logística de excavación.....	95
6.3.Cálculo de rendimientos.....	97

CAPÍTULO CUARTO: Comparación de los rendimientos logrados en cada uno de los etapas de excavación.....	100
1. Concepción de la situación.....	100
2. Análisis comparativo de los rendimientos.....	102
Conclusiones.....	103
Bibliografía.....	106
Bibliografía web.....	107

FIGURAS

Capítulo primero

Fig. 1.1. El suelo como un sistema de partículas_____	15
Fig. 1.2. Roca intacta de 100 mm. de diámetro por 200 mm. de largo en una brecha de la mina conocida con el nombre: <i>El teniente</i> en Chile_____	21
Fig. 1.3. Definición ilustrativa de un macizo rocoso (a) y de su estructura (b) __	22
Fig. 1.4 Diagrama idealizado que muestra la transición de roca intacta a una altamente fracturada por el aumento del tamaño de la muestra_____	23
Fig. 1.5. Frente de excavación de material mixto en una Interface roca-suelo____	24
Fig. 1.6. Porto Light Metro Project_____	25
Fig. 1.7. Ejemplo de frente mixto desde una vista lateral_____	25
Fig. 1.8. Criterios de Mitsubishi para la selección de tuneladoras_____	27
Fig. 1.9. Esquema de la rueda de corte de una TBM con discos cortadores _____	28
Fig. 1.10. Disco de corte_____	28
Fig. 1.11. Fotografía de las zapatas o grippers de una TBM en roca_____	29
Fig. 1.12. Diagrama de las zapatas de soporte y grippers de una TBM de roca____	30
Fig. 1.13 Sistemas de soporte para TBM - Topo en roca fracturada_____	31
Fig. 1.14. Diagrama de una TBM tipo EPB, en el que se muestra el tornillo transportador_____	32
Fig. 1.15. Diagrama del acomodo de los escudos frontal, telescópico y trasero de una TBM Doble escudo_____	33
Fig. 1.16. Diagrama de una TBM tipo doble escudo_____	34
Fig. 1.17. Modos de operación: Doble escudo según los tipos de terreno_____	35
Fig. 1.18. Esquema de un escudo de Presión EPB_____	37
Fig. 1.19. Balance de Caudales de Slurry en Hidroescudos_____	39
Fig. 1.20. Ejemplo de una lumbrera con método convencional_____	42
Fig. 1.21. Construcción de lumbrera con muro Milán_____	43

Capítulo segundo

Fig. 2.1. Preparación de la cabeza de corte de la TBM para ser bajada con grúa__	44
Fig. 2.2. Instalación de los primeros carros de la TBM_____	45
Fig. 2.3. TBM del tipo EPB en portal de entrada_____	47
Fig. 2.4. Avance excavando los metros iniciales y colocando los primeros anillos en terreno natural de portal de salida a lumbrera_____	48
Fig. 2.5. Construcción de una galería de montaje_____	49
Fig. 2.6. Construcción de una galería de montaje_____	50
Fig. 2.7. Introducción de las partes de una TBM a una galería de montaje_____	50
Fig. 2.8. Diagrama de TBM en posición de arranque dentro de galería de montaje_	51

Capítulo tercero

Fig. 3.1. Favorabilidad de las discontinuidades en relación con la obra_____	53
Fig. 3.2. Campos de aplicación de los diferentes escudos_____	54
Fig. 3.3. Perfil geológico – geotécnico del tramo analizado_____	55
Fig. 3.4. Perfil geológico – geotécnico que ejemplifica las condiciones variables posibles_____	56
Fig. 3.5. Diagrama que ejemplifica el ingreso a las cámaras Hiperbáricas de una TBM_____	60
Fig. 3.6. Ejemplo de cámaras Hiperbáricas de una TBM_____	60
Fig. 3.7. Ejemplo de trabajos en cámaras Hiperbáricas_____	61
Fig. 3.8. Esquema de fuerzas e interacciones durante la excavación con una tuneladora del tipo EPB_____	67
Fig. 3.9. Armado de carros de la TBM en superficie_____	75
Fig. 3.10. Bajada del escudo al fondo de la lumbrera_____	76
Fig. 3.11. Armado de las cuatro secciones del accionamiento principal_____	77
Fig. 3.12. Es bajado el transportador helicoidal, y la media sección inferior del escudo, cabe destacar que se posiciona en esta etapa la media sección inferior a diferencia del tornillo, que solo se deja a un costado_____	78
Fig. 3.13. Se baja la transmisión de la TBM y se posiciona sobre la media sección	

rinferior_____	78
Fig. 3.14. Se baja el mamparo de la TBM y se ensambla_____	79
Fig. 3.15. Se baja y se instala el lateral derecho de la cabeza de corte_____	79
Fig. 3.16. Se baja y se instala el lateral izquierdo de la cabeza de corte_____	80
Fig. 3.17. Se baja y se instala la media sección superior de la cabeza de corte_____	80
Fig. 3.18. Se baja y se instala el eje del erector de dovelas_____	81
Fig. 3.19. Se baja y se ensambla el erector de dovelas_____	81
Fig. 3.20. Se ensambla en su sitio el transportador helicoidal o mejor conocido como tornillo sinfín, este ya se encontraba en el fondo de la lumbrera pero por cuestiones de logística y de espacio, se deja a un lado mientras los pasos 2 al 8 transcurren. De esta forma queda armado el escudo de la TBM_____	82
Fig. 3.21. Esquema del avance de los primeros metros “Avanzando sin excavar” y “Avanzando excavando” en una lumbrera de arranque_____	83
Fig. 3.22. Esquema del avance de los primeros metros de excavación “Excavación dentro del túnel” en una lumbrera de arranque_____	84
Fig. 3.23. Diagrama de las diferentes etapas de excavación en los metros finales de un paso por lumbrera_____	96
Fig. 3.24. Gráfica del tiempo invertido en cada etapa de los metros finales_____	99

TABLAS

Capítulo primero

Tabla 1.1. Clasificación de las rocas por su resistencia a la compresión simple__	17
Tabla 1.2. Parámetros geotécnicos de un suelo firme_____	18

Capítulo tercero

Tabla 3.1. Parámetros de excavación en función del tipo de terreno para un TBM de 8.88 m diámetro_____	56
Tabla 3.2. Tiempo de trabajo y tiempo de descompresión en función de la Presión_____	59
Tabla 3.3. Parámetros de operación estimados para un TBM del tipo EPB de 8.88 m diámetro de acuerdo al tipo de material geotécnico_____	69

Tabla 3.4. Cronograma de actividades de Excavación de los primeros metros de un túnel_____	87
Tabla 3.5. Análisis de rendimientos de acuerdo a los tiempos observados para metros subsecuentes de un túnel_____	93
Tabla 3.6. Análisis de rendimientos de acuerdo a los tiempos observados para los metros finales de un túnel_____	99

Capítulo cuarto

Tabla. 4.1. Comparativa entre rendimientos de proyectos con TBM – EPB_____	101
Tabla. 4.2. Resumen de los rendimientos de las etapas de excavación de un túnel con TBM_____	102

INTRODUCCIÓN

Para este trabajo de investigación, presento un marco teórico en el que describo algunos de los conceptos básicos de la ingeniería de túneles – lo referente a los materiales geotécnicos y a las máquinas integrales de excavación TBM –, esto con el fin de que sean claros los cálculos propuestos para la comparación de los rendimientos de excavación en las tres etapas de un túnel, esto lo abordo en el capítulo primero.

En la primera parte de este proyecto, puntualizo – acorde a una clasificación geotécnica empírica – los materiales geotécnicos que se pueden presentar en las etapas de la realización de un túnel, a saber, suelo blando y firme, rocas y la combinación de estos conocidos con el nombre de frentes mixtos. Referente a los materiales geotécnicos expongo la importancia de clasificarlos ya que al catalogar cada material y describir sus características es posible predecir su comportamiento ante las acciones impuestas en el subsuelo por mano del hombre.

Posteriormente hago una descripción de los tipos de roca según su origen ya que en gran medida el comportamiento y configuración de éstas, están determinadas por su orogénesis. Expongo de igual forma, la diferencia entre macizo rocoso y roca intacta, este contraste es uno de los puntos finos del análisis de rocas. Lo anterior, lo trato desde la mecánica de rocas – disciplina encargada de estudiar el comportamiento de las mismas ante las acciones impuestas sobre ellas –.

Análogamente en la sección 2 del primer capítulo puntualizo las principales características de las TBM en función del tipo de tuneladora, de manera que cada máquina está diseñada para excavar en cierto tipo de material geotécnico y bajo ciertas condiciones específicas. En lo subsecuente al aludir a las actividades logísticas y procesos de las TBM, se requiere que el lector este familiarizado con los conceptos elementales de la excavación con máquina tuneladora. Además de lo anterior en este mismo capítulo abordo las generalidades y una descripción de las técnicas más socorridas para la excavación de lumbreras.

En el capítulo segundo, describo detalladamente el procedimiento de ensamble de un escudo tipo EPB por medio de las tres técnicas más socorridas las cuales son: a) Lumbreira con umbilicales, b) Portal de entrada – Tajo a cielo abierto – y c) Galería de montaje.

Posteriormente en el capítulo tercero, realizo una descripción de las principales

actividades del proceso constructivo de cada etapa de excavación para comprender en términos generales lo que implica cada uno. Por ejemplo, a diferencia del tramo intermedio de excavación que resulta ser un ciclo; los primeros y últimos metros de avance con TBM implican acciones de gran precisión que requieren mayor tiempo y recursos por la complejidad de dichas tareas. Además de ello explico los aspectos relevantes que intervienen en el proceso de excavación que son: las condiciones geológicas, la presencia de agua en el frente – hago especial énfasis en las intervenciones hiperbáricas –, los parámetros operativos de la TBM – proporciono un esbozo acerca de la predicción de rendimientos y los aspectos básicos a considerar para elegir la TBM que conviene utilizar –.

En este mismo capítulo, tercero, elaboro un análisis de los rendimientos de excavación en cada una de las etapas: metros iniciales, subsecuentes y finales, tomando en cuenta y de manera detallada cada actividad que rigurosamente se realiza en cada etapa de excavación, todo esto por medio de un recuento cronológico de los trabajos.

Finalmente, en el capítulo cuarto comparo los rendimientos de cada etapa constructiva de un túnel con TBM del tipo EPB para verificar la gran diferencia que existe en los rendimientos de los primeros metros, metros finales contra los metros subsecuentes con lo cual quedará demostrado que englobar el proceso de tuneleo con máquina tuneladora en un solo proceso – como si fuesen similares sus tres etapas de construcción – es un error.

CAPÍTULO PRIMERO

Marco teórico

1. Importancia de la clasificación de los materiales geotécnicos

La clasificación de los materiales geotécnicos debe su importancia a que muestra los comportamientos y rendimientos de excavación del túnel que dependen de éste. La forma general en que se clasifican dichos materiales se da mediante métodos empíricos y se dividen en: suelo blando y firme, roca y la combinación de éstos. Se puede considerar que clasificar los materiales geotécnicos de manera empírica no es suficiente porque se ha observado y demostrado que si hay un escueto conocimiento del subsuelo esto lleva a errores catastróficos.¹ Por lo anterior, es necesaria la realización de una precisa caracterización geotécnica para la efectiva elección del trazo del túnel y demás factores que dependen para su construcción.

Una correcta caracterización geotécnica es fundamental para la elección del proceso constructivo y su planeación, lo cual es la base para un acertado cálculo de los rendimientos de excavación.

Para el caso que nos ocupa, se comparan los *rendimientos*² de las tres etapas constructivas de un túnel, es decir, metros iniciales, subsecuentes y finales, en el caso con TBM³ del tipo EPB,⁴ con un diámetro de 8.88 metros, donde se excava en *suelo firme*⁵ a una profundidad promedio de 110 metros.

¹ Casos históricos en: Metro de Munich (Germany) – 1994, Heathrow Express Link (UK) – 1994, Metro de Taegu (South Korea) – 2000, SOCATOP Túnel A86 (Francia) – 2002, Metro de Shangh (P.R. de China) – 2003, Singapore MRT – Spring 2004, Metro de Taipei (Taiwan), Metro de Los Angeles, (Estados Unidos) – 1995, Hull Yorkshire Tunnel, (UK) – 1991, TAV Bologna (Florence) – Italia, Taiwan High Speed Railway, Metro de Barcelona (España) – 2005, Metro de Lausanne (Switzerland) – 2005, Lana Cove Tunnel (Sydney) – 2005, Metro de Kaohsiung (Taiwan) – 2005.

² *Rendimiento*: es la velocidad de avance en la excavación de un túnel, se mide en metros/día, y está determinado por las horas de trabajo disponibles cada día, la velocidad de avance y la duración de las interrupciones al tuneleo.

³ *TBM*: Por sus siglas en inglés *Tunnel Boring Machine*. Traducción propia: *Máquina tuneladora*.

⁴ *EPB*: Tipo de máquina tuneladora para excavar túneles que utiliza un soporte del frente de excavación mediante escombros, óptimo para suelos cohesivos.

⁵ Para mayor información ver: Capítulo Primero Sección 1.1.3

1.1. Suelos

Son agregados resultantes de la erosión de las rocas por desgaste físico y químico. El desgaste físico en las rocas causa desprendimientos de partículas y una reducción del tamaño de las mismas que al acumularse se convierten en suelos. El desgaste químico además de provocar alteraciones en los átomos de las partículas de roca procedente, causa con ello una reducción en el tamaño de las mismas.

Desde el punto de vista de la ingeniería geológica, el suelo se define como un agregado de minerales unidos por fuerzas débiles de contacto, separables por medios mecánicos de poca energía o por agitación en agua.⁶

La importancia de estudiar y clasificar los suelos reside en que se debe saber su comportamiento al inducir fuerzas externas, un caso es la aplicación de cargas que los alteran estructuralmente – en el acomodo de sus partículas – como se muestra a continuación:

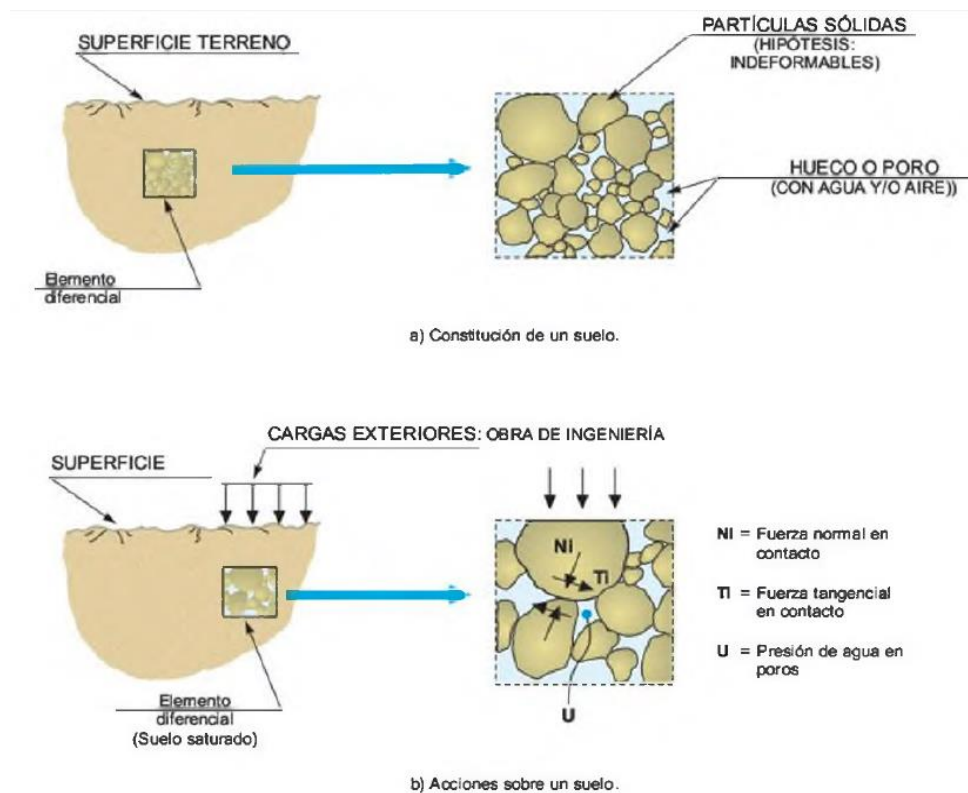


Fig. 1.1 El suelo como un sistema de partículas.⁷

⁶ González de Vallejo, Luis I. et al. (2002) *Ingeniería Geológica*. Madrid: Pearson Education. p. 20

⁷ *Ibidem*. p. 21

La clasificación de los suelos más usada reside con base en el tamaño de los granos que lo conforman, dividiéndolos en suelos de grano grueso; a saber las gravas y arenas en las que más del 50% de los granos es mayor de 0,075 mm. de diámetro, y suelos de grano fino que son los limos y las arcillas los cuales tienen un diámetro de menos de 0,075 mm. en más del 50% de sus partículas. Sin embargo, la clasificación de interés para el presente trabajo corresponde con la capacidad resistente de los suelos; el cual los divide en dos grupos: suelos blandos y firmes.

1.1.1. Suelos blandos

Son aquellos que por el acomodo y tamaño de sus partículas poseen una baja capacidad portante o de resistencia. Estos tienen una resistencia a la *compresión simple*⁸ de hasta 0.1 MPa. En el caso de los suelos de grano fino, su resistencia no solo depende del acomodo de sus partículas, sino de los enlaces químicos entre las mismas, que aunado a las fuerzas impuestas por el agua contenida en los huecos, generan una serie de presiones que pueden aportar resistencia a una masa de suelo.

El agua puede cambiar significativamente las características de los suelos. Las fuerzas de flujo de agua desempeñan un papel muy importante en la desestabilización de estructuras geotécnicas.⁹

1.1.2. Suelos firmes

Tienen una elevada resistencia, se puede decir que es la más alta de los suelos; pueden estar constituidos de granos gruesos o de granos finos. Atkinson propone que un suelo firme es aquel que presenta una elevada resistencia a la compresión simple, que puede llegar a 1 o 1,25 MPa que es ya la frontera entre los suelos y las rocas.

⁸ Máximo esfuerzo que soporta una probeta antes de romper al ser cargada axialmente en laboratorio. Extraído de: González de Vallejo, Luis I. et al. (2002) *Ingeniería Geológica*. Madrid: Pearson Education. p. 121

⁹ Muni, Budhu (2000) *Soil Mechanics and Foundations*. Arizona: John Wiley & Sons, INC. 3rd ed. p. 152

Un criterio ampliamente extendido en ingeniería geológica para el establecimiento de los límites entre suelo y roca es el valor de la resistencia a compresión simple en la zona de transición se encontrarían los denominados suelos duros y rocas blandas. Los límites sugeridos por diferentes clasificaciones y autores han ido rebajándose hasta 1 ó 1,25 MPa debido a que algunas rocas muy blandas presentan resistencias de este orden, valor que actualmente se considera adecuado.¹⁰

A continuación se muestra una tabla en la que bajo cuatro diferentes criterios los suelos son aquellos que presentan una resistencia a la compresión simple menor a 1 MPa.

Clasificación de las rocas a partir de su resistencia a compresión simple				
Resistencia a compresión simple (MPa)	ISRM (1981)	Geological Society of London (1970)	Bieniawski (1973)	Ejemplos
< 1	Suelos			
1 - 5	Muy blanda	Blanda > 1,25		
5 - 12,5	Blanda	Moderadamente blanda	Muy baja	Sal, hitita, limolita, marga, toba, carbón.
12,5 - 25				
25 - 50	Moderadamente dura	Moderadamente dura	Baja	Esquisto, pizarra.
50 - 100	Dura	Dura	Media	Marmol, granito, gneiss, arenisca, caliza porosa.
100 - 200	Muy dura	Muy dura	Alta	Arenisca muy cementada, caliza, dolomía.
> 200				
> 250	Extremadamente dura	Extremadamente dura	Muy alta	Cuarcita, gabro, basalto.

Tabla 1.1. Clasificación de las rocas por su resistencia a la compresión simple.¹¹

Por lo anterior, considero necesario mostrar una tabla de valores en los que se circunscriben los parámetros de los suelos firmes con el fin de identificarlos con mayor precisión.

¹⁰ González de Vallejo, Luis I. et al. (2002) *Ingeniería Geológica*. Madrid: Pearson Education. p. 121

¹¹ *Ibidem*. p. 133

Párametros geotécnicos de un Suelo firme

Parámetro	Valor
Índice de fluidez, I_L	1,00-0,80
Peso específico, γ	11,80 - 15,7 kN/m^3
Relación de vacíos, e	< 0,5
Coefficiente de permeabilidad, k	$10^{-5} - 10^{-8} \text{ cm/s}$
Resistencia a la compresión simple	0,08 – 1,25 MPa
Contenido de agua, w	30% - 40%

Tabla 1.2. Parámetros geotécnicos de un suelo firme.¹²

1.2. Rocas

Son conjuntos de agregados mono o poli-minerales con fuertes uniones cohesivas y que se presentan consolidados, cementados, aglomerados o de cualquier otra forma, de modo que dan lugar a un material de alta resistencia. Las rocas ocupan gran parte de la corteza terrestre con el principal elemento que constituye la litosfera y se encuentran comúnmente atravesadas por distintos caracteres geológicos estructurales y discontinuidades de variado origen geológico, como la estratificación, esquistosidad, pliegues, fallas y juntas. Al conjunto de estas discontinuidades que atraviesan la roca se denomina estructura del *macizo rocoso*.¹³

El conocimiento del comportamiento de las rocas es de interés para los ingenieros porque en estas se desplantan determinadas obras o se realizan excavaciones que cambian el estado natural de las mismas, lo cual genera reacciones que conviene predecir en pro de salvaguardar la integridad de la obra. El comportamiento de las rocas está principalmente condicionado por dos factores: su origen y estructura.

¹² Cfr. González de Vallejo, Luis I. et al. (2002) *Ingeniería Geológica*. Madrid: Pearson Education. pp. 27, 30

¹³ Mayor información: Capítulo Primero, sección 1.2.2

1.2.1. Clasificación de las rocas por su origen

A) Rocas ígneas

Las rocas ígneas se forman por la solidificación de una masa fundida, mezcla de materiales pétreos y de gases disueltos, denominada magma. El magma se puede derivar del manto de la tierra o de las rocas preexistentes fundidas por cambios extremos de la temperatura y de la presión. Se constituyen de soluciones calientes, la que predomina es una fase compleja de silicato. Las rocas ígneas pueden dividirse en: intrusivas y extrusivas, según el medio en que se formen.

a. Ígneas intrusivas

Se forman cuando el magma solidifica a profundidad dentro de la corteza terrestre, debido a ello, se pueden desarrollar cristales ya que el enfriamiento del magma es lento. Un ejemplo de este tipo de rocas es el granito.

b. Ígneas extrusivas

Estas se forman en el momento en que el magma solidifica en superficie, este lo hace de manera brusca y no se forman cristales grandes, por el contrario se generan pequeños cristales que no son visibles a simple vista, incluso en ocasiones la roca queda vitrificada, es decir, sin cristales.

Un caso de formación de rocas extrusivas son las piroclásticas: estas se forman cuando el magma es expulsado explosivamente por el aire. Los fragmentos producidos por esta actividad explosiva se denominan piroclastos. Su tamaño puede variar en función de la viscosidad del magma, la violencia de la explosión, el gas contenido en el magma antes o después de salir disparado y la cantidad de materia que el volcán expulse. Un tipo de piroclasto es el *Lapilli*, que tiene un diámetro de 10 a 50 mm.; y otro tipo es la ceniza que cae.

En el proceso de formación de rocas piroclásticas, el material de tipo piroclástico cae sobre la superficie después de ser lanzado, este eventualmente se endurece y forma rocas; unas se dan por la caída de ceniza denominadas *tobas*; otras se forman de piroclastos redondeados y genera los *aglomerados* y por último las formadas por piroclastos angulares denominadas *brechas*.

B) Rocas sedimentarias

Estas se forman por la acumulación de restos o *detritus* de otras rocas, por la precipitación química de minerales solubilizados o por la acumulación de restos de animales o vegetales.

Se constituyen de tres maneras:

1. Por el depósito de restos de otras rocas desprendidos por efecto de la erosión¹⁴
2. por la acumulación de partículas resultantes de la acción de los seres vivos¹⁵
3. por la precipitación química de minerales solubilizados.¹⁶

Son cuatro los procesos que generan las rocas sedimentarias clásticas: erosión, transporte, deposición y compactación. Las partículas de rocas de diferentes tamaños son transportadas por agentes de erosión – usualmente agua y en menor frecuencia aire y hielo – los cuales reducen el tamaño de sus partículas. Estos materiales acumulados se sedimentan en zonas más bajas, se depositan en los fondos marinos o lacustres y se compactan bajo el efecto de nuevos sedimentos; al compactarse y endurecerse estas partículas se convierten en rocas clásticas, proceso que lleva por nombre *litificación*.

C) Rocas metamórficas

Son un tipo de roca procedente de la transformación de una roca existente – sedimentaria, ígnea o incluso otra metamórfica como los esquistos y gneises – a través del metamorfismo. Este proceso consiste en el cambio físico y químico que sufre una roca al estar sometido a nuevas condiciones de presión y temperatura. Cuando la temperatura supera los 200° C, los minerales de las rocas comienzan a cristalizarse y la presión obliga a los cristales a reorientarse.

Las texturas de las rocas metamórficas se dividen en dos categorías: las foliadas y las no foliadas. Las foliadas son producto del diferencial de presión que deformó la roca en un plano, se caracterizan por la orientación de los minerales que les da su aspecto distintivo. Las no foliadas no tienen rasgos o patrones de presión, lo que las hace más difícil de clasificar a simple vista.¹⁷

¹⁴ Rocas sedimentarias clásticas

¹⁵ Otra categoría en la que se dividen las rocas sedimentarias son las no clásticas, estas se forman por la acumulación de restos de animales o vegetales, como las rocas carbonatadas y las salinas, y se diferencian por no tener de manera visible clastos o partículas como el yeso o la caliza.

¹⁶ *Ibíd.*

¹⁷ Jian Zhao. (s/f). *Rock mechanics for civil engineers*. Lausanne, pp. 4-7

1.2.2. Mecánica de rocas

La mecánica de rocas es la disciplina encargada del estudio teórico y práctico de las propiedades y comportamiento mecánico de los materiales rocosos; así como su respuesta ante la acción de fuerzas aplicadas en su entorno físico. Es menester entender la importancia de esta disciplina ya que brinda los parámetros necesarios para desplantar una obra sobre roca. La mecánica de rocas nos permite establecer dos tipos de análisis para las rocas; en primera instancia está la roca intacta o matriz rocosa, que concibe a las rocas como bloques sanos ubicados entre las discontinuidades y pueden ser representados por una muestra de mano o trozo que se utiliza para ensayos de laboratorio. A pesar de considerarse continua, presenta un comportamiento heterogéneo y anisótropo ligado a su origen y a su microestructura mineral. Mecánicamente queda caracterizada por su peso específico, resistencia y deformabilidad.¹⁸



Fig. 1.2. Roca intacta de 100 mm. de diámetro por 200 mm. de largo en una brecha de la mina conocida con el nombre: *El teniente* en Chile.¹⁹

En segundo término tenemos, el *macizo rocoso* al que la mecánica de rocas concibe como el conjunto de los bloques de matriz rocosa y de las discontinuidades de diverso tipo que afectan al medio rocoso. Mecánicamente los macizos rocosos son medios discontinuos,²⁰ anisótropos,²¹ y heterogéneos.²²

¹⁸ Ídem.

