



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL – TÚNELES Y OBRAS SUBTERRÁNEAS

EXCAVACIÓN DE FRENTES MIXTOS CON TBM EN CONDICIONES DE ALTA
PERMEABILIDAD Y FLUJO DE AGUA; IMPLICACIONES TÉCNICAS Y
CONTRACTUALES

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

PRESENTA:
ING. FILIBERTO CRUZ PÉREZ

TUTOR DR. JOSÉ ANSELMO PÉREZ REYES,
FACULTAD DE INGENIERÍA

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX. ABRIL 2022



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Jurado Asignado

Presidente: M.I. Mendoza Rosas Marco Tulio

Secretario: M.I. Sánchez Reyes Fermín Antonio

1er Vocal: Dr. Pérez Reyes José Anselmo

2do Vocal: Dra. Ossa López Alexandra

3er Vocal: M. en I. Suárez Fino José Francisco

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: Ciudad de México, México

Tutor de Tesis

Dr. José Anselmo Pérez Reyes

"Se ha dicho que un túnel es un largo agujero cilíndrico a través del suelo, con un geólogo en un extremo y un grupo de abogados en el otro".

Sir Alan Muir Wood

Dedicatorias

A mi madre, por su apoyo económico al principio de la maestría y por siempre alentarme a echarle ganas.

Agradecimientos

A los Maestros e Ingenieros, que nos transmitieron su conocimiento y experiencia a lo largo de la maestría.

Al CONACYT, por el apoyo económico en la realización de la maestría.

Al Dr. José Anselmo, por ayudarme en la definición y guía de mi tema de investigación.

Índice

Índice de Figuras	viii
Índice de Tablas.....	ix
Resumen.....	xi
Abstract	xi
1. Introducción	12
2. Objetivos	13
2.1. Objetivo General	13
2.2. Objetivos Específicos.....	13
3. Hipótesis.....	13
4. Metodología	13
5. Generalidades	14
5.1. Túneles	14
5.2. Excavación convencional de túneles.....	15
5.3. Excavación mecanizada de Túneles	16
5.4. Excavación mecanizada de túneles en suelos.....	20
5.5. Excavación mecanizada de túneles en macizos rocosos.....	31
6. Excavación mecanizada de túneles en frentes mixtos.....	42
6.1. Tipos de frentes mixtos.....	42
6.2. Tuneladoras TBM para frentes mixtos.....	45
7. Operación de TBM de tipo EPB en condiciones de frente mixto (control de procesos).....	48
7.1. Modos de operación	48
7.2. Parámetros operacionales	50
7.3. Acondicionamiento del terreno	57
7.4. Atascamiento (Clogging)	63
7.5. Obstrucción por bloques.....	66
7.6. Alta Abrasión	70
7.7. Alta presión y flujo de agua en el frente de excavación	74
7.8. Intervenciones en el frente de excavación.	78
7.9. Fallas Mecánicas.....	89
7.10. Atrapamiento de la TBM	95
8. Manejo contractual en la construcción de obras subterráneas	98

8.1.	Incertidumbre Geológica.....	99
8.1.1.	Mitigación de Riesgos Geotécnicos.....	102
8.1.2.	Condiciones Geológicas Inesperadas	104
8.2.	Reporte Geotécnico de Referencia (GBR)	107
8.3.	Dispute Boards	113
8.4.	Normatividad y aspectos contractuales.....	118
9.	Conclusiones.....	130
	Bibliografía	132

Índice de Figuras

Figura 1 Túnel de Sistema Metro.....	14
Figura 2 Excavación Convencional de Túneles	15
Figura 3 Tunnel Boring Machine (TBM).....	16
Figura 4 Tren de Equipos	17
Figura 5 Sistema Back-Up.....	18
Figura 6 Formación de Suelo	20
Figura 7 Configuración General de un Escudo.....	25
Figura 8 TBM de Tipo EPB.....	26
Figura 9 Escudo tipo Slurry	27
Figura 10 Tipos de Cabeza de Corte	28
Figura 11 Herramientas de Corte de Suelos	30
Figura 12 Macizo Rocoso.....	31
Figura 13 TBM abierta.....	36
Figura 14 TBM tipo Escudo Simple	37
Figura 15 TBM tipo Doble Escudo.....	38
Figura 16 Cabeza de Corte para Macizo Rocoso	39
Figura 17 EPB en Modo de Operación Abierto en Macizo Rocoso	41
Figura 18 Frente Mixto -Roca y Suelo-.....	42
Figura 19 Frente Mixto Suelo-Bloques.....	43
Figura 20 Frente Mixto Estratificado.....	44
Figura 21 Cabeza de Corte para Frentes Mixtos de Roca y Suelo.....	45
Figura 22 Relación entre el Tamaño del Tornillo sinfín y el Tamaño de Partículas de Roca	46
Figura 23 EPB con Cabeza de Corte Interna y Externa	47
Figura 24 Modo Abierto de Operación	48
Figura 25 Modo Transición de Operación	49
Figura 26 Modo Cerrado de Operación	49
Figura 27 Parámetros Operacionales de un EPB	50
Figura 28 Límites de Penetración en Diferentes Resistencias de Roca	52
Figura 29 Rotura de Discos de Corte	53
Figura 30 Evolución del Asentamiento Debido al Paso de una Tuneladora	55
Figura 31 Tipos de acondicionamiento del terreno	57
Figura 32 Acondicionamiento del Terreno	60
Figura 33 Atascamiento de Arcilla.....	63
Figura 34 Relación del Potencial de Pegajosidad y la Consistencia del Suelo	64
Figura 35 Desgaste Anormal en Discos de Corte	65
Figura 36 Riesgo de Obstrucción por Bloques	66
Figura 37 Frecuencia de Clastos en el Terreno	67
Figura 38 Desgaste por Abrasión	72
Figura 39 EPB en Modo Cerrado con alta cantidad de Roca y alto Flujo de Agua.	75

Figura 40 <i>Fluidez Excesiva de la Rezaga</i>	75
Figura 41 <i>Modo de Operación de Transición y Acondicionamiento del terreno</i>	76
Figura 42 <i>Ingreso de Agua desde el Faldón</i>	77
Figura 43 <i>Reinyecciones en los Anillos de Dovelas</i>	77
Figura 44 <i>Técnicas de Intervenciones Hiperbáricas</i>	84
Figura 45 <i>Cámara Hiperbáricas</i>	85
Figura 46 <i>Cámara Hiperbárica Móvil</i>	86
Figura 47 <i>Contenedor Habitacional</i>	87
Figura 48 <i>EPB en Frente Mixto con Alto Flujo de Agua e Inyección de Bentonita</i>	88
Figura 49 <i>Transmisión Principal de una TBM</i>	89
Figura 50 <i>Etapas del Plan de Recuperación del Rodamiento Principal</i>	92
Figura 51 <i>Sistema de Sellos de Faldón</i>	93
Figura 52 <i>Excavación en Frente de Roca-Suelo</i>	96
Figura 53 <i>Excavación en Roca Heterogénea</i>	97
Figura 54 <i>Gestión de Riesgos</i>	100
Figura 55 <i>Etapas de los Estudios Geológicos</i>	103
Figura 56 <i>Repartición de Riesgos del GBR</i>	108
Figura 57 <i>Correlación entre Desgaste, UCS y CAI</i>	111
Figura 58 <i>Libro Rojo de FIDIC</i>	121
Figura 59 <i>Libro Amarillo de FIDIC</i>	124
Figura 60 <i>Repartición de Riesgos de acuerdo con el Método de Pago</i>	126
Figura 61 <i>Marco Legal de la Obra Pública en México</i>	129

Índice de Tablas

Tabla 1 <i>Tipos de Partículas de Suelos</i>	21
Tabla 2 <i>Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS)</i>	22
Tabla 3 <i>Compacidad de Suelos Granulares</i>	22
Tabla 4 <i>Consistencia de Suelos</i>	23
Tabla 5 <i>Comportamiento de Excavaciones en Suelos</i>	24
Tabla 6 <i>Ventajas y Desventajas de las Cabezas de Corte de Brazos y de Placa</i>	29
Tabla 7 <i>Clasificación de Rocas por su Dureza</i>	33
Tabla 8 <i>Comportamiento de las Excavaciones en Macizos Rocosos</i>	34
Tabla 9 <i>Parámetros Requeridos de la Rezaga en Excavación con EPB</i>	58
Tabla 10 <i>Potencial de Pegajosidad de los Suelos</i>	64
Tabla 11 <i>Clasificación de Abrasividad en Suelos</i>	70
Tabla 12 <i>Clasificación de Abrasividad en Rocas</i>	71
Tabla 13 <i>Presencia de Agua en las Excavaciones y su Influencia en la Estabilidad</i>	74
Tabla 14 <i>Tiempos de Trabajo y de descompresión en Intervenciones Hiperbáricas</i>	81
Tabla 15 <i>Modos de Falla del Sistema de Sellos del Faldón</i>	94
Tabla 16 <i>Factores de Riesgo Constructivo y Contractual</i>	101

Resumen

La presente investigación aborda el estudio de las implicaciones técnicas y contractuales involucradas en la excavación mecanizada de frentes mixtos con altas presiones y flujos de agua y mediante una tuneladora TBM de tipo EPB. Dado que bajo dichas condiciones geológicas y geohidrológicas los rendimientos de excavación se ven sumamente afectados, existen diversas implicaciones técnicas y contractuales que se pueden resolver mediante el conocimiento técnico suficiente y la aplicación de mecanismos de manejo contractual que promuevan el desarrollo eficiente del proyecto. En este trabajo se mencionarán las implicaciones técnicas más relevantes para dichas condiciones y su relación con los mecanismos de manejo contractual más apropiados que permitan una adecuada gestión del proceso constructivo, la relación entre las partes involucradas en el proyecto y el manejo del contrato necesario para este tipo de condiciones.

Abstract

This research deals with the technical and contractual implications involved in the mechanized excavation of mixed ground with high pressures and water inflows by EPB TBM. Because that under these geological and geohydrological conditions the excavation rates are greatly affected, there are many implications that can be resolved through enough technical knowledge and the application of contractual management mechanisms that promote the efficient development of the project. This paper will mention the most relevant technical implications for these conditions and their relationship with the most appropriate contractual management mechanisms that allow an adequate management of the construction process, a good relationship between the parties involved in the project and the management of the contract necessary for this type of conditions.

1. Introducción

La construcción de túneles aporta uno de los mayores retos a los que se pueda enfrentar la Ingeniería Civil: la excavación de varios kilómetros a través de estructuras geológicas de complejas características en un plazo de tiempo y con un presupuesto limitado, con el objeto de dejar una estructura estable y durable para beneficio de la sociedad; pero su construcción está ligada siempre a riesgos de tipo geológico como cambios de terreno, presencia de agua o fallas geológicas que no fueron advertidas en el proyecto. Por otra parte, la construcción con TBM requiere de una importante aproximación a las condiciones geológicas reales que se presentarán durante la excavación con la intención de que su diseño original sea suficiente para enfrentar las condiciones para las que fue diseñada y, con ello, evitar posibles modificaciones que repercutan negativamente en el proyecto.

En el caso particular de la excavación con TBM en frentes mixtos con altos flujos de agua, la maquina atraviesa una zona con dos o más estructuras geológicas con diferencias significativas en sus propiedades mecánicas e hidrológicas, las cuales repercuten en las tasas de avance al incrementar el desgaste de los componentes de la TBM obligando a realizar un mayor número de paradas de reparación o cambio de herramientas. Por otra parte, la presencia de flujos importantes de agua puede dificultar el retiro del material excavado, provocar la erosión de la excavación, del mortero de inyección, y provocar un aflojamiento del terreno que conlleve al atrapamiento de la TBM.

Todos estos factores deben ser previstos en la etapa de proyecto y gestionados durante la construcción con el fin de evitar disputas entre propietario y contratista que entorpezcan o retrasen la ejecución de la obra, por tanto es obvio la necesidad de tener una adecuada gestión contractual sobre todo en aspectos como la gestión y asignación de riesgos, de los mecanismos para la solución de controversias; porque, como ya se mencionó, este tipo de obras están ligadas siempre a la incertidumbre geológica.

2. Objetivos

2.1. Objetivo General

Identificar las implicaciones técnicas inherentes a la excavación mecanizada de túneles con TBM de tipo EPB en frentes mixtos - roca y suelo - con alta permeabilidad y presión de agua; así como establecer la importancia de un adecuado manejo contractual en estas condiciones constructivas.

2.2. Objetivos Específicos

1. Dar a conocer los distintos criterios, conceptos y definiciones generales para la construcción de túneles, particularizando en la excavación mecanizada con TBM de tipo EPB en condiciones de frente mixto - roca y suelo -.
2. Mostrar las características centrales de los frentes mixtos - roca y suelo-, definiendo las diferentes máquinas TBM apropiadas para la excavación de este tipo de terrenos y detallando la aplicación de una de tipo EPB para estas condiciones.
3. Determinar y proponer los parámetros operacionales para una TBM de tipo EPB en la excavación de frentes mixtos - roca y suelo-; así mismo, indicar las dificultades más comunes, y sus soluciones, que se presentan durante la operación en estas condiciones.
4. Mostrar las principales características contractuales de un proyecto de túnel y determinar los rasgos más importantes de una correcta administración contractual en virtud de las características técnicas y operativas de este tipo de obras. A su vez, proponer algunos mecanismos de resolución de controversias con un efecto positivo probado en proyectos de este tipo.

3. Hipótesis

La correcta gestión de un proyecto de excavación mecanizada con TBM de tipo EPB en condiciones de frente mixto – roca y suelo- depende de la adecuada definición del diseño del equipo tuneleador así como de un control de procesos eficiente y de la definición oportuna de un adecuado esquema de contratación que defina claramente las responsabilidades de cada parte y que, a su vez, establezca los mecanismos de resolución de controversias más apropiados.

4. Metodología

Primeramente, se describirán las características que una TBM de tipo EPB debe tener para la excavación de frentes mixtos – roca y suelo-, posteriormente se mencionarán las características contractuales más apropiadas para un proyecto de construcción de obras subterráneas y, por último, se documentarán algunos casos de éxito para este tipo de condiciones.

5. Generalidades

5.1. Túneles

Un túnel es una obra lineal subterránea con una entrada y una salida cuyo propósito es transportar gente o algún material. Se realiza cuando es inviable, riesgoso e imposible realizar excavaciones a cielo abierto o hacer grandes cortes de montaña. Su construcción conlleva varios retos entre los que podemos resaltar: la condición de ubicarse por debajo de la superficie hace imposible definir la totalidad de las características del terreno por donde pasará el túnel, ya que solo es posible definir con relativa exactitud el terreno donde se realizan los sondeos de exploración, lo que conlleva a una alta probabilidad de presentarse condiciones inesperadas entre sondeos; razón por la que es requerido tener una adecuada investigación geológica en la etapa de diseño de un túnel.

Figura 1

Túnel de Sistema Metro



Nota. Obtenido de (xataka, 2020). <https://www.xataka.com/otros/china-tiene-tunel-metro-largo-mundo-otros-dos-tuneles-record-que-esta-venir>

En la actualidad para construir un túnel se precisan de dos métodos de excavación: convencional y mecanizada, a continuación, se describe cada uno:

5.2. Excavación convencional de túneles

El tuneleo convencional de acuerdo con la Asociación Internacional de Túneles (AITES ITA, 2009) significa la construcción de aberturas subterráneas de cualquier forma a través de un proceso cíclico de las siguientes actividades:

1. Excavación de sección parcial o completa del túnel usando métodos como barrenación y voladura o excavadoras mecánicas, excepto TBM.
2. Retiro del material excavado del frente hacia el portal o pozo de entrada para su disposición final.
3. Colocación de elementos primarios de soporte como:
 - a. marcos de acero,
 - b. anclas de suelo o roca
 - c. concreto lanzado o colado en sitio con o sin refuerzo de malla o fibras

Este método permite una gran flexibilidad de adaptación a las condiciones del terreno, en todo momento se ve el frente de excavación, se puede modificar la longitud de avance y el tipo de sostenimiento.

Figura 2

Excavación Convencional de Túneles



Nota. Obtenido de (mosen, 2020). <https://mosen.global/2019/09/tunnelling-journal-profiles-mosen-ltd/>

5.3. Excavación mecanizada de Túneles

Puede definirse la excavación mecanizada como la construcción de túneles por medio de la utilización de máquinas de estructura cilíndrica llamadas Tunnel Boring Machines (TBM). Estas máquinas tienen la capacidad de excavar el túnel a sección completa, realizar el retiro del material removido y de ir colocando un sistema de sostenimiento, todo esto brindando seguridad a los trabajadores en condiciones de terreno inestable gracias a que cuentan con una camisa metálica que rodea y protege su interior.

La excavación mecanizada se aplica a muchas condiciones de terreno como roca dura o fragmentada, suelos blandos e inestables, frentes mixtos de materiales duros y suaves, presencia de gases y flujo de agua con altas presiones, condiciones geológicas variables en el trazo del túnel, zonas de intersecciones con pozos y otros túneles, zonas urbanas y zonas en altas presiones de montaña. Sin embargo, puede no resultar adecuada para formaciones geológicas con grandes huecos o cavernas y cavidades bajo agua (Fulcher, Home, & Hudson-Smith, 2017). Debido a los elevados costes de inversión, las tuneladoras se utilizan principalmente en túneles largos.

Figura 3

Tunnel Boring Machine (TBM)



Nota. TBM para frentes mixtos de suelo y roca usada en el Túnel Emisor Poniente TEPII. Obtenido de (Robbins company, 2019). <http://www.therobbinscompany.com>

Este método de excavación es muy sensible a cambios inesperados de la geología en el trazo ya que cualquier condición no contemplada del terreno afectará el rendimiento de la máquina y obligará a realizar modificaciones en sus componentes.

Tren de equipos

Saenz Fucugauchi, (s.f.) menciona en *Construcción de túneles y lumbreras en suelos blandos y firmes* que atrás del cuerpo de una TBM van instalados en módulos los equipos que son necesarios para su operación, estos conforman el tren de equipos y contienen entre otras instalaciones:

- Cabina del operador. Desde esta cabina operan los sistemas de la cabeza de corte, gatos de empuje, las compuertas de excavación, las unidades de energía hidráulica y de lubricación; así como los indicadores necesarios para la operación de la TBM.
- Un Polipasto por medio del cual se llevan las dovelas al alcance del erector.
- La unidad de poder hidráulico y depósitos de aceite.
- Transformador y circuito eléctrico. Contiene los circuitos de suministro de energía a las unidades hidráulicas, a la bomba de lubricación, a los motores de la cabeza, al compresor de aire, a los circuitos de iluminación.