¹⁹ Recuperado de: https://www.rocscience.com/documents/hoek/corner/12_Rock_mass_properties.pdf

²⁰ *Discontinuidad*: la presencia de rasgos físicos – superficies de estratificación, juntas, fallas, diques, etc. – que rompen la continuidad de las propiedades mecánicas de los bloques rocosos, confiriendo al macizo rocoso un comportamiento geo mecánico e hidráulico discontinuo, condicionado por la naturaleza, frecuencia y orientación de los planos de discontinuidad. Cfr. González de Vallejo, Luis I. et al. (2002) *Ingeniería Geológica*, Madrid: Pearson Education. p. 123.

²¹ *Anisotropía*: es la presencia de planos de debilidad de orientaciones preferentes – estratificación, laminación, familias de diadas a tectónicas – implica diferentes propiedades y comportamiento mecánico en función de la dirección considerada. Ídem.

²² *Heterogeneidad*: es la variación de litología, grado de alteración, contenido de agua, etc., en una misma masa de roca. Ídem.

Al conjunto de discontinuidades que presentan los macizos rocosos se denomina estructura del macizo rocoso, el siguiente diagrama permite visualizar el concepto.

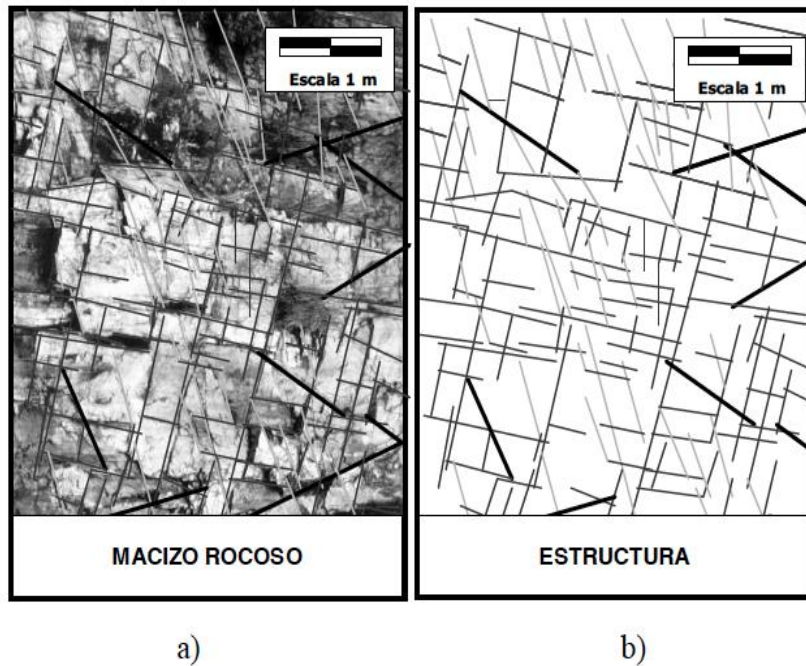


Fig. 1.3. Definición ilustrativa de un macizo rocoso (a) y de su estructura (b).²³

De lo anterior, el comportamiento de un macizo rocoso está influenciado por el estado y origen de los bloques de roca intacta, por la estructura del macizo rocoso y el tamaño de la obra. A continuación se muestra un diagrama que Hoek & Brown proponen para representar el efecto escala en un túnel:

²³ Ramírez Oyanguren, P., & Alejano Monge, L. R. (2004). *Mecánica de rocas: Fundamentos e ingeniería de taludes* (No. 727). Red DESIR.

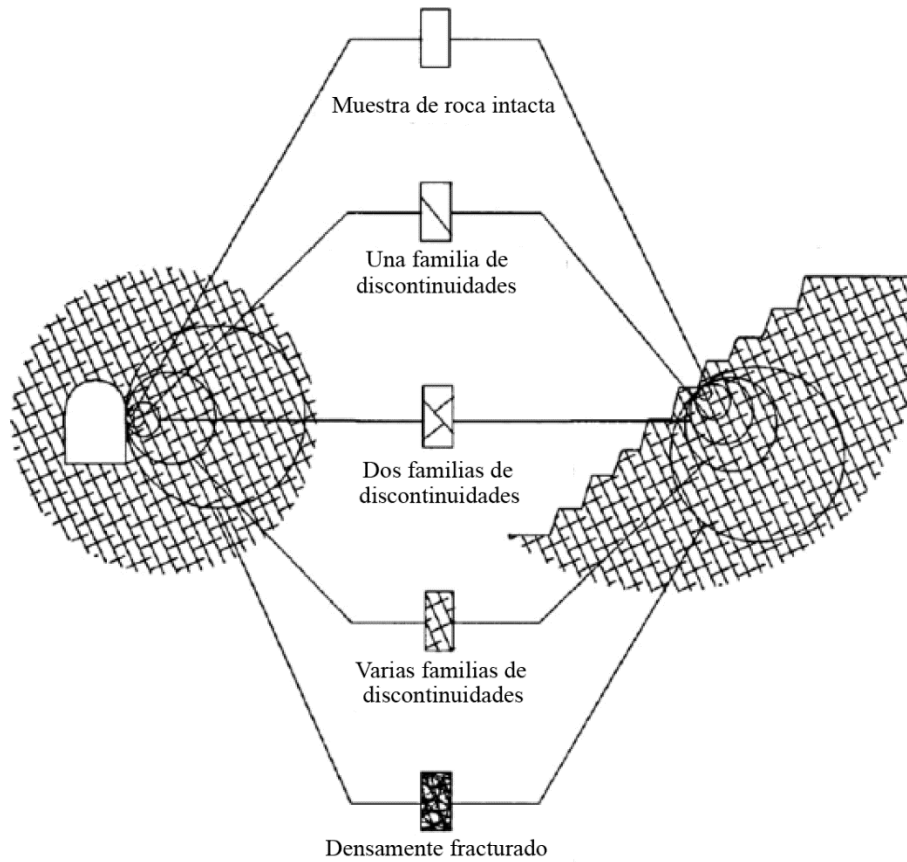


Fig. 1.4. Diagrama idealizado que muestra la transición de roca intacta a una altamente fracturada por el aumento del tamaño de la muestra.²⁴

²⁴ Recuperado de: https://www.roscience.com/documents/hoek/corner/12_Rock_mass_properties.pdf

1.3. Frente mixto

El frente mixto es el material geotécnico, donde hay dos o más formaciones geológicas presentes a la vez en la superficie frontal del túnel con diferencias significativas en las propiedades del material, que influyen en gran medida en la velocidad de penetración de la TBM o en los parámetros operacionales de ésta.²⁵ Es también aquel frente con zonas que poseen diferentes propiedades mecánicas aunque con la misma formación geológica.



Fig. 1.5. Frente de excavación de material mixto en una Interface roca-suelo ²⁶

a) Preparación para un frente mixto

Tenemos el caso de “Porto Light Metro Project” en Portugal, el cual nos mostró que uno de los retos más grandes en la excavación de túneles con TBM es encontrarnos con una interfaz inclinada de materiales, es decir, un frente mixto. Al presentarse este tipo de condiciones geotécnicas para las cuales la máquina no está calibrada²⁷ en sus parámetros operativos y tener al frente una combinación de materiales, la TBM no puede excavar como lo hacía cuando el material a excavar era hasta cierto punto homogéneo. Esta situación es ya una constante en la industria de los túneles, por lo que es crucial estar preparados para minimizar su afectación.

²⁵ cfr. Ákos Tóth, Qiuming Gong, Jian Zhao (2013) *Tunnelling and Underground Space Technology* 38, *Case studies of TBM tunneling performance in rock–soil interface mixed ground*. Ed. Elsevier. p. 141.

²⁶ Ídem.

²⁷ La TBM lleva ciertos parámetros operativos de acuerdo al tipo de material que excava, por lo que al llegar a un cambio de materiales, estos deben ajustarse.



Fig. 1.6. Porto Light Metro Project²⁸

Lo anterior expuesto y los daños causados a una TBM pueden ejemplificarse con la siguiente figura:

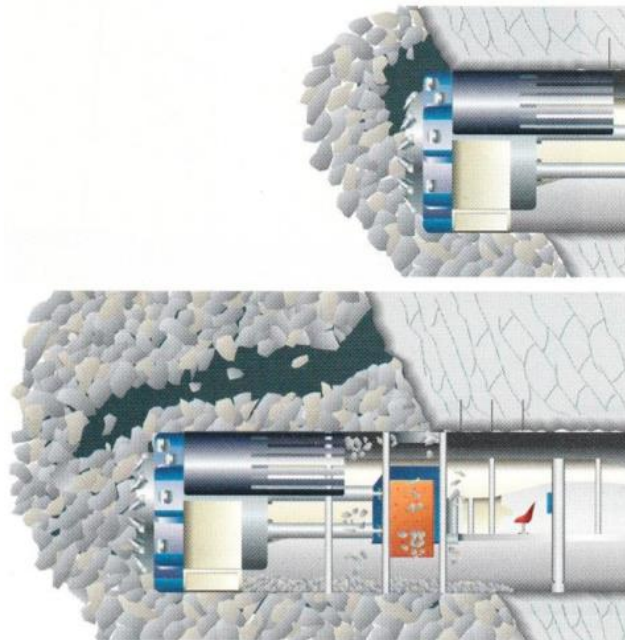


Fig. 1.7. Ejemplo de frente mixto desde una vista lateral²⁹

²⁸ Recuperado de: http://cenor.pt/wp-content/uploads/2013/05/estacao-s-bento_FW.jpg

²⁹ Robins, R J. (1982) *The application of tunnel boring machines to bad rock conditions*. Proc. ISRM Symp. Aachen, Vol. 2, Ed. Wittke, A A Balkema. pp. 827-836.

Una forma para prepararse ante lo escrito con anterioridad, es que se debe considerar como opción el aumento del torque de la TBM para que en caso de que el material geotécnico haga presión contra el escudo de la TBM, este pueda vencer la fricción, al aumentar la fuerza de empuje.

Otra estrategia para la TBM es adicionarle equipos de sondeo que permitan conocer unos metros antes el material con el cual se enfrentará la cabeza de corte, de manera que los operadores de la máquina podrían implementar un plan de acción previo.

Existen más formas para afrontar las condiciones que se presentan ante el frente mixto, pero lo más importante es tener una caracterización geotécnica del trazo del túnel tan detallada como sea posible, que permita tener un diseño adecuado de la TBM antes de empezar a excavar. Con ello se estará lo mejor preparado desde el diseño que se realice de la TBM.

2. Tipos de tuneladoras

Las tuneladoras son máquinas encargadas de excavar en el subsuelo a sección completa³⁰, con diámetros de dos metros en adelante y longitudes variables en función de las instalaciones que esta necesite, pero que llegan a rebasar los 100m. También son definidas como máquinas integrales debido a que realizan todo el proceso de excavación hasta su soporte inicial.³¹

Las TBM realizan varios procesos: excavar, transportar la rezaga hasta la cola de la TBM, impulsarse hacia delante y en caso de que se requiera – cuando la excavación no es autoestable – colocar un sostenimiento que puede ser utilizado como definitivo ya sea de dovelas de concreto, marcos metálicos, anclas y concreto lanzado.

Las características y los tipos de TBM varían en función del tipo de terreno a excavar. A continuación presento para clarificar, un esquema de tipos de TBM para diferentes materiales geotécnicos.

³⁰ Refiero a la excavación en secciones del tamaño del frente de ésta, a diferencia de los túneles que se excavan con métodos convencionales que por lo general se hacen en etapas. Se secciona tanto el frente de excavación como el túnel. Ejemplo: Desierto de los Leones en la Ciudad de México. Basado en: <http://tunnelbuilder.es/uploads/CMS/Documents/Art%C3%ADculo%20T%C3%BAneles%20Desierto%20de%20los%20Leones.%20PROAC%C3%93N%20M%C3%89XICO.pdf>

³¹ Túneles de la Línea 12 del metro de la Ciudad de México. Basado en: <https://www.smig.org.mx/archivos/revista-trimestral-smig/revista-geotecnia-smig-numero-226.pdf>




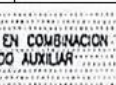







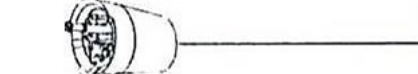









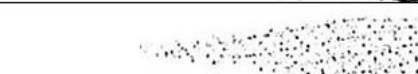



TIPO DE TUNELADORA	TERRENO BLANDO				TERRENO DURO (ROCA)		
	HOMOGENEO		COMPLEJO	BOLO CONFINADO	COMPLEJO		HOMOGENEO
	BLANDO	DURO			BLANDO	DURO	
ESCUDOS MANUALES							
ESCUDOS CON BRAZO EXCAVADOR							
ESCUDOS CIEGOS							
ESCUDOS MECANIZADOS							
ESCUDOS CON BRAZO ROZADOR							
ESCUDOS DE EQUILIBRIO DE PRESIÓN DE TIERRAS (EPB) (SIN LODO DE ALTA DENSIDAD)							
HIDROESCUDOS							
ESCUDOS EPB (CON LODO DE ALTA DENSIDAD)							
EPB / HIDROESCUDOS (CON DISCOS CORTADORES)							
ESCUDO TIPO TBM							
TOPOS							

Fig. 1.8. Criterios de Mitsubishi para la selección de tuneladoras.³²

³² López Jimeno, C. (coord.) (1997) *Manual de túneles y obras subterráneas*. Madrid. Entorno Gráfico. p. 479

2.1. Tuneladoras para rocas y frentes mixtos

Estas máquinas para rocas son diferentes a las tuneladoras de suelos porque en la cabeza de corte – parte frontal de la TBM – llevan herramientas de corte para roca llamadas discos cortadores. Estos discos son los que podrían desfragmentar la roca del frente de la excavación de manera eficiente.

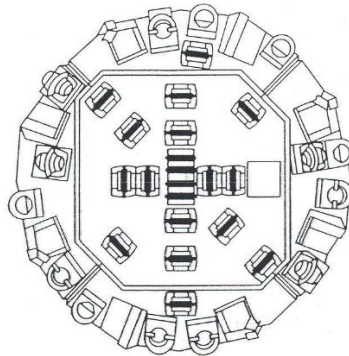


Fig. 1.9. Esquema de la rueda de corte de una TBM con discos cortadores.³³

Los discos cortadores están diseñados para despedazar la roca en fragmentos pequeños comúnmente llamados *chips*. La rezaga de estas máquinas no puede bombearse por el tamaño y agresividad de los fragmentos, así que debe ser extraída por una banda transportadora o un tornillo helicoidal para finalmente ser llevada por una banda transportadora o carros sobre las vías de tren hacia el exterior del túnel. A continuación se muestra un diagrama de un disco cortador.

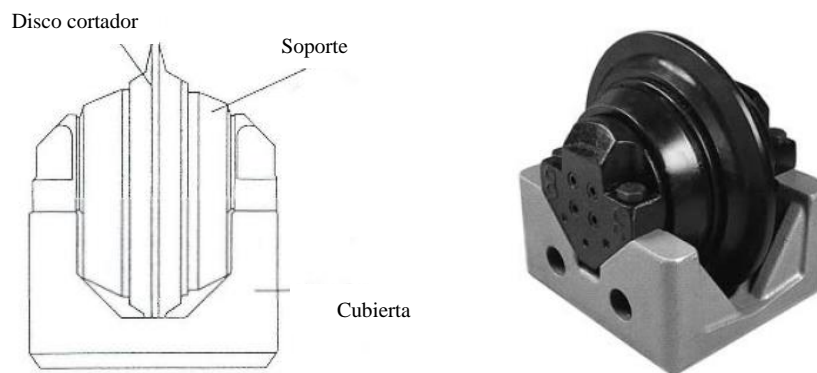


Fig. 1.10. Disco de corte.³⁴

³³ Recuperada de: <https://www.etcg.upc.edu/asn/TiMR/descargas/T8.pdf> y Maidl, B. e. (2008). *Hardrock tunnel boring machines*. John Wiley & Sons, Berlin, p. 33

³⁴ *Ibíd.*

2.1.1. TBM tipo Topos

Son máquinas tuneladoras diseñadas para excavar *rocas competentes*.³⁵ Trabajan de manera adecuada y con rendimientos elevados en roca homogénea y sana. Empero, cuando el terreno se torna complejo las discontinuidades se hacen presentes; debido a que existe variación drástica en el tipo de material geotécnico a excavar. El comportamiento de la roca es explosivo, ésta se deforma de manera acelerada o comienza a fluir un volumen abundante de agua a una fuerte presión hacia el interior de la excavación. Es en este punto donde el *Topo* no excava de forma eficiente y debe por tanto pensarse en una TBM con escudo.

Los *Topos* se distinguen por no contar con un escudo protector cilíndrico, solamente cuentan con una pequeña sección protectora en su parte superior que tiene forma de peine y su función es proteger a los trabajadores de los fragmentos que puedan caer y con ello generar mecanismos de inestabilidad, los cuales colapsarían el túnel.

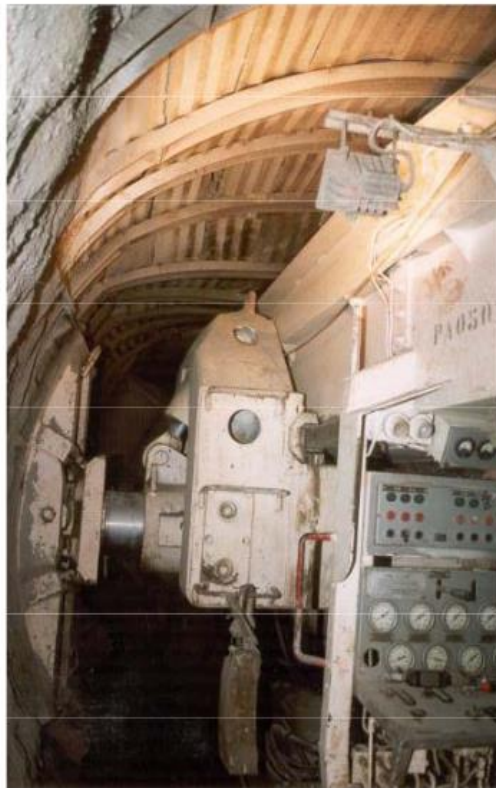


Fig. 1.11. Fotografía de las zapatas o grippers de una TBM en roca.³⁶

³⁵ Tienen capacidad de autoaporte, es decir, que al excavar y no colocarles inmediatamente un soporte no colapsará.

³⁶ Recuperada del proyecto final de carrera: Ignacio Sáenz de Santa María Gatón en: <https://www.etcg.upc.edu/asg/TiMR/descargas/T8.pdf>

El avance de los Topos consiste en que dos o más zapatas o *grippers*³⁷ que se acuñan lateralmente en el terreno, impulsen la TBM hacia el frente. Dichos grippers están conectados a la TBM mediante cilindros telescópicos o gatos hidráulicos de empuje. Cuando los cilindros telescópicos conectados a los grippers están retraídos, una zapata de soporte debajo de la parte frontal de la TBM se extiende para cargar la tuneladora, pero al excavar, los grippers laterales se extienden y éstos son los que sostienen la máquina y no a la zapata de soporte bajo del cabezal.

En la medida en que los cilindros telescópicos de los grippers laterales se extienden, empujan la rueda de corte hacia el frente hasta terminar la carrera de estos cilindros, para que de este modo pueda desplegarse nuevamente la zapata bajo el cabezal y volver a empezar este ciclo. El siguiente diagrama permite apreciar las zapatas laterales o grippers y la zapata de soporte bajo el cabezal de la TBM.

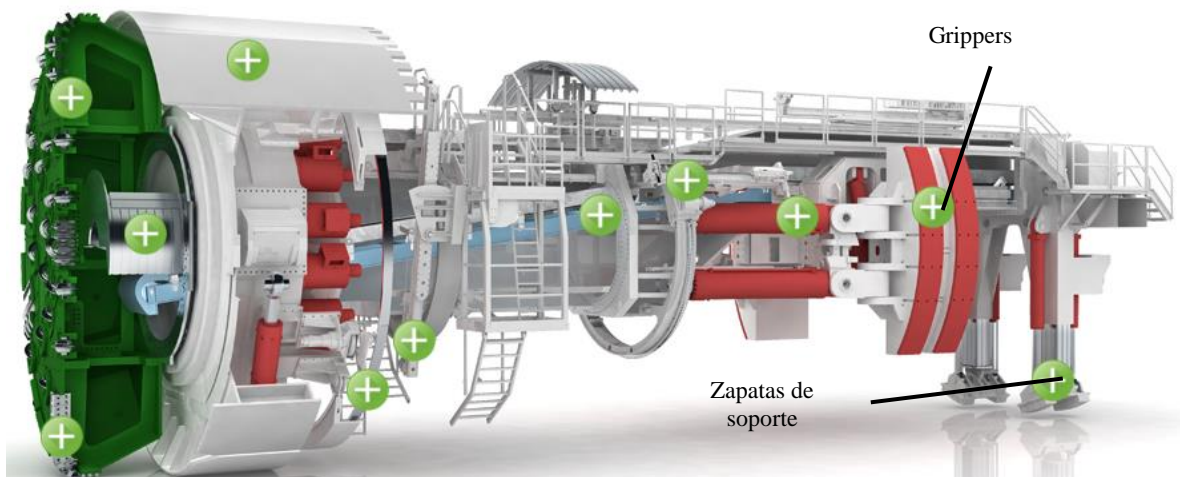


Fig. 1.12. Diagrama de las zapatas de soporte y grippers de una TBM de roca.³⁸

La carga total sobre la zapata depende del peso de la máquina, pero la presión sobre los grippers aumenta con la resistencia de la roca, ya que deben soportar la reacción necesaria para aplicar los empujes normales de los cortadores sobre el frente. Cuando los Topos

³⁷ Las zapatas o *grippers* son estructuras de apoyo lateral que conectadas mediante cilindros de empuje o gatos hidráulicos; tienen la capacidad de extenderse o retraerse para apoyarse en el terreno lateral excavado.

³⁸ Recuperada de: <https://www.herrenknecht.com/en/products/core-products/tunnelling/gripper-tbm.html>

excavan en formaciones geológicas más fracturadas, diversos sistemas de soporte inmediato de roca detrás de la cabeza de corte se instalan en la TBM. Estos sistemas le permiten excavar y sostener la bóveda o incluso todo el túnel en su circunferencia con marcos metálicos, concreto lanzado y anclaje,³⁹ como lo muestra la siguiente imagen.



Fig. 1.13. Sistemas de soporte para TBM - Topo en roca fracturada.⁴⁰

2.1.2. EPB

Estos escudos permiten aplicar una presión en el frente de la cabeza de corte en conjunto con el material que es producto de la excavación, con la finalidad de mantener el equilibrio de la masa de suelo que reacciona contra la cabeza de corte de la TBM y la fuerza de empuje de la tuneladora.

La presión del suelo en la cámara de excavación se genera mediante bombas que inyectan aire a presión dentro de ésta; a su vez dicha presión se regula mediante la carrera de los gatos del escudo y torque, además de la velocidad de rotación de la cabeza de corte y del transportador helicoidal.

El transportador helicoidal también llamado tornillo de Arquímedes o *tornillo sinfín* es un elemento longitudinal que por lo general tiene un acomodo oblicuo; conecta la cámara de excavación con la banda transportadora. Sirve para regular la presión y salida de la rezaga o producto de la excavación. La siguiente figura muestra el acomodo del transportador:

³⁹ Estos aditamentos son un avance enorme. En años anteriores suscito que los fragmentos solían caer de la bóveda de un túnel recién excavado; ésta fue la causa de mortandad de muchos trabajadores además del colapsamiento del túnel por alojamiento.

⁴⁰ Recuperada de: <https://www.herrenknecht.com/en/products/core-products/tunnelling/gripper-tbm.html>

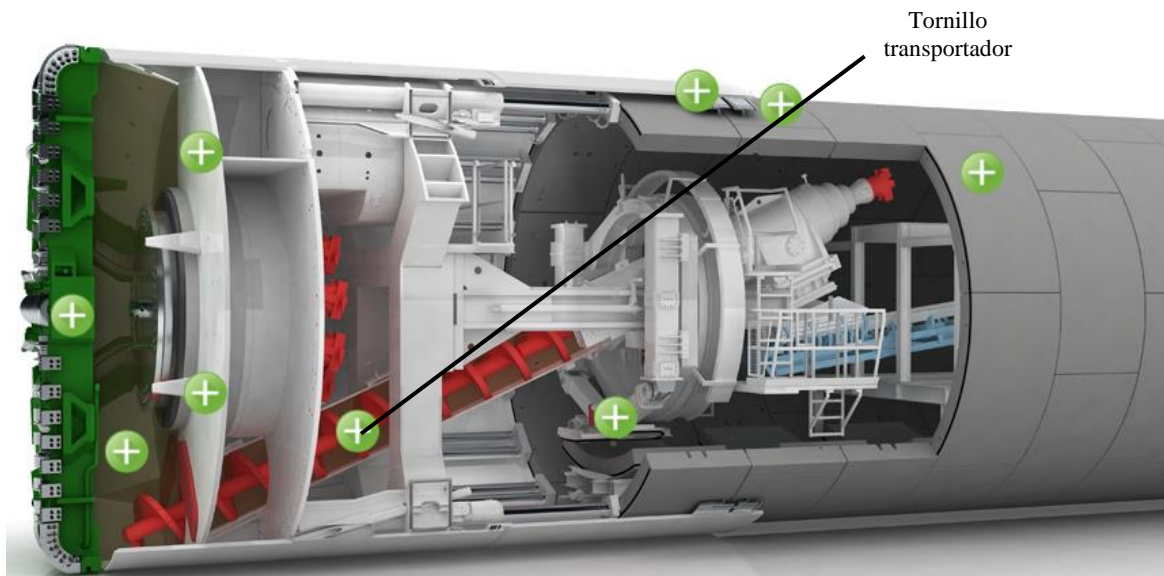


Fig. 1.14. Diagrama de una TBM tipo EPB, en el que se muestra el tornillo transportador.⁴¹

Las TBM tipo EPB cuentan con una coraza cilíndrica que protege el área del accionamiento principal y el erector de dovelas, logrando así a diferencia de las máquinas tuneladoras abiertas lo siguiente:

- Disminuir los problemas relacionados con el agua, al permitir – con un diseño adecuado – el paso en zonas de elevada presión de agua impidiendo los arrastres e inestabilidades que ésta provoca.
- Seguridad para los trabajadores, que en todo momento se encuentran protegidos por una coraza de acero, alrededor y en el frente.
- Mayor independencia de los terrenos atravesados, al ser el sistema menos susceptible a los cambios de terreno y comportamiento de éste.
- Control de inestabilidad del frente, que permite empujar contra él, para evitar la entrada de material al túnel, y con ello disminuir la velocidad de aparición de inestabilidades frontales.

⁴¹ Ibíd.

2.1.3. TMB tipo Doble escudo

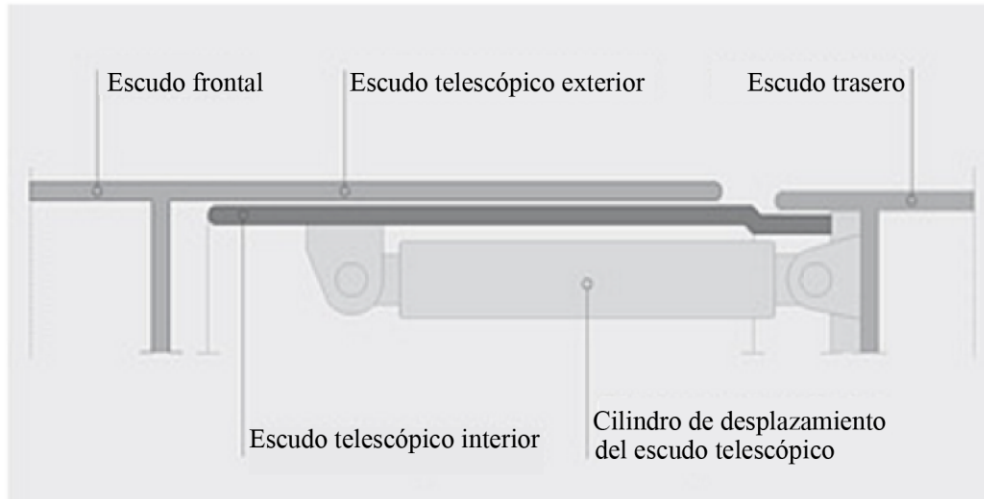


Fig. 1.15. Diagrama del acomodo de los escudos frontal, telescópico y trasero de una TBM Doble escudo.⁴²

Las TBM tipo doble escudo cuentan con un escudo formado por dos *secciones telescópicas*⁴³ llamadas escudo delantero y escudo trasero. El delantero contiene el sistema principal de empuje y el sistema de acondicionamiento de la cabeza; por otro lado, el escudo trasero es el que lleva incorporado los grippers. El elemento que los une se denomina escudo telescópico en el que se sitúan los cilindros de empuje del sistema principal de empuje. Dicho sistema se utiliza para el trabajo en *modo doble escudo*, y está conformado por una serie de cilindros dispuestos en la zona telescópica y fijados al borde posterior del escudo delantero. El sistema auxiliar de empuje es el que permite repositionar la máquina – *resetting* – para iniciar el nuevo ciclo de avance en ambos modos de operación. La capacidad de éste sistema es muy alta, con el fin de poder aplicar un empuje excepcional, para liberar la máquina, en caso de bloqueo de la misma por un terreno muy deformable o expansivo.

⁴² *Ibíd.*

⁴³ Escudos con secciones telescópicas: se puede comparar al cilindro un amortiguador de un automóvil, el cual está dentro de otro cilindro de mayor diámetro, que al introducirse uno en el otro acortan su distancia o la alargan.

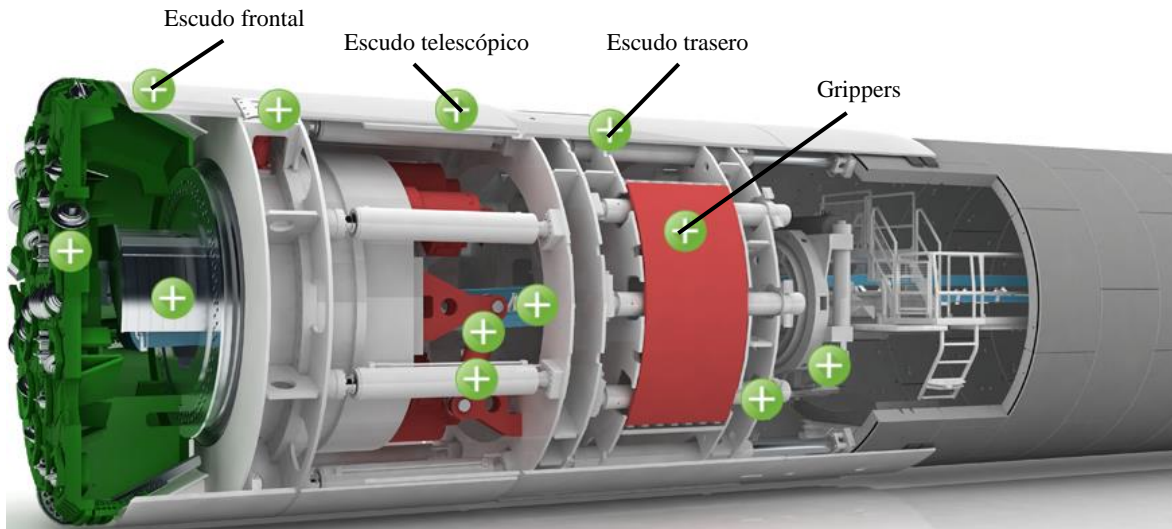


Fig. 1.16. Diagrama de una TBM tipo doble escudo.⁴⁴

La configuración distintiva de esta máquina le permite que cuando trabaja en modo doble escudo utilice los grippers como mecanismo de reacción para la propulsión además de los cilindros de empuje apoyados sobre el anillo de dovelas. Por otra parte, si el terreno es incompetente y no soporta el empuje de los grippers, la máquina ha de pasar a trabajar en *modo escudo simple* y la propulsión se logra empujando los cilindros del sistema auxiliar contra los anillos de dovelas.

Dicho lo anterior, excavar en roca poco competente implica una disminución en el rendimiento, el cual se elevaría al pasar a roca competente, aunque con una pérdida económica de usarse los anillos de dovelas que en tramos competentes se usan. Así que, lo acertado es tramificar el túnel según la calidad geotécnica de la roca y fabricar entre 2 y 4 tipos de anillos de dovelas de la misma geometría, pero de distinta capacidad resistente, adaptada a la tramificación establecida, así se podría pasar de un modo a otro sin que ello implicase un fuerte desperdicio de recursos. El siguiente esquema muestra las fases del avance de los dos modos de operación de una TBM doble escudo.

⁴⁴ *Ibíd.*

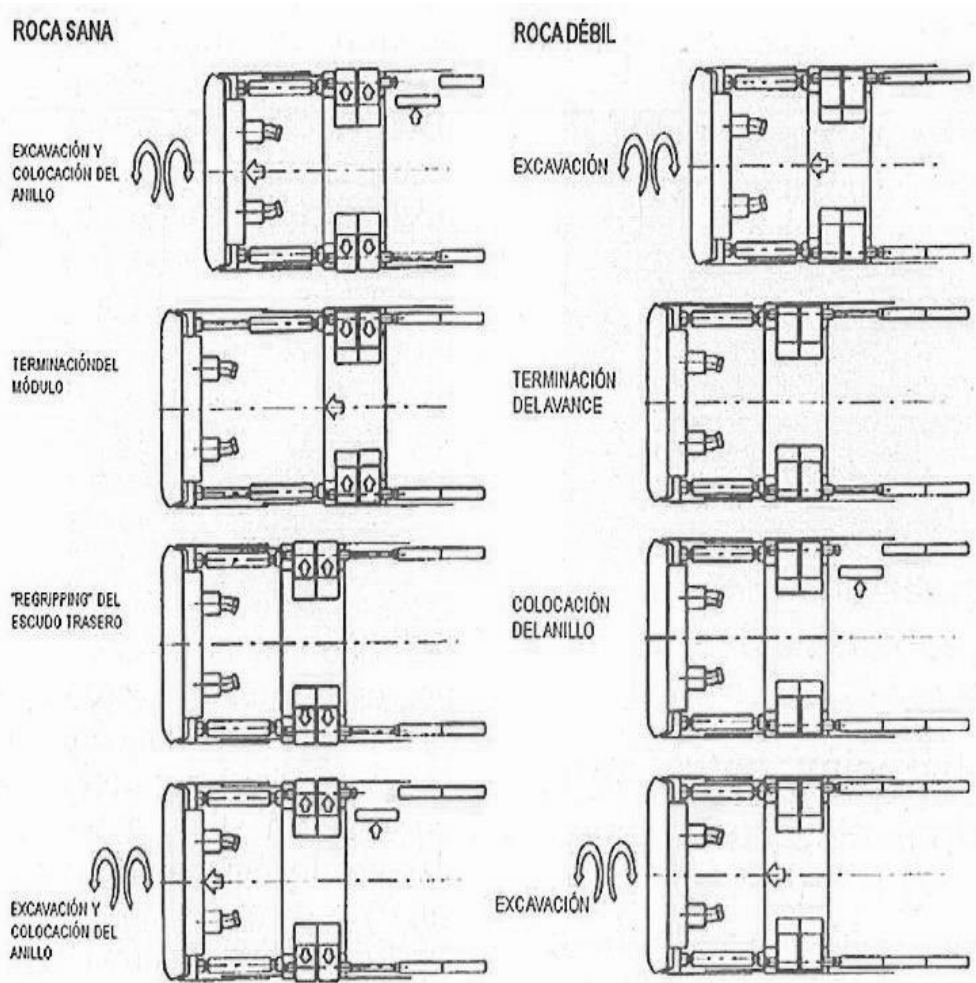


Fig. 1.17. Modos de operación: Doble escudo según los tipos de terreno. ⁴⁵

⁴⁵ López Jimeno, C. (coord.) (1997). *Manual de túneles y obras subterráneas*. Madrid: Entorno Gráfico. p. 581

2.2. Tuneladoras para suelos

Las TBM para suelos se distinguen por algunas capacidades que poseen a diferencia de las TBM para roca, ello derivado de las características intrínsecas del suelo. Una de ellas es la inestabilidad del túnel después de excavarlo, esto hace necesario que las TBM de suelos tengan una coraza llamada escudo, este protege el interior de la TBM de la caída de material, además la TBM en suelo requiere ejercer una presión al frente para evitar que el material por excavar impida el avance de la rueda de corte. Otra particularidad que distingue las TBM de suelos es que inmediatamente después de cada avance colocan un anillo de dovelas que sostiene el túnel.

2.2.1. EPB

Esta tecnología se desarrolló inicialmente para resolver el trabajo en terrenos arcillosos inestables, procurando lograr un sistema de trabajo continuo, que incluyese el mayor número de las ventajas que ofrecía la tecnología existente de las TBM, haciéndose a través de tres ideas básicas:

- Estabilizar el frente con un material a presión, que es el propio escombros excavado, una vez convertido, con productos de adición, en una mezcla de consistencia visco-plástica – un principio análogo al de los *hydroshield* –
- Lograr que la mezcla tenga la consistencia adecuada para ser transportable por cinta y vagón, y finalmente,
- Conseguir que esa mezcla se pueda extraer sin perder la presión en el frente. La estabilización del frente se logra manteniendo la cabeza con la cámara llena de una mezcla del terreno excavado con agua más ciertos productos de adición, comprimida contra el frente por medio del empuje longitudinal de los cilindros contra el revestimiento prefabricado.

A continuación, se muestra un esquema de un escudo de presión de tierra, en el cual se muestra sus principales elementos.

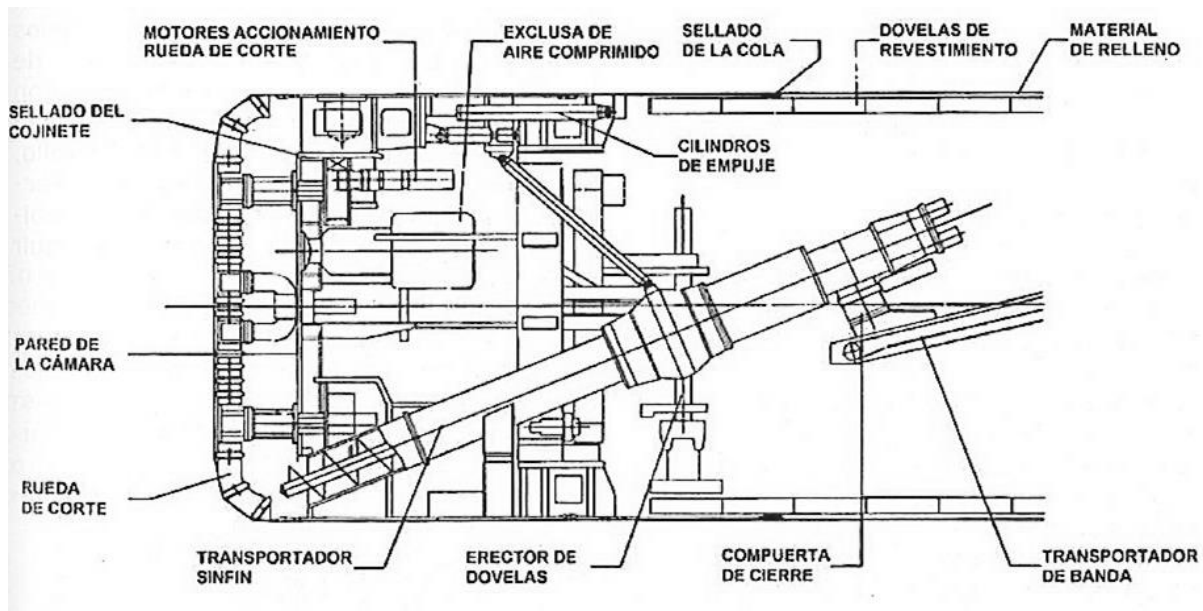


Fig. 1.18. Esquema de un escudo de Presión EPB.⁴⁶

La consistencia pastosa de la mezcla ha de permitir su transporte por cinta, ya sea a lo largo de todo el túnel o para alimentar los vagones de extracción al exterior. El Par de giro es la potencia que la TBM ejerce sobre la rueda de corte para que esta pueda girar y hace posible la excavación mecánica del terreno, el cual vence el rozamiento de la cabeza contra el frente.

El volumen de terreno excavado entra en la cámara y sustituye al equivalente que ha de extraerse de la misma sin pérdida de presión. Dicha extracción se hace por medio de él tornillo sinfín.

Las EPB se idearon inicialmente para excavar suelos arcilloso-limosos y limo-arenosos de consistencia entre plástica⁴⁷ y blanda, con un contenido mínimo de finos⁴⁸ del orden del 30%. Por ello cuando el material no tiene dichas características, debe ser acondicionado debidamente en la cámara hasta conseguir la mezcla idónea.

Respecto a las formas de trabajo; en los terrenos muy competentes se puede operar en *modo abierto*, es decir sin presión, pero siempre con tornillo porque solo así es posible el paso inmediato del modo de operación *abierto* al de *presión de tierra* o *modo EPB* sin riesgo alguno por un cambio instantáneo en la presión del escombros.

⁴⁶ López Jimeno, C. (coord.) (1997). *Manual de túneles y obras subterráneas*. Madrid: Entorno Gráfico. p. 593

⁴⁷ La consistencia plástica es aquella que tienen los suelos que al tacto se sienten viscosos o pastosos.

⁴⁸ Partículas menores a 0,075 mm.

El rendimiento puede bajar notablemente por causas secundarias diversas:

- taponamiento de las entradas de la rueda,
- reducción de la penetración -avance por vuelta-,
- Par de giro agotado por rozamiento contra el frente,
- grandes desgastes de las herramientas y en sus protecciones en la rueda de corte.

Ante estas problemáticas, las medidas a tomar son diferentes:

- empleo de espumas,
- adición de finos al frente o en la cámara de excavación,
- y generalmente se aumenta la frecuencia de las revisiones hiperbáricas para examinar el estado de la rueda y de las herramientas de corte.

2.2.2. Hidroescudos (*Slurry*)

Es la tipología ideal para excavar, en suelos no cohesivos, inestables y en particular con cargas importantes de agua. La idea básica consiste en operar con bombeo de lodos arcillosos en un circuito cerrado que incluye el espacio entre frente y cabeza. Por una parte, el terreno arrancado por la rueda de corte se mezcla con lodos, forma un fluido espeso, pero bombeable. La bomba principal lo aspira y envía al exterior por la tubería de salida. Al mismo tiempo, por la tubería de entrada, se aporta al frente un caudal equivalente de lodos recuperables por separación del escombros de la mezcla, con lo que se mantiene la presión en el frente.

El desarrollo de la tecnología de los escudos de lodos logró pleno éxito a partir de dos líneas básicas de investigación diferentes, la primera desarrollada en Japón – *slurry shield* – empleando todo tipo de arcillas para formar el lodo y la segunda, la alemana –*hydroshields* – que utilizó exclusivamente lodos bentoníticos, usados hoy en día con carácter general.

Las dos características principales de la versión japonesa son: la rueda cerrada que ayuda a la estabilidad del frente y el mantenimiento de la presión por regulación del caudal de lodos. El inconveniente principal es la limitación de los tamaños máximos del suelo a excavar, derivado del tamaño de las aberturas. Para resolver esta limitación, la técnica alemana introdujo las tres variantes principales:

- una burbuja de aire comprimido para mantener la presión del lodo, pues la ventaja del aire comprimido es la respuesta a una reducción de la presión en el frente que puede ser prácticamente instantánea;
- el trabajo con lodos bentoníticos que mejoran la estabilidad del terreno en el frente y,
- la rueda abierta, que permite una libertad mayor de tamaños, a reducir luego por machaqueo hasta 100 mm., con todo lo cual se amplió notablemente su campo de aplicación.

En todo caso, el transporte del material se hace hidráulicamente, y de ahí el nombre de “*hydroshield*” usado para todas esas máquinas.

Las ventajas de la bentonita se conocieron durante el desarrollo de la tecnología de las pantallas continuas. El lodo arcilloso asegura, en primer lugar, una excelente contención del frente, porque se produce no solo por medio de la presión hidráulica que ejerce directamente la masa de lodo y terreno excavado, además el lodo penetra unos pocos centímetros en los huecos del material por excavar y forma un *cake* que ayuda de manera considerable a conseguir la estabilidad del frente de excavación.

El control del proceso consiste en un balance de volúmenes ingresados al frente: bentonita; y el volumen extraído: bentonita + suelo, y la densidad de los mismos, como se muestra a continuación:

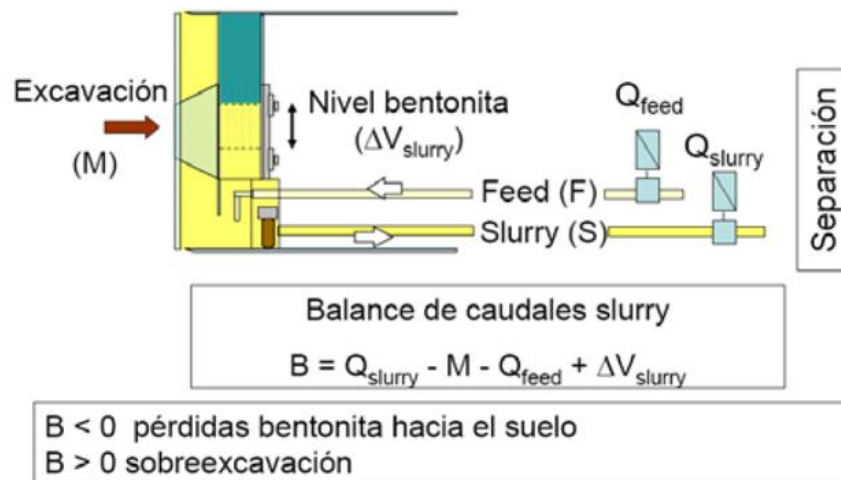


Fig. 1.19. Balance de Caudales de Slurry en Hidroescudos.⁴⁹

⁴⁹ Comulada M, Wingmann J, Maidl U, (2009), *Process Controlling in Mechanized Tunnelling*, 2nd International Conference on Computational Methods in Tunnelling. Ruhr Universität Bochum, Alemania p. 6

3. Excavación de lumbreras

La construcción de un túnel requiere de accesos que de acuerdo a las condiciones topográficas del lugar se pueden dividir en excavaciones a cielo abierto – tajos – y en lumbreras. Es menester mencionar que en una misma obra pueden existir ambas condiciones.

La lumbrera es una excavación vertical o inclinada, de sección poligonal o circular, que se excava con procedimientos mecánicos o convencionales para conectar un túnel con la superficie. Las lumbreras donde se realiza el ensamble de las máquinas tuneladoras se les denomina *lumbreras de montaje*, su principal característica es que cuentan con un diámetro interno terminado de aproximadamente el doble del diámetro exterior de la tuneladora. Se utilizan para diversos procedimientos como el montaje de la estructura de reacción, los primeros empujes para el inicio de la excavación, la instalación del sistema de rezaga – ya sea banda vertical, u otro, esto depende de la profundidad de la lumbrera –, la instalación de las tuberías para la extracción y suministro de agua a la TBM, la instalación de la tubería para el agua residual al igual que la tubería para el aire comprimido, el ducto de ventilación y el suministro de dovelas hacia el frente de excavación.

Otro tipo de lumbreras son las *lumbreras de paso*, tienen un diámetro interno de aproximadamente 1.5 veces el diámetro de la TBM y sirven como vía de ingreso y salida del personal; suministros durante la construcción y sirven como zona de mantenimiento de los escudos a su paso.

Las lumbreras se ejecutan en diferentes condiciones geotécnicas y geológicas, razón por la cual su procedimiento constructivo es diferente uno de otro. De estos procedimientos describo los siguientes por ser los más concurridos:⁵⁰

3.1. Lumbrera flotada

Consiste en la excavación de un brocal perimetral, en el cual se realizan zanjas ademas con bentonita; una vez completado el anillo perimetral con las zanjas llenas de bentonita se procede a excavar el núcleo de la lumbrera mediante una grúa con cucharón de almeja que va extrayendo la arcilla. Al mismo tiempo, la excavación se llena con lodos bentoníticos para

⁵⁰ Las variantes y combinación de los mismos quedan a consideración del proyectista.

evitar una falla de fondo.

Una vez excavado el núcleo se coloca el *tanque de flotación*⁵¹ que se utilizará como soporte para la construcción de la losa de fondo y muros de la lumbrera. El descenso del tanque de flotación se regula por una serie de válvulas en la parte superior de la lumbrera en las que se extrae o inyecta aire o lodo para un rápido o lento descenso o ascenso.

3.2. Anillos prefabricados

La secuencia del procedimiento constructivo inicia con la construcción de los brocales, posteriormente se excavaba una trinchera perimetral estabilizada con los lodos bentoníticos. Acto seguido se continua con la excavación del núcleo, la sumersión del primer anillo, el colado de la losa del fondo, la sumersión de los anillos superiores, el relleno perimetral con el suelo – cemento – bentonita, el retiro de los lodos del interior de la lumbrera y concluye con la construcción del revestimiento definitivo, de los portales de salida y entrada de la máquina tuneladora. Ese procedimiento constructivo fue ideado y se desarrolló en el ambiente de las zonas urbanas de la Ciudad de México.

3.3. Convencional (Excavación en roca)

Este procedimiento inicia con la construcción de un brocal y excavación hasta unos 25 a 30 metros. En ésta fase, una vez excavado y colado el concreto del brocal, se procede a la barrenación a base de las perforadoras de piso. Una vez terminada la barrenación, se hace la carga de explosivos en los barrenos para posteriormente realizar la conexión eléctrica en series o paralelo, esto depende del número de barrenos.

⁵¹ El tanque de flotación es la estructura fundamental de este procedimiento constructivo, el cual es un vaso cilíndrico invertido que cubre el diámetro de la lumbrera y de los muros de la misma.

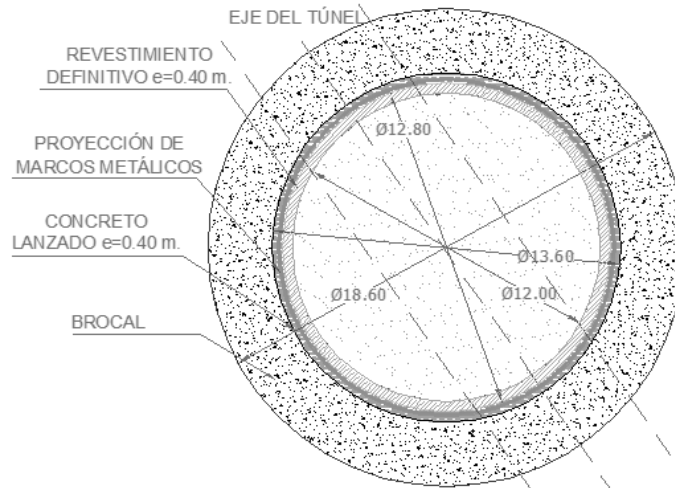


Fig. 1.20. Ejemplo de una lumbrera con método convencional.⁵²

Una vez que se ha retirado el equipo y el personal, se hace la voladura desde la superficie. La ventilación en esta etapa es natural; inmediatamente después se acercará la máquina, que pudiera ser una grúa con cucharón de almeja o bien con botes cilíndricos, para la extracción del producto de la voladura. Posterior a la ventilación pueden figurar rozadoras que perfilen la sección del terreno a la línea de excavación de proyecto.

Finalmente, se sostiene la excavación ya sea con base de concreto lanzado, anclaje, anillos metálicos, etc. Y nuevamente se repite el procedimiento de barrenación y voladura, para comenzar así un nuevo ciclo de avance.

3.4.Muro Milán (Técnica Soletanche)

La excavación del sector anular se realiza con un taladro barrenador guiado, colocado en la periferia de la lumbrera y montado sobre una vía. Esta maquinaria extrae el material por medio de una broca rotatoria y de percusión. Al mismo tiempo que se comienza la excavación del material, se inyecta lodo con bentonita desde el exterior.

La broca tiene las funciones de licuar el material y de extraer esta mezcla de rezaga y bentonita por medio de una tubería de succión colocada en el interior de la misma, ésta

⁵² José, O. (2016). *Túnel Emisor Oriente (TEO): Procedimiento constructivo de una galería de montaje para ensamble de máquina tuneladora*. Ciudad de México, México: UNAM.

deposita el material en un tanque sedimentador colocado en la superficie, donde se recupera la mayor parte de la bentonita para inyectarla nuevamente.

La maquinaria además de su movimiento vertical – rotatorio, cuenta con un movimiento horizontal, lo que de este sector se colocan las parrillas de armado y se procede al colado del muro de la lumbrera con concreto a través de una tubería tremie, desplazando el lodo por diferencia de densidades.

Una vez que el concreto ha fraguado lo suficiente, se retira la tubería y se procede a la excavación del siguiente sector, de esta manera queda la junta de colado. Después de colar todo el muro de la lumbrera, se excava el núcleo en donde se emplea una almeja y si no se presentan expansiones importantes, no es necesario estabilizar el fondo con agua o bentonita.⁵³

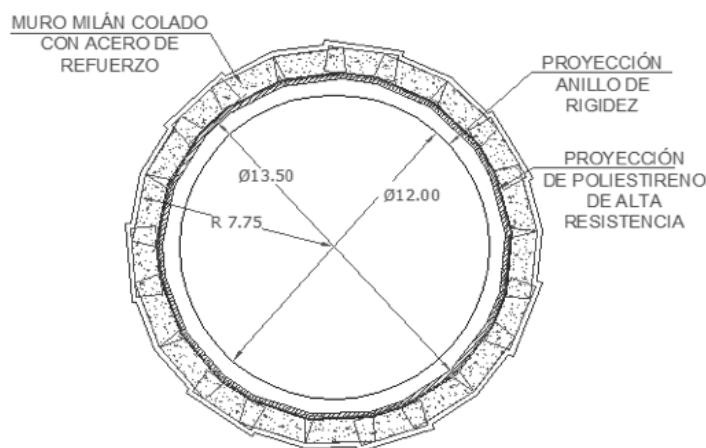


Fig. 1.21. Construcción de lumbrera con muro Milán.⁵⁴

⁵³ Slobodan, T. (2011). *Diseño y construcción de lumbreras en suelos blandos por el procedimiento de los anillos prefabricados*, D. G. Guichard: CDMX, Ciudad Universitaria.