Otros equipos que pueden ir en el tren de equipos son:

- Casetes de tuberías de ventilación
- Bombas hidráulicas.
- Contenedores de materiales (mortero, lodos, aditivos, etc.)

Figura 4

Tren de Equipos



Nota. Obtenido de (González Valderrama, 2016).

Sistemas back-up

Los rendimientos de perforación de túneles con TBM se ven frecuentemente limitados por la velocidad de evacuación del escombros y por el suministro a la tuneladora de los materiales necesarios para la construcción de este. (Robbins Company, 2020) El sistema back-up se refiere a la combinación de los sistemas por medio del cual se realiza el retiro de la rezaga (escombros) a partir del tren de equipos al exterior del túnel; y al sistema de suministro de materiales. Para llevar los materiales al frente de excavación puede realizarse por dos medios principalmente el sistema de vehículos sobre rieles de y el sistema de vehículos sobre neumáticos; mientras que la rezaga puede realizarse a través de vagonetas montadas sobre rieles o llantas, o por medio de bandas transportadoras de avance continuo, y en caso de manejo de lodos por medio de bombas y tuberías.

Figura 5

Sistema Back-Up



Nota. En la figura se observa una banda transportadora de rezaga y un vehículo de suministro de materiales sobre neumáticos.

Restricciones geométricas.

Los requisitos geométricos del túnel tienen gran influencia en la selección del método de excavación con TBM:

- Largas aberturas y secciones no circulares son necesario construirlas por métodos convencionales.
- Mientras que la excavación convencional puede seguir cualquier diseño de curvas, alineamientos con radios de curva pequeños representa un reto para una TBM con un largo tren de equipos.
- La máxima longitud de conducción de una TBM depende de restricciones de logística (cadena de suministros) y requerimientos de salud y seguridad (ventilación, tiempo de rescate).

Logística

Una parte importante en la planeación de un túnel por este método es la consideración de una serie de trabajos preliminares tales como:

- La construcción de obras de acceso pozos o portales;
- El traslado de las partes de la máquina al sitio de los trabajos, su ensamblaje y pruebas de funcionamiento;
- Instalación de equipos auxiliares como: subestaciones eléctricas, plantas de emergencia, sistemas de izaje, compresores, cisternas para agua tratada, tuberías, equipos de retiro de escombros, entre otros,
- Habilitado de áreas para la fabricación de dovelas, planta de separación de lodos, y para disposición de los residuos.

Estos requerimientos son la razón por la cual el inicio de la excavación es más tardado que en los métodos de excavación convencional.

5.4. Excavación mecanizada de túneles en suelos

Características de los suelos

Según (Crespo Villalaz, 1996, pág. 18) suelo es: “una delgada capa que reposa sobre la corteza terrestre y que proviene de la desintegración y/o alteración física o química de las rocas y de los residuos de las actividades de los seres vivos”. En efecto es una formación de partículas provenientes de la descomposición de las rocas, con fuerzas de unión débiles “separables por medios mecánicos de poca energía o por agitación en agua” (González de Vallejo, Ferrer, Ortuño, & Oteo, 2002, pág. 20).

Figura 6

Formación de Suelo



Nota. En la figura se observa la formación de suelos por desintegración de un macizo rocoso. Obtenido de (greenpackonline, 2018) <http://www.greenpackonline.org/english/environmental-components.php?id=03-04-07-01>

Aun cuando existe una gran variedad de suelos con diferentes características, propiedades y nombres; en ingeniería de túneles interesa conocer el tamaño y cantidad de las partículas que conforman una masa de suelo, y así poder determinar su comportamiento. La distinción entre partículas de un suelo se basa en su tamaño como lo muestra la

Tabla 1.

Tabla 1

Tipos de Partículas de Suelos

Tipo	Definición	Tamaño
Bloques	Partículas de roca que no pasan una abertura cuadrada de 12in (300 mm)	> 300mm
Boleos	Partículas de roca que pasan una abertura de 12 in (300mm) y son retenidas en un tamiz de 3in (75 mm)	300mm – 75mm
Gravas	Partículas voluminosas angulares y/o redondeadas, que no se apelmazan, aunque estén húmedos.	75mm – 4.75mm
Arenas	Partículas finas angulares y/o redondeadas que tienden a apelmazarse cuando están húmedas.	4.75mm - 0.075mm
Limos	Partículas no visibles, no-plásticas o muy poco plásticas; exhiben poco o ninguna resistencia cuando están secas.	
Arcillas	Partículas no visibles la mayoría minerales de arcilla; exhiben plasticidad y significativa resistencia cuando están secas; el agua reduce su resistencia.	< 0.075mm

Nota. Obtenido de (ASTM D 2487 – 06)

En la naturaleza los suelos no siempre presentan un solo tamaño de partículas, sino que en muchas ocasiones una masa de suelo está conformada tanto por partículas gruesas como por finas en distintos porcentajes. La cantidad de finos en un suelo influye de manera significativa en el comportamiento de este, por ejemplo, un suelo con contenido de finos mayor al 35% de finos hará que este se comporte probablemente como suelo fino, mientras que un contenido de finos menor al 5% tiene poca o ninguna influencia en el comportamiento de la masa de suelo (Budhu, 2015).

Dos grandes grupos de suelos surgen a partir de considerar el porcentaje de partículas finas que contienen: granulares y finos. Un suelo granular de acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) está constituido por menos del 50% por partículas finas, mientras que un suelo fino lo forman en más del 50% partículas finas ver Tabla 2.

Tabla 2

Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS)

Tipo de suelo	% finos	Clave	Descripción
Suelos finos	> 50%	CH	Arcilla de alta plasticidad
		CL	Arcilla de baja plasticidad
		MH	Limo de alta plasticidad
		ML	Limo de baja plasticidad
Suelos granulares	> 12%	SC	Arenas arcillosas
		SM	Arenas limosas
	> 12%	GC	Gravas arcillosas
		GM	Gravas limosas
	< 5%	SW	Arenas limpias bien graduadas
		SP	Arenas limpias mal graduadas
	< 5%	GW	Gravas limpias-bien graduadas
		GP	Gravas limpias-mal graduadas

Nota. Obtenido de (ASTM D 2487 – 06)

Compacidad

Un parámetro importante que interesa conocer de un suelo en túneles es su resistencia a ser deformado. Para suelos granulares esta es determinada por su *compacidad relativa* definida como el grado de empaquetamiento (compactación) del suelo respecto a su estado mas suelto posible y el mas denso posible. La Tabla 3 muestra los diferentes porcentajes de compacidad de un suelo granular.

Tabla 3

Compacidad de Suelos Granulares

%	Compacidad relativa
0-20	Muy suelta (very loose)
20-40	Suelta (loose)
40-70	Media (medium dense)
70-85	Compacta (dense)
85-100	Muy compacta (very dense)

Nota. Obtenido de (Budhu, 2015)

Consistencia

En suelos finos la resistencia a la deformación se mide por medio de su *consistencia* la cual es función del contenido de agua del suelo en estado natural respecto al contenido de agua en sus estados de menor y mayor resistencia; a mayor contenido de agua la resistencia del suelo disminuye y a menor aumenta. La Tabla 4 muestra los diferentes niveles de consistencia de un suelo fino.

Tabla 4

Consistencia de Suelos

Ic	Consistencia	Comportamiento
<0	líquida	Líquido
0-0.5	Muy blanda (very soft)	Plástico
0.5 - 0.75	Blanda/Media (soft/medium)	
0.75 - 1	Firme (stiff)	
1-1.25	Muy firme (very stiff)	Semi-sólido a sólido
1.25-1.5	Dura (Hard)	

Nota. Obtenido y adaptado de la clasificación de (DAUB, 2010).

Comportamiento de las Excavaciones en Suelos

El suelo alrededor de un túnel cuando es excavado pierde el equilibrio que tenía lo que propicia que este se active y comporte de forma estable o inestable dependiendo de las características propias del suelo, del nivel y condiciones de carga (*esfuerzos*), del nivel agua freática y de la geometría de la excavación.

Un comportamiento estable en túneles se caracteriza por que al momento de la excavación el terreno no presenta fallas por caídos, de grandes flujos de agua o cuando la velocidad de deformaciones es muy lenta, lo que permite realizar las actividades de excavación sin riesgo. Por otro lado, en un comportamiento inestable el terreno inmediatamente presenta caídos, altos flujos de agua, o las deformaciones son muy rápidas lo que requiere la pronta implementación de algún soporte temporal. La Tabla 5 muestra los distintos tipos de comportamiento que pueden presentarse en excavaciones de suelos:

Tabla 5

Comportamiento de Excavaciones en Suelos

Tipo de Comportamiento	Tipo de suelos
Firme: El frente puede avanzar sin soporte inicial, y el sostenimiento final puede construirse antes que el terreno empiece a moverse.	Loess arriba del nivel freático, arcillas duras, margas, arenas y gravas cementadas que no estén sobre esforzadas.
Desmoronamiento (Raveling): Se empiezan a desprender del techo y paredes, trozos o laminillas de material, cierto tiempo después de que el material quedó expuesto, debido al aflojamiento o al sobre esfuerzo y a la fractura frágil (el suelo se separa o se rompe a lo largo de distintas superficies). Desmoronamiento Rápido: El proceso de desprendimiento empieza en pocos minutos.	Suelos residuales o granulares con pequeñas cantidades de cementante, puede ser rápido a bajo del nivel freático y lento arriba. Arcillas rígidas fisuradas pueden presentar rápido o lento desmoronamiento dependiendo del grado de sobre esfuerzo.
Estrujamiento (squeezing): El terreno fluye plásticamente hacia el interior del túnel, sin ninguna fractura o pérdida de continuidad y sin ningún aumento perceptible del contenido de agua. Dúctil, fluye debido al sobre esfuerzo.	Suelos sin resistencia friccionante. El grado de extrusión depende del grado de sobre esfuerzo. Ocurre en arcillas muy blandas y hasta de consistencia media, a poca y a mediana profundidad. A gran profundidad, las arcillas de duras a firmes, pueden presentar una combinación de desmoronamiento en la superficie de la excavación y estrujamiento a profundidad detrás de la superficie.
Corrimiento (running): Los materiales granulares sin cohesión, son inestables con una pendiente mayor a su ángulo de reposo (30 – 35°). Cuando son expuestos a pendientes mayores, los materiales corren como si fuera azúcar o arena de duna.	Materiales granulares con poco o nada contenido de arcilla que les den cohesión,
Fluyente (Flowing). Una mezcla viscosa de suelo y agua fluye hacia el túnel. El material puede ingresar al túnel por el frente, el piso, la clave o por las paredes del túnel. Puede fluir grandes distancias y en ocasiones invadir completamente el túnel.	Bajo el nivel freático: Limos, arenas o gravas, que no contengan arcillas que les puedan dar cohesión y plasticidad. Se puede presentar en arcillas altamente sensitivas cuando se rompe su estructura
Hinchamiento (swelling): El suelo absorbe agua, incrementa su volumen y se expande lentamente hacia el túnel.	Arcillas altamente preconsolidadas con índices de plasticidad mayores de 30. Generalmente con contenidos significativos de montmorilonita.

Nota. Obtenido de (Heuer, 1974).

TBM para suelos

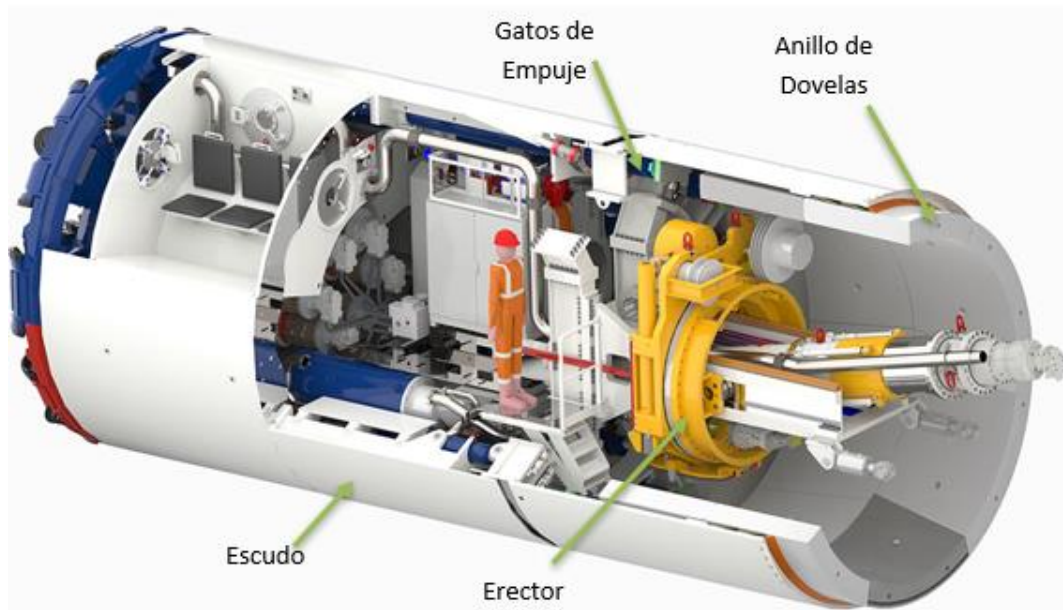
Escudos de frente Presurizado

Las tuneladoras TBM más usadas para excavar en suelos son las llamadas *Escudos de frente presurizado*, son nombradas así debido a la camisa metálica que las envuelve y porque tienen la capacidad de presurizar el frente de excavación cuando el frente es inestable. En la actualidad se tienen principalmente dos tipos de escudos presurizados: Escudo de Presión de Tierra Balanceada (EPB) y Escudo de Lodos (Slurry Shield) diferenciándose por medio del material utilizado para estabilizar el frente.

El ciclo de trabajo de cualquier escudo ya sea de frente presurizado o de *frente abierto* comienza con el apoyo de los *gatos de empuje* en el último *anillo de dovelas* instalado, posteriormente los gatos son extendidos de acuerdo con la dirección de avance del túnel al tiempo que va girando la cabeza de corte y controlándose la presión en el frente, después de cierto avance se recogen los gatos y el *erector de dovelas* comienza a formar el siguiente anillo.

Figura 7

Configuración General de un Escudo



Nota. Adaptado de (TunnelTalk, 2020). <https://www.tunneltalk.com/Paris-16Aug2018-Bessac-to-supply-EPBM-for-RER-Meudon-safety-chamber.php>

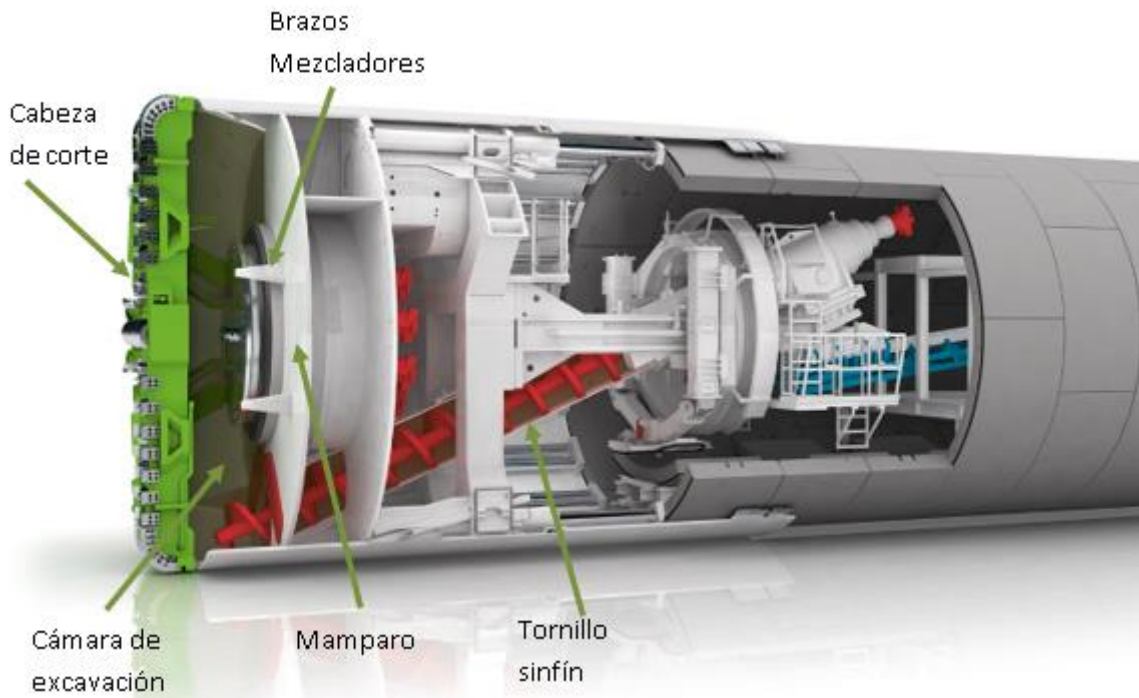
Escudo de Presión de Tierra Balanceada EPB

Desarrollado en Japón en los años 70's, el frente es soportado por el propio material removido. La *Cámara de Excavación o Pleno*¹ se encuentra cerrada por un mamparo de presión, una cabeza de corte más o menos cerrada excava el suelo, mientras brazos mezcladores atrás de la cabeza de corte y en el mamparo ayudan a remoldear el suelo a una consistencia adecuada. La presión es medida por celdas distribuidas sobre el frente del mamparo. Un tornillo sinfín remueve el suelo de la cámara de excavación. La presión de soporte es controlada a través de la velocidad de rotación del tornillo sinfín y de la inyección de agentes acondicionantes. (Maidl, Herrenknecht, Maidl, & Wehrmeyer, 2012)

El principal rango de aplicación de los EPB es en suelos con contenido de partículas finas mayor o igual al 30 %, para suelos con porcentaje de finos menores es necesario adecuar el terreno con agentes acondicionantes. Cuando es necesario entrar a la cámara de excavación para inspeccionar o cambiar las herramientas de corte se puede presurizar esta con aire comprimido para poder trabajar.

Figura 8

TBM de Tipo EPB



Nota. En la figura se indican las partes características de una TBM de tipo EPB. Obtenido y adaptado de (Herrenknecht, 2019). <https://www.herrenknecht.com/en/products/core-products/tunnelling/epb-shield.html>

¹ Espacio comprendido entre la cabeza de corte y una placa metálica llamada Mamparo.