⁵⁴ José, O. (2016). *Túnel Emisor Oriente (TEO): Procedimiento constructivo de una galería de montaje para ensamble de máquina tuneladora*. Ciudad de México, México: UNAM.

CAPÍTULO SEGUNDO

Ensamble de un escudo del tipo EPB

1. Procedimiento

La elección que se haga para el armado del escudo y back up de una TBM tipo EPB es una decisión crucial, ya que afecta de manera directa tanto al costeo como al tiempo que se invertirá al proyecto. Ello dependerá de las condiciones geotécnicas y de la profundidad que tenga la lumbrera.

a) Lumbrera con umbilicales

En esta opción constructiva se baja la TBM en cuanto se terminan las actividades necesarias para recibir al equipo en el fondo de la lumbrera, a saber, el muro de reacción, la cuna metálica o de concreto y el portal de salida o arranque.

Es importante señalar que los componentes de la TBM, al no caber ensamblados en el fondo de la lumbrera, se arman en plataformas adosadas a las paredes de la lumbrera y en distintas posiciones, por lo que su ubicación se prevé de manera que no falte espacio.

A medida que avanza la excavación del túnel, el montaje de los elementos en el fondo de la lumbrera se realiza de la siguiente manera:

1. Se baja y ensambla la cabeza de corte y sus accesorios.



Fig. 2.1. Preparación de la cabeza de corte de la TBM para ser bajada con grúa.⁵⁵

⁵⁵ Imagen proporcionada por COMISSA.

2. Colocación de dovelas metálicas y soportes a base de puntales, que puedan resistir el empuje del escudo por los gatos hidráulicos.
3. Se excavan los primeros 1.5 m, a continuación se coloca el primer anillo de dovelas ya en el terreno, para el cual, deberá bajarse dovela por dovela mediante una grúa, que las llevará hasta el erector de estas. El erector es el dispositivo de la TBM que se encargará de ensamblar las dovelas durante toda la excavación del túnel.
4. Se inyecta lechada en el espacio anular que queda entre el terreno y la cara exterior del anillo de dovelas. Previamente en la construcción del portal, se debió colocar un sello de no retorno para la lechada que une las dovelas al terreno natural.
5. Durante la excavación, es necesario monitorear la presión que ejerce el terreno por su naturaleza intrínseca y la que la TBM ejerce al frente, de esta manera se logrará un equilibrio, y se evitará un caído en el frente de la excavación.
6. En cuanto se tenga el espacio necesario para bajar el primer carro, se detiene la excavación, se baja el carro y se desliza sobre unos rieles adosados al techo de la galería sobre los anillos del carro como observamos en la imagen siguiente:



Fig. 2.2. Instalación de los primeros carros de la TBM.⁵⁶

⁵⁶ *Ibíd.*

7. Se procede a desinstalar el umbilical junto con los equipos principales que anteriormente estaban adosados a la lumbrera para colocarlos en su posición definitiva entre el escudo y el primer carro.
8. Se realizan algunas pruebas de funcionamiento que comprueben el éxito de los últimos cambios, para proseguir con la excavación y asimismo continuar con la bajada de los siguientes carros.
9. Al ingresar el segundo carro, se permite la operación de un sistema provisional de rezaga a base de botes o vagonetas, lo que permite el ingreso paulatino del resto de los carros hasta completar el ensamble del equipo auxiliar del escudo.
10. Una vez ensamblada totalmente la tuneladora se retira el atraque de la lumbrera, los anillos metálicos y se realiza la construcción de la plataforma de trabajo; la instalación de un cambio de vías california, tuberías, la banda vertical, la banda horizontal y las instalaciones necesarias para reiniciar la excavación del túnel.
11. Finalmente, cuando la TBM haya excavado los primeros metros y con la máquina armada en su totalidad, estará lista para excavar los metros subsecuentes, a ciclos mejor definidos y más eficientes, hasta llegar a una lumbrera de paso o en la que la TBM sea extraída.⁵⁷

⁵⁷ José, O. (2016). *Túnel Emisor Oriente (TEO): Procedimiento constructivo de una galería de montaje para ensamble de máquina tuneladora*. Ciudad de México, México: UNAM.

b) Portal de entrada “Tajo a cielo abierto”



Fig. 2.3. TBM del tipo EPB en portal de entrada.⁵⁸

Esta opción constructiva ofrece rendimientos más favorables que los otros métodos para los primeros metros pues los carros del back-up de la TBM se arman en superficie. Este proceso constructivo es relativamente el más sencillo ya que se realiza a cielo abierto por lo que se tiene un acceso fácil y rápido a los materiales y equipo a utilizar.

No obstante, en ocasiones, hay que enfrentarse a ciertas complicaciones; por mencionar una, se debe garantizar la estabilidad de taludes – dos laterales y uno al frente – aunado a ello, se hace la extracción del pie del talud frontal por la inserción de una cavidad al centro que es el túnel.

Por tanto, el reforzamiento en el portal es de vital importancia, pues sostiene los cortes al terreno como un gran muro que hay que sostener, para esto son muy socorridas las técnicas de insertar anclas al terreno, muros Milán y/o concreto lanzado.

⁵⁸ Innovative TBM powers through mountains. (2012). Recuperado el 20 de Octubre de 2016, de tunneltalk.com

Algunas de las actividades del proceso de armado de la TBM a cielo abierto son:

- la construcción de: una plataforma o rampa para descarga de la rezaga, armado de banda horizontal para extracción de rezaga,
- construcción de la estructura de atraque,
- construcción y costureo de anillo metálico y anillos de atraque,
- calafateo anular exterior en boca de túnel e inyección anular,
- instalación de estructura y sistema de ventilación axial en boca de túnel,
- reacondicionamiento de vía e instalación de cambios de vía en cajón de conducción, etc.

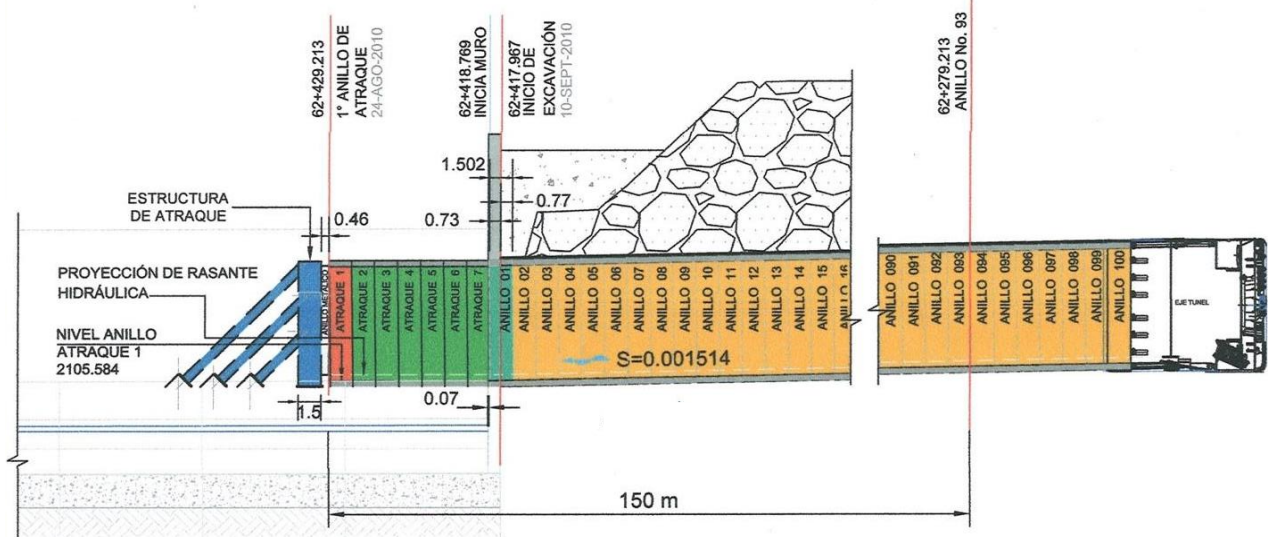


Fig. 2.4. Avance excavando los metros iniciales y colocando los primeros anillos en terreno natural de portal de salida a lumbrera.⁵⁹

c) Galería de montaje

Este procedimiento es un caso especial; surge por la problemática de enfrentarse a la excavación de un túnel que parte de una lumbrera que tiene gran profundidad. De manera que conviene iniciar la excavación con la TBM y sus dos primeros carros ensamblados en el fondo de la lumbrera ya que en estos se aloja el sistema de rezaga.

⁵⁹ Imagen proporcionada por COMISSA.



Fig. 2.5. Construcción de una galería de montaje.⁶⁰

La galería es un túnel convencional corto como se ve en la foto anterior, excavado posterior a la construcción de la lumbrera; su función es albergar la estructura de reacción contra la cual se apoyará la tuneladora y el escudo de la TBM durante el proceso de ensamble de los carros pórtico.

Para el ensamble de la TBM en el fondo de la lumbrera, es necesario construir una serie de elementos estructurales entre los que destacan: la cuna para recepción – estructura que brinda apoyo al escudo y genera la continuidad entre el túnel y la lumbrera –, y el sello de salida - elemento de contención para la lechada⁶¹ inyectada en los primeros anillos –. Éste último sirve para evitar que la lechada salga por el espacio existente entre el escudo y el terreno excavado. De igual manera tenemos: los muertos – estructuras de concreto trapezoidales, estos son la base o cimiento para los puntales de acero que harán la función de estructura de reacción, para los primeros empujes –.

⁶⁰ Imagen proporcionada por COMISSA.

⁶¹ Mezcla de agua y cemento o mortero de arena y cemento



Fig. 2.6. Construcción de una galería de montaje.⁶²

El armado de la TBM requiere la utilización de una grúa con capacidad mínima de 800 toneladas, lo que permite bajar con seguridad los elementos del escudo, estos son: la transmisión, el tornillo helicoidal y la media sección superior e inferior.



Fig. 2.7. Introducción de las partes de una TBM a una galería de montaje.⁶³

⁶² Imagen proporcionada por COMISSA.

⁶³ *Ibíd.*

Después de bajar y ensamblar con tornillería y soldadura los componentes del escudo, procede un artificio llamado "Deslizamiento de la TBM dentro de la galería". Esto se realiza para dejar a la TBM apoyada en la estructura de reacción, a saber, la posición indicada para realizar el arranque.

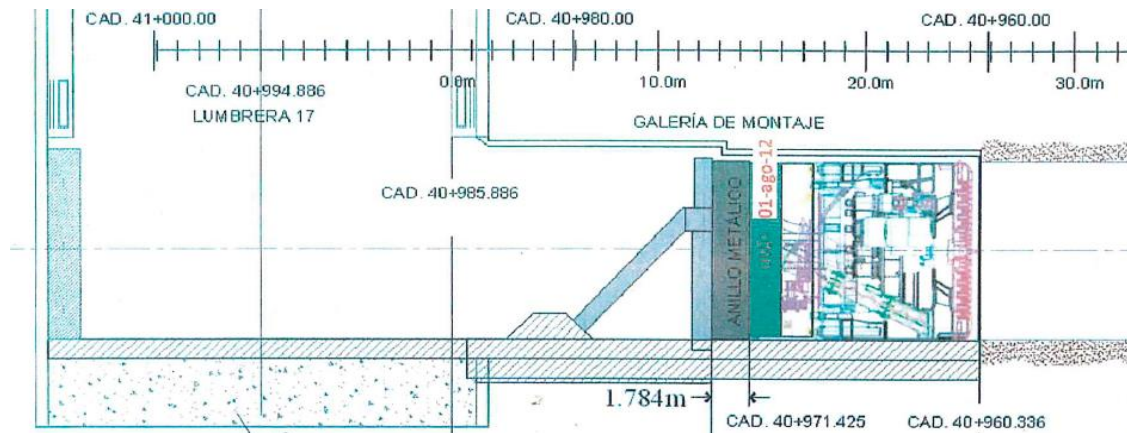


Fig. 2.8. Diagrama de TBM en posición de arranque dentro de galería de montaje.⁶⁴

Posteriormente se habilita e instala las ménsulas metálicas y la estructura de reacción; las ménsulas son estructuras adosadas al perímetro del túnel a cada metro y su función es servir de apoyo para el primer anillo de dovelas.

A continuación, se realiza al avance y armado del segundo anillo de dovelas. Estos primeros anillos deben quedar debidamente troquelados exteriormente con dos cuñas y puntales laterales. Se procede de la misma forma con los anillos tres y cuatro, éste último cuenta con una estructura metálica que ocupará el lugar de la dovela cuña de concreto, pues se requiere como ventana de acceso.

Este mismo procedimiento de avance y armado de anillo se realiza para el anillo cinco y seis, se destaca que en el cinco se repite el procedimiento de sustitución de cuña metálica. Para finalizar se rellena con gravilla el espacio que se advierte entre el muro de la galería y las dovelas. Una vez que se bajen y ensamblen todos los carros del back-up de la TBM, se realiza una prueba, y si el funcionamiento de la TBM completa es óptimo, se inicia la etapa de excavación de los metros subsecuentes.

⁶⁴ *Ibíd.*

CAPÍTULO TERCERO

Análisis de rendimientos de la excavación con equipo EPB en suelos firmes con Galería de montaje

1. Condiciones geológicas

Las condiciones geológicas son la suma de las propiedades del subsuelo que se presentan en el terreno. Mientras que los estudios geotécnicos, determinan las propiedades de las rocas y los suelos. Algunos puntos de estudio son: la resistencia, la dureza, densidad, tenacidad, abrasividad y las índice. Los resultados obtenidos de estos estudios, especialmente los de laboratorio, son una abstracción aproximada que se dan a través de condiciones que tratan de simular a la realidad.

La resistencia a la compresión simple es por excelencia el parámetro más cuantificado de los materiales geotécnicos y su obtención en laboratorio es recurrente; su determinación en campo no es tan sencilla, pero en la actualidad es posible obtener buenas aproximaciones, este parámetro influye directamente en el desempeño de la TBM al excavar.

La densidad de los materiales influye también, aunque de manera indirecta, en el rendimiento de la TBM pues el estado natural de esfuerzos del terreno se ve influenciado por la profundidad y la densidad de los materiales geotécnicos. De igual manera, la densidad se ve afectada por el grado de fracturamiento, el cual influye en el volumen que ocupan los materiales y esto atañe a los volúmenes por excavar, que son determinantes en el rendimiento de avance del equipo tunelador.

La abrasividad atañe a los costos de excavación, los cuales serán un rubro a abatir, de manera que habrá que hacer un balance entre costo y rendimiento. Es decir, se tendrán que colocar herramientas que sean resistentes a la abrasividad de las rocas y buscar de manera simultánea no elevar los costos; aunque por ello se tenga que sacrificar la velocidad de avance.

El parámetro anterior, se ve correlacionado directamente con la deformabilidad o rigidez del terreno y por el contenido de materiales abrasivos que haya en el mismo – que en su mayoría es el cuarzo – de manera que estos parámetros también afectan la velocidad de avance de la TBM.

La tenacidad es un parámetro de las rocas y se refiere a la energía elástica necesaria

para llevar un material a la falla. Cuando la TBM está en roca, las herramientas de corte son discos metálicos que rotan de manera que al rozarlo lo llevan a la falla en pequeños sectores. Por lo tanto, entre más alta sea su tenacidad, será más difícil su fragmentación y su avance.

Las discontinuidades, determinan en gran medida el desempeño de la TBM; por ejemplo: una inclinación desfavorable, podría provocar desgastes excesivos en las herramientas por un golpeo en las mismas debido a su orientación.

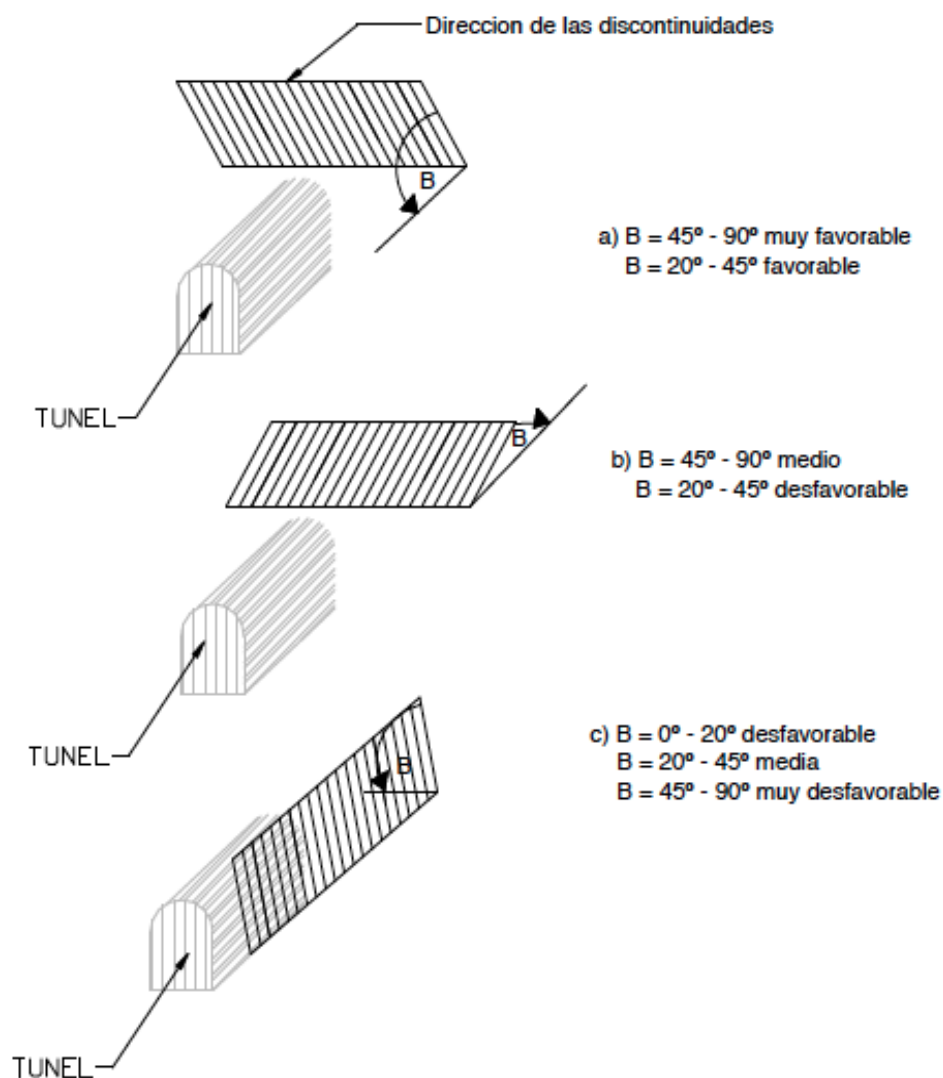


Fig. 3.1. Discontinuidades en relación con la obra.⁶⁵

⁶⁵ Abril, E. G. (2010). *Macizos rocosos. Cátedra de Geotecnia I, Cuadernos Didácticos de Geotecnia*: Laboratorio Área Geotecnia (GeoLab). (F. y. Facultad de Ciencias exactas, Ed.) Argentina, Argentina: Universidad Nacional de Córdoba.

El agua a través del terreno es importante para el rendimiento de la excavación. Cuando se excava en materiales permeables y la presión del frente es elevada, la dificultad de excavación se torna un reto. El aporte del frente será alto y en caso de tener la necesidad de intervenir en el frente de excavación, esta intervención deberá hacerse en condiciones hiperbáricas; a menos que se apliquen tratamientos al frente que reduzcan el aporte de agua y permitan intervenir en condiciones atmosféricas.

En suma, las condiciones del terreno para la excavación atañen de forma directa, por lo cual desde fases tempranas del proyecto es necesaria la realización de un análisis del terreno que será utilizado para excavar. Asimismo son imprescindibles, estudios geotécnicos que permitan vislumbrar a grandes rasgos el material a excavar. De esta manera, se obtendrán los elementos adecuados para elegir un equipo tunelador⁶⁶ apropiado para la tarea que se le asigne.

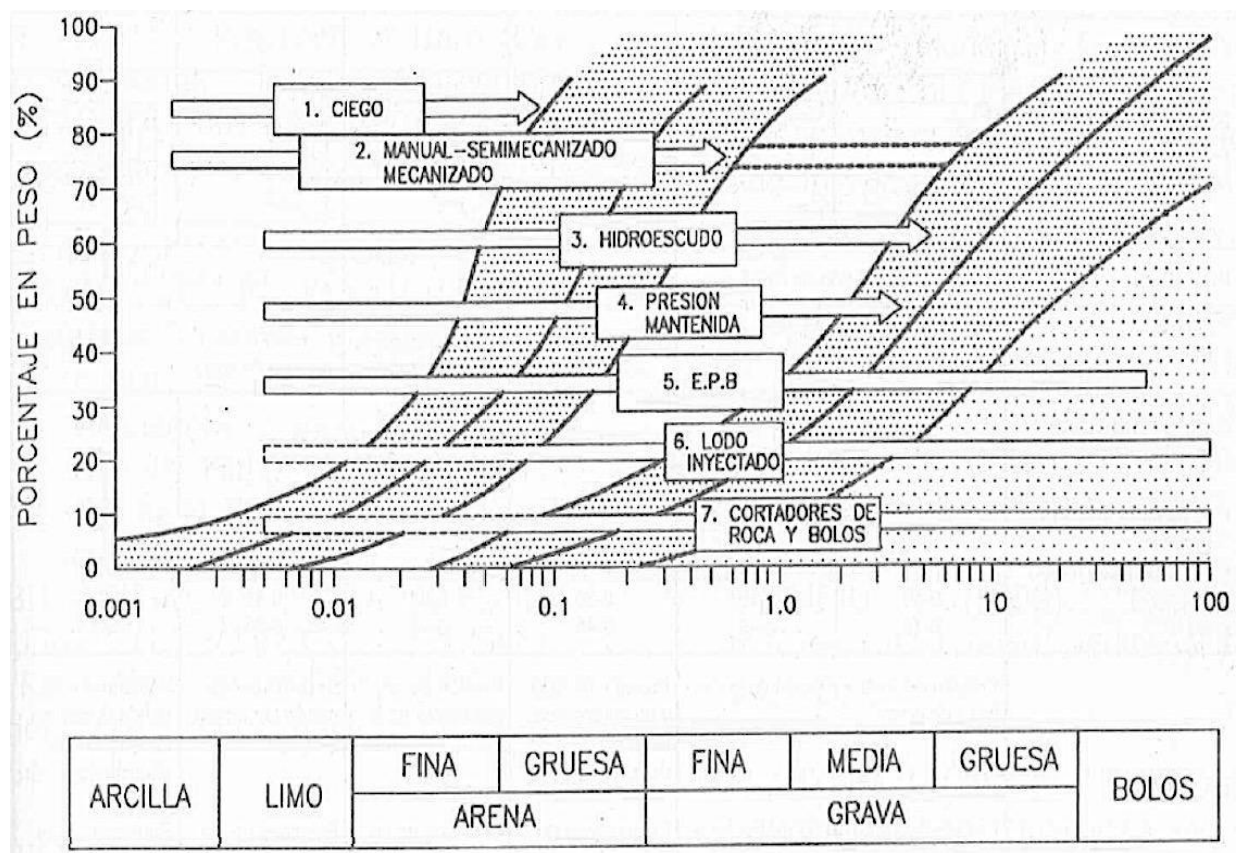


Fig. 3.2. Campos de aplicación de los diferentes escudos.⁶⁷

⁶⁶ La aplicabilidad de cada tipo de TBM tiene sus propios límites.

⁶⁷ López Jimeno, C. (coord.) (1997). *Manual de túneles y obras subterráneas*. Madrid: Entorno Gráfico. p. 479.

El perfil geológico-geotécnico representativo es el que se muestra a continuación y que contiene la descripción de las principales características geológicas y parámetros geotécnicos según se indica:

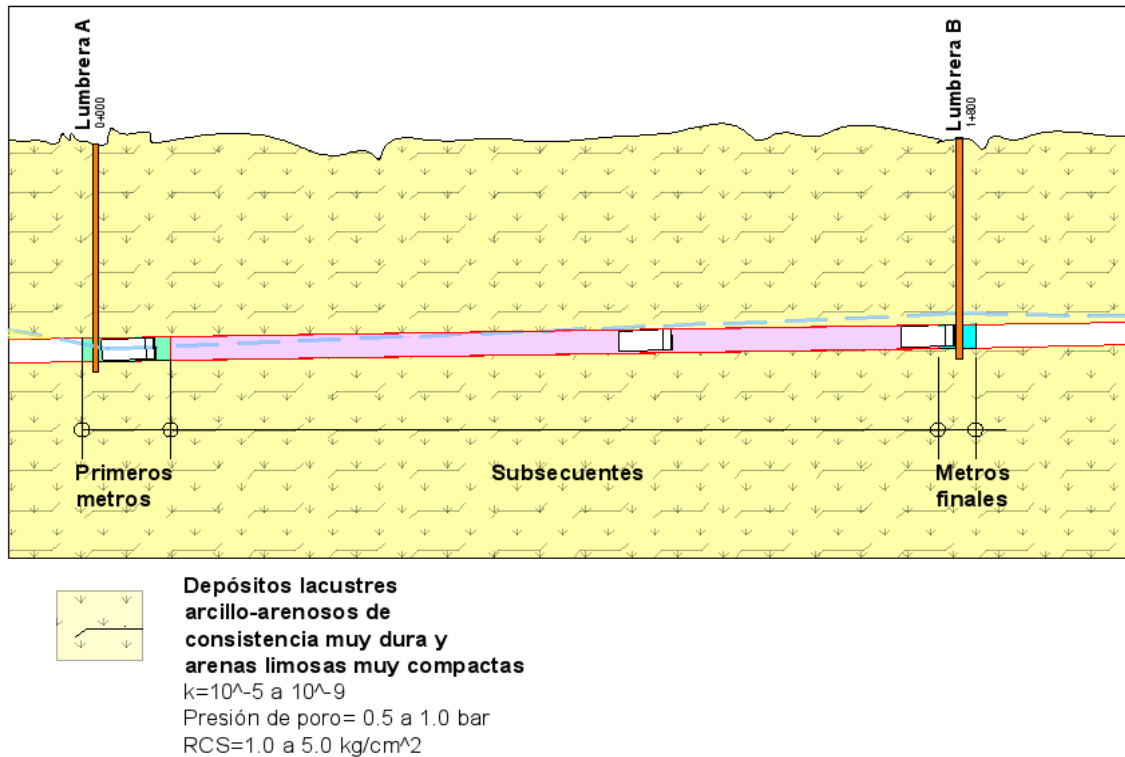


Fig. 3.3. Perfil geológico – geotécnico del tramo analizado.⁶⁸

Las condiciones de excavación de este tramo de túnel en particular son las que los ingenieros desearían encontrar. Son condiciones tipo, de materiales geotécnicos homogéneos que no se encuentran de manera usual.

El rendimiento de una TBM depende de la penetración y ésta es directamente proporcional de la velocidad de avance que se da por el material geotécnico en cuestión. A partir de esto y de un análisis con datos empíricos que estimen a través de una sumatoria de tiempos para cada proceso de excavación, se podrá extrapolar el procedimiento planteado por el presente trabajo para otros proyectos, con parámetros y condiciones de terreno variables, como se muestra en la imagen siguiente.

⁶⁸ Imagen proporcionada por COMISSA.

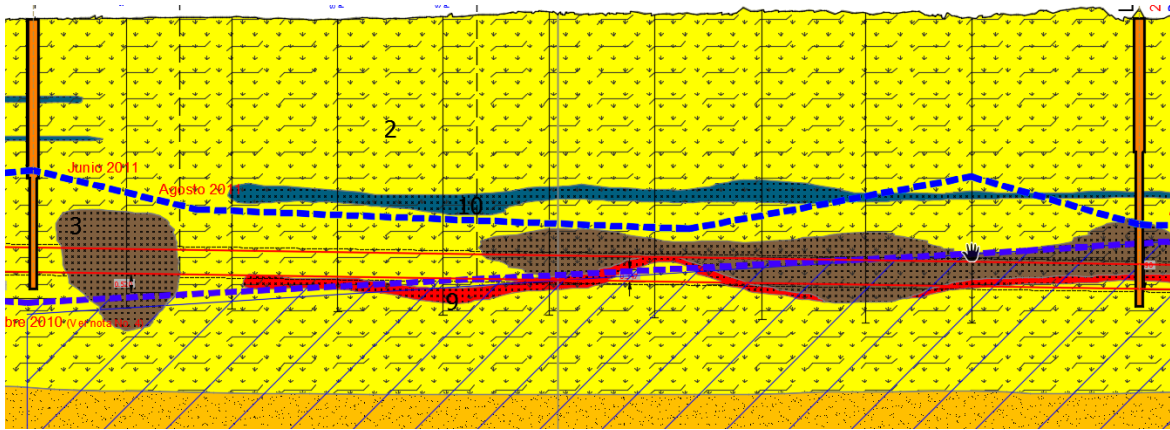


Fig. 3.4. Perfil geológico – geotécnico que ejemplifica las condiciones variables posibles.⁶⁹

El rendimiento de excavación en cada material con una TBM está supeditado a su penetración. Aunque los trabajos de logística, el endovelado del túnel y los trabajos de reparación toman un papel fundamental en los tiempos de excavación, estos son equiparables para cualquier proyecto de túnel; sin embargo lo que diferencia el rendimiento entre un proyecto y otro, es la penetración de la TBM en los materiales geotécnicos. La siguiente tabla sirve de comparación entre los tres principales tipos de materiales: suelo, roca y frente mixto.

Parámetros de excavación en función del tipo de terreno			
Condiciones del Terreno	Suelo Firme Frente Completo (Taximay)	Frente Mixto (Taximay + Vulcanitas)	Frente Completo de Roca (Vulcanita)
Modo de Operación	Cerrado	Semi-abierto	Abierto
Penetración	22 a 40 mm/rev	5 a 10 mm/rev	18 a 25 mm/rev
Velocidad Angular de la Rueda	1.5 a 1.8 rev/min	1.5 rev/min	1.8 a 2.5 rev/min
Velocidad de Avance	33 a 72 mm/min	7 a 15 mm/min	35 a 45 mm/min
Presión de Frente (clave)	1.8 a 2.5 bar	1.8 a 2.5 bar	N/A
Fuerza de Empuje	28,000 a 35,000 kN	15,000 a 20,000 kN	30,000 a 50,000 kN
Torque	3.5 a 5 MNm	2.5 a 3.5 MNm	1.5 a 2.5 MNm
		Abrasividad (Cerchar)	0.7 - 1.5 (abrasividad baja a media)
		Resistencia a Compresión Simple (MPa)	20 - 39
		RQD %	50 a 100
		Dureza (Mohs)	5

Tabla 3.1. Parámetros de excavación en función del tipo de terreno para un TBM de 8.88 m diámetro.⁷⁰

Además de considerar los tiempos de logística, endovelado y excavación neta es necesario

⁶⁹ Imagen proporcionada por COMISSA.

⁷⁰ *Ibíd.*

tener en consideración la influencia que el agua ejerce en los rendimientos. La afectación en los tiempos puede darse entre un 20% y 50% de acuerdo a experiencias en la excavación. Por lo anterior, se recomienda un estudio exhaustivo de las condiciones geo-hidrológicas y su evolución ante la perturbación que representa la excavación, pues está en función del volumen de las aportaciones y la presión que este pueda ejercer sobre el frente de excavación.

2. Presencia de agua en el frente

Los túneles actúan en ocasiones como drenaje de los materiales geotécnicos y por ello es útil dividir éste en secciones que correspondan cada una de ellas a una región con distinta permeabilidad de las atravesadas por el túnel.⁷¹

Las afluencias de agua no previstas pueden ser muy dañinas para los operarios, el equipo mecánico y lo eléctrico de las tuneladoras.⁷² Con lo anterior, es necesaria la realización de perforaciones y exploración de éstas como medida preventiva y, cuando no es posible el drenaje, la única solución posible es la preinyección sistemática en las áreas con presencia de agua, ya sea algún material cementante, impermeable y de sellado que favorezca una disminución o bloqueo de los afluentes al frente de excavación. En los casos donde la cantidad de agua sea moderada, se pueden aplicar las siguientes soluciones:

- Inyecciones de cemento desde el túnel.
- Inyección de espuma de poliuretano o resinas desde el túnel.
- Estaciones de pozos de bombeo para reducir las presiones piezométricas en el sitio de la tuneladora, e intervenir al frente de excavación en condiciones atmosféricas.

En los casos en que el afluente de agua es elevado debido a una alta permeabilidad de los materiales geotécnicos y a una elevada presión del afluente y donde las opciones anteriores por algún motivo no se puedan implementar se tendrán que realizar intervenciones en condiciones hiperbáricas al frente de la cabeza de corte para inspecciones de rutina, cambios de herramienta o maniobras necesarias, lo cual a lo largo de la historia de los túneles ha resultado costoso, tardado y riesgoso.

⁷¹ Cfr. Ramírez, P. (2004) *Mecánica de Rocas: Fundamentos e ingeniería de Taludes*. Madrid: Red DESIR, p. 209.

⁷² Las afluencias suelen estar acompañadas de finos, sobre-excavaciones, caídas de bloques, etc.

2.1. Intervenciones hiperbáricas

Las intervenciones en condiciones hiperbáricas deber ser previstas, programadas y supervisadas. Debe existir una planeación adecuada de las mismas para realizar solo las necesarias, en menor tiempo, menor costo y condiciones máximas de seguridad.

Existen medidas tales como la detección remota del desgaste y el uso de CCTV que pueden usarse solos o en conjunción con otras técnicas de estabilización del suelo para reducir aún más la necesidad de intervenciones hiperbáricas.

En los últimos años se han construido varios túneles que requieren la aplicación de aire comprimido de alta presión para intervenciones en la cabeza de la tuneladora. Se trata de un desarrollo significativo en la actividad hiperbárica en el túnel y ha requerido la transferencia de tecnología hiperbárica, desde la industria del buceo hacia el túnel.

Las técnicas hiperbáricas requeridas para las intervenciones son muy similares a las de buceo a presiones similares pero sin sumergirse en agua. A partir de los años 70, la tecnología de buceo y la seguridad hiperbárica avanzaron mucho con la explotación del petróleo en las aguas relativamente profundas del Mar del Norte. En consecuencia, hay mucha orientación relevante que se puede obtener de las fuentes de buceo.⁷³

Las intervenciones hiperbáricas son operaciones estándar en túneles de suelo blando para permitir la inspección regular y el mantenimiento de la cámara de excavación y la cabeza de corte aunque en ocasiones también se realizan en suelos firmes, por lo que es necesario que las máquinas tuneladoras estén equipadas para estas maniobras.

La intervención debe ser ejecutada aproximadamente cada semana para detectar y reparar los cortes estructurales a la cabeza de corte, lo que en su lugar daría lugar a largas paradas de reparación – también en condiciones hiperbáricas –. Por lo que es más económico y seguro invertir recursos en intervenciones periódicas programadas.⁷⁴

Debido a la naturaleza de las intervenciones, su impacto psicológico y social requiere cualidades especiales en los que hacen el trabajo. Nadie debe ser considerado para esta actividad a menos que puedan demostrar haber realizado exitosamente dicho trabajo

⁷³ ITA. (Febrero de 2012). *Guidelines for good working practice in high pressure compressed air*. ITA Working Group N°5 Health & Safety in Works.

⁷⁴ Lars, B. (2013). *Mechanized Methods for Soft Ground. Principles in Tunneling Design*. México, D.F.: Tunnelsoft.

anteriormente en el buceo o la industria de túneles o han sido sometidos a una formación específica y se ha evaluado como adecuado. Los trabajadores de las intervenciones deberían tener una cualificación de submarinismo comercial en las técnicas de saturación.

Tiempo de trabajo y tiempo de descompresión en función de la Presión							
Presión (bar) @ nivel del mar	Mezcla de gases de trabajo	Tiempo de trabajo (Menos de 75 min)	Tiempo de descompresión (Menos de 75 min)	Tiempo máximo de trabajo	Tiempo de descompresión (min)	Método de descompresión	Tiempo Total máximo de intervención
0.75	Aire			8h 00m	3	Aire	8h 03m
0.90	Aire			6h 00m	3	Aire	6h 03m
1.05	Aire			5h 30m	13	Aire	5h 43m
1.20	Aire			5h 30m	37	Oxígeno	6h 07m
1.35	Aire			5h 00m	47	Oxígeno	5h 47m
1.50	Aire			4h 30m	67	Oxígeno	5h 37m
1.65	Aire	4h 00m	73	4h 30m	88	Oxígeno	5h 58m
1.80	Aire	3h 00m	68	4h 00m	98	Oxígeno	5h 38m
1.95	Aire	2h 30m	59	4h 00m	119	Oxígeno	5h 59m
2.10	Aire	2h 00m	54	3h 30m	121	Oxígeno	5h 31m
2.40	Aire	1h 30m	55	3h 00m	134	Oxígeno	5h 14m
2.70	Aire	1h 00m	46	2h 30m	145	Oxígeno	4h 55m
3.00	Aire	1h 00m	52	2h 30m	190	Oxígeno	5h 40m
3.30	Aire	1h 00m	65	1h 30m	124	Oxígeno	3h 34m
3.60	Aire	45m	51	1h 30m	147	Oxígeno	3h 57m
3.90	Aire	45m	64	1h 30m	180	Oxígeno	4h 30m
4.20	Aire	30m	48	1h 00m	121	Oxígeno	3h 01m
4.50	Aire	30m	56	1h 00m	142	Oxígeno	3h 22m
4.80	Aire	30m	59	1h 00m	165	Oxígeno	3h 45m
5.00	Trimix	20m	46	1h 30m	279	Oxígeno	6h 09m
5.50	Trimix	20m	56	1h 30m	305	Oxígeno	6h 35m
6.00	Trimix	20m	65	1h 20m	310	Oxígeno	6h 30m
6.50	Trimix	20m	72	1h 20m	67	Oxígeno	7h 27m
7.00	Trimix	-	-	1h 10m	367	Oxígeno	7h 17m
7.50	Trimix	-	-	1h 00m	359	Oxígeno	6h 59m
8.00	Trimix	-	-	1h 00m	402	Oxígeno	7h 42m

*El aire no puede ser utilizado como mezcla de trabajo a presiones de más de 4.8 bares.

*Trimix puede ser considerado como una alternativa al heliox o nitrox para exposiciones de saturación, es probablemente la mezcla respiratoria de elección para exposiciones no saturadas a presiones superiores a 3,5 bar., ya que reduce la densidad de gas y los efectos narcóticos del nitrógeno.

Tabla 3.2. Tiempo de trabajo y tiempo de descompresión en función de la Presión.⁷⁵

⁷⁵ Información proporcionada por COMISSA.

El procedimiento de ingreso a la cámara debe realizarse como se ve en la tabla anterior; por fases, una inicial de ingreso a la cámara hiperbárica donde la presión es impuesta al trabajador después de haber cerrado la escotilla. Cuando la presión de la cámara hiperbárica ha igualado a la de trabajo, se abre la escotilla que conecta con la cámara de excavación, para que finalmente después de haber realizado el trabajo, la persona puede regresar, cerrar la escotilla y pasar a un estado de descompresión gradual con el tiempo indicado en el cálculo. El siguiente diagrama ejemplifica lo anterior.

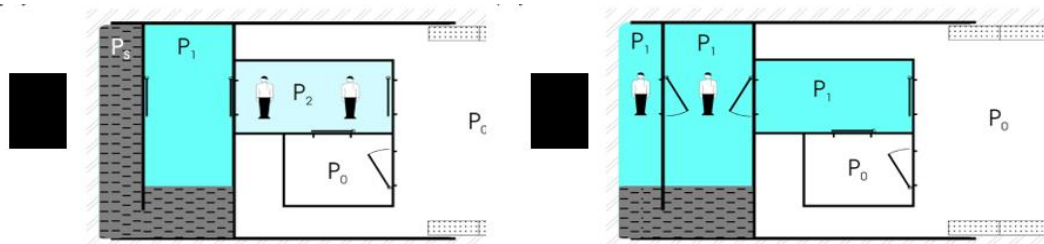


Fig. 3.5. Diagrama que ejemplifica el ingreso a las cámaras Hiperbáricas de una TBM.⁷⁶

A continuación se muestra una imagen de una de las posibles configuraciones que pueden tener las cámaras hiperbáricas de una Tuneladora y las mismas en operación:



Fig. 3.6. Ejemplo de cámaras Hiperbáricas de una TBM.⁷⁷

⁷⁶ Imagen proporcionada por COMISSA.

⁷⁷ ITA. (Febrero de 2012). *Guidelines for good working practice in high pressure compressed air*. ITA Working



Fig. 3.7. Ejemplo de trabajos en cámaras Hiperbáricas.⁷⁸

Durante el traslado de los trabajadores de una cámara a otra, se deben hacer todos los esfuerzos posibles para evitar cambios en la temperatura, en la composición de la mezcla que se respira para evitar efectos fisiológicos.⁷⁹

2. Parámetros operativos

Son muchos factores que se deben tomar en cuenta cuando se plantea una excavación de forma mecánica; como el controlar los distintos parámetros de operación y los de construcción. Y con respecto a los parámetros empleados en la predicción del desempeño o funcionamiento de la penetración, permiten verificar las características geotécnicas de los materiales que se excavan delante del frente de excavación.

Dado que las tuneladoras actuales disponen de un sistema que les permite medir y registrar numerosos parámetros de funcionamiento, algunos de ellos son elementos o parámetros muy útiles que ayudan a controlar indirectamente la calidad geotécnica del terreno por delante del frente de excavación. Algunos de los parámetros que se suelen registrar, medir y que tienen interés geotécnico son:

Group N°5 Health & Safety in Works.

⁷⁸ Burger, W. (2014). *Chamber Access & Compressed-Air Works*. En H. AG (Ed.), *Mechanised Tunnelling*. CDMX.

⁷⁹ ITA. (Febrero de 2012). *Guidelines for good working practice in high pressure compressed air*. ITA Working Group N°5 Health & Safety in Works.

- Velocidad de avance de la tuneladora.
- El tiempo de excavación de la TBM.
- Peso del material extraído durante el avance.
- Empuje total aplicado y empuje de contacto.
- Velocidad de giro de la cabeza de corte.

Los parámetros indicados pueden, de forma indirecta, proporcionar información sobre las características de la calidad del macizo rocoso, por ejemplo:

- Un aumento significativo en la velocidad de avance junto con una disminución en el empuje se asocia a una disminución de la calidad geotécnica.
- Un aumento en el peso del material extraído (superior a lo que corresponde a la sección de avance realizada) se relaciona con inestabilidades en el frente.
- Aumentos instantáneos en el par de rotación pueden asociarse con desprendimientos de terreno en el frente.
- La diferencia entre el empuje total y el empuje de contacto es equivalente al rozamiento de la TBM. Si éste rozamiento es muy alto, existe un alto riesgo de atrapamiento.

Los parámetros de perforación registrados pueden ser analizados individualmente para una primera interpretación, pero generalmente la geología no es tan homogénea, sino más compleja. Precisa la combinación de varios parámetros para una interpretación adecuada y objetiva; los cuales pueden correlacionarse con las propiedades geomecánicas del terreno. Las variables más empleadas, deducidas a partir de los parámetros de perforación de las TBM, son:

- La penetración neta por cada vuelta de la cabeza de corte.
- El índice de penetración.
- La energía específica de excavación.

Los parámetros de perforación se definen por una serie de medidas físicas llevadas a cabo en el equipo de perforación. Tales parámetros pueden ser divididos en dos grupos:

1. Parámetros independientes: son controlados por el operador de la máquina TBM. Como la velocidad de rotación, la fuerza de propulsión (empuje), etc.
2. Parámetros dependientes: están relacionados con los cambios en la situación geológica.

Rueda de corte:

- Velocidad de rotación o revoluciones (rev/min): La velocidad de rotación es una medida de frecuencia para medir la velocidad rotacional. Representa el número completo de vueltas de la rueda de corte en un minuto. La velocidad de rotación afecta la velocidad de penetración.
- Momento de torsión (MNm): también conocido como par de rotación o momento de torsión, es la fuerza de rotación aplicada para la rotación de la cabeza de corte. Esta fuerza está definida por una fuerza lineal multiplicada por un radio. La cantidad de par requerido para rotar la cabeza de corte es dependiente de las propiedades de la roca, de la fuerza de propulsión (empuje) aplicada sobre la cabeza de corte y del diseño mismo de la cabeza de corte. Es un parámetro tan buen indicador, de la variación entre rocas blandas y duras, como lo es la velocidad de penetración. El sistema internacional de medidas (SI), establece para el par de unidades Newton metro (N – m), pero dada la magnitud de éstas máquinas se suele expresar en MNm o kNm.
- Corriente (%): el consumo de corriente se registra como indicador de las características del terreno. Aumentos en el consumo indican condiciones de avance difíciles, bien por dureza del frente de avance o bien condiciones difíciles por ejemplo ante empuje del frente por desprendimientos.

Cilindros de propulsión:

- Fuerza de propulsión o empuje (kN): el empuje proporcionado por los cilindros de propulsión a la cabeza de corte permite conseguir una velocidad de penetración. Cualquier cambio en la fuerza de propulsión o empuje sobre la cabeza de corte se

refleja en cambios en la velocidad de penetración. En el sistema internacional de medidas (SI), el empuje o fuerza de propulsión se define como Newton (N), pero ante la magnitud de las máquinas perforadoras de túneles (TBM) se suele expresar en kN.

- Velocidad de penetración o avance (mm/min): la velocidad de penetración es la velocidad de avance de la cabeza de corte a través de la roca. Las propiedades geológicas y geotécnicas del macizo rocoso influyen en la velocidad de penetración, por lo tanto, la velocidad de penetración es un parámetro importante en los aparatos de registro de parámetros de perforación para delimitar o situar bordes o contornos entre diferentes tipos de roca. Los incrementos de velocidad de perforación en rocas blandas y zonas fracturadas contrasta con la disminución de velocidad de avance en rocas duras.

Es importante tener en cuenta que éste parámetro de avance puede estar influenciado por otros parámetros tales como: la fuerza de propulsión o empuje, la velocidad de rotación, el diseño y desgaste de los cortadores. Por lo anterior, es importante que durante la perforación se mantengan estos parámetros lo más constantes posibles, para así poder realizar una interpretación veraz y objetiva del parámetro individual del avance.

- El sistema internacional de medidas (SI) establece para la velocidad de penetración las unidades de metros por segundo (m/s). Sin embargo, en las TBM se suele emplear mm/mín.
- Penetración (mm/rev): la penetración es un parámetro importante de las tuneladoras ya que proporciona información sobre la resistencia al arranque de los terrenos atravesados. En un macizo rocoso cuanto mayor sea la resistencia al arranque, menor es la penetración de la tuneladora. La penetración (mm/rev) se obtiene a partir de la velocidad de avance medio (mm/min) dividida por la velocidad de rotación (rev/min) [(mm/min)/ (rev/min) = mm/rev].⁸⁰

⁸⁰ Lopez Jimeno, C. (coord.) (1997). *Manual de túneles y obras subterráneas*. Madrid: Entorno Gráfico. pp. 569, 740, 741.

3.1. Control de procesos

Como parte del conocimiento de las condiciones del terreno que se excava, y una prospección del que se excavará surge la necesidad del control de procesos. La interacción de terreno – TBM debe ser monitoreada y comprendida de manera continua, un eficiente control de procesos solo puede ser obtenido con una continua correlación de los parámetros operativos de la TBM y los efectos que la excavación provoca.

Una de las mayores bondades del control de procesos es el poder garantizar una seguridad global a un nivel técnico, pues los efectos de accidente pueden ser localizados y corregidos, y principalmente prevenidos gracias a un monitoreo constante del comportamiento de la excavación y de los efectos externos que esta provoca. De manera que no solo se aumenta el nivel de seguridad, sino que se reducen los efectos inducidos al entorno por la excavación, implementando acciones preventivas.

En el estado del arte de la tecnología de tuneladoras se registran y almacenan hasta 600 parámetros operacionales cada 10 a 60 segundos en tuneladoras de gran diámetro.⁸¹

Hasta hace poco, el control de procesos para la excavación de túneles con TBM se llevaba a cabo mediante registros y evaluaciones manuales de los procesos más importantes para la excavación. A partir de la parametrización y digitalización de un mayor número de procesos y debido a la gran cantidad de datos que éstos aportan, se ha logrado implantar una serie de sistemas que no sólo velan por la evaluación de los parámetros más importantes, sino que también permiten la identificación y el análisis en tiempo real de la interacción entre todos los procesos que incorpora la excavación. La instrumentación en túneles, por su parte cubre parte de las necesidades de seguridad y calidad de la construcción; sin duda, la aplicación de sistemas de auscultación cada vez más sofisticados ha permitido complementar el sistema de control de procesos, particularmente en la relación que existe entre los parámetros de excavación y su interacción con el entorno. En conjunto, ambos aspectos de la ingeniería para túneles han logrado la reducción de los plazos de ejecución y cubierto ampliamente los más estrictos requisitos de seguridad y calidad por lo que su aplicación, a la fecha, forma parte

⁸¹ Comulada M, Wingmann J, Maidl U, (2009), *Process Controlling in Mechanized Tunnelling*, 2nd International Conference on Computational Methods in Tunnelling. Ruhr Universität Bochum, Alemania, p. 1.

esencial en la gestión de proyectos de estas características. Así, fue necesario el desarrollo de nuevos sistemas que permiten simplificar el análisis y la evaluación toda la información, lo que llevó a la implementación de software y métodos especializados para la integración de ambas tareas, sistemas que hoy en día en los grandes proyectos de túneles con TBM han implementado y disfrutan de sus bondades.

A partir de los datos recogidos con estos sistemas, pueden afinarse las estimaciones de predicción de la penetración y mejorarse el conocimiento del terreno delante del frente de excavación, si se complementa la información así obtenida con los perfiles geológico-geotécnicos existentes, de las fases previas del proyecto.

Mientras más sea el número de parámetros que la tuneladora registre, el análisis de dicha información será más completo y en consecuencia, la operación del escudo es más eficiente. Esto aunado al sistema de auscultación, que permite el correcto desempeño de la excavación y de ser necesario la adaptación de sus parámetros de acuerdo con las condiciones geotécnicas reales, lo cual se refleja en la minimización de los efectos inducidos al entorno y el aumento de los rendimientos de excavación

Se puede plantear como principal problema el adquirir una buena aproximación a la predicción de su desempeño o funcionamiento, para así garantizar la ejecución del proyecto en términos de seguridad, eficiencia y economía.

No solo los condicionantes de tipo geológico producen daños en la cabeza de corte, también las condicionantes de tipo operativo y las especificaciones de la tuneladora pueden afectar el buen desempeño durante la excavación.

3.2. Parametrización de acuerdo al tipo de frente

Es imprescindible disponer de un sistema de gestión de datos si se desea implementar un sistema de Control de Procesos eficiente en la obra. Las fuentes de alimentación del Control de Procesos son variadas y principalmente destacan la información geológica e hidrogeológica del proyecto, los cálculos y resultados para la determinación de valores objetivo, los datos de la tuneladora, las lecturas del programa de instrumentación así como los datos e información de otros proyectos de referencia.

Para poder llevar a cabo la comparación de valores objetivo con valores reales y para poder

evaluar las interacciones en el proceso constructivo, se requieren distintas herramientas. Éstas deben permitir simplificar el análisis y la evaluación de la información, para consecuentemente reducir los tiempos de reacción. La siguiente figura muestra de forma esquemática las principales fuerzas e interacciones en la excavación con tuneladora:

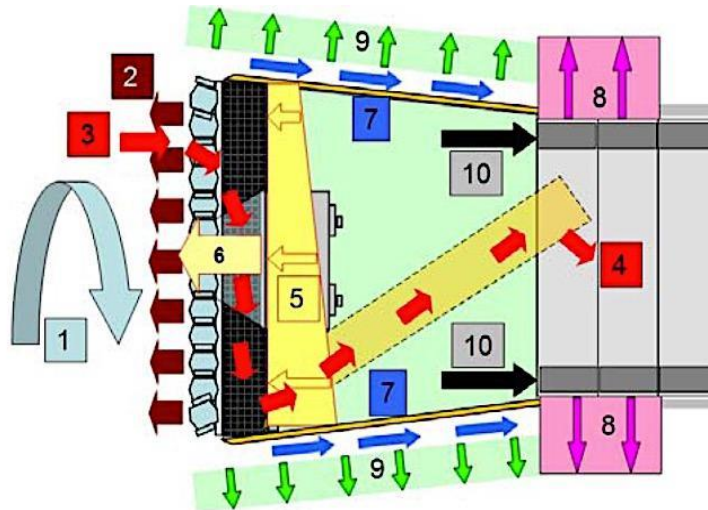


Fig. 3.8. Esquema de fuerzas e interacciones durante la excavación con una tuneladora del tipo EPB.⁸²

El proceso de excavación se inicia en el frente, donde las herramientas de corte giran con la rueda de corte (1) y penetran y rompen el suelo del frente gracias al empuje transmitido a la cabeza (2) desde los cilindros de empuje de la tuneladora (10). El primer objetivo es que el proceso de corte del suelo se haga de forma efectiva, con el mínimo desgaste de herramientas y el mínimo torque (1).

Inmediatamente tras ser cortado, el material excavado debe ser capaz de fluir cómodamente a través de las aberturas de la cabeza de corte (3) hacia la cámara de excavación y hasta el tornillo sinfín (4). El buen flujo de material es necesario para garantizar un mínimo desgaste secundario de herramientas, así como una velocidad de avance constante y elevado. En suelos inestables, es necesario aplicar presión en la cámara de excavación (5) con objeto de estabilizar el frente. Cuanto mayor es la presión del frente en la cámara (5), mayores serán el torque de la rueda de corte (1) y el desgaste de herramientas, lo cual puede acabar

⁸² Comulada M, Wingmann J, Maidl U, (2009), *Process Controlling in Mechanized Tunnelling*, 2nd International Conference on Computational Methods in Tunnelling. Ruhr Universität Bochum, Alemania, p. 5.

repercutiendo en una disminución de la velocidad de avance. La fuerza resultante de la presión en la cámara (6) reacciona contra el mamparo estanco y debe ser vencida por la fuerza de los cilindros de empuje (10). La mencionada fuerza resultante de presión en la cámara (6), no sólo depende de la presión que se aplique para sostener el frente, sino que depende también de la densidad del material excavado. Por ello, es de crucial importancia mantener la densidad del material en la cámara suficientemente baja, tanto para minimizar la fuerza de empuje (10), como para permitir un adecuado flujo del material a través de la cámara (3-4).