Escudo de lodos (Slurry Shield)

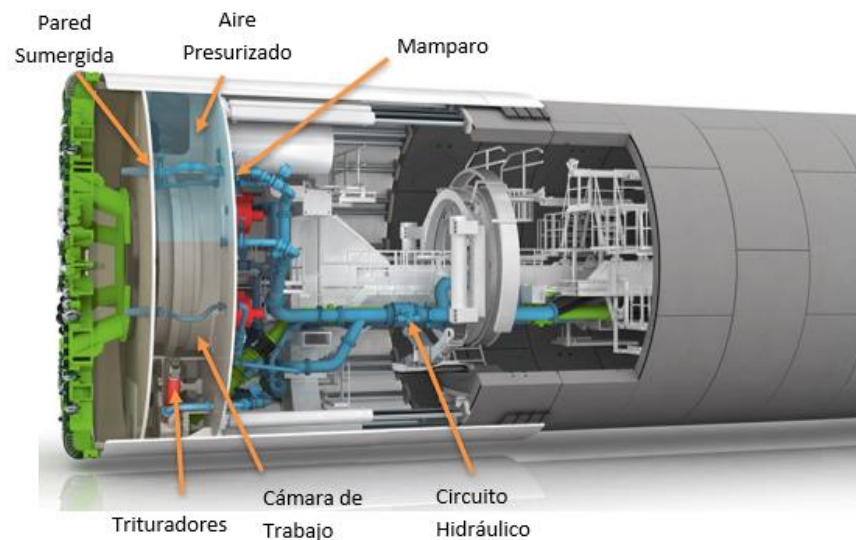
Los Escudos de lodos son máquinas TBM utilizadas para excavar principalmente en suelos granulares con poco porcentaje de finos. En caso de que el suelo sea inestable son capaces de ejercer una contrapresión en el frente de excavación por medio de lodos inyectados en la cámara de excavación, normalmente bentonita u otro tipo de arcilla mezclada con agua. El material de rezaga formado por el terreno excavado y los lodos es bombeado desde el pleno por medio de tubería hasta el exterior, donde es separado el lodo para su reutilización en una planta de recuperación.

Actualmente estas máquinas cuentan con dos mamparos: uno separa la cámara de excavación del túnel y el segundo llamado pared sumergida divide la cámara de excavación en dos, dejando una comunicación en la parte inferior. (Guglielmetti, Grasso, Mahtab, & Xu, 2008) La parte frontal de la cámara es llenada completamente con fluido a presión para brindar apoyo total durante la conducción. En la parte trasera conocida como *Cámara de Trabajo*, el fluido a presión está solo justo encima del eje de la máquina; un colchón de aire comprimido en la zona superior aplica la contrapresión necesaria en el frente. (Herrenknecht, 2020) La ventaja del aire comprimido es que se logra una rápida respuesta a una reducción súbita de la presión en el frente que puede ser debida a la pérdida del lodo hacia el terreno, caso de suelos muy permeables lo que lo hace su principal rango de aplicación.

Cuando se presentan grandes fragmentos de roca y boleos este tipo de máquina cuenta con *trituradores* dentro del pleno para reducir los tamaños de roca lo que permite su paso a través de rejillas hacia la tubería de rezaga.

Figura 9

Escudo tipo Slurry



Nota. Obtenido de (Herrenknecht, 2019). <https://www.herrenknecht.com/en/products/core-products/tunnelling/epb-shield.html>

Tipos de cabeza de corte para suelos

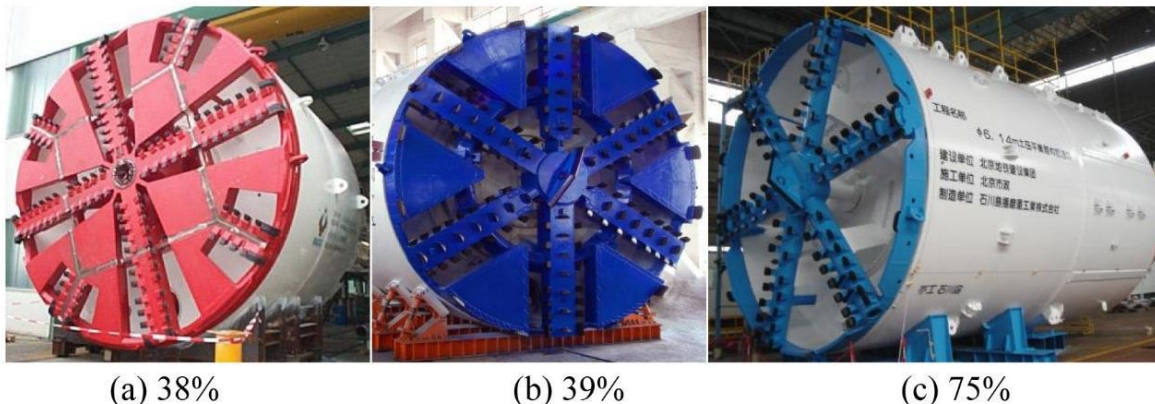
Existen básicamente tres tipos de cabeza de corte para excavación en suelos: las Cabezas de *brazos*, las de *placa* y las de *placa y brazos*, diferenciándose principalmente por su porcentaje de aberturas ver Figura 10.

En una cabeza de brazos el porcentaje de aberturas es alto, lo que ocasiona que el desgaste sea menor, que se reduzca la potencia requerida, que la presión en el frente sea más adecuadamente transmitida, que exista menor restricción en el flujo del material (menos riesgo de atascamiento y obstrucciones), y que haya una mayor velocidad de avance; sin embargo, no proporciona un soporte mecánico al frente y la seguridad en frentes inestable es baja.

Por otra parte, cabezas de corte de tipo placa o de placa y brazos cuentan con menores porcentajes de aberturas, lo que ofrece un alto grado de soporte adicional mecánico en caso de un colapso súbito del frente; sin embargo, si el porcentaje es muy bajo se dificulta el conocimiento del estatus del frente durante la excavación (Grothen, 2015), aumenta el riesgo de atascamiento de arcilla y bloques en las aberturas, y el desgaste puede ser excesivo.

Figura 10

Tipos de Cabeza de Corte



Nota. (a) Cabeza de Corte de Placa con 38% de aberturas, (b) Cabeza de corte de Placa y Brazos con 39% de aberturas, (c) Cabeza de Corte de Brazos con 75% de aberturas.

Obtenido de *Cutterhead selection in Beijing Metro Line 4 and 5* de (Cheng, Liao, Chen , & Zhou, 2016).

Tabla 6

Ventajas y Desventajas de las Cabezas de Corte de Brazos y de Placa

Concepto	Cabeza de Brazos	Cabeza de Placa
Control de la presión del frente de excavación	Siendo casi igual a la presión de la cámara de excavación, la presión del frente de excavación es fácil de controlar.	Debido a la transmisión indirecta entre la presión de la cámara de excavación y la presión en el frente, es algo difícil controlar de manera precisa la presión en el frente.
Entrada de la rezaga a la cámara de excavación	La entrada de los materiales excavados es suave debido al alto porcentaje de aberturas, casi sin problemas de atascamiento de arcilla.	Afectado por la placa la entrada del material excavado no es suave y la cabeza de corte es propensa a un atascamiento de arcilla en sus aberturas.
Torque	El torque requerido es pequeño y el precio del equipamiento es bajo.	Se requiere un alto torque y gran capacidad de equipamiento, lo que lleva a un alto costo de construcción.
Desgaste de la cabeza y herramientas de corte.	El alto porcentaje de aberturas causa un relativo menor desgaste.	Debido al bajo porcentaje de aberturas el desgaste excesivo es un fenómeno común.
Adaptabilidad a grandes partículas y bloques.	Partículas muy grandes o bloques que no pueden ser ingeridas por el sistema de rezaga deben ser manejados mediante trabajo manual.	Permaneciendo a fuera de la cabeza las grandes partículas y bloques pueden ser fragmentados por las herramientas de corte.
Seguridad en el cambio de herramientas	La alta relación de apertura de la cabeza de corte hasta cierto punto disminuye la estabilidad del frente de excavación.	La placa es útil para estabilizar el frente y resulta en una alta seguridad en la construcción.

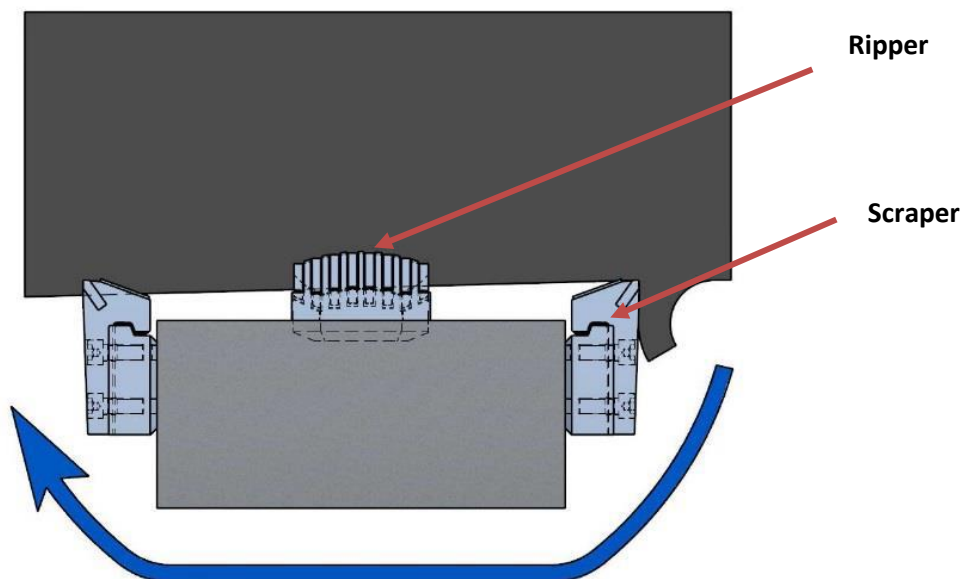
Nota. Obtenido de Advantages and disadvantages of the spoke type and plate type cutterhead de (Xinggao, Dajun, & Qingfei, 2017).

Herramientas de Corte para Suelos

Existen dos tipos principales de cortadores para suelos: Rippers y Scrapers. Por lo general las cabezas de corte trabajan en combinación de estas dos herramientas. Los Rippers son las herramientas primarias de corte y se utilizan para aflojar material duro del frente de excavación como gravas y boleos, mientras que los Scrapers son herramientas de menor altura que completan el trabajo rastrillando y acarreando el material aflojado al interior de la cabeza de corte.

Figura 11

Herramientas de Corte de Suelos



Nota. Obtenido y modificado de *Wide tool placement* de (Grothen, 2015)

5.5. Excavación mecanizada de túneles en macizos rocosos

Características de los macizos rocosos

Las rocas son una mezcla o conjunto de minerales con fuertes uniones cohesivas y que se presentan consolidados, cementados o aglomerados, de modo que dan lugar a un material de alta resistencia. Se encuentran comúnmente atravesadas por distintos caracteres geológicos llamados discontinuidades, como estratificación, esquistosidad, pliegues, fallas y juntas (Serradell Mejia, 2017). “Las masas rocosas aparecen en la mayoría de los casos afectadas por discontinuidades o superficies de debilidad que separan bloques de matriz rocosa o «roca intacta» constituyendo en conjunto los macizos rocosos”. (González de Vallejo, Ferrer, Ortuño, & Oteo, 2002, pág. 142)

Figura 12

Macizo Rocoso



Nota. En la figura se aprecian planos de falla (discontinuidades) de una masa de roca. Obtenido de (Indian Minerology, 2019). <https://indianminerology.blogspot.com/2016/11/how-to-describe-rock-mass.html>

No todos los macizos rocosos presentan las mismas características y comportamiento debido a que estos dependen del tipo de roca intacta, de su resistencia, intemperismo y alteración; así como las condiciones de las discontinuidades, como la densidad, rugosidad y tamaño. Stille & Palmström, (2008) proponen una clasificación para macizos rocosos con base en las características de las discontinuidades:

- **Masivo.** Existen muy pocas discontinuidades en la roca tales como fracturas o el espacio entre discontinuidades son del mismo orden de magnitud que las dimensiones de la excavación. Las propiedades de la roca son las que dominan el comportamiento.
- **Articulado o Bloquizado.** El macizo rocoso se encuentra moderadamente a fuertemente articulado, el comportamiento de la excavación lo dominan las juntas y planos de debilidad.
- **Muy articulado o triturado.** Varias fracturas o planos de discontinuidades atraviesan el macizo rocoso, el comportamiento es similar a un material granular y es dominado por la interacción entre los bloques o fragmentos.
- **Especiales.** Macizos rocosos con materiales débiles y blandos como estratos de roca de diferente dureza; o macizos formados por clastos (fragmentos) de roca embebidos en una matriz de materiales blandos; o macizos rocosos de materiales plásticos como lutitas.

Dureza de las rocas

En lo que respecta a las propiedades de la roca intacta de los macizos rocosos, la dureza es importante conocerla en excavación con TBM ya que tiene influencia en la vida útil de los cortadores y la penetración óptima de la máquina. La *Resistencia a la Compresión Simple (UCS)*² de la roca es utilizada como parámetros para clasificar su dureza ver la Tabla 7.

Tabla 7

Clasificación de Rocas por su Dureza

ISRM R strength	Dureza	UCS (MPa)	Ejemplos	Identificación
R6	Extremadamente Dura	> 250	Cuarcita, granito, gneis	Solo puede ser astillado con martillo geológico.
R5	Muy Dura	250-100	Basalto, gneis, granito, dolomita	Requiere bastantes golpes de un martillo geológico para fracturar.
R4	Dura	100-50	Caliza, mármol, filita, arenisca, pizarra, dolomita	Requiere más de un golpe de martillo geológico para fracturar.
R3	Moderadamente Dura	50-25	Concreto, caliza, shale, limolita, carbón, esquisto	No se puede raspar ni pelar con una navaja de bolsillo, la muestra puede ser fracturada de un solo golpe firme de un martillo geológico.
R2	Blanda	25-5	Tiza, sal de roca, potasa	Puede ser pelada con una navaja de bolsillo.
R1	Muy Blanda	5-1	Roca altamente alterada o intemperizada	Se desmorona bajo golpes firmes con un martillo geológico.
R0	Extremadamente Blandas	< 1	Rocas de Falla sin cohesión de granos muy finos	Se pueden formar hendiduras con las uñas.

Nota. Obtenido de Table 1 ISRM strength de (Warren, Kallu, & Barnard, 2016)

² “Esfuerzo máximo que soporta una muestra de suelo o roca sin confinamiento lateral antes de romper al aplicarle una carga axial”. (González de Vallejo, Ferrer, Ortuño, & Oteo, 2002, pág. 121)

Comportamiento de las Excavaciones en Macizos Rocosos

En la excavación de macizos rocosos tres agentes son generadores de inestabilidad: la gravedad, los esfuerzos, y el agua subterránea pudiendo actuar de manera simultánea. La Tabla 8 agrupa los distintos tipos de comportamiento de excavaciones en macizos rocosos de acuerdo con el tipo de mecanismo que lo propicia.

Tabla 8

Comportamiento de las Excavaciones en Macizos Rocosos

	Tipo de comportamiento	Comentarios
Impulsado por la gravedad	Estable: El terreno de la periferia estará sin soportar por varios días o más.	Macizo rocoso masivo de rocas durables a bajas y moderadas profundidades.
	Caída de bloques: Bloques individuales: Estable con potencial caída de bloques individuales. Varios bloques: Estable con potencial caída de varios bloques (volumen de deslizamiento <10m ³).	La falla es controlada por las discontinuidades.
	Derrumbamiento (Cave -in): Movimiento rápido de grandes volúmenes (>10m ³) de fragmentos de roca.	Macizo rocoso altamente articulado o triturado,
	Corrimiento (Running): Material granular invade rápidamente el túnel hasta que un talud estable es formado en el frente. Tiempo de autosoporte es cercano a cero.	Arenas limpias y gravas arriba del nivel freático.
Inducido por los esfuerzos	Pandeamiento (Buckling): Aflojamiento de fragmentos de roca a lo largo de foliación o estratificación.	Ocurre en macizos rocosos anisotrópicos duros y frágiles bajo alta carga debido a la deflexión de la estructura.
	Rompimiento (Rupturing): Rompimiento gradual en fragmentos o escamas en la superficie del túnel.	Efecto dependiente del tiempo debido a redistribución de esfuerzos.
	Lajamiento (Slabbing): Súbito y violento desprendimiento de lajas de roca delgadas desde el techo y paredes.	Macizo rocoso masivo de roca dura y frágil sujeto a moderado o alto sobreesfuerzo.
	Estallido de roca (Rock burst): mucho más violento desprendimiento de roca y más volumen que en slabbing.	Macizo rocoso masivo de rocas duras y frágiles sujeto a muy alto sobreesfuerzo.
	Plastic behaviour: Deformaciones iniciales causadas por fallas de corte en combinación con discontinuidades y falla controlada por la gravedad.	Toma lugar en macizo rocoso de rocas deformables bajo un sobreesfuerzo.
	Estrujamiento (Squeezing): Deformación dependiente del tiempo, causada por sobreesfuerzo. Las deformaciones pueden terminar durante la construcción o continuar por un largo periodo.	Macizos rocosos masivos con materiales de alto porcentaje de minerales micáceos o arcillosos con baja capacidad de hinchamiento (swelling).

	Ravelling from slaking: El terreno se rompe gradualmente en escamas o fragmentos.	Desintegración de algunos materiales moderadamente cohesivos y friables como lutitas y arcillas rígidas y agrietadas.
Influenciado por agua	Hinchamiento de rocas: Convergencia del túnel debido a la expansión causada por absorción de agua.	Ocurre en macizos rocosos en los que la anhidrita, halita y minerales como esmectita constituyen una parte significativa.
	Hinchamiento de juntas arcillosas: esto lleva al aflojamiento de bloques.	Ocurre en juntas con relleno de minerales como esmectita o montmorilonita.
	Terreno fluyente (Flowing Ground): Una mezcla de agua y sólidos rápidamente invade el túnel desde todos lados.	Materiales con poca o ninguna cohesión debajo del nivel freático.
	Ingreso de agua: Agua presurizada invade la excavación a través de canales o aberturas en roca.	Puede ocurrir en rocas porosas y solubles, o a lo largo de aberturas significantes en fracturas o juntas.

Nota. Obtenido y adaptado de *Main Ground behaviour types in underground excavations* de (Stille & Palmström, 2008)

TBM para macizos rocosos

TBM abierta

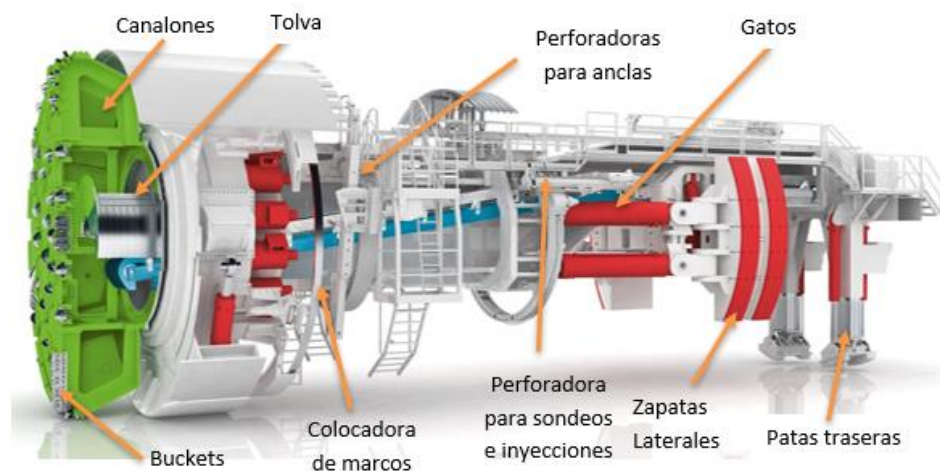
Este tipo de TBM no cuenta con un Escudo que envuelva completamente la máquina por lo que se les denomina de tipo abierta y son empleadas principalmente en macizos rocosos de buena calidad (masivos o moderadamente articulados). Su modo de trabajo es extender unas *Zapatas laterales (Grippers)* contra las paredes de la excavación y mediante gatos hidráulicos lograr el avance de la máquina y posteriormente instalar marcos de acero, anclas y/o concreto lanzado dependiendo de la calidad del macizo rocoso.

Si se pronostica un macizo rocoso muy articulado o triturado o condiciones no heterogéneas (alto grado de articulación, zonas de falla, alto flujo de agua), se recomienda equipar la máquina con equipo para investigación avanzada y tal vez también para mejoramiento del macizo rocoso por delante de la máquina (DAUB, 2010).

La falta de escudo produce poca fricción que se traduce en una menor fuerza de empuje; además de tener menor riesgo de sufrir un atrapamiento por caída de rocas. Estas TBM permiten perforar túneles de gran longitud con rendimientos muy altos en roca competente, pero pueden quedar bloqueados en zonas falladas debido a la imposibilidad de actuación de los “Grippers” cuando el terreno a nivel de hastiales se desprende o es deformable. Razón por la que estas máquinas se utilizan en macizos rocosos de mediana a buena calidad donde la excavación sea estable y se permita apoyar las zapatas.

Figura 13

TBM abierta



Nota. Adaptada de (Herrenknecht, 2019). <https://www.herrenknecht.com/en/products/core-products/tunnelling/epb-shield.html>

Escudos de Frente Abierto

Son escudos que no disponen de un sistema para regular la presión en el frente de excavación como los EPB o Slurry, y son utilizados principalmente en Macizos rocosos. Su ciclo de trabajo es el mismo de los escudos presurizados: excavar, rezagar y colocar dovelas.

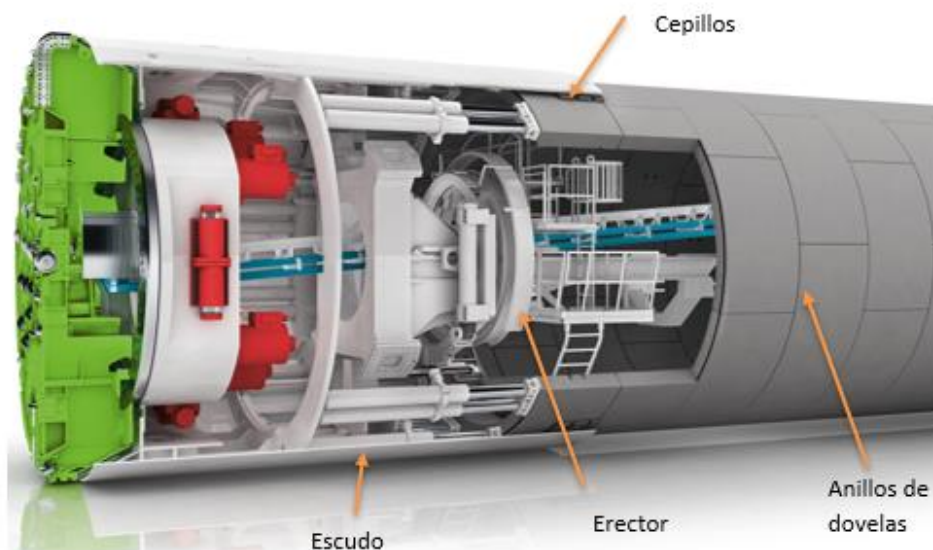
Escudo sencillo

Este tipo de máquinas se utilizan en caso de frente estable por ejemplo en arcilla de consistencia firme y suficiente cohesión o en roca sólida. En macizos rocosos muy articulados propensos a desprendimiento son utilizados principalmente, ya que están equipados con una cabeza de corte en gran parte cerrada y totalmente protegido de terreno inestable por un escudo. Las fuerzas de empuje y el torque se transfieren al último anillo de dovelas por los gatos de empuje (DAUB, 2010).

Estas máquinas también cuentan con una perforadora de sondeos e inyecciones para obtener información del frente de excavación, estabilizar el terreno y/o reducir la presión de agua por medio de inyecciones.

Figura 14

TBM tipo Escudo Simple



Nota. Adaptada de (Herrenknecht, 2019). <https://www.herrenknecht.com/en/products/core-products/tunnelling/epb-shield.html>

Doble Escudo

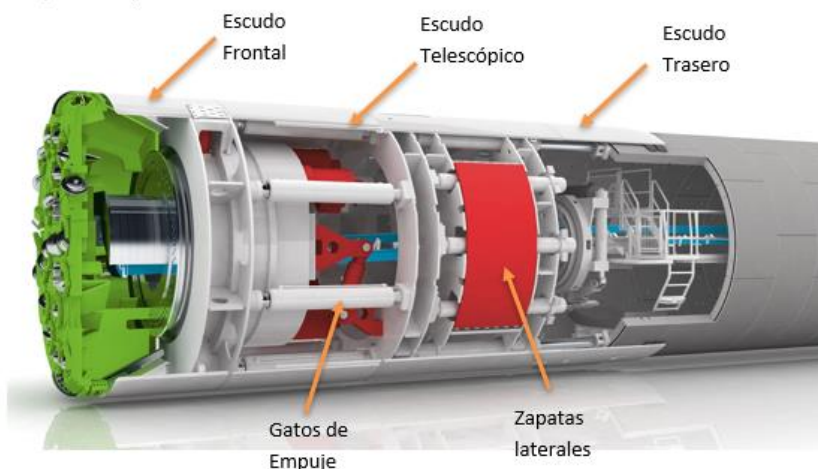
Los equipos *Doble Escudo* cuentan con tres camisas cilíndricas que envuelven la máquina, una llamada *Escudo frontal* que contiene los *Gatos de Empuje Principales*; un *Escudo Trasero* que incorpora zapatas de apoyo lateral (Grippers) y el erector de dovelas; y un *Escudo telescópico* de menor diámetro ubicado entre los escudos frontal y trasero que mantiene protegida la máquina cuando el escudo frontal es extendido. Se puede decir que es una máquina dual al poder trabajar como una TBM de tipo abierto o como un Escudo sencillo dependiendo de las condiciones del terreno.

- Modo TBM abierta. Si el macizo rocoso es de una buena calidad que permita el apoyo de los Grippers contra la superficie de excavación la máquina puede excavar mientras se colocan las dovelas, en este caso el escudo frontal es extendido por medio de los gatos principales para lograr la excavación mientras el escudo trasero se mantiene estático protegiendo la colocación de las dovelas.
- Modo Escudo Sencillo. Si el terreno es muy deformable no se pueden anclar las zapatas entonces la máquina necesita avanzar mediante los *gatos de empuje auxiliares* que se apoyan sobre el último anillo de dovelas logrando rendimientos mucho menores.

La elección de este tipo de TBM se debe hacer cuando en el trazo del túnel existan cambios constantes en las condiciones del macizo rocoso entre masivo y estable a muy articulado e inestable. Además, debe tomarse en cuenta que, por tener una mayor superficie de contacto con el terreno por el doble escudo, es más propensa a sufrir un atrapamiento, de requerir mayor fuerza de empuje debido a la fricción, y un radio de giro mayor que un escudo sencillo.

Figura 15

TBM tipo Doble Escudo



Nota. Adaptada de (Herrenknecht, 2016). <https://www.herrenknecht.com/en/products/core-products/tunnelling/epb-shield.html>.

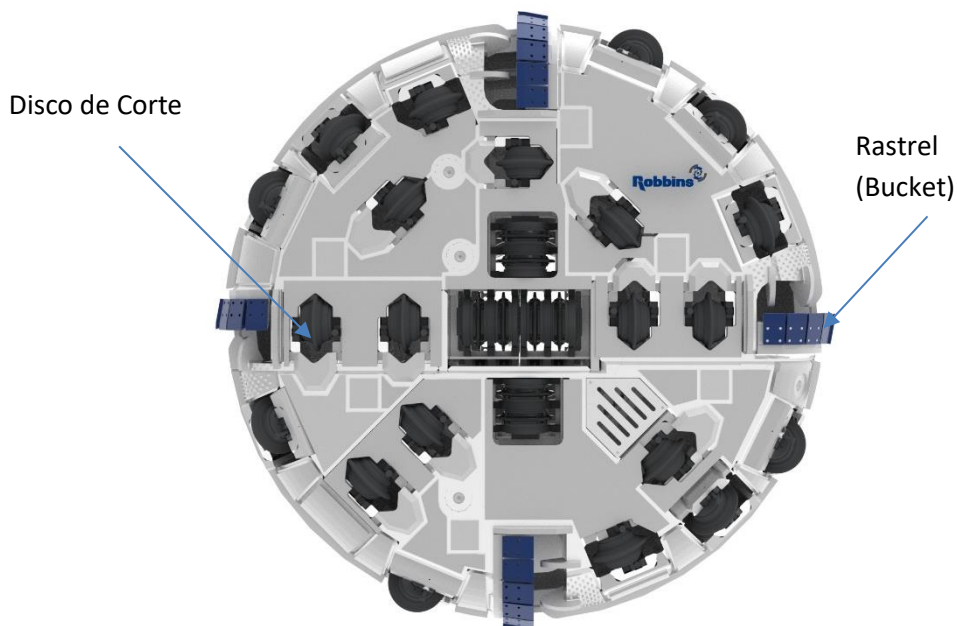
Cabeza de Corte para Macizos Rocosos

Las cabezas de corte utilizadas en macizos rocosos tienen un bajo porcentaje de aberturas para impedir la entrada de grandes fragmentos de roca al interior de la máquina que pudiesen dificultar su transportación y dañar u obstruir los componentes de la TBM, de manera que los fragmentos de roca desprendidos son reducidos de tamaño por los discos de corte hasta poder entrar por las aberturas con ayuda de unos rastreles llamados *buckets*.

la cabeza gira generando una presión al terreno por medio de los discos cortadores, esto hace que se fracture la roca generando fragmentos llamados **chips** que son transportados por medio de los **Buckets** ubicados en la cabeza de corte hacia la **Tolva** detrás de la cabeza por medio de **Canalones**; de la tolva pasan a una serie de bandas transportadoras hasta el exterior del túnel.

Figura 16

Cabeza de Corte para Macizo Rocosos



Nota. Obtenido de <https://www.robinstbm.com/products/tunnel-boring-machines/main-beam/>

Discos de corte

Estas herramientas consisten en un disco de acero montado a un rodamiento que permite su rotación, y están diseñados para trabajar bajo presión mediante sellos para evitar la pérdida de aceite o el ingreso de suciedad al interior del rodamiento. Deben colocarse de manera que cada uno de los discos tenga un radio de giro diferente y con la separación adecuada para una óptima fragmentación de la roca y evitar la formación de grandes fragmentos que pudiesen obstruir las entradas de la cabeza y/o el sistema de rezaga, este espaciamiento se encuentra entre 70mm a 100mm dependiendo de la dureza del macizo rocoso (Maidl, Herrenknecht, Maidl, & Wehrmeyer, 2012).

Rostami & Chang (2017) mencionan que la selección del tamaño del disco de corte es importante ya que influye en:

- **Capacidad de carga (KN):** Esta determina la profundidad de penetración. Las capacidades típicas para discos de 17" y 19" que son los más comunes son de 250KN y 310KN respectivamente.
- **Fuerza requerida de corte y Vida útil:** Estos aumentan con el aumento del tamaño del disco de corte.
- **Límite de la velocidad del cortador:** Esta es impuesta por la máxima velocidad de rotación de los rodamientos, para discos de 17" y 19" estas típicamente son 165m-min y 200m-min respectivamente.

EPB en Macizos Rocosos

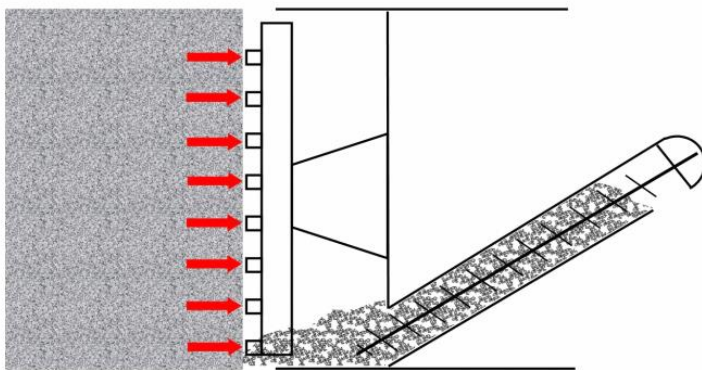
Aunque este tipo de tuneladoras se diseñan en un principio para excavar en suelos; con el desarrollo de aditivos acondicionantes y adecuaciones en la cabeza de corte se ha demostrado su viabilidad para excavar en frentes con roca. La aplicación de EPB en macizos rocosos puede lograrse mediante la molienda intensiva de la roca y de su posterior fluidificación a través de la inyección de materiales finos (Lombardo Aburto & Pérez Reyes, 2013).

Las aberturas de la cabeza de corte deben impedir la entrada de grandes fragmentos de roca que puedan obstruir y dañar el tornillo sinfín, una manera de contrarrestar esta deficiencia en un EPB es mediante la adición de barras "grizzli" sobre las aberturas de la cabeza de corte, las cuales permiten la trituración de los bloques y rocas en el frente, hasta alcanzar un tamaño lo suficientemente pequeño para su ingreso hacia el pleno (González Pascual, 2017).

Lombardo Aburto & Pérez Reyes (2013) mencionan que el uso del sistema de rezaga de un EPB en macizos rocosos conlleva importantes riesgos a saber: obstrucción por el diámetro de los bloques de roca que pretenden ingresar al elemento, desgaste excesivo y dificultad de la extracción del material. La inyección de grandes cantidades de material acondicionante en la cámara de excavación y directamente en el tornillo sinfín son la única manera de lograr el transporte del material.

Figura 17

EPB en Modo de Operación Abierto en Macizo Rocosos



Nota. Obtenido de EPB-shield in hard rock (open mode) de (Thewes, 2004).

6. Excavación mecanizada de túneles en frentes mixtos

De acuerdo con (Tóth, Gong, & Zhao, 2013) frente mixto es la condición del frente de excavación donde están presentes simultáneamente dos o más estructuras geológicas o la misma, pero con diferencias significativas en sus propiedades físicas y mecánicas, que influyen en gran medida en la velocidad de penetración de la TBM, en los parámetros operacionales, o en los sistemas de sostenimiento instalados, aceptando que la relación de resistencia a la compresión simple (UCS) entre el material más débil y el más fuerte tiene que ser igual o menor que 1/10.

6.1. Tipos de frentes mixtos

Interfaz – Roca y Suelo-(Rock–Soil Interface, RSI).

Este tipo es característico de una formación dura y otra blanda. Es típico de zonas de contacto entre formaciones de roca y suelo, o roca con diferentes niveles de fracturamiento.

Durante la excavación con TBM en esta condición se presentan problemas de vibración en la máquina, cargas de impacto en la cabeza de corte, distribución desigual de fuerzas en el frente y un alto consumo en los cortadores por daños ocasionados cuando se mueven del material blando al material duro, la destrucción de los discos y el bloqueo de los rodamientos son comunes. “Para afrontar estos problemas es una práctica común reducir la fuerza de empuje y la velocidad de rotación de la cabeza de corte” (Tóth, Gong, & Zhao, 2013, pág. 2).

Figura 18

Frente Mixto -Roca y Suelo-



Nota. Obtenido de *Rock–soil interface mixed-face Ground* de (Tóth, Gong, & Zhao, 2013, pág. 141).

“Las condiciones de frente mixto que involucren la presencia de roca de buena calidad y de suelos blandos en la misma sección de excavación es una de las más críticas, sobre todo si el primero se

sitúa encima del otro. Bajo estas circunstancias, el empuje de la tuneladora se aplica de manera no uniforme: para excavar la zona con el material más resistente requiere mayor empuje en los gatos” (González Pascual, 2017, pág. 40)

Matriz Suelo- Bloques (Boulder Soil Matrix, BSM).