Otras fuerzas que deben ser contrarrestadas por la fuerza de empuje total (10) son las fuerzas de fricción con el suelo (9), que pueden ser minimizadas con un adecuado guiado de la máquina y verificando el correcto posicionamiento del faldón del escudo. Además, con la presión a lo largo del escudo (9), que es función de las presiones de frente (5) y de inyección de mortero (8), se puede controlar la deformación del suelo alrededor del escudo y con ello se puede reducir la fricción.

La inyección de mortero (8) no sólo permite controlar la deformación del suelo, sino que ofrece al revestimiento de dovelas el confinamiento necesario para trabajar como anillo. La calidad del revestimiento depende, finalmente también, de la magnitud y distribución de las fuerzas de los cilindros de empuje (10) que, como se ha visto, resultan de todo el proceso.

En definitiva, se puede concluir que efectivamente existe una estrecha interacción entre los procesos clave de la excavación con tuneladora y al mismo tiempo con las propiedades del suelo. Para que el Control de Procesos sea efectivo, es necesario comprender y dominar todos los procesos clave, así como las interacciones existentes en todo momento.⁸³

⁸³ *Ibíd.*

Parámetros de operación TBM	Suelo	Mixto	Roca
Modo de operación	Cerrado	Semicerrado	Abierto
Penetración	25-45 mm/rev	5-7 mm/rev	5 mm/rev
Revoluciones de rueda	1.5-1.8 rpm	1.5-1.8 rpm	2.0-2.2 rpm
Velocidad de avance	45-80 mm/min	10 mm/min	10-11 mm/min
Presión de aire/tierra (superior)			
Cámara al 50%	--	+ 0.05 - 1.00 bar	+ 0.05 - 1.00 bar
Cámara al 75%	--	+ 0.06 - 1.20 bar	+ 0.06 - 1.20 bar
Cámara al 100%	+ 2.00 - 2.5 bar	--	--
Fuerza de empuje	35,000 - 50,000 kN	25,000 - 45,000 kN	25,000 - 40,000 kN
Torque	2,000 - 7,000 kNm	3,000 - 6,000 kNm	2,500 - 6,000 kNm
Inyección de espuma (FIR)	≥ 100%	30-100%	70-100%
Inyección de espuma (FER)	20:1	20:1	7-20:1

Tabla 3.3. Parámetros de operación estimados para un TBM del tipo EPB de 8.88 m diámetro de acuerdo al tipo de material geotécnico.⁸⁴

Los parámetros de la TBM con los cuales trabajará de manera estándar, están función del tipo de frente a excavar, de manera que cuando se excava en terrenos muy duros como la roca, la TBM trabajará en modo abierto o semicerrado, las penetraciones serán bajas y la fuerza de empuje será menor. Caso contrario cuando se excava en medios muy deformables, por ejemplo, un suelo blando, el modo de operación debe ser cerrado, las revoluciones en la rueda de corte son menores, y la fuerza de empuje y la penetración son menores. De manera que cuando hay un cambio de material se debe estar al tanto de la interfaz de un material geotécnico a otro, pues de cambiar por ejemplo de un suelo blando a roca y permanecer con los parámetros que no le corresponden, ocasiona que las herramientas de corte se rompieran, el avance disminuiría más de lo debido y la TBM podría averiarse. La tabla anterior muestra una tabla donde se muestran los rangos estimados para una TBM de tipo EPB con diámetro de 8.88 m.

⁸⁴ Información proporcionada por COMISSA.

3.3. Predicción de rendimientos

*TBM performance is the result of a complex interaction between the ground, the tunnelling equipment (TBM and back-up) and the support.*⁸⁵

La predicción del rendimiento de las unidades EPBM es una herramienta esencial para el diseño y la estimación. Una predicción realista sólo es posible basándose en los datos específicos para el proyecto, incluyendo todas las cargas, las condiciones locales y las interacciones.⁸⁶

La penetración por sí sola no determina el avance real de perforación en un determinado período. La velocidad de avance real también se ve afectada por otros factores como el de sostenimiento de la roca, cambio de cortadores, reparaciones y no menos importante la eficiencia de la logística para remover la suciedad de la excavación de los carros de la TBM, así como la entrega de materiales y suministros de construcción.⁸⁷

Para predecir la velocidad de avance de un EPB a diferencia de una TBM de roca, tienen que ser considerados muchos más procesos y factores. La cadena de procesos de un EPB consta de unos diez procesos parciales:

1. Corte
2. Control de presión del frente
3. Acondicionamiento
4. Dirección
5. Inyección de lechada
6. Construcción del revestimiento
7. Tornillo de transporte de rezaga
8. Banda de transporte de rezaga
9. Disposición Temporal
10. Vertido de la rezaga

⁸⁵ Marco Ramoni, G. Anagnostou (2010) *Tunnelling and Underground Space Technology* 25 ETH Zurich, Switzerland: ELSEVIER journal homepage: www.elsevier.com/locate/tust p. 155.

⁸⁶ Maidl, U. et al. (2009). *Predicting the performance of earth pressure shields in loose rock*. Geomechanics and Tunnelling (No. 2). p. 189.

⁸⁷ Cfr. Maidl, B. e. (2008). *Hardrock tunnel boring machines*. John Wiley & Sons, Berlín, p. 200.

Los procesos de excavación del suelo (1-5), el transporte de la rezaga (7-9) y el vertido de la rezaga (10) corren en paralelo, como con una TBM de roca. Las interrupciones para la construcción del revestimiento (6) y los tiempos de parada previstas (de cambio de herramientas) son considerablemente más largos en total que el tiempo de avance y esto es de gran importancia para la determinación del factor de utilización.⁸⁸

La predicción del rendimiento de las máquinas tuneladoras (TBM) es crucial porque una estimación precisa puede reducir considerablemente las incertidumbres involucradas en el costo y el tiempo de los proyectos. Sin embargo, el proceso de predicción es de carácter muy complejo, los investigadores siempre han tenido la curiosidad de conocer la tasa de penetración y el rendimiento desde las primeras épocas del uso de las TBM.⁸⁹

El rendimiento de una tuneladora está determinado por las horas de trabajo disponibles cada día, la velocidad de avance y la duración de las interrupciones al tuneleo. Los métodos predictivos de rendimiento de tuneleo existen principalmente para predicción en rocas, si bien no es el tema fundamental de este trabajo, es importante saberlo. Unos de los métodos disponibles para la predicción del rendimiento que ha demostrado resultados satisfactorios y una precisión aceptable es el índice QTBM, que surge del índice de calidad Q de Barton para catalogar los macizos rocosos y que pretende predecir la velocidad neta de avance de una TBM; se expresa de la siguiente manera:

$$Q_{TBM} = \frac{RQD_0}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \cdot \frac{J_w}{SRF} \cdot \frac{SIGMA}{F^{10}/20^9} \cdot \frac{20}{CLI} \cdot \frac{q}{20} \cdot \frac{\sigma_\theta}{5}$$

donde:

RQD_0 = Primer parámetro del índice de Barton, es lo mismo que RQD% pero medido en orientación longitudinal al túnel, es decir, en el sentido de tuneleo.

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 favorecen la penetración de los cortadores.

⁸⁸ Maidl, U. et al. (2009). *Predicting the performance of earth pressure shields in loose rock*. Geomechanics and Tunnelling (No. 2). p. 189.

⁸⁹ Pandey, S. e. (2013). *Performance prediction of rock TMBs. Proceedings of Indian Geotechnical Conference. Indian Geotechnical Society, Roorkee, Uttarakhand, India, p. 1.*

J_a = Cuarto parámetro de la clasificación de Barton que depende del grado de alteración de las discontinuidades que más favorecen la penetración de los cortadores.

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.

$SIGMA$ = Resistencia del macizo rocoso en la misma zona (MPa).

F = Fuerza media por cortador (tnf) a través de la misma zona, normalizado por 20 tnf.

CLI = Índice de vida del cortador, (por ejemplo 4 para Cuarquita, 90 para Caliza).

q = % de contenido de cuarzo

σ_θ =Inducido estado biaxial de esfuerzos en la cara del túnel (MPa) en la misma zona (valor estimado normalizado a 100 m de longitud de túnel).

Bartón explica que el rendimiento es desfavorable si $CLI < 20$, si $q > 20$, y si el σ_θ es más de 5 MPa.⁹⁰ Finalmente, Barton define a la velocidad de avance como:

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

donde:

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

Existen más métodos de predicción del rendimiento de una TBM, sin embargo, todos difieren tanto en los parámetros utilizados en las estimaciones como en sus resultados.

Hoy en día se emplea el concepto del Avance Medio en un tramo de túnel (“Average Rate of Advance”, ARA) que se calcula dividiendo la longitud de un tramo de túnel homogéneo entre el tiempo invertido en su excavación y se expresa en m/día. Por otro lado, para calcular en avance diario a partir de la velocidad de penetración, se requiere conocer el porcentaje del día que la tuneladora efectivamente está excavando, pero por la experiencia adquirida, se sabe que conocer este dato de manera precisa es imposible. Se tuvo a bien

⁹⁰ Barton N. (2015) *TBM Performance, Prognosis and Risk Caused by Faulting*.

destacar en este trabajo el método predictivo QTBM de Barton pues incluye en sus parámetros de entrada el valor del estado de esfuerzos del frente de excavación, valor que influye en gran medida a la tasa de penetración de la TBM, mientras que varios de los métodos predictivos existentes no lo usan.

Los cálculos matemáticos de la velocidad de avance de los escudos de presión de tierras no cumplen con su propósito, porque el número de factores, los cuales no pueden ser determinados, es superior al número de factores que sí pueden. Los parámetros de mecánica de suelos sólo son útiles para el pronóstico de la penetración. El avance diario se determina por un sistema complejo de factores intrínsecos al sistema y específicos para el proyecto. Por ello se recomienda que los pronósticos de rendimiento se basen en un análisis detallado de los procesos clave en el proyecto en particular. El análisis del comportamiento del sistema, la división de la programación de la construcción en las actividades de desarrollo y la incorporación de todos los datos del proyecto representa un método de trabajo demostrado.⁹¹

De igual forma, se pueden hacer estimaciones de las velocidades de penetración más acordes con la realidad, es cada día más patente la necesidad de desarrollar modelos probabilísticos. Estos modelos de predicción aportan más información que los determinísticos y permiten tener en cuenta la variabilidad de los parámetros que intervienen, así como su grado de influencia.

3.4. . Diseño del equipo tunelador

Antes de elegir un tipo de tuneladora, habrá que determinar si efectivamente una TBM es la mejor opción, comenzando por la longitud a excavar. Para que la aplicación de las máquinas tuneladoras se justifique técnica y económicamente se tendrá que manejar una longitud mínima que de acuerdo a estudios realizados en USA es 2,5 km, debajo de la cual, la decisión deberá ser buscar otra opción viable.

La velocidad de rotación, está en función del diámetro del cabezal, este parámetro de la TBM está directamente relacionado con el torque el cual le da la fuerza a la TBM para girar la cabeza cortadora. Cuanto más resistente, duro y competente sea el terreno, requerirá una mayor velocidad de rotación, pues la excavación estará basada en formación de

⁹¹ Maidl. U. et al. (2009). *Predicting the performance of earth pressure shields in loose rock. Geomechanics and Tunnelling* (No. 2), p. 197.

fragmentos del terreno. De manera contraria cuando se excava en suelos deformables, la velocidad de rotación no requerirá ser elevada.

La energía que requieren las TBM es de alta tensión y está en función del material para el cual fue diseñada, es decir, si fue diseñada para roca, la fuerza de empuje es mayor, por lo que requerirá mayor disponibilidad de energía instalada.

Otros factores del diseño del túnel a excavar determinan los sistemas que la TBM deberá llevar, como la necesidad de sostenimiento obliga a que la TBM esté equipada para colocarlos o si la autosustentación del túnel lo permite, se puede hacer paralelamente a la excavación del túnel, pero esto no es tan común.

La geometría y la ubicación de las herramientas de corte, así como la elección de las mismas son factores que determinarán los mecanismos de fragmentación o roce que la TBM provocará. Tanto las características geométricas como de desgaste de los cortadores tienen una influencia sobre la transferencia de energía a la roca.

4. Metros iniciales

Es la etapa constructiva con la que comienza la excavación de un túnel, esta se da cuando la rueda de corte se encuentra posicionada y preparada para cortar el terreno lateral de la lumbrera, es decir, el túnel. Este proceso conlleva el armado paulatino de cada uno de los carros de la TBM – *back up* – mientras que se excava y concluye en el momento en que la TBM está completamente armada y probada para excavar completa; es hasta este punto donde empieza la etapa de metros subsecuentes.

4.1. Procedimiento constructivo

En la construcción de un túnel es indispensable contar con lumbreras de ensamble; en la construcción se tiene como objetivo la bajada y el armado de la tuneladora EPB en fondo, y por añadidura la de los carros que conforman el equipo excavador. Para ello resulta óptimo contar con una cavidad llamada *galería de ensamble*, donde se arma la TBM y dos carros antes de arrancar la excavación.

Para iniciar con la excavación es necesario ensamblar el equipo excavador a utilizar, debido a que la TBM se traslada en secciones desde el lugar de origen, hasta el lugar de

utilización. Para ello, se requiere realizar actividades previas en la superficie de la lumbrera, para recibir las secciones y poder conformar los elementos del equipo excavador tales como rueda de corte y faldón de cola, siendo estos dos elementos los principales que requieren de trabajos especializados de soldadura para unir las secciones.

En la superficie de la lumbrera, simultáneamente a las actividades de soldadura especializada, se llevan las actividades de armado de los carros que componen el equipo excavador. Valga como ilustración de lo anterior la siguiente imagen:



Fig. 3.9. Armado de carros de la TBM en superficie.⁹²

⁹² Imagen proporcionada por COMISSA.

Una vez que se tienen conformados los elementos del equipo excavador EPB, que requieren trabajos especializados de soldadura, son bajados al fondo de la lumbrera por medio de equipos mecánicos (grúas con capacidades apropiadas al peso máximo del equipo EPB y la profundidad de la lumbrera a vencer), apoyados en la cuna metálica y/o de concreto ubicada al fondo de la lumbrera.



Fig. 3.10. Bajada del escudo al fondo de la lumbrera.⁹³

Así mismo, se baja el accionamiento principal en sus cuatro secciones que es ensamblado en el fondo de la lumbrera. A continuación se realizan las conexiones hidráulicas y mecánicas, para poder colocar los sellos del accionamiento principal como se ve en la imagen siguiente.

⁹³ *Ibíd.*

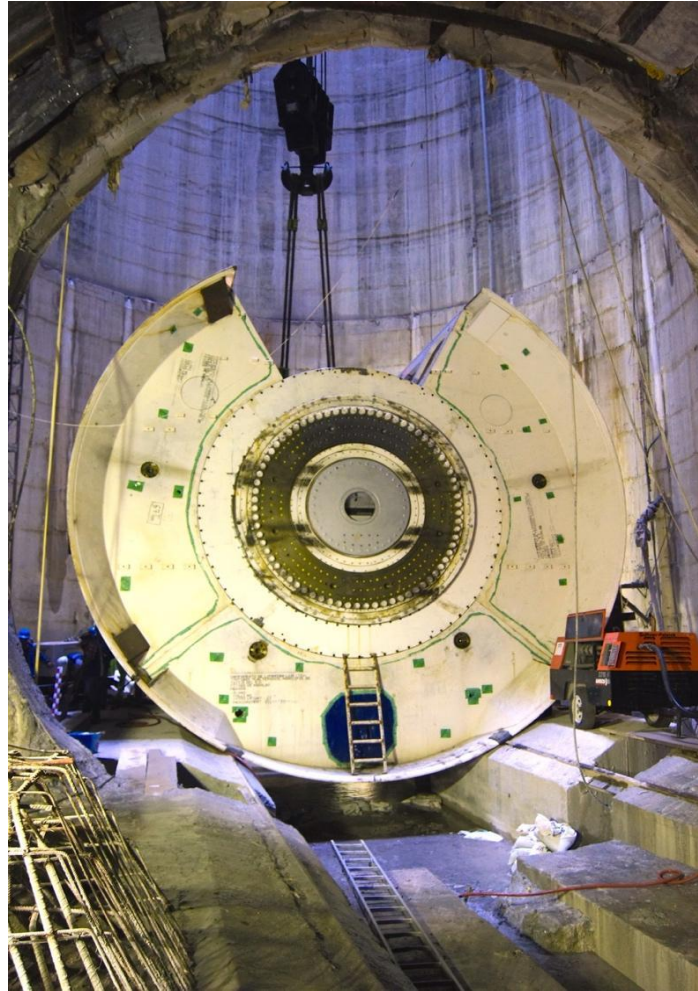


Fig. 3.11. Armado de las cuatro secciones del accionamiento principal.⁹⁴

Una vez ensamblado el accionamiento principal es bajado al fondo de la lumbrera para ensamblarse a la cabeza de corte. Análogamente el *tornillo sin fin* es bajado e instalado junto con el accionamiento principal. Una vez que se tiene el tornillo sin fin instalado, se procede a bajar el faldón de cola para concluir la primera etapa de ensamble del cuerpo de excavación. Para la mejor comprensión de lo anterior, detallo de manera representativa y esquemática todo el proceso en las figuras siguientes:

⁹⁴ *Ibíd.*

Paso 1 :

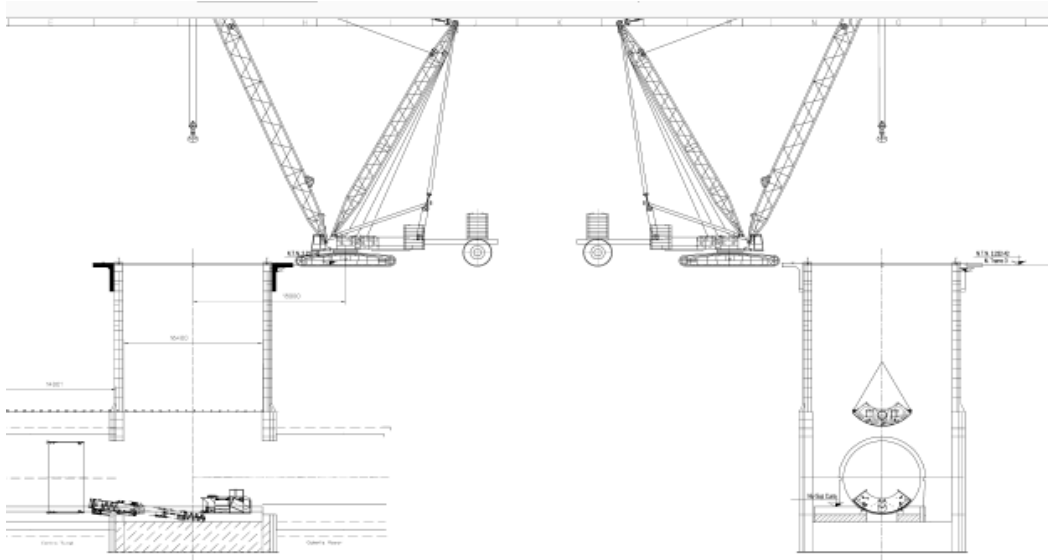


Fig. 3.12. Es bajado el transportador helicoidal, y la media sección inferior del escudo, cabe destacar que se posiciona en esta etapa la media sección inferior a diferencia del tornillo, que solo se deja a un costado.⁹⁵

Paso 2:

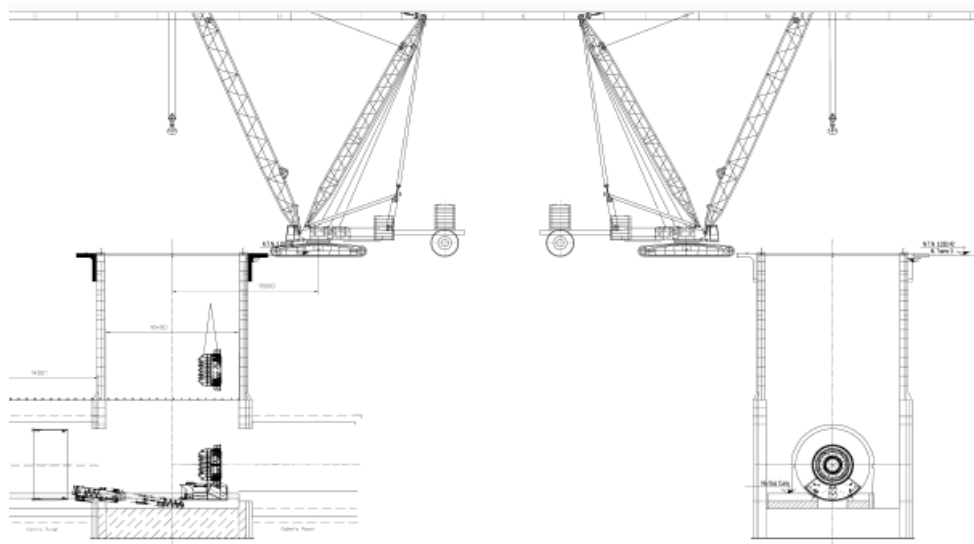


Fig. 3.13. Se baja la transmisión de la TBM y se posiciona sobre la media sección inferior.⁹⁶

⁹⁵ *Ibíd.*

⁹⁶ *Ibíd.*

Paso 3:

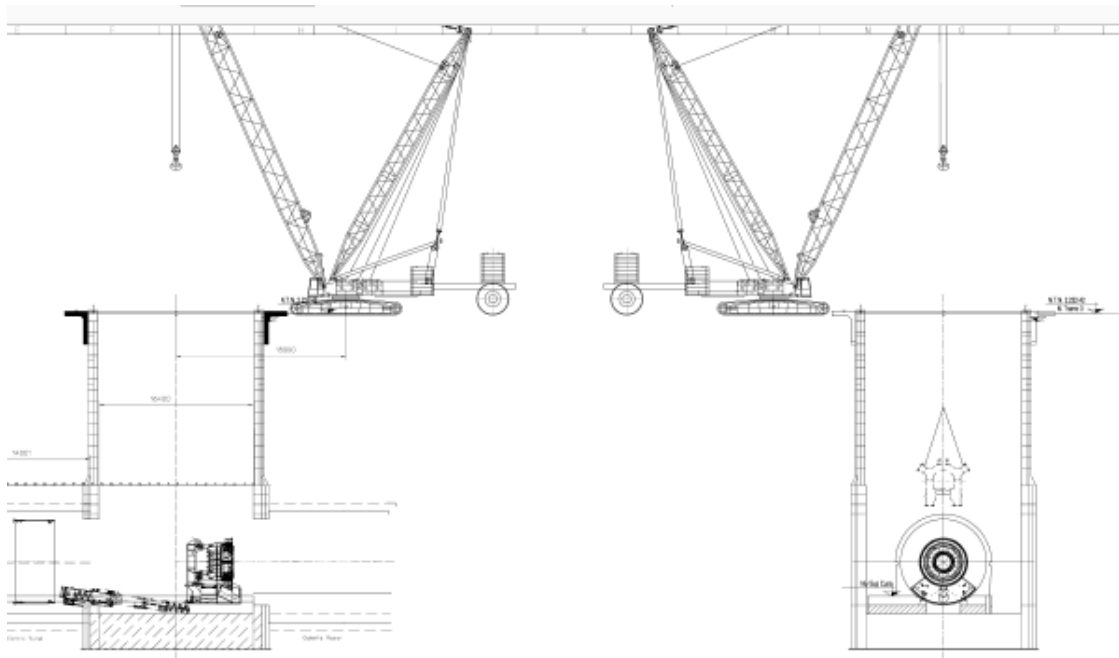


Fig. 3.14. Se baja el mamparo de la TBM y se ensambla.⁹⁷

Paso 4:

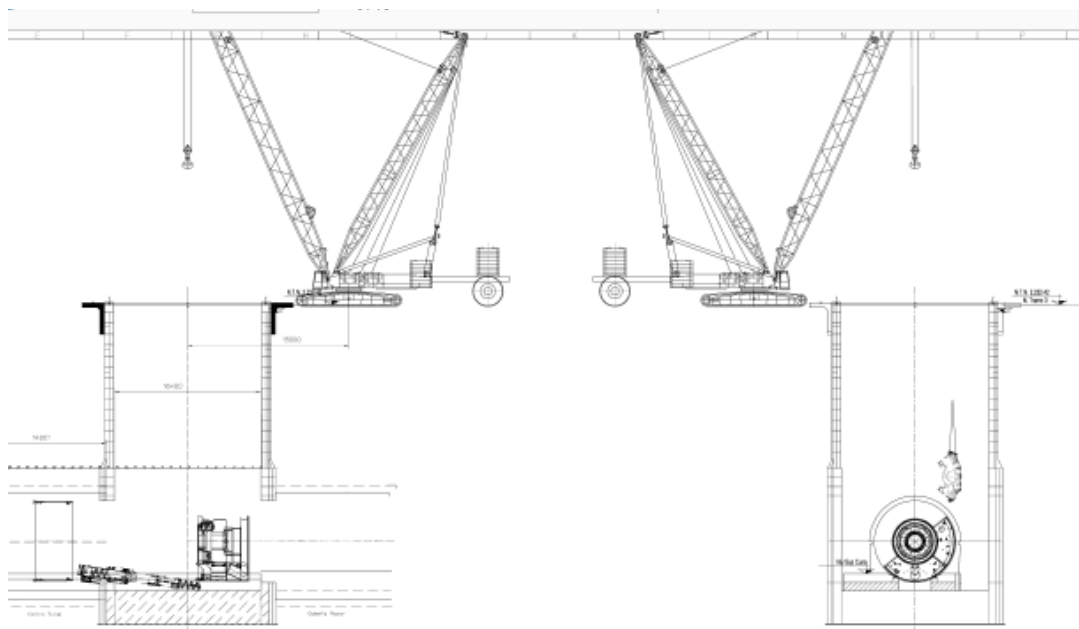


Fig. 3.15. Se baja y se instala el lateral derecho de la cabeza de corte.⁹⁸

⁹⁷ Ibíd.

⁹⁸ Ibíd.