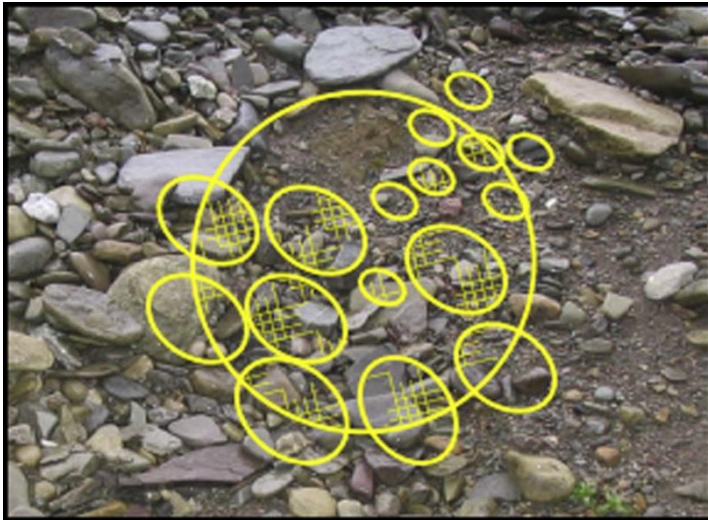
En esta condición la excavación pasa por una formación de bloques y boleos embebidos en un material de consistencia blanda llamada *Matriz*. El tamaño de los bloques puede variar de centímetros a metros. “Comúnmente este tipo de formaciones ocurre en depósitos aluviales donde boleos de diferentes tamaños son rodeados por materiales arenosos, y en roca tropical meteorizada, donde bloques de roca están embebidos en suelos residuales” (Tóth, Gong, & Zhao, 2013, pág. 2).

“El mayor problema en estas formaciones es la dislocación y libre movimiento de los clastos causando problemas de estabilidad y bloqueo en las aberturas de la cabeza de corte” (Tóth, Gong, & Zhao, 2013, pág. 2).

Por ejemplo, para el caso de una TBM de tipo Mix-shield, la solución a este tipo de terrenos es contar con trituradoras en la cámara de excavación o aberturas reducidas en la cabeza de las TBM de manera que de una forma u otra se reduzca el tamaño de los clastos para su mejor manejo.

Figura 19

Frente Mixto Suelo-Bloques



Nota. Obtenido de *Boulder soil matrix mixed-face ground* de (Tóth, Gong, & Zhao, 2013, pág. 142).

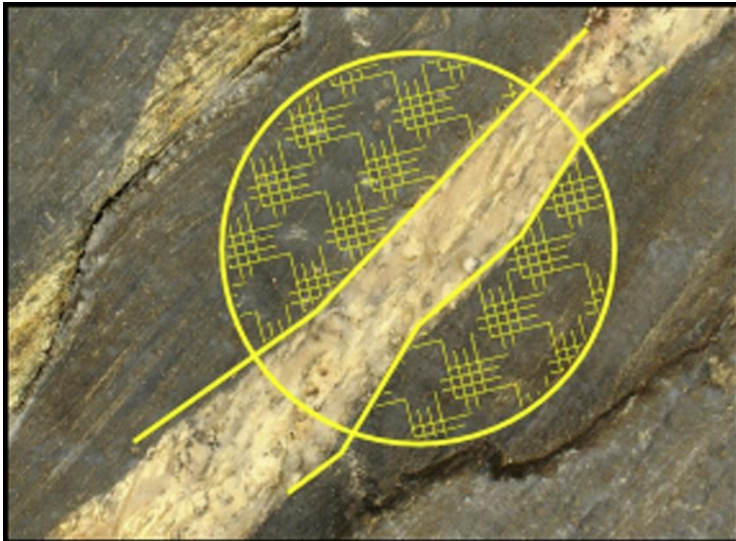
Roca Estratificada (Layered-Banded Rock, LBR)

Aquí el frente de excavación está intercalado por estratos (capas) de roca con diferencias significativas en sus propiedades mecánicas y físicas. Comúnmente se trata estratos sedimentarios, zonas de falla y cuerpos intrusivos. El comportamiento se verá influenciado por la relación de áreas y orientación de los estratos, las propiedades de los materiales y zonas de interfaz entre capas.

Dos estratos con relación UCS de 1:10 causan los mismos problemas que en una condición de interfaz: vibraciones, daños a herramientas y cabeza de corte; de igual manera se aplica una reducción a la fuerza de empuje, torque y velocidad de rotación a fin de disminuir el daño y vibración provocado por el frente mixto.

Figura 20

Frente Mixto Estratificado



Nota. Obtenido de *Layered-banded rock mixed-face Ground* de (Tóth, Gong, & Zhao, 2013, pág. 142).

Zonas de falla.

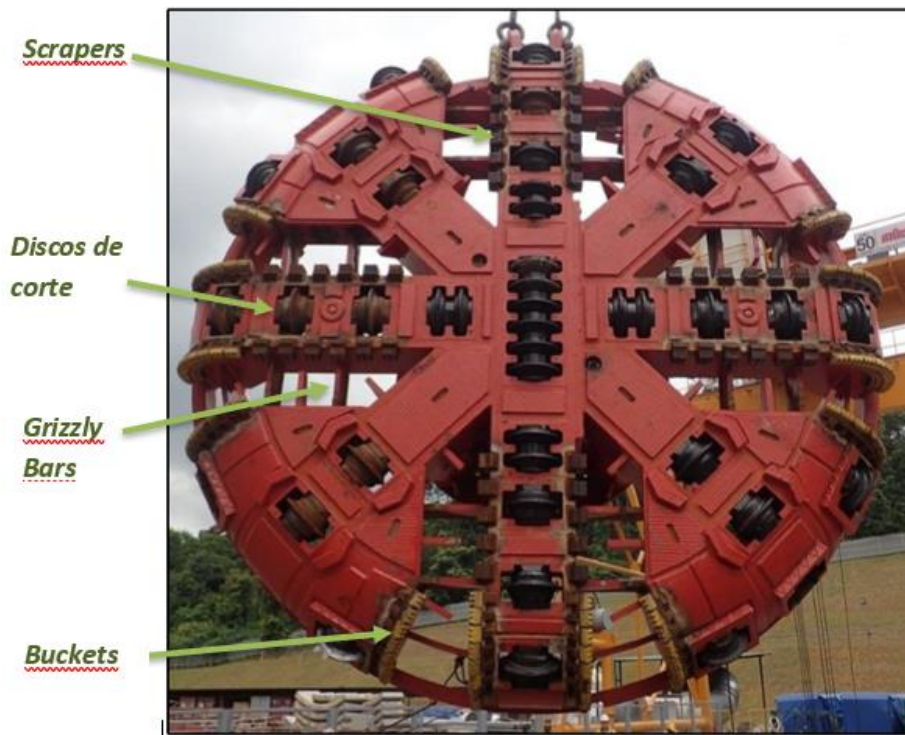
Especial atención requiere este tipo de condición al presentar riesgos de: colapsos de frente, alta presión de flujos, lavado de finos, formación de cavidades adelante o en la corona del túnel. Siendo la más seria cuando el túnel es inundado y los finos son empujados dentro del túnel, mientras los bloques de roca quedan forzados contra la cabeza de la TBM. Una mala operación de la TBM en estas condiciones sería deteniendo la máquina y rotando la cabeza, de esta manera se induce a que la falla se vacíe sobre la máquina (Barla & Pelizza, 2000). El procedimiento correcto es tratar el terreno adecuadamente mediante el uso de aditivos o espumas apropiados para este tipo de terrenos.

6.2. Tuneladoras TBM para frentes mixtos

Los escudos EPB y Slurry son utilizadas también para excavar en frentes mixtos, para eso requieren de un diseño especial en sus componentes. La cabeza de corte, por ejemplo, deben optimizarse sus aberturas de manera que se logre un eficiente retiro de la rezaga, de que se reduzcan los riesgos de atascamientos y de que se evite la entrada de grandes fragmentos de roca al pleno; por otra parte, debe poder operar tanto con discos de corte como herramientas para terreno blando: rippers y scrapers, ver Figura 21.

Figura 21

Cabeza de Corte para Frentes Mixtos de Roca y Suelo



Nota. Obtenido y adaptado de *The 6.66m cutterhead configuration* de (Connors, 2017, pág. 5).

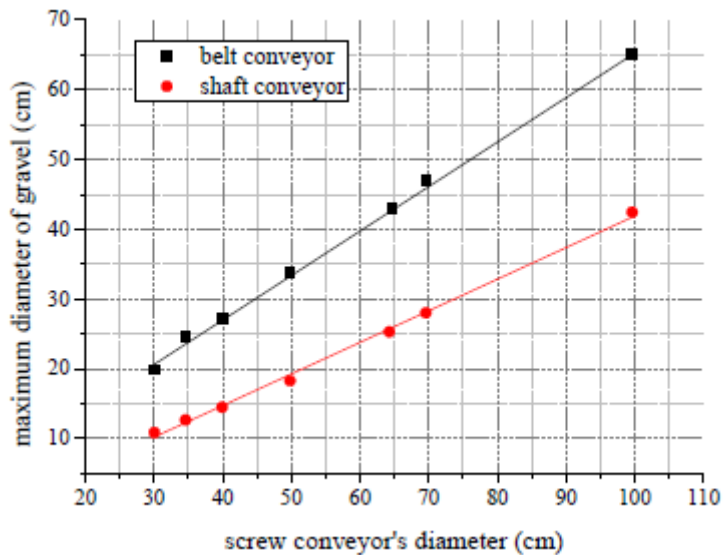
Aplicación de las EPB para frentes mixtos

Tornillo sinfín

En escudos EPB la selección del tamaño de las aberturas de la cabeza de corte debe ser consistente con el tamaño del tornillo sinfín. Existen dos tipos de tornillo: con eje y sin eje, los tornillos con eje son usados para resistir altas presiones, mientras que los segundos son ocupados para manejar partículas grandes de roca. La relación entre el diámetro del tornillo y el diámetro de las partículas de roca se muestra en la Figura 22.

Figura 22

Relación entre el Tamaño del Tornillo sinfín y el Tamaño de Partículas de Roca



Nota. Obtenido de *Relationship between screw conveyor's diameter and maximum diameter of gravel* de (Cheng, Liao, Chen, & Zhou, 2016).

Otros aspectos para considerar en el diseño del tornillo sinfín para frentes mixtos es el utilizar protecciones contra desgaste excesivo, puertas de inspección para mantenimiento y puntos de inyección de aditivos.

Cabeza de corte

El área central de una cabeza de corte es susceptible a atascamiento por arcilla. “Para las máquinas de presión de tierra (EPB), apenas hay movimiento de mezcla en el centro propiciando problemas de atascamiento. Las aberturas en el centro merecen una atención considerablemente mayor que las del área exterior”. (Maidl, Herrenknecht, Maidl, & Wehrmeyer, 2012, pág. 82)

Por esta razón en máquinas EPB de diámetro grande se han desarrollado dos cabezas de corte, una interior independiente a veces con su propio circuito de inyección. Esta rueda independiente permite una alta velocidad y dinámica de mezcla en el centro.

Figura 23

EPB con Cabeza de Corte Interna y Externa



Nota. Obtenido de (AITES, ITA, 2019). <https://tunnel.ita-aites.org/en/how-to-go-underground/construction-methods/mechanized-tunnelling/epbs-shield>

Sistema de acondicionamiento

El acondicionamiento del terreno juega un papel importante en excavación de frentes mixtos con escudos EPB, sobre todo en frentes con pocos finos y alto flujo de agua, en estas condiciones la cantidad inyectada de aditivos es alta debido a la alta permeabilidad y fluidez de la rezaga. El diseño del sistema de acondicionamiento debe considerar puntos de inyección de acondicionantes en la cabeza de corte, cámara de excavación y tornillo sinfín.

7. Operación de TBM de tipo EPB en condiciones de frente mixto (control de procesos)

Como se ha mencionado anteriormente la tuneladora TBM de tipo EPB originalmente se utilizó para excavar en suelos con un porcentaje de partículas finas mayor o igual al 30%, pero con el paso del tiempo se fue adaptando para atacar también en suelos granulares, y posteriormente se ha constatado la factibilidad de su uso en roca y en frentes mixtos. En este capítulo se mencionarán cuáles son las principales características mecánicas que debe tener y cuáles son las de control de procesos para lograr una excavación exitosa en este tipo de condiciones.

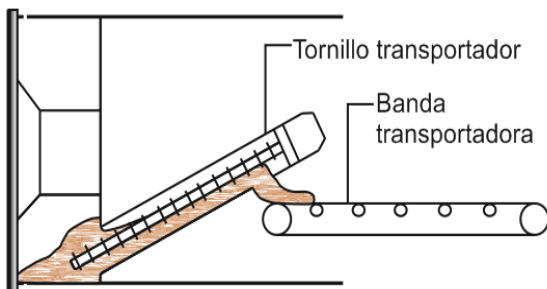
7.1. Modos de operación

Las máquinas EPB disponen de tres modos de operación dependiendo del comportamiento del terreno en el frente de la excavación:

Modo Abierto (Sin presión en el frente). Para frente de excavación estable con poca presión de agua que no cause algún problema hidrogeológico o problemas de operación del escudo. El pleno se mantiene casi vacío y solo se acondiciona el material para su transporte, para reducir el desgaste de componentes, y/o evitar atascamiento de arcilla en las aberturas de la cabeza.

Figura 24

Modo Abierto de Operación



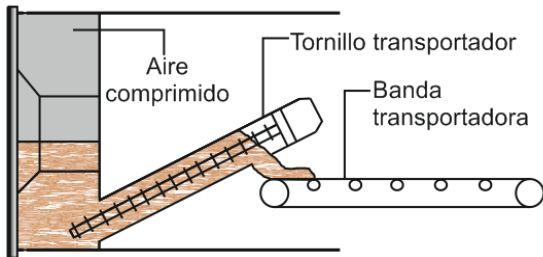
a) Modo abierto con tornillo transportador

Nota. Obtenido de Modos de operación de las tuneladoras EPB de (González Pascual, 2017, pág. 17).

Modo de transición. La cámara de excavación se llena parcialmente del material excavado, y este es presurizado con aire comprimido, el cual ayuda a reducir o evitar el flujo de agua subterránea a la cámara. Este modo es aplicable a casos de terreno muy permeable y alto flujo de agua. El principal propósito del modo de transición es para controlar los flujos de agua a través del frente.

Figura 25

Modo Transición de Operación

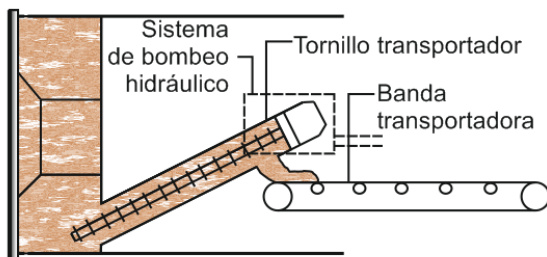


Nota. Obtenido de *Modos de operación de las tuneladoras EPB* de (González Pascual, 2017, pág. 17).

Modo Cerrado (Con presión en el frente). Para condiciones de frente inestable y/o alta presión y flujo de agua esta máquina puede ejercer una contrapresión en el frente de excavación con la saturación de la cámara de excavación. El control de la presión es determinado por la velocidad de avance del escudo, las revoluciones de la rueda de corte, la adición de espuma o arcillas al material excavado y las revoluciones del tornillo sinfín. Cuanto mayor es la presión de frente a vencer más largo será el tornillo.

Figura 26

Modo Cerrado de Operación



d) Modo cerrado

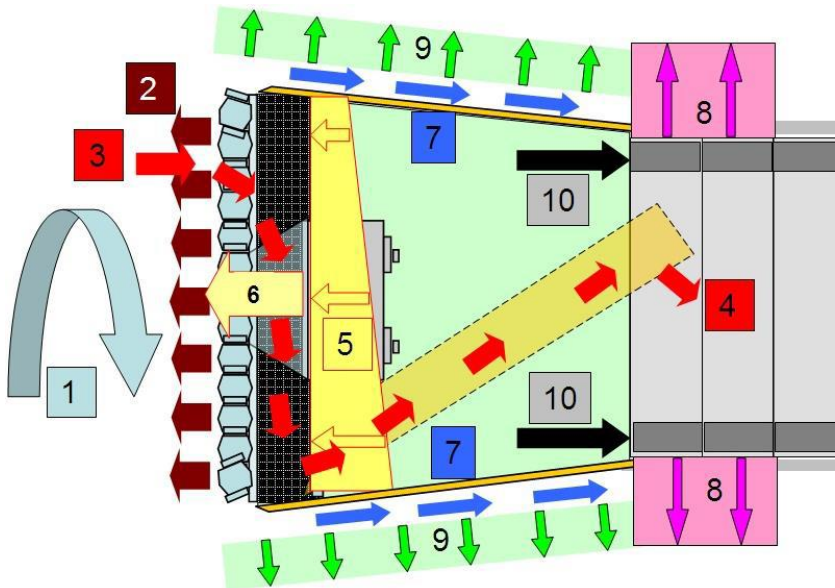
Nota. Obtenido de *Modos de operación de las tuneladoras EPB* de (González Pascual, 2017, pág. 17).

7.2. Parámetros operacionales

La operación de una TBM está íntimamente ligada tanto a las características del terreno como la de su comportamiento. La interacción terreno-tuneladora debe ser registrada, comprendida y evaluada de forma continua durante la construcción del túnel. Sólo así se consigue un eficiente Control de Procesos. Existe una estrecha interacción entre los procesos clave de la excavación con tuneladora y, al mismo tiempo, con las propiedades del suelo (Comulada & Maidl, s.f.).

Figura 27

Parámetros Operacionales de un EPB



Nota. En la figura se aprecian los siguientes parámetros: 1) Torque y velocidad de rotación, 2) Empuje de contacto, 3) Flujo de material excavado, 4) Salida del material del tornillo, 5) Presión en el pleno, 6) Fuerza resultante de la presión en el pleno, 7) Fuerzas de fricción, 8) Presión de inyección, 9) Presión a lo largo del escudo, 10) Fuerza de Empuje total. Obtenido de *Esquema de fuerzas e interacciones durante la excavación con tuneladora* de (Comulada & Maidl, s.f., pág. 5).

Velocidad de rotación de la Cabeza de corte

Se define como el número completo de vueltas que da la cabeza de corte en un minuto (rev/min), y es regulada por el torque de la transmisión. Se diseña para ser tan baja como sea posible para una penetración factible considerando que el desgaste de herramientas crece proporcionalmente con la velocidad. Diferentes rangos de velocidad son elegidos de acuerdo con el tipo de soporte de frente y el diámetro de la TBM.

Los Slurry por ejemplo rara vez exceden tres revoluciones por minuto, debido a la falta de peso de volante, cambios de resistencia y por tanto de torque, son transferidos a la conducción casi sin amortiguación.

Los escudos EPB son operados a revoluciones mayores, mientras que en roca Según Rostami & Chang (2017) la velocidad de rotación de la cabeza (V_R) es función del tamaño y límite de velocidad de los Discos de Corte (V_L), y del diámetro de la TBM D_{TBM} :

$$V_R = V_L / \pi D_{TBM}$$

Velocidad de avance

Es la velocidad de avance de la TBM medida en (mm/min), resulta de aplicar cierta Fuerza de Empuje proporcionada por los gatos a cierta Velocidad de Rotación de la Cabeza de Corte. La velocidad de avance (V_A) en suelos es mayor (50-80mm/min) en comparación al avance en excavación de roca (10mm/min).

Penetración

La penetración (mm/rev) de la TBM se define como el avance en mm por cada vuelta o giro de la cabeza de corte y es importante en condiciones de frente mixto ya que bajo tales condiciones de terreno una penetración alta origina daño excesivo a las herramientas de corte por impacto. Una penetración baja origina mayor desgaste, mientras que una penetración alta puede dañar las herramientas de corte, por lo que es importante conocer cuál es la penetración óptima para cada condición de terreno.

El nivel de la penetración se consigue ajustando la velocidad de avance y la velocidad de rotación:

$$P = V_A / V_R$$

Penetración en Suelos

En suelos los niveles de penetración son altos respecto a excavación en roca debido principalmente a su menor resistencia. En EPB una penetración bastante alta entre 20 a 40mm/rev son deseables, debido a la baja velocidad de rotación de la cabeza de corte minimizará el desgaste y la rezaga. (Thewes, 2009)

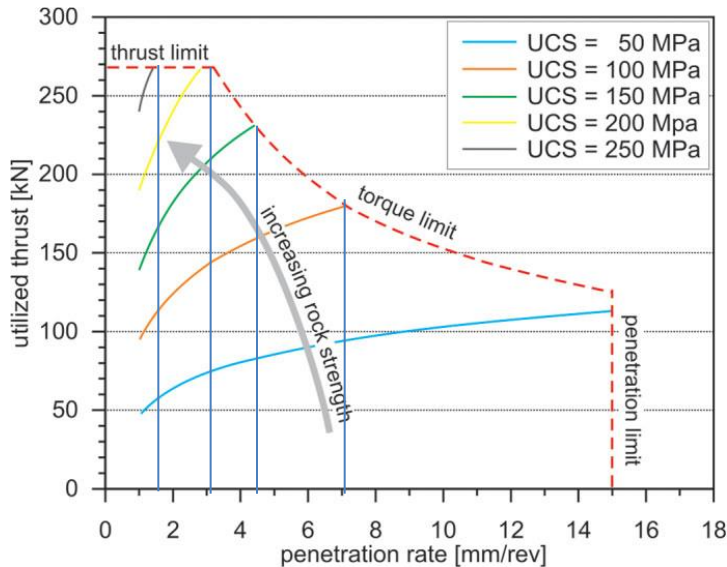
Penetración en Roca

La penetración máxima en rocas limita la capacidad de penetración permisible de los Discos de Corte instalados en la TBM, por lo general se establece que es 15mm/rev, esta penetración máxima se da en rocas de resistencia UCS < 50MPa, conforme aumenta la resistencia de la roca, disminuye la penetración debido al aumento de fricción hasta llegar a rocas con UCS > 250 MPa donde la

penetración es menor a 3mm/rev como se muestra en la Figura 28 para un Disco de Corte de 17". Tasas de penetración debajo de 2 o 2.5mm/rev son indicadores de problemas de excavación, mientras que una excavación comienza a ser eficiente cuando está arriba de 3 o 4mm/rev (Barla & Pelizza, 2000, pág. 8)

Figura 28

Límites de Penetración en Diferentes Resistencias de Roca



Nota. Límites de operación para TBM con Discos de Corte de 17". Obtenido de *Operating limits of a TBM with 17" disc cutters at different rock strengths* de (Frenzel, Käsling, & Thuro, 2008, pág. 56).

Penetración en Frentes mixtos:

El problema de una penetración alta es que aumenta el riesgo de que se presente fracturamiento por impacto excesivo sobre las herramientas de corte al pasar del material blando al material duro o por caídos de fragmentos de material duro.

Debido a las cargas de choque impuestas en los Discos de Corte, en algunos casos la rotura de los anillos de los discos y sus rodamientos puede tomar lugar. Una vez que un disco rota de una formación blanda a una dura especialmente en una relativamente alta velocidad de rotación de la cabeza de corte, los discos estarán sometidos a intensas cargas. Como una consecuencia el fracturamiento de los anillos de corte como fenómeno de astillamiento será dominante. Por otro lado, las excesivas fuerzas dinámicas y el alto momento en los cortadores llevaran a la falla en los rodamientos de los cortadores.

Figura 29

Rotura de Discos de Corte



Nota. En la figura se aprecian dos tipos de fracturamiento en Discos de Corte que se presentaron en el túnel de conducción hidráulica de la ciudad de Kerman, Irán: a) fractura del anillo de corte, b) fractura del eje. Obtenido de *Two disc cutters with secondary failure mechanisms a) Cutter ring failure b) Cutter shaft failure* de (Narimani Dehnavi, Shamsaddini, Koohsari, Akbar, & Hamidi, 2017, pág. 11).

Bajo estas condiciones la penetración permisible es determinada por los procesos de rompimiento de la parte rocosa incluso si esta ocupa un porcentaje pequeño del área. Una penetración de 15 a 25mm pueden causar grandes daños a los discos debido a las extremas cargas de impacto (Maidl, Herrenknecht, Maidl, & Wehrmeyer, 2012).

En estos casos una penetración de 5 a 7 mm/rev se ha comprobado mitiga el daño por impacto en las herramientas de corte y permite un óptimo rendimiento. La penetración va en función de la velocidad de avance y de rotación de la cabeza de corte, mientras estos parámetros sean más conservadores, entonces la penetración es suficiente pero no representa un impacto elevado que ocasione el daño de las herramientas de corte.

Fuerza de empuje

Es la fuerza ejercida para vencer el peso de la máquina (con el tren de equipos); la fricción del escudo y el terreno; la presión del frente y la resistencia del terreno para lograr el avance de la tuneladora, y es proporcionada por los gatos de empuje. El control de la fuerza de empuje radica en no aplicar una carga excesiva a los cortadores que pudiese dañarlos.

Frentes Mixtos

La implicación de excavar en condiciones de suelo-roca en el frente de excavación radica que no todos los Discos de Corte estarán en contacto con la roca por tanto habrá una repartición

desequilibrada de la fuerza de empuje, con una mayor carga en los discos apoyados en roca, esto provoca que lleguen a presentarse rotura en discos de corte por sobrecarga; entonces la fuerza de empuje que puede aplicarse va a depender del porcentaje de roca en el frente de excavación, a menor porcentaje menor fuerza de empuje y al contrario si el porcentaje es grande habrá más discos en contacto con la roca y se podrá aplicar un mayor empuje.

“Una primera aproximación nos indica que, de acuerdo con el porcentaje de roca (apoyo) en el frente de excavación, la fuerza de empuje no debe exceder la resistencia máxima de contacto que se obtiene de la suma de las resistencias de cada disco en función del porcentaje de roca en el frente. Dicho de otro modo, la fuerza de empuje no debe exceder la fuerza máxima de contacto de la suma de los discos” (Lombardo Aburto & Pérez Reyes, 2013, pág. 8).

Torque.

Es la fuerza mínima requerida para hacer girar la cabeza de corte (MNm). Un incremento en el torque es indicativo de cambio geológico, daño a herramientas de corte o problemas mecánicos en la transmisión.

Volumen excavado

El volumen del material excavado es continuamente monitoreado para evitar provocar deformaciones en superficie que puedan afectar infraestructura pública y privada, sobre todo cuando se está trabajando en zonas urbanas y cercanas a la superficie. Esto se logra monitoreando y ajustando la velocidad de excavación y regulando la descarga de la rezaga en el tornillo sinfín. Si se excava un volumen mayor al teórico de avance de la máquina se presentará un asentamiento en la superficie; por el contrario, si tenemos un menor volumen, en la superficie se estará presentando un levantamiento del terreno.

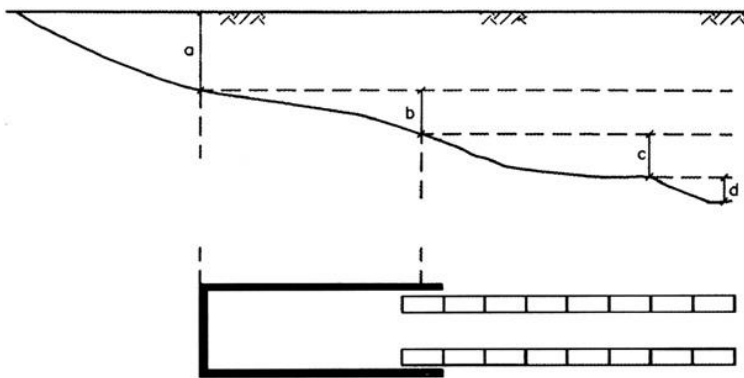
Asentamientos

Los asentamientos se explican por la *perdida de terreno*, que es definido como la diferencia entre el volumen excavado teórico y el real de la excavación. La deformación del terreno alrededor de la excavación y del frente va hacer hace que la cantidad excavada siempre sea mayor que la teorica; dicho de otra forma, la velocidad de eliminación del terreno es mayor que la velocidad de penetración.

En excavación con TBM la deformación que puede producirse se desarrolla en cuatro etapas:

Figura 30

Evolución del Asentamiento Debido al Paso de una Tuneladora



Nota. Obtenido de *Evolution of settlements along a Shield* de (ITA A. , 2007, pág. 124)

Antes de la excavación (Pérdida del frente).

El terreno en cierto punto tiende a deformarse mucho antes de que la TBM pase, provocando una pérdida de volumen del frente. La pérdida del frente es muy limitada si el túnel es adecuadamente presurizado.

Durante el paso del escudo (Perdida radial en el escudo).

La ligera sobre excavación que se hace de la sección del túnel para facilitar el avance del escudo y reducir la posibilidad de atascos, después del paso de la cabeza el terreno tiene la oportunidad de moverse radialmente hacia adentro del túnel. Dependiendo de la velocidad de deformación del terreno en relación con la velocidad de avance, el perímetro excavado puede cerrarse completamente sobre el escudo. La forma de reducir la pérdida de volumen en el escudo es inyectar el espacio existente con la bentonita usada para estabilizar el frente y/o el mortero de inyección usado en la cola del escudo para rellenar el espacio anular entre el terreno y el sostenimiento.

“Cabe mencionar que, en comparación con los Slurry, los escudos EPB presentan cierta dificultad para controlar adecuadamente los asentamientos. Esto radica que en los primeros el lodo denso ejerce presión a lo largo del “gap”, mientras que en los otros este efecto no puede conseguirse plenamente. Una mejor fluidificación en el frente va en contra de su principio de funcionamiento” (González Pascual, 2017, pág. 37).

Durante la colocación del sostenimiento (Perdida radial en el sostenimiento).

El sostenimiento que es ligeramente de menor diámetro que el escudo es erigido dentro de la TBM, y el espacio anular entre el sostenimiento y el terreno es inmediatamente llenado con mortero y/o

gravilla, así hay una nueva oportunidad del terreno para converger esta vez sobre el sostenimiento hasta que el espacio anular ha sido llenado por completo.

- **Presión de Inyección de Mortero.** Permite controlar la deformación del suelo y ofrece al sostenimiento de dovelas el confinamiento necesario para trabajar como anillo. Se deberá garantizar una presión de al menos 0.5 bar por encima a la ejercida por el terreno y el agua circundante.
- **Volumen de Inyección de Mortero.** La inyección de un volumen de mortero significativamente más alto que el teórico puede representar una condición de sobreexcavación, una filtración hacia el terreno circundante, o que ha sido deslavado por flujo de agua. Una inyección menor representa la convergencia del túnel y posiblemente asentamientos en superficie.
- **Presión de grasa.** Se debe fijar una presión superior a la del mortero de inyección para evitar la entrada de este a los sellos y que pudiese dañarlos.

Después de la colocación del sostenimiento.

La última convergencia del terreno es debida a la deformación de los anillos de dovelas, debido a diversos factores como un subdimensionamiento, o pérdida de confinamiento.

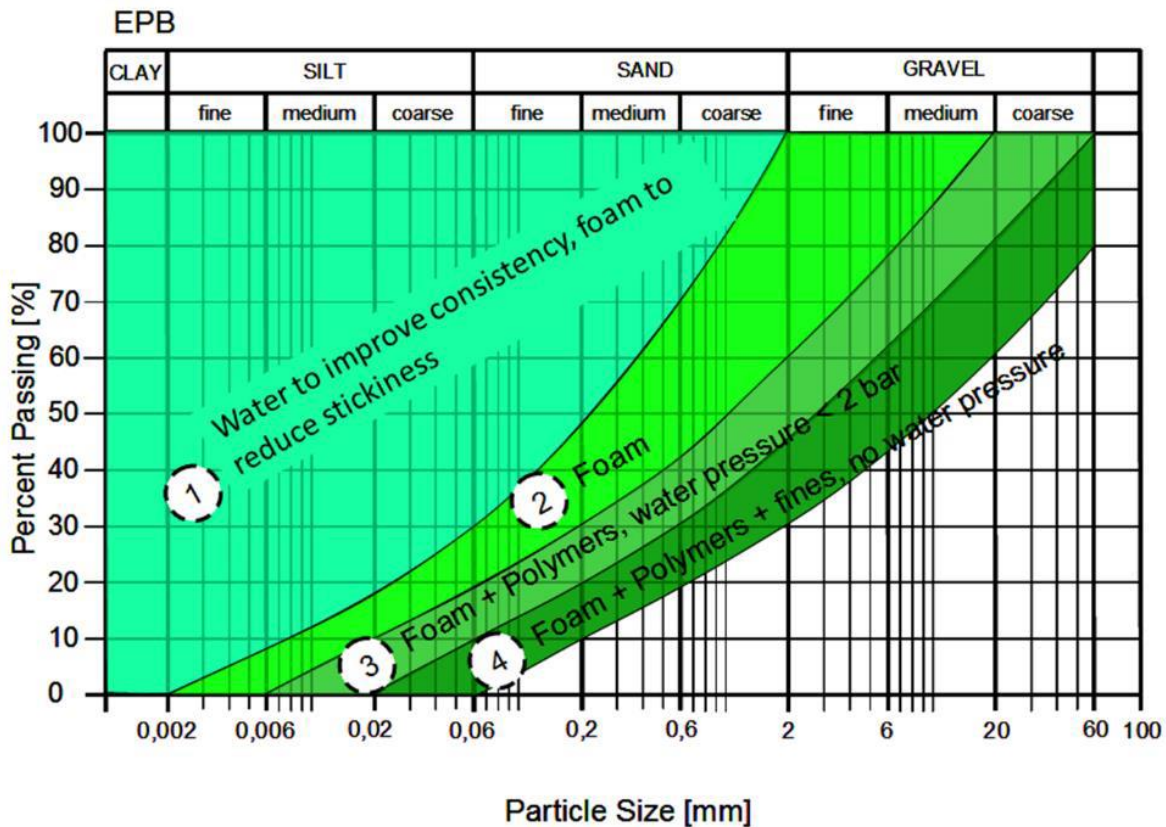
La suma de estas pérdidas de volumen influye directamente en el asentamiento total del terreno. Este volumen puede ser controlado apropiadamente con un adecuado procedimiento de operación de la TBM. La magnitud de la pérdida de volumen V_L depende principalmente del tipo de terreno y el método de excavación. En

7.3. Acondicionamiento del terreno

La característica principal del material que puede atacar un EPB es la de tener un porcentaje de partículas finas mayor o igual al 30% debido a que se requiere una mezcla plástica que sea fácil de manejar a través del tornillo sinfín. En otras condiciones de terreno se requiere usar aditivos para acondicionar el material de excavación de manera que sea manejable por la máquina, estos pueden ser principalmente espumas, polímeros y finos para aumentar el rango de aplicabilidad de la máquina a suelos granulares.

Figura 31

Tipos de acondicionamiento del terreno



Nota. La figura muestra los distintos métodos de acondicionamiento requeridos para excavación con EPB:

1. Suelos con porcentaje de finos $\geq 30\%$: Requieren de adición de agua para mejorar la consistencia y espumas para reducir la pegajosidad.
2. Suelos con porcentaje de finos entre 30 y 20%: se requiere adición de espumas
3. Suelos con porcentaje de finos entre 20 y 10% con presión de agua < 2bares: requiere adición de espumas y polímeros
4. Suelos con porcentaje de finos $\leq 10\%$ sin presión de agua: se necesita de adición de espumas, polímeros y finos.

Obtenido de *Application ranges of the EPB Shield* de (Thewes, 2007, pág. 15).

En excavación con EPB, el material excavado además debe cumplir ciertos valores referentes a consistencia y permeabilidad para poder usarse como soporte del frente de excavación, y para reducir riesgos de pegajosidad y desgaste excesivo, ver Tabla 9.

Tabla 9

Parámetros Requeridos de la Rezaga en Excavación con EPB

Parámetro	Propiedad deseada del medio de soporte	Propósito	Referencia
Permeabilidad	$K < 10^{-5}$ m/s	Para reducir el flujo de agua en la cámara de excavación.	(Abe, Sugimoto, & Ishihara, 1978)
Buena consistencia para trabajabilidad	$0.4 < I_c < 0.75$	Para asegurar comportamiento fluido.	(Maidl U. , 1995)
Mantenimiento del gradiente de presión en el tornillo sinfín	$0.6 < I_c < 0.7$	Para permitir la diferencia de presión entre la cámara de excavación y banda transportadora (dentro del escudo)	(Maidl U. , 1995)
Buena compresibilidad	Dependiente de las condiciones geológicas del terreno y dimensiones geométricas de la TBM	Para lograr un soporte homogéneo	(Maidl U. , 1995)
Tendencia de pegajosidad	$I_c < 0.5$ o $I_p < 20\%$	Para reducir la pegajosidad	(Maidl U. , 1995)
Efecto de desgaste	$I_c < 0.8$	Para reducir el desgaste	(Maidl U. , 1995)

Nota. La tabla muestra los parámetros requeridos en la rezaga para ser usada como medio de soporte en el primer rango de aplicación de los EPB. I_p denota límite plástico e I_c el índice de consistencia del suelo. Tomada de (Thewes & Budach, 2010).

En caso de que el material no posea estas propiedades en estado natural se cuenta con una gama amplia de aditivos para lograr esas características como espumas, polímeros, rellenos y lodos de finos. Estos pueden ser inyectados desde la cabeza de corte, en el pleno o en el tornillo durante la excavación y durante las paradas.