Paso 5:

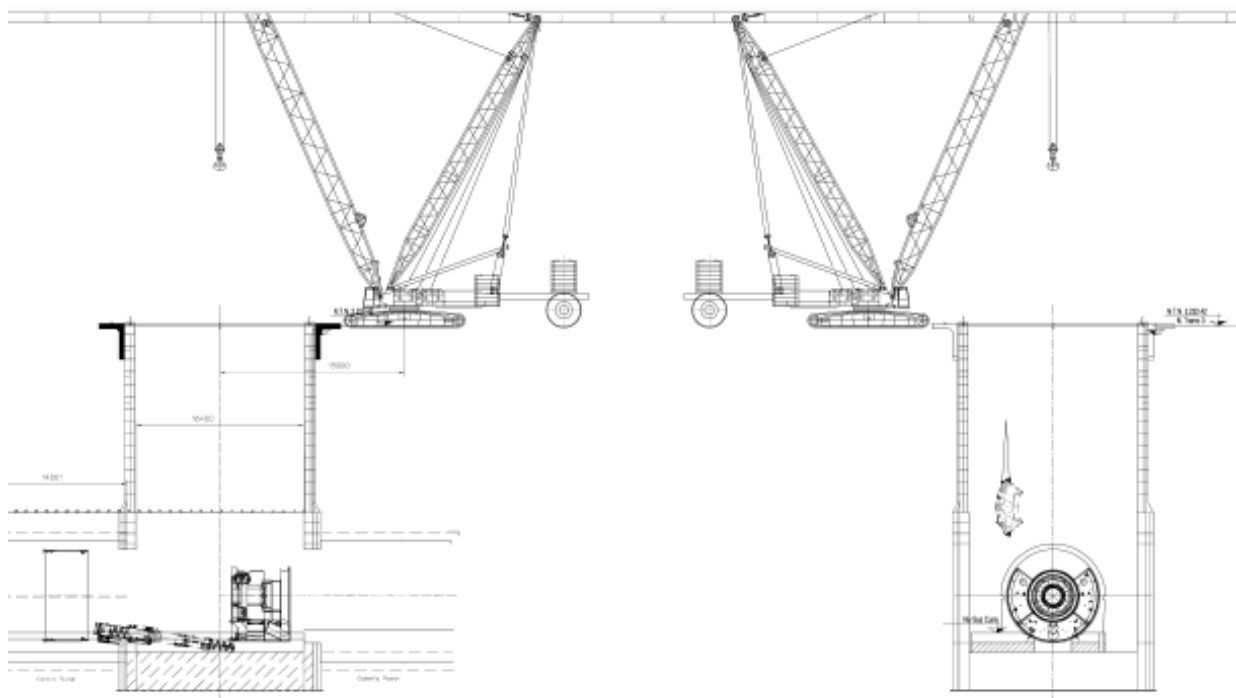


Fig. 3.16. Se baja y se instala el lateral izquierdo de la cabeza de corte.⁹⁹

Paso 6:

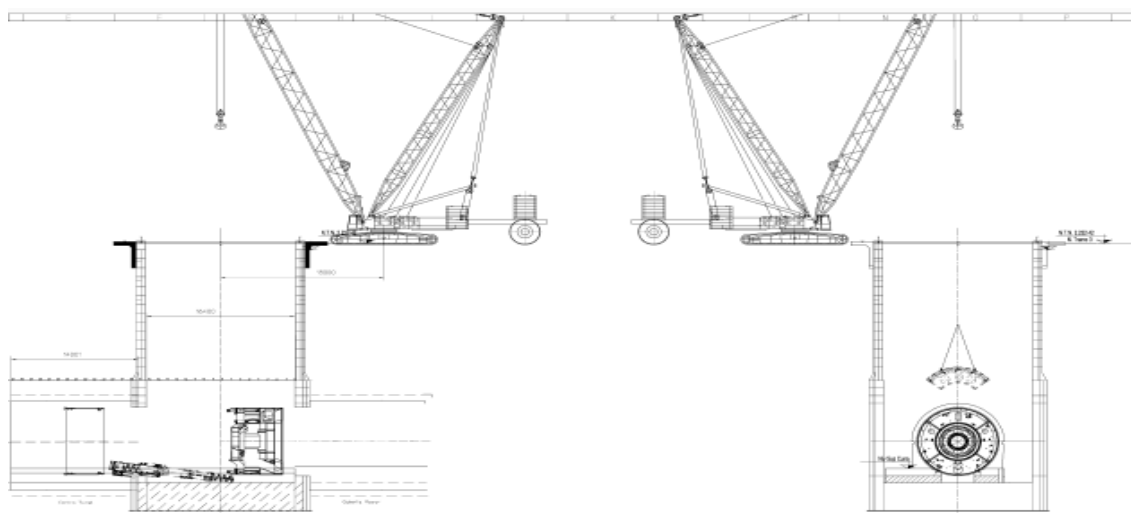


Fig. 3.17. Se baja y se instala la media sección superior de la cabeza de corte.¹⁰⁰

⁹⁹ *Ibíd.*

¹⁰⁰ *Ibíd.*

Paso 7:

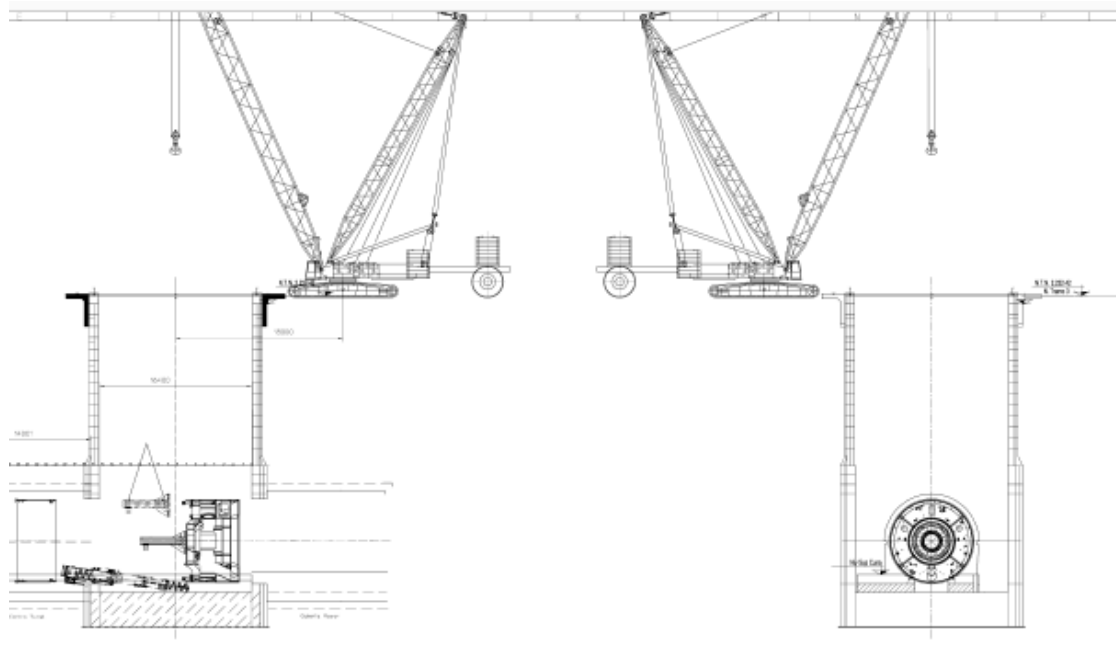


Fig. 3.18. Se baja y se instala el eje del erector de dovelas.¹⁰¹

Paso 8:

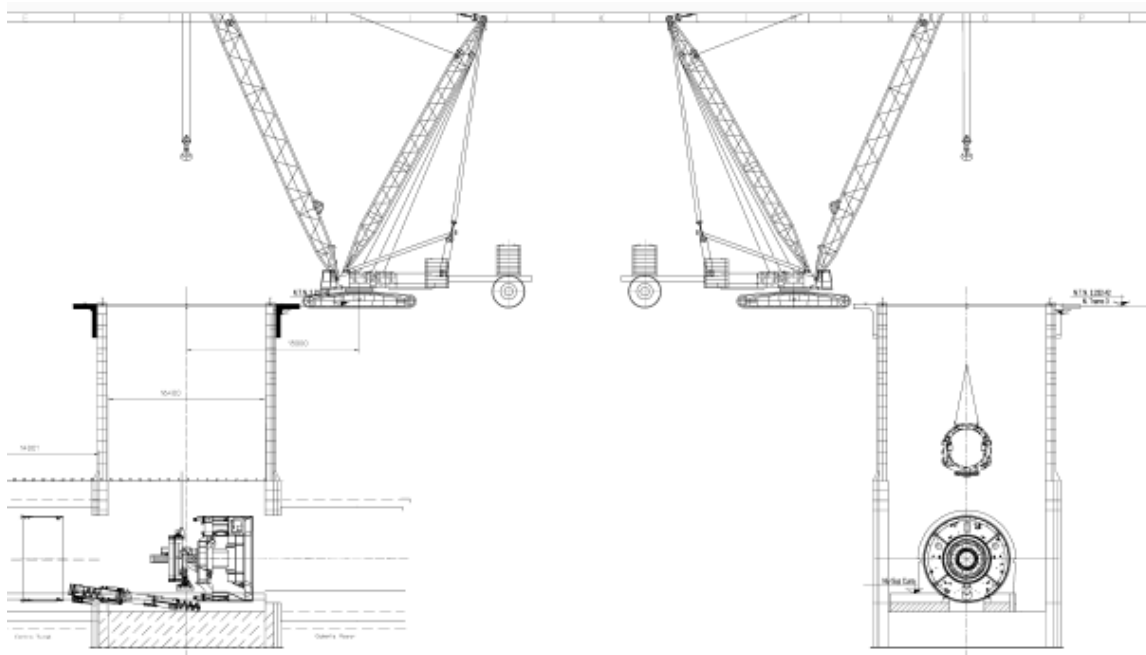


Fig. 3.19. Se baja y se ensambla el erector de dovelas.¹⁰²

¹⁰¹ *Ibíd.*

¹⁰² *Ibíd.*

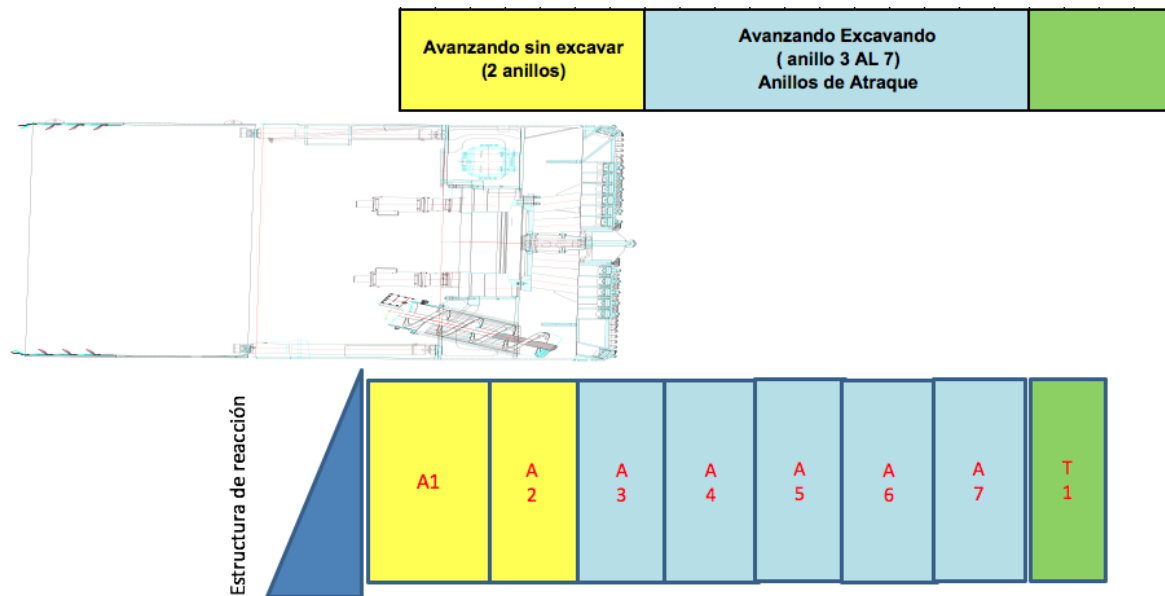


Fig. 3.21. Esquema del avance de los primeros metros “Avanzando sin excavar” y “Avanzando excavando” en una lumbrera de arranque.¹⁰⁴

- Anillos de atraque (avanzando con excavación)

Se denomina *anillos de atraque avanzando con excavación* a los anillos colocados en la lumbrera pero siempre y cuando este ya la máquina dentro del terreno, es decir, la TBM ya hizo contacto con el terreno pero el faldón continúa ubicado en la lumbrera, como se ve en la figura anterior. Para diferenciar esta etapa con la siguiente que corresponde a excavar el túnel como tal colocando anillos ya dentro del mismo, se muestra la figura siguiente:

¹⁰⁴ *Ibíd.*

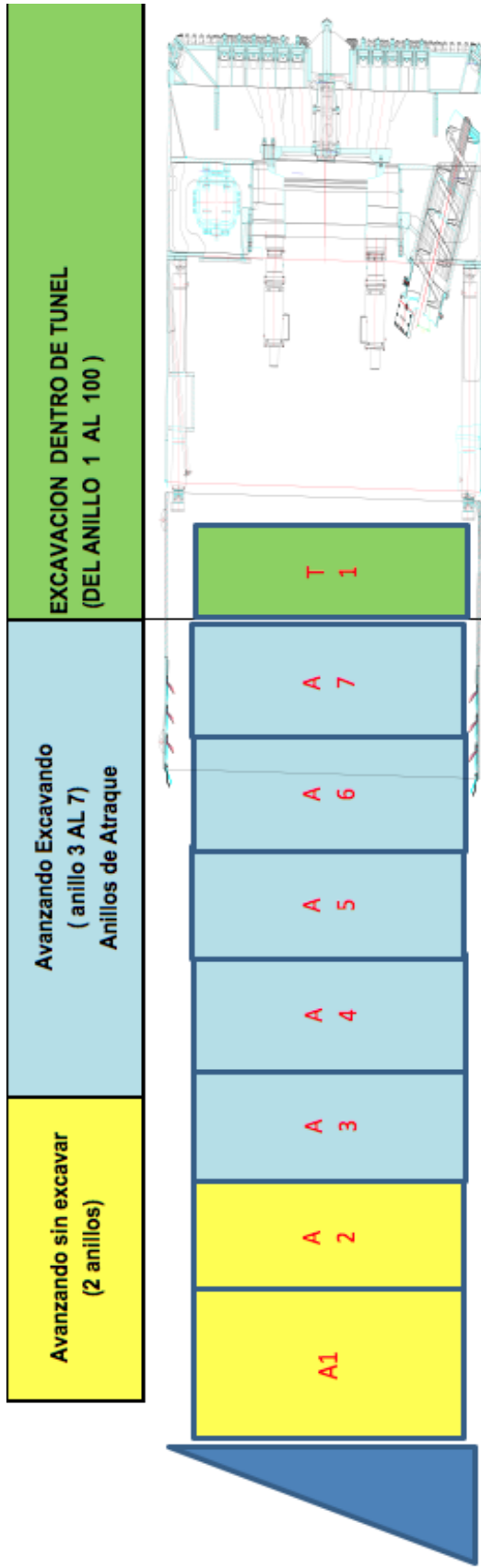


Fig. 3.22. Esquema del avance de los primeros metros de excavación "Excavación dentro del túnel" en una lumbrera de arranque.

Una vez que se cuenta con el espacio necesario para bajar el primer carro, se procede a bajarlo con grúas de canto y luego ensamblarlo al escudo, de esta manera se proseguirá con la excavación para poder ir bajando uno a uno los carros del equipo auxiliar, *back up* de la TBM.

Las características principales del back up de la TBM: el segundo carro lleva en su parte superior el tablero principal de control y el sistema de inyección de lechada la cual rellena el espacio anular entre las dovelas y el terreno excavado; el tercero lleva el sistema de enfriamiento y compresores; el cuatro lleva la extensión del sistema para el suministro y retorno de agua de enfriamiento; y el quinto tiene el sistema de rezaga por medio de bandas transportadoras, la conexión con el sistema de ventilación, la extensión de las líneas de alta y baja tensión para la TBM y al interior del túnel y el sistema de tuberías para rezaga y bomba de achique para cuando se requiera.¹⁰⁵

4.2. Cálculo de rendimientos

Este trabajo considera el cálculo de rendimientos de excavación en un túnel a 60 metros de profundidad emplazado en una formación de suelos y abanicos aluviales poco permeables (suelos firmes) y con una presión de poro despreciable para fines de excavación (<1 bar).

Para excavar los primeros metros de un túnel con TBM existen tres procedimientos los cuales son “tajo a cielo abierto”, “umbilicales”, y “galería”. El primero se utiliza cuando el frente de excavación es somero y permite el armado completo de la TBM en superficie, para que después a través de un portal se introduzca al terreno.

El procedimiento de “umbilicales” es complejo por las maniobras de transporte de insumos y materiales por medio de tuberías y cables que llegan desde la superficie hasta el fondo de la lumbrera, aunado a esto al ensamble y bajada de los carros del equipo excavador con grúas. Cuando se excava un túnel mecanizado a grandes profundidades resulta óptimo contar con una cavidad llamada “galería de ensamble”, donde se arma el escudo de la TBM y sus dos primeros carros y conforme avanza la excavación, progresa el armado de la máquina.

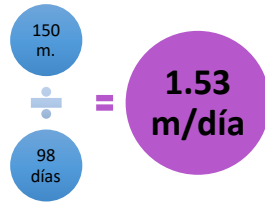
En los primeros metros, los procesos van de menos a más en rendimiento, pues se mejoran las condiciones operativas de la máquina, ya que, al avanzar más, se introducen a la lumbrera las partes faltantes del equipo excavador, de manera que, al estar más completa, se

¹⁰⁵ Cfr. José, O. (2016). *Túnel Emisor Oriente (TEO): Procedimiento constructivo de una galería de montaje para ensamble de máquina tuneladora*. Ciudad de México, México: UNAM. pp. 69-71.

desempeña con un mejor rendimiento.

Los metros iniciales abarcan desde que la rueda de corte se encuentra posicionada y preparada para cortar el terreno y concluye en el momento en que la TBM está completamente armada y probada para excavar completa con todos sus carros; es hasta este punto donde empieza la etapa de metros subsecuentes.

Previo al inicio de la excavación se construye en la lumbrera un anillo metálico, que soportará los primeros empujes de la TBM, posteriormente se arman anillos de dovelas de concreto, como un atraque hasta el anillo número 9 donde sus dovelas ya son parte del túnel adosado al terreno extraído. La excavación y colocación de los anillos de dovelas continúa hasta el número 21, que abrirá paso para la bajada del primer y segundo carro. Una vez ensamblado e instalado el escudo a los primeros dos carros, se avanza hasta el anillo 125 para tener espacio y para bajar los carros 3, 4, 5, 5-A y 6. De esta manera queda completo el back up de la tuneladora; cabe destacar que en este punto no termina la etapa de los metros iniciales sino hasta instalar y probar el back up completo de la TBM. A continuación, se muestra un cronograma de actividades que clarifica todo el proceso antes mencionado.



Como se puede ver en el cronograma, las actividades que se dan después de bajar el escudo y ensamblarlo comienzan el día 20/08/2012 con algunas actividades previas a la excavación y descenso de los *gantries* terminando así el día 27/12/2012, con las pruebas del sistema con el equipo completo.

Si bien la excavación de los primeros metros se completa con la colocación del anillo 91, aún no se considera terminada esta etapa de los metros iniciales sino hasta la instalación, conexión y verificación de todo el back-up de la TBM. Por lo tanto, el tiempo invertido en esta etapa de los metros iniciales corresponde a 98 días, por lo que el rendimiento global de esta sección de túnel es de 1.53 metros/día.

5. Metros subsecuentes

Este proceso se diferencia fácilmente de los demás, pues es el que durará en tiempo y longitud a diferencia de los metros iniciales y finales. Es el más sencillo de analizar, aunque con sus dificultades inherentes. Los metros subsecuentes engloban la etapa más larga, cíclica y de mayor impacto en los tiempos totales de construcción de túneles con TBM, su rendimiento es incluso predecible, de manera aproximada a través de diversas metodologías. Esta etapa comienza a partir del cierre de los primeros metros que se identifican con el cambio de instalaciones y termina al llegar a la lumbrera.

5.1. Procedimiento constructivo

Los metros subsecuentes engloban la etapa más larga, cíclica y de mayor impacto en los tiempos totales de construcción de túneles con TBM, su rendimiento es incluso posible de predecir con aceptable acercamiento como se vio en el capítulo anterior. Comienzan a partir de la etapa de cierre de los primeros metros que se identifican por el cambio de instalaciones y terminan cuando el cortador de la TBM llega a la lumbrera.

La excavación en esta etapa es un ciclo que comprende la excavación o avance, el endovelado del túnel y la inyección del espacio anular, este proceso se repite hasta completar la etapa de excavación.

El rendimiento de una tuneladora excavando metros subsecuentes está determinado por las horas de trabajo disponibles de cada día, la velocidad de avance y la duración de las interrupciones al tuneleo. La velocidad de avance se mide normalmente en metros de avance por día de trabajo.

La velocidad neta de avance depende principalmente de los siguientes parámetros controlables de funcionamiento de la máquina:

- Velocidad de rotación de la cabeza de corte
- Fuerza de presión de la cabeza de corte
- Presión de soporte en la cámara de excavación.¹⁰⁷

Hay otros factores que tienen influencia en la velocidad de avance y la fuerza de presión, pero no son directamente medibles, son las condiciones de la cabeza de corte – geometría, desgaste, suciedad por adhesión y el flujo de material –. Con el estado de la tecnología disponible en la actualidad, el flujo de material y la densidad del medio de soporte pueden ser influenciados selectivamente por ajuste de los parámetros de acondicionamiento (por ejemplo: velocidad de inyección de espuma, la presión de inyección de espuma, tipo de producto tensoactivo y concentración).

5.2. Ciclo de excavación

El tiempo registrado por los sistemas de registro automático de datos por lo general diferencia tres fases durante un ciclo de avance.

- Excavación (Excavación y el transporte de materiales)
- La construcción del revestimiento
- Paradas

¹⁰⁷ Maidl. U. et al. (2009). *Predicting the performance of earth pressure shields in loose rock. Geomechanics and Tunnelling* (No. 2), p. 192.

El tiempo necesario para la construcción de los anillos de dovelas puede ascender hasta el 50% del tiempo total para un ciclo y depende de los siguientes factores: ^[P]_[SEP]

- Número de segmentos por anillo
- Longitud del segmento, ancho y peso
- Longitud del túnel
- Número y tipo de conexiones
- Tipo de sistema de acoplamiento
- La precisión y la velocidad del erector y el sistema de suministro
- Requerimientos para tolerancias de instalación
- Grado de experiencia y práctica del personal.

El mayor factor de incertidumbre radica en la estimación del tiempo de paro. Aunque el tiempo de avance neto y el tiempo para la construcción del revestimiento se pueden definir como el rendimiento del sistema, la pérdida de tiempo por paradas incluye, además de las interrupciones que se han previsto como parte del sistema, el tiempo de inactividad que afecta a los equipos de tuneleo y toda la cadena de logística del material, los cuales son difíciles de estimar.

Cuando no se alcanzan tasas de avance pronóstico, la causa se encuentra a menudo en la estimación incompleta o poco realista de la duración del tiempo de inactividad y por averías impredecibles de la maquinaria.

Los factores más importantes que reducen el rendimiento de un escudo de presión de la tierra incluyen:

- Una pobre excavación y flujo de material: el rendimiento de avance de la cabeza de corte puede reducirse considerablemente mediante herramientas de excavación tapadas y aberturas en la cabeza de corte. El flujo pobre de material en la cámara de excavación conduce a un aumento de la fuerza de empuje y una reducción de la velocidad de avance. La dirección del escudo también se vuelve más difícil.
- Alto desgaste: el cambio de herramientas y trabajos de soldadura de la cabeza de corte bajo aire comprimido son la principal causa de los costos adicionales y las

pérdidas de tiempo. El tiempo de inactividad para cambiar una herramienta tarda en promedio alrededor de una hora. Un extenso trabajo de soldadura para la reparación de la cabeza de corte puede conducir a semanas de paro. Además de los parámetros conocidos, que determinan las tasas de desgaste, éste depende principalmente del acondicionamiento del suelo, la elección de las herramientas y las propiedades de los materiales de las herramientas. El potencial de optimización más grande para mejorar el rendimiento global de este modo radica en la reducción del desgaste.

- Licuefacción del lodo: El flujo de material se puede mejorar mediante el acondicionamiento intensivo del suelo y en la reducción del desgaste. No obstante, si el suelo es licuado por el acondicionamiento del suelo, entonces, se dificulta la eliminación de escombros en forma abierta por cinta transportadora y/o transporte por ferrocarril o camión. Los sistemas de transporte cerrados (bombeo) son entonces más adecuados, aunque aumentarán notablemente los costos.

Basado en el análisis de varias de EPB, parece no ser posible analíticamente ni mediante el uso de métodos estocásticos o estadísticos la determinación cuantitativa de los factores, ya que muchos de ellos no son medibles.¹⁰⁸

5.3. Cálculo de rendimientos

El siguiente cálculo se basa en un conteo, lo más detallado posible, de una experiencia de tunelaje en suelos firmes con una TBM de 8.88 m. de diámetro. Cabe mencionar que, aunque el tiempo parcial A) es igual en metros subsecuentes que en finales, cuando se tiene armada la TBM, los tiempos invertidos en las actividades de logística inevitable favorecen notablemente al rendimiento aumentando casi al doble.

El tiempo parcial A) y B) se manejan en términos del tiempo invertido para un anillo de dovelas, de manera que simplemente al dividir 1500 mm., que es el ancho de una dovela, entre la duración de ambos tiempos parciales se obtiene un rendimiento parcial en metros por día (R2).

¹⁰⁸ Maidl. U. et al. (2009). *Predicting the performance of earth pressure shields in loose rock*. Geomechanics and Tunnelling (No. 2), p. 193.

Los términos de cálculo de los tiempos parciales C), D) y E), se manejan con el concepto del tiempo disponible de un día (24 horas), de las cuales, las invertidas en estas actividades de paro, son restadas al tiempo disponible, generando porcentajes de uso efectivo, los que a su vez al multiplicarlos por el rendimiento 2 (R2), obtenido del tiempo de excavación, montaje y de la logística de excavación inevitable, resultan en un rendimiento global. A continuación, se presenta una tabla de análisis de los tiempos invertidos en cada una de las actividades necesarias para llevar a cabo el ciclo de excavación correspondiente a metros subsecuentes.

ANÁLISIS DE CICLOS BASICOS DE TRABAJO				
Rendimiento metros subsecuentes				
A)	Tiempo de excavación y montaje		Tiempo (hrs)	min/anillo
	Vel. de avance (Crucero)			30.0 mm/min
	Longitud po excavar			1,500.0 mm
	Tiempo de excavación			50.0 min
	Tiempo de montaje			30.0 min
	Tiempo total parcial A)			80.0 min
	Rendimiento 1: (Avance neto)			
	R1_metros por día			27.00 m/d
B)	Actividades rutinarias (Logística inevitable)	Periodicidad	tiempo (hrs)	min/anillo
1	Extensión de cable eléctrico de la TBM	@ 145 anillos	6.00	2.5
2	Tuberías de servicios	@ 4 anillos	0.30	4.5
3	Empalme de banda	@ 133 anillos	12.00	5.4
5	Medición de PPS para colocación del anillos	@ 1 anillos	0.10	6.0
6	Limpieza de faldón y bombeo de achique	@ 1 anillos	0.10	6.0
7	Grasa WR89	@ 3 anillos	0.30	6.0
8	Suministro de aditivos y espumas	@ 3 anillos	0.30	6.0
9	Tubería de ventilación	@ 65 anillos	1.00	0.9
10	Topografía	@ 111 anillos	1.00	0.5
11	Inspecciones atmosféricas de cámara*	@ 150 anillos	6.00	2.4
12	Ajuste a la poligonal y retroalimentación al sistema de	@ 100 anillos	1.00	0.6
17	Limpieza de banda transportadora TBM	@ 60 anillos	6.00	6.0
	Tiempo total parcial B)			46.9
	Rendimiento 2:			
	Tiempo de excavación y montaje (A)			80.00 min
	Actividades rutinarias (B)			46.86 min
	Total			126.86 min
	R2_metros por día			17.08 m/d
	Factor 1			63.07%
C)	Mantenimiento mecánico rutinario (preventivo)		Tiempo (hrs)	
	1 paro a la semana de 12 horas (6 días laborables)			
	Mantenimiento de escudo			
	Mantenimiento de equipos auxiliares en túnel, lumbrera y superficie			
	Tiempo total parcial C)			2.00 hr/d
D)	Mantenimiento/repaciones menores			
	Tiempo total parcial D)			3.50 hr/d
	Rendimiento 3:			
	Mantenimiento mecánico rutinario (preventivo) (C)			2.00 hr/d
	Mantenimiento/repaciones menores (D)			3.50 hr/d
	Total			5.50 hr/d
	Factor 2			77.08%
	R3_metros por día			13.13 m/d
E)	Adicionales			
	Comidas (hr)			2.00 hr/d
	Cambio de turno (hr)			1.00 hr/d
	Total			3.00 hr/d
	Factor 3			87.50%
	Rendimiento 4:			
	R4_metros por día			11.00 m/d

Tabla 3.5. Análisis de rendimientos de acuerdo a los tiempos observados para metros subsecuentes de un túnel.¹⁰⁹

¹⁰⁹ Información proporcionada por COMISSA.