Agentes acondicionantes

Agua. Como se dijo el rango de aplicación de los EPB es en suelos con contenido de finos mayores o igual al 30%, en este rango el material se acondiciona principalmente con la adición de agua, a través de puntos de inyección situados en el pleno, el contenido de agua agregada debe permanecer entre el límite líquido y el límite plástico de tal manera que la mezcla sea maleable y poco fluida.

Lodo bentónico. El uso de bentonita en un EPB se da cuando se está trabajando en un terreno con poco contenido de finos por lo que se adiciona al material para mejorar la granulometría del material, su plasticidad, y reducir su permeabilidad.

Adicionalmente:

- Hace el frente de excavación impermeable para el aire comprimido, así permitir el vaciado del pleno para operaciones de mantenimiento en condiciones hiperbáricas.
- Mantiene la presión de diseño en el pleno durante las paradas cortas o prolongadas de mantenimiento.

Rellenos. Son esencialmente arena fina o caliza triturada fina que tiene el efecto de modificar la granulometría del material excavado haciéndolo más manejable y no tan permeable. Utilizadas en terrenos como lo son gravas uniformemente graduadas.

Cloruro de Potasio. Un método para reducir el potencial de expansividad (*Swelling*) del material arcilloso envuelve la conversión del terreno natural en uno menos absorbente de agua, normalmente por cambio específico de iones de minerales de arcilla. La adición de cloruro de potasio es un eficiente método de reducción de expansividad.

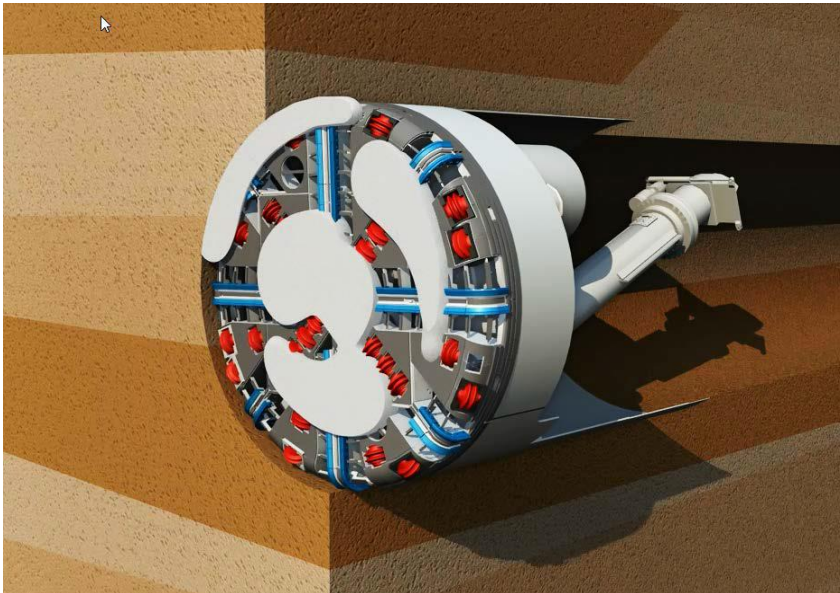
Espumas

Se trata de una mezcla de aire, agua, un agente espumante (*tensoactivo*³), y en ocasiones polímeros en diferentes proporciones dependiendo de las características geológicas y fisicoquímicas del terreno a excavar, resultan imprescindibles para reducir:

- La pegajosidad del terreno excavado y evitar así la formación de grandes bloques en la cámara de excavación,
- La fricción del terreno en la cabeza de corte.
- El desgaste en la cabeza, herramientas de corte y tornillo sinfín
- El torque de la cabeza de corte y del tornillo sinfín.
- La permeabilidad en el pleno.

Figura 32

Acondicionamiento del Terreno



Nota. En la figura se observa la inyección de aditivos al terreno a través de la cabeza de corte. Obtenido de (Lindsay, 2016).

³ Tensoactivo. Es un producto capaz de producir burbujas como el jabón, con buenas características de estabilidad bajo presión en largos periodos.

Tasa de expansión (FER). Se define como la relación entre el volumen de espuma y el volumen de la solución formada por agua y el agente espumante. El contenido de agua del terreno ya sea la inyectada o la presente de forma natural será el factor clave para la optimización de la tasa de expansión.

$$FER = \frac{\text{Volumen de espuma}}{\text{Volumen de solución}}$$

- Valores muy altos de humedad condicionan a la formación de una espuma seca (FER: 14-20)
- Alto valor de sequedad o baja cohesividad condicionan la formación de una espuma húmeda (FER: 7-10) mejorando la maleabilidad y ductilidad del material.

Tasa de tratamiento (FIR). Definida como la relación entre el volumen total de espuma inyectada en el frente y el volumen total de terreno excavado. Los valores dependen de la pegajosidad del material.

$$FIR = \frac{\text{Vol. total de espuma}}{\text{Vol. total de terreno excavado}}$$

- FIR ($\geq 60\%$) Terrenos con alta pegajosidad.

Tipos de Espumas

La Federación Europea dedicada a productos químicos de construcción y sistemas de concreto EFNARC en su publicación (Specification and Guidelines for the use of specialist products for Mechanised Tunnelling (TBM) in Soft Ground and Hard Rock) menciona los tipos de espuma que se emplean en excavación con EPB:

- Espuma tipo A: Alta capacidad dispersiva (rompimiento de enlaces de arcilla) y/o buena capacidad de revestimiento (reduce efectos de expansión).
- Espuma tipo B: Propósitos generales, con estabilidad media
- Espuma tipo C: Alta estabilidad y propiedades de anti-segregación para desarrollar y mantener un suelo cohesivo tan impermeable como sea posible.

Aditivos

Polímeros.

Su actividad química radica en la floculación de las partículas finas guardando el agua dentro de la matriz del escombros, generando así un lodo plástico, cohesivo y con un nulo efecto de pegajosidad. “Cuando se usan en una concentración de entre 1 y 3% tienden a enlazar partículas más grandes en pequeños “trozos”, lo que contribuye a un mejor manejo durante el transporte del material en la banda transportadora” (González Pascual, 2017, pág. 49).

- “Dependiendo de la concentración, estos polímeros pueden trabajar como agentes que modifican la viscosidad del material excavado para mejorar su comportamiento en el pleno” (González Pascual, 2017, pág. 49).
- “Otro de sus efectos es que reduce la rigidez de los suelos cohesivos e incrementa la estabilidad de la mezcla, por lo tanto, mejora la consistencia del material una vez que circula a través de la cámara de excavación y el tornillo sinfín. Su concentración recomendada se encuentra en orden de 0.1 a 5% en la solución espumante” (González Pascual, 2017, pág. 49).
- En presencia de un elevado contenido de *agua libre* presente en el terreno de excavación y una deficiencia de finos acusada en el mismo ($\leq 10\%$) es necesario adicionar polímeros para transformar la masa líquida en un cuerpo plástico, que permita ser transportado como un sólido moldeable y así ser descargado sin problemas por el sinfín y a través de la banda transportadora (BASF, s.f., pág. 10).
- En terrenos faltos de cohesión interna, debe aplicarse polímeros para dar estabilidad a la masa. El efecto proporcionado por el polímero es similar a un “pegado” de las partículas, de tal forma que la masa suelta adquiera cohesión y mediante la actividad de las espumas pueda ser transformada a un sólido moldeable de suficiente plasticidad (BASF, s.f., pág. 10).

Agentes desestructurantes.

“Ante la presencia masiva de arcillas de alta plasticidad en el terreno, las espumas carecen de suficiente capacidad de penetración para desempeñar su función. En consecuencia, la elevada presión y temperatura de la cabeza de corte y cámara de amasado acelera la *floculación* e incluso endurecimiento de estas arcillas, que bloquean la cabeza de corte y obligan a la intervención manual para su mantenimiento, con los costes que esta actividad implica” (BASF, s.f., pág. 12).

“Con el empleo de agentes desestructurantes, la pegajosidad de las arcillas sobre las superficies metálicas se ve sustancialmente reducida, facilitando el desescombros sin la necesidad de incrementar el contenido de agua dosificado en la cámara de excavación. Así pues, si el contenido de arcillas es elevado se precisa de la labor de un agente desestructurante que actúa rompiendo los flóculos de arcillas y evitando la formación de grandes bolos compactos que bloquearían la cámara de excavación” (BASF, s.f., pág. 12).

7.4. Atascamiento (Clogging)

Una situación común en la excavación con TBM's en frentes mixtos es el atascamiento de arcilla (*Clogging*) en las herramientas de corte, cámara de excavación y sistema de rezaga. Este fenómeno es provocado por la combinación de cuatro mecanismos: la adhesión de partículas de arcilla a superficies metálicas, la formación de puentes de partículas de arcilla sobre una abertura metálica, la cohesión de partículas y la insolubilidad de minerales arcillosos. (Thewes & Burger, 2004)

Las condiciones que influyen para que se presente este problema son:

- el contenido y potencial de adherencia de las arcillas presentes en el terreno,
- el diseño de la TBM,
- y el proceso de excavación (el agua añadida puede transformar un suelo en potencialmente pegajoso).

Este atascamiento provoca una reducción en la tasa de avance y consumo de tiempo en actividades limpieza, debido a que deriva en un malfuncionamiento en los bordes de las herramientas de corte, brazos mezcladores y en la entrada al tornillo sinfín y banda transportadora, causando una reducción a la penetración, así como a un incremento significativo en el torque en casos severos de obstrucción. Estos problemas resultan en largos y frecuentes intervenciones para limpiar las herramientas atascadas.

Figura 33

Atascamiento de Arcilla



Nota. Obtenido de (Comulada M. , Maidl, Silva, Aguiar, & Ferreira, 2016).

La evaluación del potencial de adherencia del suelo y posibles medidas de mitigación son por lo tanto una prioridad en la excavación con TBM. De acuerdo con (Hollman & Thewes, 2013) el riesgo de adherencia de un suelo se da entre el rango de consistencia Muy Blanda a Firme, con el mayor riesgo en el rango de consistencia blanda a media ($0.5 \leq I_c \leq 0.75$) ver Tabla 10, que es prácticamente el mismo rango ($0.4 \leq I_c \leq 0.75$) requerido en la excavación con EPB para que el suelo pueda ser usado como medio de soporte, por lo que el riesgo de adherencia en EPB es muy alto.

Debido a esto es muy común el acondicionamiento del suelo para reducir el atascamiento. Usualmente con un contenido de arcilla entre 20 y 40% y dependiendo del potencial de adherencia el uso de agentes acondicionantes es recomendado (Oliveira, Diederichs, Thewes, Freimann, & Aguiar, 2017).

Tabla 10

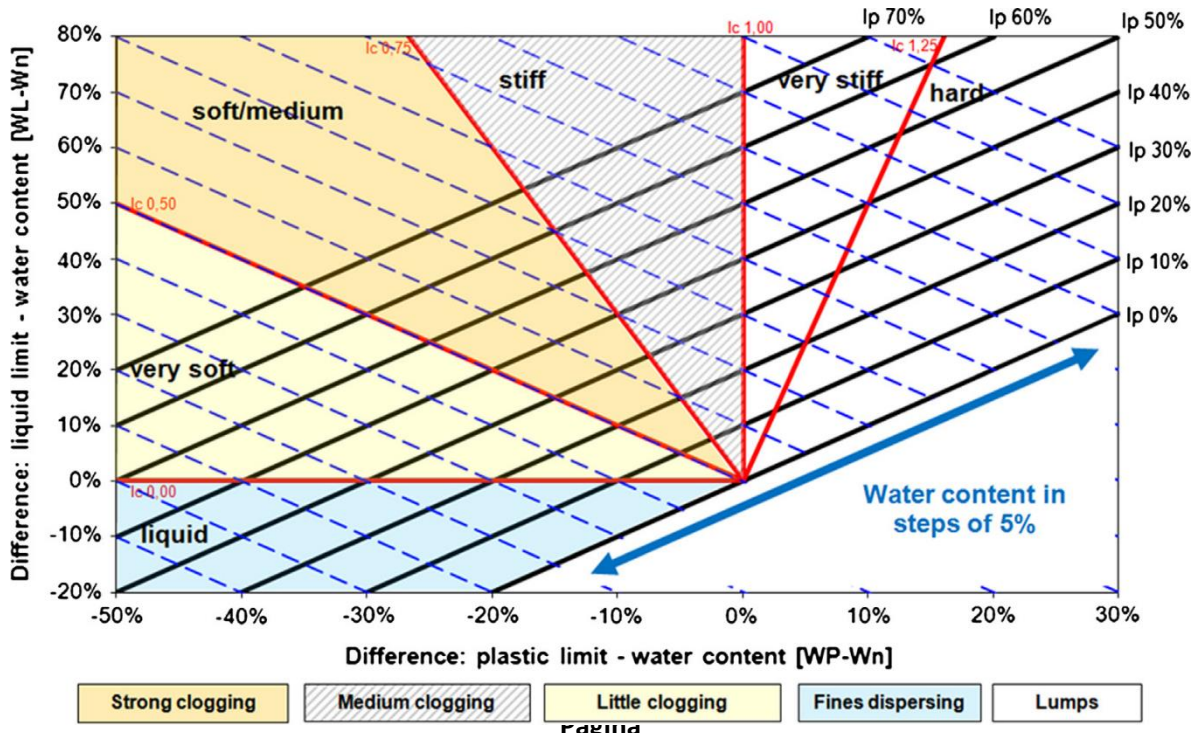
Potencial de Pegajosidad de los Suelos

Comportamiento	Ic	Consistencia	Potencial de Pegajosidad
Plástico	0 - 0.5	Muy blanda (very soft)	Bajo
	0.5 - 0.75	Blanda/Media (soft/medium)	Fuerte
	0.75 - 1	Firme (stiff)	Medio

Nota. Obtenido de (Hollman & Thewes, 2013)

Figura 34

Relación del Potencial de Pegajosidad y la Consistencia del Suelo



Nota. Obtenido de Universal classification diagram for critical consistency changes regarding clogging and dispersing de (Hollman & Thewes, 2013, pág. 102)

Atascamiento de los Discos de Corte

En frentes mixtos cuando se esta trabajando con discos de corte puede ocurrir un llenado de la caja donde se alojan los discos con material arcilloso pudiendo llevar a estos a un atascamiento de sus rodamientos. “Los discos centrales son más susceptibles al atascamiento debido a su baja relación de velocidad” (Bakhshandeh Amnieh, Saber Zamzam, & Mozdianfard, June 2016, pág. 29) en comparación de los discos perimetrales.

Dos tipos de desgaste pueden presentarse en esta situación:

Desgaste plano. Si la superficie de desgaste es lo suficientemente amplia el disco no podrá rotar en el material duro ni en el blando y el desgaste plano será dominante.

Desgaste multiplano. Por otra parte, frecuentes atascamientos y liberaciones de los discos pueden ser responsables de desgaste multiplano.

Figura 35

Desgaste Anormal en Discos de Corte



Nota. A la izquierda se aprecia un Desgaste Multiplano y a la derecha un Desgaste Plano en discos de corte utilizados en la excavación del Túnel de conducción hidráulica de la ciudad de Kerman, Irán. Obtenido de *Flat and multi-flat wear in mixed-face conditions of Kerman tunnel* de (Narimani Dehnavi, Shamsaddini, Koohsari, Akbar, & Hamidi, 2017, pág. 10).

Si la evaluación del nivel de pegajosidad del terreno no es acertada se tendrán que realizar una serie de acciones no contempladas en el proyecto para mitigar los efectos del atascamiento de arcilla, como un mayor número de intervenciones en el frente de excavación, modificaciones al tamaño de las aberturas en la cabeza de corte y el uso de una cantidad mayor de agentes acondicionantes del terreno, estas acciones pueden generar costos adicionales y retrasos no previstos.

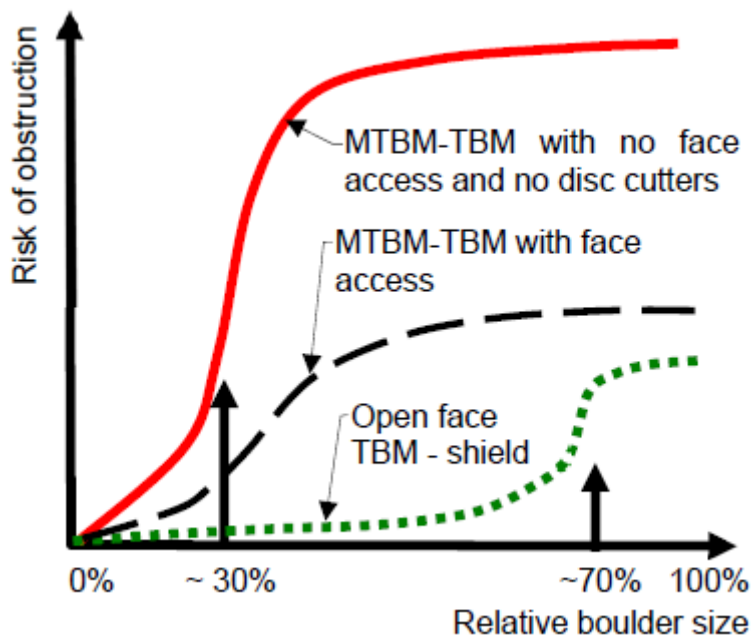
7.5. Obstrucción por bloques

Los bloques y boleos generalmente forman parte de las más fuertes, resistentes y abrasivas clases de roca, razón por la que resisten el desgaste del transporte geológico y los procesos de intemperismo. Su fragmentación es difícil sobre todo si están incrustados en una matriz blanda y problemas de obstrucción en la cabeza de corte son muy frecuentes.

El riesgo de obstrucción por bloques crece con el tamaño relativo de los bloques cuando estos se encuentran entre un 20 y 40% del diámetro de excavación, debido al límite de tamaño de bloques que pueden pasar a través de las aberturas de la cabeza de corte y ser triturados o digeridos por el sistema de rezaga. En la Figura 36 se observa que una TBM o Micro TBM (MTBM) sin acceso al frente o discos de corte tiene un mayor riesgo de ser obstruida que otros tipos de TBM.