Cabe mencionar que cuando se menciona “mantenimiento/repificaciones menores” se está refiriendo a un prorrateo de las siguientes actividades:

1. Bombas de grasa
2. Limpieza de tubería de grasa
3. Limpieza de tuberías del sistema de acondicionamiento
4. Erector:
 - Sellos
 - Sistemas de vacío
 - Cableado y sistema eléctrico
5. Sistemas de PLC
6. Sistema del CPU
7. Cambio de sellos de la grúa de descarga de dovelas
8. Cambio de tarjetas electrónicas
9. Limpieza de mangueras de mortero
10. Limpieza de tolvas de descarga de rezaga
11. Cambio de rodillos y paletas del sistema de bandas
12. Reparaciones de sistemas eléctricos
13. Reparaciones y calibraciones de safset
14. Reparación y mantenimiento de la mesa de dovelas
15. Sensores de presión de la cámara
16. Calibración del sistema de bandas
17. Cambio de sellos y baleros a la tubería telescópica (snorkel)
18. Cambio de bomba activa a bomba de reserva en sistema de rezaga.

El rendimiento obtenido de esta cuantificación de actividades, su periodicidad y tiempo invertido, es lo más acercado a un análisis empírico de acuerdo a los tiempos observados, y es sólo parcialmente relevante para otros proyectos con condiciones de terreno, TBM, y especificaciones similares.

Este análisis incluye además del tiempo de excavación y montaje, las actividades rutinarias, mantenimiento mecánico rutinario, reparaciones menores y comidas o cambios de turno. De manera que el único rubro que por su naturaleza difícil de cuantificar no está

incluido es el de paros por reparaciones o averías mayores.

El rendimiento obtenido como ya se ha explicado para los metros subsecuentes de excavación con TBM del tipo EPB, de 8.88 m. de diámetro es de 11 m/día.

6. Metros finales

Es la etapa de excavación de un túnel con TBM, y comienzan cuando la cabeza de corte llega al muro de la lumbrera de llegada después de haber excavado los metros subsecuentes del tramo en cuestión.

Esta etapa constructiva al igual que los metros iniciales está determinada por la serie de actividades de logística a realizar lo cual prepondera sobre el avance de excavación. Por lo tanto, ante la diferencia con los metros subsecuentes en materia de rendimientos de excavación se ve la necesidad de realizar un análisis temporal del proceso constructivo de metros finales.

6.1. Procedimiento Constructivo

Cuando una tuneladora está próxima a llegar a una lumbrera, la logística que se tenía de metros subsecuentes se ve modificada, pues la tuneladora al irse aproximando debe disminuir su velocidad para las preparaciones de su llegada. En lo posterior me referiré a la terminación de los metros subsecuentes cuando la tuneladora está pegada al paño exterior del muro de la lumbrera de llegada.

Los metros finales de excavación inician y finalizan un subtramo, sin embargo, la longitud del escudo, es decir, la distancia que existe entre la cabeza de corte y el erector de dovelas hace un poco complejo el discernimiento de estas etapas finales de construcción del túnel, pues mientras la cabeza de corte está, por ejemplo, avanzando sin excavar, a la vez está armando un anillo que sigue siendo parte del túnel previo a la lumbrera.

6.2. Logística de excavación

La etapa de “Posicionamiento de la rueda de corte”, es la longitud que se avanza hasta quedar totalmente descubierta la rueda de corte colocando dos anillos de dovelas, esto implica el avance de la TBM sin excavar y la perforación de un barreno para localizar la posición de la rueda de corte.

Finalmente, la etapa de avanzar sin excavar, se refiere a la longitud que avanza la tuneladora para colocar los últimos anillos del túnel. Se considera medido el último anillo de la etapa de “posicionamiento de la rueda de corte” hasta el último anillo en el interior del túnel. Incluye una serie de actividades:

- el colado de ajuste,
- colocación de rieles en cuna para recibir la tuneladora,
- colocación de soporte de tuneladora entre el muro de la lumbrera y cuna para llegada y salida,
- avance sin excavar,
- colocación de los últimos anillos de dovelas en el túnel,
- inyección final entre las dovelas y el terreno natural y el costureo de los últimos anillos de dovelas, que consiste en colocar una serie de perfiles metálicos en cada anillo para evitar un desalineamiento de los mismos.

De esta manera termina el proceso de metros finales, donde se llega a una lumbrera en la que la TBM sea extraída como se ilustra en la siguiente figura:

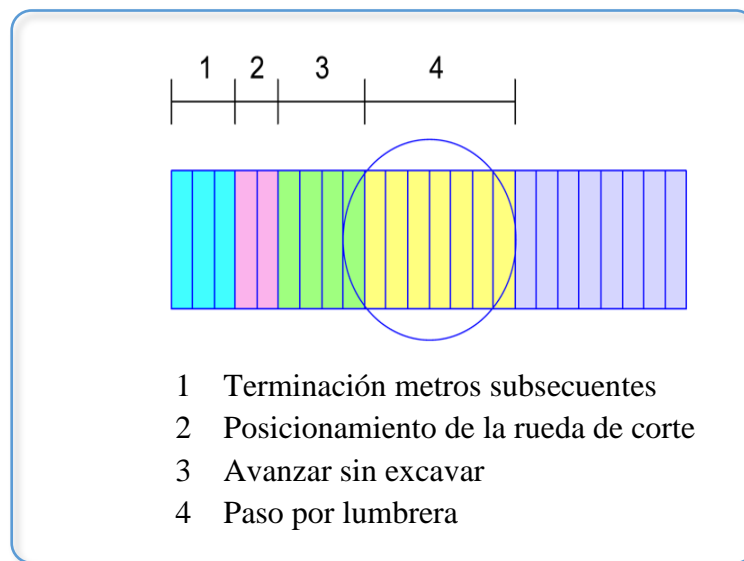


Fig. 3.23. Diagrama de las diferentes etapas de excavación en los metros finales de un paso por lumbrera.

6.3. Cálculo de rendimientos

a) Terminación de metros subsecuentes

Avance

Si se toma en cuenta un rendimiento de metros subsecuentes de 11 m/día,¹¹⁰ entonces:

$$11 \text{ m} \rightarrow 1 \text{ día}$$

$$3 \text{ m (2 anillos de dovelas)} \rightarrow \mathbf{0.27 \text{ días}}$$

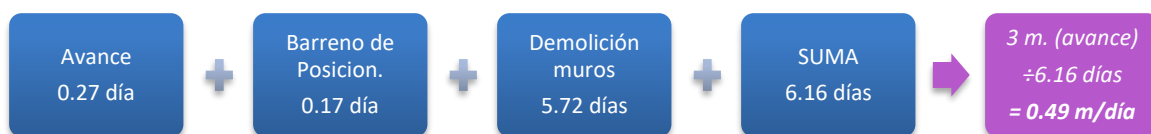
Barreno de posicionamiento

De acuerdo a rendimientos observados = 4 horas = **0.17 días**

Demolición de muros de lumbrera

Implica demoler concreto del revestimiento de la lumbrera con equipo neumático, corte y retiro de anillo metálicos. Según análisis del procedimiento se realiza en promedio en 2.86 días, para no interferir con los trabajos de posicionamiento de la tuneladora en la cuna, la demolición del muro de la lumbrera para la salida se hace al terminar la demolición para la llegada, por lo que la duración total de la demolición de ambos muros, incluyendo la extracción de la rezaga, es de **5.72 días**.

Si sumamos estas actividades resulta:



Por lo tanto el rendimiento para esta etapa corresponde a los metros de avance sobre los días que tarda realizar dichas actividades: **3 m / 6.16 días = 0.49 metro/día**.

¹¹⁰ Valor obtenido en el análisis de metros subsecuentes en la sección 5.3 del presente Capítulo.

b) Avanzar sin excavar

Avance

Tomando en cuenta un rendimiento de metros subsecuentes de 11 m/día, entonces:

$$11 \text{ m} \rightarrow 1 \text{ día}$$

$$6 \text{ m (4 anillos de dovelas)} \rightarrow \mathbf{0.55 \text{ día}}$$

Ajuste, cuna, rieles y vía

En función de los rendimientos observados, el tiempo para el colado de ajuste de la cuna, la posición real con la que llega el escudo, la colocación de los rieles por los que se desplazará el equipo, la prolongación de la vía del túnel en el espacio entre el muro de llegada y de salida de la lumbrera con la cuna concreto, la colocación de topes metálicos para evitar el deslizamiento de la tuneladora hacia delante, la colocación del costureo en los últimos anillos de dovelas y la inyección entre el terreno natural y las dovelas para los últimos anillos de dovelas, se calculó que esta etapa dura **2.94 días**.

Costureo

De acuerdo a lo observado, la colocación del costureo tiene una duración de 9.6 horas por anillo, por lo que la duración para los cuatro anillos donde se colocan los troqueles es de 38.4 horas = **1.6 días**.

Inyección

Al terminar la colocación de los cuatro anillos de dovelas de esta etapa, se realiza la inyección entre dovela y terreno natural para los cuatro últimos anillos del túnel, colocando una cimbra de madera en toda la unión del túnel – lumbrera.

De acuerdo a lo observado la colocación de la cimbra de madera, la inyección de los últimos cuatro anillos del túnel se realiza en: **2 días**.

Si sumamos estas actividades resulta:



Por lo tanto el rendimiento para esta etapa corresponde a los metros de avance sobre los días que tarda realizar dichas actividades: **6 m / 7.09 días = 0.85 metro/día**.

La siguiente tabla muestra un resumen de las dos fases calculadas:

Rendimiento Metros Finales		
TAREAS	Duración (días)	Rendimiento (m/días)
1 Terminación de metros subsecuentes	6.16	0.49
Avance	0.27	
Barreno de posicionamiento	0.17	
Demolición de muros	5.72	
2 Avanzar sin excavar	7.09	0.85
Avance	0.55	
Ajuste cuna, rieles y vías	2.94	
Costureo	1.60	
Inyección	2.00	

Tabla 3.6. Análisis de rendimientos de acuerdo a los tiempos observados para los metros finales de un túnel.

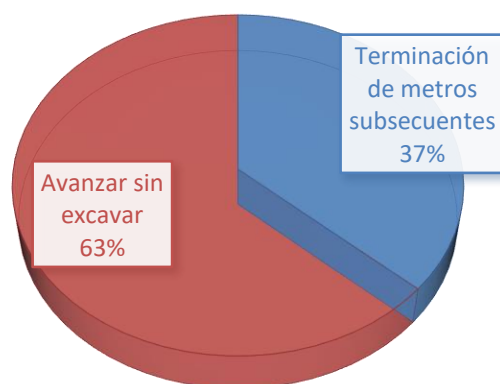


Fig. 3.24. Gráfica del tiempo invertido en cada etapa de los metros finales.

Este gráfico muestra el porcentaje de los 13.25 días que tarda este proceso de metros finales, son similares en tiempo uno y otro, a pesar de que en una etapa se avanza más que en la otra.

De manera que, si se visualizan estas dos etapas de posicionamiento de la rueda de corte y avanzar sin excavar, como un solo proceso, la duración del mismo corresponde a 13.25 días y el avance total de 2 anillos + 4 anillos = 6 anillos, que en longitud miden: 9 metros, por lo tanto, el rendimiento global para metros finales es de **0.68 m/día**.

CAPÍTULO CUARTO

ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS RENDIMIENTOS CALCULADOS EN CADA UNO DE LOS ETAPAS DE EXCAVACIÓN

1. Concepción de la situación

Se trata de un túnel para drenaje de agua, con máquina tuneladora tipo EPB, en suelos firmes, sin presencia de roca ni boleos mayores a 30 cm. Con un diámetro de 8.88 m. que permite colocar el soporte inicial formado por dovelas, prefabricadas de concreto. Para la estabilidad frontal aprovecha la excavación del suelo con la que forma la cámara de presurización del frente y estabilidad de la misma. En este caso se aborda la etapa de metros iniciales a través del procedimiento llamado “galería”, explicado en el capítulo tercero sección 4.2 y la etapa de metros finales se analiza con el proceso constructivo explicado en el capítulo tercero sección 6.

Con la finalidad de brindar una comparativa entre el rendimiento obtenido en el presente trabajo, se realizó una búsqueda de rendimientos con tuneladoras del tipo EPB -en condiciones similares de diámetro y tipo de suelo- con las empresas que diseñan las TBM¹¹¹ por tener en su sitio web resultados de túneles realizados en todo el mundo, en donde se pudo observar que el rendimiento obtenido en el presente trabajo para metros subsecuentes que es de 11 m/día, está muy por debajo de la media en dichos proyectos en el mundo, esto es debido a que los fabricantes proporcionan sus mejores resultados por razones de mercadotecnia, de manera que se ha buscado un marco de comparación en México en condiciones similares, es decir, con tuneladoras EPB de entre 7,88 – 9,88 metros de diámetro, y en profundidades no tan elevadas (menores a 1000 m) lo cual no resultó fructífero, pues las constructoras guardan esta información con discreción, por lo que se abrió la búsqueda a otras fuentes encontrando así una tesis de la Universidad Austral de Chile en la que muestra resultados promedio en estas condiciones de varios países como: España,

¹¹¹ Cfr. <https://www.therobbinscompany.com>; <https://www.herrenknecht.com>

Francia, EUA, Canadá, etc. lo cual brinda un marco de comparación más coherente, dicha tabla se muestra a continuación.

Túnel	Díam. (m)	Equipo	Metros/Mes	Metros/Día
Línea 7 Valdezarza	9.38	EPB Herrenknecht	269	9.0
Línea 4 Hortaleza	9.38	EPB Mitsubishi	314	10.5
Línea 9 Vicálvaro	9.38	EPB Herrenknecht	254	8.5
Línea 8 Aeropuerto	9.38	EPB Mitsubishi	490	16.3
Línea 8 Aeropuerto	9.38	EPB Mitsubishi	366	12.2
Cerc. Alcobendas	9.38	EPB Mitsubishi	619	20.6
T2 Mar Tren N. Francia	8.78	EPB Kawasaki-Robbins	670	22.3
T3 Mar Tren S. Francia	8.78	EPB Kawasaki-Robbins	697	23.2
T5 Tierra Tren N. Francia	8.64	EPB Mitsubishi	308	10.3
T6 Tierra Tren S. Francia	8.64	EPB Mitsubishi	356	11.9
Metro Lisboa Línea D	9.84	EPB Lovat	101	3.4
Saint Clair, Canade - USA	9.53	EPB Lovat	131	4.4
Passante Ferroviario 1, Milán	8.03	EPB Mitsubishi - NFM	144	4.8
		Promedios	363.0	12.1

Tabla. 4.1. Comparativa entre rendimientos de proyectos con TBM – EPB.¹¹²

Como se puede observar en los datos anteriores la media de este compendio de túneles es de 12.1 m/día, más alta que los 11 m/día que el presente trabajo muestra para metros subsecuentes, lo cual no es una gran diferencia pues en la construcción de un túnel hay muchos valores que no se pueden predecir con precisión que van desde una falla de la tuneladora hasta una mala logística, y que pueden bajar nuestros rendimientos muchísimo teniendo valores como los de la tabla anterior de 3.4 m/día en el metro de Lisboa, o caso contrario, que el proceso sea tan bueno que incluso existan ahorros significativos de tiempo en los procesos llegando a rendimientos de hasta 23.2 m/día como en el T3 Mar Tren Sur de Francia. Lo que coloca la predicción proporcionada en el presente trabajo en un rango muy aceptable de comparación a otros proyectos ya terminados.

¹¹² Soto Saavedra, P. R. (2004). *Construcción de túneles*. Universidad Austral de Chile, Escuela de Construcción Civil. Chile: Facultad de Ciencias de la Ingeniería. pp. 109, 110.

2. Análisis comparativo de los rendimientos

El resumen de los análisis de rendimiento realizados se muestra en la siguiente tabla como se puede apreciar, hay una muy marcada diferencia en los rendimientos de cada una de las etapas constructivas de un túnel con TBM, la razón de ello es la compleja logística de avance que a diferencia de metros subsecuentes se tiene en metros iniciales y en finales. Hay muchos procesos que intervienen en el rendimiento de los metros subsecuentes, sin embargo, el proceso se convierte en un ciclo, un proceso industrial que consiste en excavar, sostener e inyectar el espacio anular entre las dovelas y el terreno, de manera que el personal convierte el ciclo en una serie de actividades bien definidas, que fácilmente llegan a dominar.

Etapa	Rendimiento
Metros iniciales	1.65 m/día
Metros subsecuentes	11.00 m/día
Metros finales	0.68 m/día

Tabla. 4.2. Resumen de los rendimientos de las etapas de excavación de un túnel con TBM.

CONCLUSIONES

Los dos factores de éxito que intervienen en un proyecto de túnel es la tipología de materiales geotécnicos en los cuales se excava y de lo cual es imprescindible que se realice una precisa clasificación geotécnica para evitar los catastróficos errores que a la postre se pagan con creces.

El otro favor de éxito para un proyecto de túnel es la elección adecuada del procedimiento constructivo que engloba todas las actividades de logística necesarias para el buen desarrollo del proceso de excavación, ya sea que se realice con métodos convencionales o TBM, que de hecho es una de las primeras cuestiones a decidir y de lo cual depende mucho de lo que está en juego en el proyecto.

Geotecnia:

Es muy importante no escatimar al momento de planear los estudios geotécnicos del proyecto de túnel, ya que en muchas ocasiones por ahorrar recursos en esta etapa, se suelen pagar consecuencias desastrosas como en los ejemplos mencionados en el capítulo primero.

Así que conviene no demeritar la importancia de los estudios geotécnicos que permitirán tener un razonable panorama de los materiales a excavar, aunque sin exagerar en recursos excesivos.

El punto medio entre que tanto profundizar en la caracterización geotécnica se conoce con base en la experiencia y el buen juicio de los ingenieros, sin dejar de lado los análisis estadísticos y predicciones tridimensionales con métodos numéricos, que realizados con parámetros lo más cercanos a la realidad y sumados a la instrumentación arrojan soluciones tempranas y previenen situaciones de peligro; de esta forma se actúa de manera preventiva y no correctiva.

Métodos de excavación:

Si se tiene un perfil geotécnico que con precisión razonable este cercano a la realidad, el siguiente paso será seleccionar un método constructivo adecuado; por ejemplo, si el material a excavar es una roca homogénea, sana, con poca o nula presencia de agua, lo más conveniente es una TBM de roca abierta como un topo. En caso contrario si es un suelo blando, discontinuo, con un fuerte aforo de agua, lo conveniente es un escudo con frente

presurizado.

A diferencia de estos casos muchas veces no es tan sencilla la planeación del procedimiento constructivo pues puede resultar incluso una combinación de estrategias, por ejemplo: un tramo con TBM en modo abierto y otro en modo cerrado, o una etapa con TBM y otro con métodos convencionales, etc.

Construcción de los accesos al frente de excavación:

Posterior a la elección del método de excavación sigue la elección del tipo de accesos a los frentes de excavación, es decir, si se construirán lumbreras, portales en tajos a cielo abierto con trincheras a poca profundidad o portales con cortes frontales al terreno.

Por ejemplo, si el túnel se planea con TBM y en un extremo es posible abrir un portal y en el otro no por la profundidad, entonces se requiere de lumbreras. O si se planean frentes intermedios en un tramo de túnel, se tendría la necesidad de construir lumbreras.

Las características requeridas en las lumbreras dependen de varios aspectos como son: la profundidad del túnel, los materiales geotécnicos encontrados en el trazo de la lumbrera, las maniobras para las que se usará dicha lumbrera como introducción o extracción de la TBM, acceso del personal, introducción de herramientas e insumos o en algunos casos inspecciones a la cabeza de corte y cepillos de cola de la TBM.

Ensamble de la tuneladora:

Es fundamental una acertada elección del procedimiento de ensamble de la TBM, ya que en cuestiones de seguridad y tiempos de armado, puede brindar muchas bondades, esta elección dependerá de la profundidad del túnel, las condiciones geotécnicas y topografía de los frentes de trabajo.

Condiciones geológicas:

Sin duda el principal factor que impacta y del cual depende el rendimiento de la excavación de un túnel con una TBM es el “factor terreno”, es decir, las condiciones que conforman el medio a excavar.

Presencia de agua en el frente:

Este aspecto es de vital importancia al momento de elegir la TBM, de planear los frentes de

trabajo, y al instante de excavar; un mal cálculo del agua en el frente, puede hacer que la máquina tuneladora no sea la óptima para algún túnel, afectando los rendimientos y costos de la obra o incluso causar problemas graves como inundación de la TBM, o colapso del túnel.

Otro aspecto en el que el agua en el frente influye en gran medida es la elección de la metodología que se usará para inspeccionar la cabeza de corte, la cámara de excavación, y los cambios de herramientas, pues si la presión al frente es grande, y aún con tratamientos al terreno resulta imposible realizar estas intervenciones sin el frente presurizado, entonces las intervenciones deberán ser hiperbáricas, que son procedimientos delicados por su naturaleza, pues resultan costosos, tardados y riesgosos, de manera que estas intervenciones deben ser programadas, y realizar las menos posibles, resaltando que es mejor realizar una intervención para prevenir que para remediar algún problema mayor.

Rendimientos:

Son en gran medida distantes los rendimientos en la etapa inicial del túnel, en los metros subsecuentes y en los metros finales, puesto que en los metros iniciales y finales lo que más impacta en tiempo es la logística de excavación y no tanto el avance de la tuneladora como tal, pues las actividades de ensamble y de llegada a la lumbrera son mucho mayores que lo que tarda la TBM en excavar, esto se ve reflejado en los cálculos de rendimiento que el presente trabajo ofrece.

Comentarios finales:

Los resultados aquí mostrados permiten observar que las características geológico – geotécnicas de los terrenos y la tipología de las máquinas tuneladoras determinan un marco teórico previo. A partir de lo anterior, se ha demostrado que las distintas variables durante el proceso constructivo en sus diferentes etapas (metros iniciales, metros subsecuentes y metros finales) condicionan el rendimiento de excavación, por lo que dicho análisis representa una valiosa oportunidad para la definición detallada de los precios, programas de avance y estrategias de elaboración de todo el paquete requerido en las licitaciones, lo que permitirá hallar una mejora técnica y económica sustanciales para las partes involucradas en el proyecto que son: el contratista, el contratante y su supervisión.

BIBLIOGRAFÍA

- Lars, B. (2013). Mechanized Methods for Soft Ground. *Principles in Tunneling Design*. México, D.F.: Tunnelsoft.
- Comulada, S. e. (2009). Process controlling and data management for shield tunnelling.
- Abril, E. G. (2010). *Macizos rocosos. Cátedra de Geotécnia I, Cuadernos Didácticos de Geotecnia: Laboratorio Área Geotecnia (GeoLab)*. (F. y. Facultad de Ciencias exactas, Ed.) Argentina, Argentina: Universidad Nacional de Córdoba.
- Barton, N. (2015). TBM performance estimation in rock using QTBM. *Tunnels & Tunnelling International*.
- Barton, N. (2015). TBM Performance, Prognosis and Risk Caused by Faulting. *Geotechnical Synergy Invited Lectures of the 15th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering and the 8th South American Congress on Rock Mechanics*. 5, pág. 80. Buenos Aires: IOS Press.
- Burger, W. (2014). Chamber Access & Compressed-Air Works. En H. AG (Ed.), *Mechanised Tunnelling*. CDMX.
- Dovali, F. (2003). *PROCESO CONSTRUCTIVO DE TÚNELES Y LUMBRERAS*. CDMX, México: Instituto Tecnológico de la construcción.
- González de Vallejo, L. I. (2002). *Ingeniería Geológica*. Madrid: Pearson Education.
- *Innovative TBM powers through mountains*. (2012). Recuperado el 20 de Octubre de 2016, de tunneltalk: www.tunneltalk.com
- ITA. (Febrero de 2012). Guidelines for good working practice in high pressure compressed air. *ITA Working Group N°5 Health & Safety in Works*.
- López Jimeno, C. (coord.) (1997). *Manual de túneles y obras subterráneas*. Madrid: Entorno Gráfico, S.L.
- Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Minas.
- José, O. (2016). *Túnel Emisor Oriente (TEO): Procedimiento constructivo de una galería de montaje para ensamble de máquina tuneladora*. Ciudad de México, México: UNAM.
- Maidl, B. e. (2008). *Hardrock tunnel boring machines*. John Wiley & Sons.

- Maidl, U. et al. (2009). Predicting the performance of earth pressure shields in loose rock. *Geomechanics and Tunnelling* (2).
- Pandey, S. e. (2013). Performance prediction of rock TMBs. *Proceedings of Indian Geotechnical Conference*.
- Pérez, J. (2015). Innovar en excavación con TBM es unificar el control de procesos y la auscultación. *IC INGENIERÍA CIVIL* (555), 10-14.
- Ramirez, P. (2004). *Mecánica de Rocas: Fundamentos e ingeniería de Taludes*. Madrid, España.
- Romana, M. (1994). *Clasificación de macizos rocosos para la excavación mecánica de túneles*. *INGEOPRES* (No. 18).
- Slobodan, T. (2011). *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LUMBRERAS EN SUELOS BLANDOS POR EL PROCEDIMIENTO DE LOS ANILLOS PREFABRICADOS*. (D. G. GUICHARD, Ed.) CDMX, Ciudad Universitaria, México.
- Soto Saavedra, P. R. (2004). *Construcción de túneles*. Universidad Austral de Chile, Escuela de Construcción Civil. Chile: Facultad de Ciencias de la Ingeniería.

BIBLIOGRAFÍA WEB

- https://www.roscience.com/documents/hoek/corner/12_Rock_mass_properties.pdf
- http://cenor.pt/wp-content/uploads/2013/05/estacao-s-bento_FW.jpg
- <http://tunnelbuilder.es/uploads/CMS/Documents/Art%C3%ADculo%20T%C3%BAneles%20Desierto%20de%20los%20Leones.%20PROAC%C3%93N%20M%C3%A9xico.pdf>
- <https://www.smig.org.mx/archivos/revista-trimestral-smig/revista-geotecnia-smig-numero-226.pdf>
- <https://www.etcg.upc.edu/asg/TiMR/descargas/T8.pdf>
- <https://www.herrenknecht.com/en/products/core-products/tunnelling/gripper-tbm.html>
- <https://www.tunneltalk.com>
- <https://www.elsevier.com/locate/tust>
- <https://www.therobbinscompany.com>
- <https://www.herrenknecht.com>