Figura 36

Riesgo de Obstrucción por Bloques



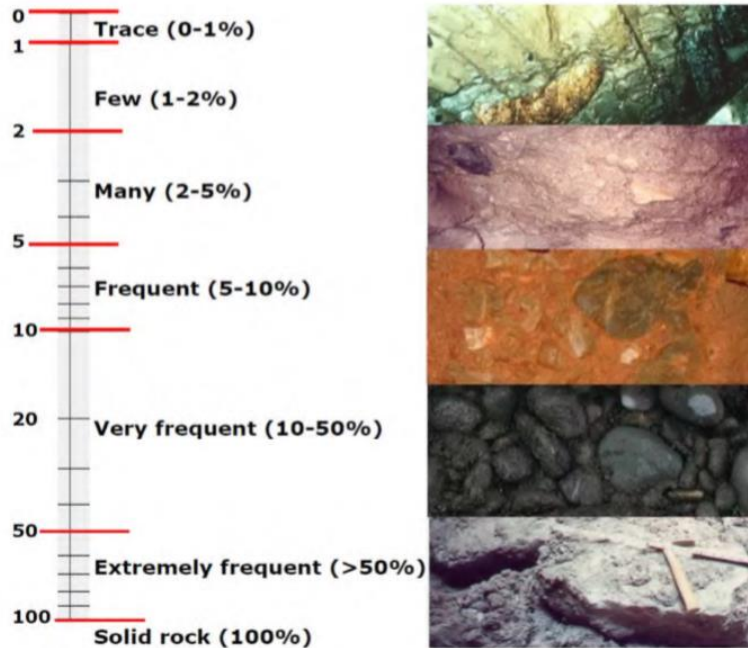
Nota. Obtenido de *Risk of boulder obstruction* de (Hunt, 2017, pág. 14).

Porcentaje de Bloques (Boulder Volume Ratio, BVR)

Se define como el porcentaje de Bloques respecto al volumen excavado; y combinado con una estimación de la distribución de tamaños es un método efectivo para expresar su ocurrencia. Altos valores de BVR son comúnmente hallados dentro de 5 pies sobre el lecho de roca, taludes, y en depósitos aluviales.

Figura 37

Frecuencia de Clastos en el Terreno



Nota. Obtenido de *Relative boulder volume ratios* de (Hunt, 2017, pág. 4).

Porcentaje de Boleos (Cobble Volume Ratios, CVR)

La cantidad y porcentaje de boleos (CVR) son generalmente más grandes respecto a los bloques. Una razonable regla de dedo es asumir que $CVR=3*BVR$.

Situaciones de desprendimiento, fracturamiento o ingestión de bloques y boleos

En orden para atravesar un terreno de bloques y boleos estos deben pasar apropiadamente por tres sitios: la cabeza de corte, la cámara de excavación y el sistema de rezaga: tornillo sinfín, banda transportadora, bomba de lodos o líneas de tuberías. Los clastos deben ser excavados y posiblemente fracturados por uno o más de los siguientes métodos:

- Arrancados del terreno usando Rippers, Scrapers o Discos de Corte y luego transportados a través de las aberturas de la cabeza de corte a la cámara de excavación para ser triturados antes de entrar al sistema de rezaga. Este método aplica para TBM tipo Slurry.
- Arrancados y empujados a un lado cuando no pueden pasar a través de la cabeza de corte y la matriz es blanda y lo suficientemente suelta. Los bloques pueden rodar en la cabeza de corte por largas distancias antes de ser empujados a un lado.
- Fracturados y rotos usando Rippers, Scrapers y/o Discos de corte antes de ser arrancados y llevados a través de la cabeza de corte para ser triturados o transportados a un tornillo sinfín o descargados en una banda transportadora.
- Entrando desde la cámara de excavación o desde un pozo o túnel de rescate y luego manualmente fragmentar y remover los bloques.
- Empujados dentro de un pozo temporal construido debajo del túnel en el frente de excavación.

Impactos en la tasa de avance

Las tasas de avance generalmente son más bajas en zonas con presencia de bloques y boleos debido a cuatro factores:

- Tasas de penetración bajas que generalmente son requeridas para cortar los bloques y boleos en clastos más pequeños en lugar de arrancarlos o para evitar soportar grandes fuerzas de impacto en los cortadores.
- Tasas de avance reducidas para permitir a los trituradores de roca triturar los clastos y al sistema de rezaga removerlos desde la cámara de excavación y evitar el bloqueo de la cabeza de corte.
- Retrasos para fragmentar o remover manualmente los bloques.
- Demoras para reemplazar los cortadores desgastados o reparar la cabeza de corte o sistema de rezaga.

Consideraciones de las herramientas de corte

La selección de los cortadores en terreno con bloques y boleos depende del porcentaje de estos, su tamaño relativo, su resistencia y abrasividad; así como las características de la matriz de suelo, de los costos por reemplazo de los cortadores y tasas de avance.

Los discos de corte dobles o múltiples con insertos de carburo resultan efectivos en terrenos de bloques y boleos. Los discos de corte múltiples proveen un área grande para enganchar bloques y ayuda a minimizar el arrancamiento prematuro, también son más fáciles de mantener girando y más resistentes a derrapar y a daños por impacto. La experiencia en perforación de varios túneles muestra que se pueden tratar los bloques y boleos con los Discos de Corte siempre y cuando estén

firmemente unidos a la matriz circundante. Dependiendo el tamaño del bloque, el proceso de ruptura puede ser como formación de astillas de roca (*chips*) como en roca dura o dividiendo la roca en pedazos (Maidl, Herrenknecht, Maidl, & Wehrmeyer, 2012).

“La combinación de Discos de Corte, Rippers y Scrapers es generalmente más efectivo en terreno donde la suma de CVR +BVR está en el rango de 1 a 10 % y donde los bloques son pequeños. Cuando el BVR está sobre 5% y cuando el tamaño de los bloques es mayor al 30 o 40% del diámetro excavado entonces los discos de corte deben usarse como herramientas principales de corte” (Hunt, 2017, págs. 17,18) .

Implicaciones contractuales

Debido a que el túneleo en bloques y boleos es más costoso, una cuestión importante es como compensar al contratista de la mejor forma. Para los casos en el que el porcentaje estimado de CVR+BVR es menos del 1% y donde el máximo tamaño relativo de los bloques se espera sea menor que el 25% del diámetro de excavado y cuando la TBM este equipada con un apropiado torque, cortadores, trituradores, protección antidesgaste o accesos al frente, el costo de excavación es generalmente incidental y el pago es parte del precio unitario (Hunt, 2017).

Por otra parte, un método para compensación por obstrucción debido a bloques y boleos debe considerarse. La experiencia indica que definiendo un precio por obstrucción en la etapa de oferta es generalmente más rentable que pagar por el como parte de una reclamación de *condición física inesperada*.

Dos métodos de compensación por obstrucción son los más comunes:

- Uno es ofertar un precio unitario por obstrucción, este puede variar dependiendo de los rangos en el tamaño de los bloques, de los accesos al frente, profundidad del túnel y restricciones de pozos de rescate.
- Otro método es ofertar tarifas unitarias por retraso de tiempo para acceder y remover las obstrucciones, un estimado del total de horas de obstrucción deberá ser referenciado en el GBR⁴ y listado como concepto de pago en el contrato; así como que califica como una obstrucción y cómo será medido en campo.

La experiencia ha mostrado que el método de tarifa unitaria de tiempo de remoción es más rentable si está disponible el acceso al frente. Esto reduce el riesgo del contratista resultando en una mejor oferta que el método de precio unitario por obstrucción. El costo adicional de túneleo en bloques y boleos será minimizado si el riesgo es apropiadamente referenciado y gestionado por una selección de la TBM tomando en cuenta los accesos al frente, diseño de la cabeza de corte, tipos de cortadores y capacidad de torque y empuje (Hunt, 2017).

⁴ Ver capítulo 8.2

7.6. Alta Abrasión

La abrasión puede ser definida como un proceso que causa remoción o desprendimiento de material de una superficie sólida, el cual deriva en un desgaste (Alber, y otros, 2013). En una TBM el fenómeno se da por el roce de los minerales presentes en el terreno contra las superficies metálicas de las herramientas de corte, la cabeza, el mamparo, las barras mezcladoras, y el tornillo sinfín.

El nivel de desgaste dependerá por una parte de la dureza y porcentaje de los minerales presentes en el terreno, y por otro lado del tipo de material expuesto a ellos. Dentro de los minerales más comunes que uno puede encontrar en rocas y suelos es el cuarzo que es un mineral muy duro.

Otra fuente de desgaste que afecta a las TBM independiente del terreno son los lodos usados como soporte en las máquinas tipo Slurry o como agentes acondicionantes en las EPB, ya que estos contienen un porcentaje de arena que habitualmente consisten de partículas de cuarzo lo que favorece el desgaste en los elementos de rezaga como el tornillo sinfín o las tuberías de rezaga de los Slurry, por lo que también debe considerarse su diseño contra el nivel de abrasión y la cantidad de desgaste esperada para calcular costos y tiempos de mantenimiento.

Abrasividad en suelos

En suelos, la composición mineralógica y la resistencia son relevantes para el desgaste de las herramientas, pero también la distribución granulométrica y la forma de la partícula. La prueba *LCPC*⁵ ofrece un método de evaluación de abrasividad en suelos.

Tabla 11

Clasificación de Abrasividad en Suelos

LCPC Índice	Clasificación
< 500	Muy Baja
500 – 1000	Baja
1000 – 1500	Media
1500 – 2000	Alta
> 2000	Muy Alta

Nota. Obtenido de (Büchi, 1995)

⁵ Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

Abrasividad en Roca

La Prueba de Abrasividad *CERCHAR* es usada en rocas para determinar su nivel de abrasión, esta proporciona un índice llamado *CERCHAR Abrasivity Index (CAI)*. La clasificación de Abrasividad en rocas está dada en la Tabla 12.

Tabla 12

Clasificación de Abrasividad en Rocas

CAI	Clasificación
0.1-0.4	Extremadamente Baja
0.5-0.9	Muy Baja
1.0-1.9	Baja
2.0-2.9	Media
3.0-3.9	Alta
4.0-4.9	Muy Alta
≥5	Extremadamente Alta

Nota. Obtenido de (Alber M. et al, 2013)

Abrasividad en Frentes mixtos

Mendaña Saavedra, (2012) menciona que los efectos de la abrasividad de frentes mixtos pueden ser mucho más desfavorables que los frentes de roca dura debido que al pasar de una formación a otra produce pequeñas roturas del filo de los cortadores que incrementan rápidamente el desgaste. Además, la optimización de los parámetros operacionales de la TBM para un menor desgaste es más difícil de lograr debido a la variabilidad de estos frentes.

Como sea la caracterización de las propiedades abrasivas del terreno juegan el rol más importante en el desarrollo de estrategias efectivas para manejar el problema del desgaste como pudiera ser un acondicionamiento del terreno, emplear materiales más resistentes a la abrasión, la optimización de la abertura de la cabeza de corte y el largo del tornillo (un tornillo largo o dos implica más material desgastado) de manera que la rezaga este el menor tiempo en contacto con estos componentes, y placas de protección a la cabeza, mamparo y tornillo.

Abrasividad de Bloques y boleos

La abrasividad de bloques y boleos necesita ser considerada, particularmente cuando se tiene un $BVR > 5\%$ o cuando la suma de $CVR + BVR$ es mayor al 2%. Esta alta concentración de bloques y boleos se espera tengan impacto en las tasas de avance, vida de los cortadores

Desgaste Secundario (Cabeza de corte)

Un riesgo de la excavación en terrenos altamente abrasivos es el desgaste secundario, que es el desgaste de la cabeza de corte. Ocurre cuando el desgaste primario (de las herramientas de corte) es excesivo.

Con el fin de proteger la cabeza de corte contra el desgaste, comúnmente se adiciona insertos de metal resistente (placas antidesgaste), sin embargo, cuando no se toman oportunamente estas medidas, se tiene que recurrir a acciones de corrección, que pueden ser trabajos de resoldadura, torneado y rectificado

Figura 38

Desgaste por Abrasión



Nota.

Desgaste de la cabeza de corte y operaciones de soldadura en el túnel de conducción hidráulica de Kerman, Irán: a) desgaste de placa antidesgaste, b) desgaste de la protección de las calzas de los discos de corte.

Obtenido de *Cutterhead wear and the welding operations* a) *Damages to the wear protection plates around the buckets* b) *Damages to the disc cutter wear protection wedges* de (Narimani Dehnavi, Shamsaddini, Koohsari, Akbar, & Hamidi, 2017, pág. 11).

.El problema de la abrasión deriva en retrasos y sobrecostos en demasiados contratos de túneles debido a:

- Mala evaluación del nivel de abrasión y de desgastes de componentes de la TBM origina una mala estimación de tiempos y costos requeridos para cambio de herramientas.
- Mal diseño contra la abrasión de las herramientas de corte y componentes de la TBM origina un incremento de costos por consumo de cortadores y cambios.
- Mal programación de las tareas de inspección y mantenimiento (se pueden prever sensores para verificar el nivel de desgaste) origina el desgaste excesivo de los cortadores lo que

puede repercutir en reducción de la tasa de avance desembocando en retrasos, además de daño y desgaste a la cabeza de corte con sus propias implicaciones en costos y tiempos.

- Falla en dar las apropiadas inspecciones y mantenimientos por parte de los contratistas. Dejar una herramienta de corte dañada o con excesivo desgaste puede originar el rápido deterioro de las demás herramientas.

7.7. Alta presión y flujo de agua en el frente de excavación

El agua subterránea se encuentra almacenada en el subsuelo en diversas formaciones geológicas y a diferentes niveles de profundidad, dependiendo de las características de cada formación el agua puede fluir con facilidad o no. En formaciones geológicas como suelos granulares, cavidades cársticas, rocas muy fracturadas y zonas de fallas el agua puede almacenarse en grandes cantidades y fluir con mucha facilidad; y dependiendo de la presión a la que se encuentre puede provocar serios problemas en la excavación con TBM. Los factores principales relacionados al flujo de agua y lodo son la presión de agua, la fuente de suministro (cantidad de agua almacenada), la facilidad de flujo (permeabilidad) de la estructura geológica, las dimensiones de la excavación y los impactos meteorológicos (Zhao, Li, & Tian, 2013).

Tabla 13

Presencia de Agua en las Excavaciones y su Influencia en la Estabilidad

Condición de la excavación	(RMR) Flujo Por 10m de túnel (l/min)	Tasa de flujo (lts/seg/m)	Influencia en la estabilidad de la excavación
Húmeda (Damp)	<10	<0.02	Tiene menor influencia en la estabilidad.
Mojada (Wet)	10-25	0.02-0.04	
Goteo de agua (Dripping)	25-125	0.04-0.21	Discontinuidades desfavorables con goteo pueden influir en la estabilidad.
Flujo de agua (Flowing)	>125	>0.21	Puede influir claramente en la estabilidad de la excavación, y en la seguridad de los trabajadores.

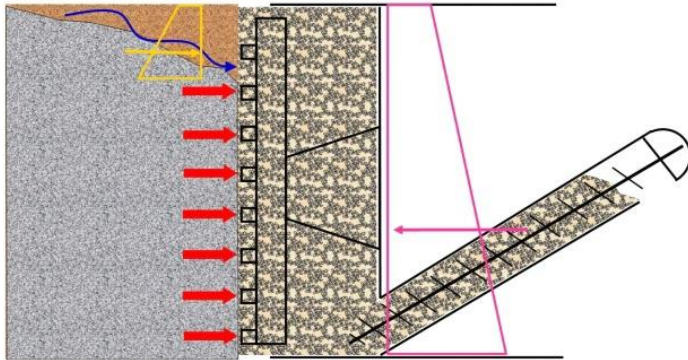
Nota. Obtenido de la Clasificación Rock Mass Rating (RMR).

EPB en Frente Mixto con Alto Flujo de Agua

En una situación donde la roca cubre la mayor parte del frente y una pequeña parte de suelo permanece con un significativo flujo de agua, se requiere operar el EPB en modo cerrado y crear un soporte del frente con el material excavado que consiste principalmente de astillas de roca con muy poca cantidad de finos, resultando en un extremo desgaste y grandes espacios entre partículas de roca haciendo muy difícil estabilizar la rezaga contra el flujo de agua; McFeat Smith (2001) menciona el gradiente de presión necesario a lo largo del tornillo sinfín que se requiere en esta situación no puede ser creado, esto resulta en un incontrolable flujo de agua dentro de la cámara, incrementando la oportunidad de erosión e inestabilidad en la zona de suelo.

Figura 39

EPB en Modo Cerrado con alta cantidad de Roca y alto Flujo de Agua.



Nota. Obtenido de *EPB-shield in mixed face geology with high amount of rock (closed mode)* de (Thewes, 2004)

Fluidificación excesiva del material.

El flujo excesivo de agua puede causar dificultades en la consistencia del material provocando que no se pueda formar una adecuada contrapresión en el frente. Al respecto Comulada M. (2018) comenta “Sin un control activo sobre la presión del material de rezaga en la cámara de excavación, se producen expulsiones descontroladas a presión por el tornillo sinfín que impiden un avance continuo del escudo, que debe interrumpirse continuamente y además provocan el desborde de material extraído en la banda transportadora. El desborde de rezaga causa largos tiempos de parada para limpiar la zona inferior del escudo, donde deben instalarse las dovelas debido a la acumulación de material”

Figura 40

Fluidez Excesiva de la Rezaga

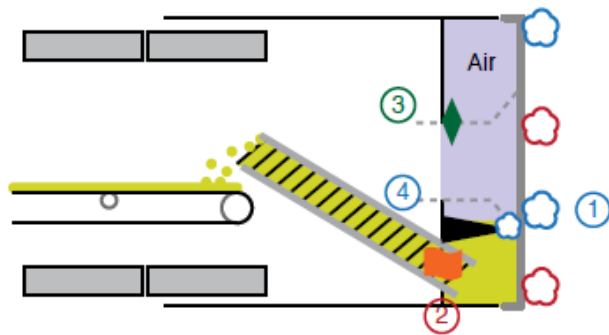


Nota. Obtenido de *Fluidificación de la rezaga por presencia de flujos elevados de agua* de (Comulada M. , 2018, pág. 20)

Con el objeto de controlar la presión hidráulica en la cámara de excavación y mejorar la consistencia de la rezaga se opta por trabajar el escudo en modo de Transición con aire comprimido y acondicionar el terreno por medio de polímeros, espumas y bentonita desde la cabeza de corte, cámara de excavación y tornillo sinfín. El acondicionamiento del material en el tornillo es una respuesta eficiente y rápida para cambios súbitos en las propiedades del terreno.

Figura 41

Modo de Operación de Transición y Acondicionamiento del terreno



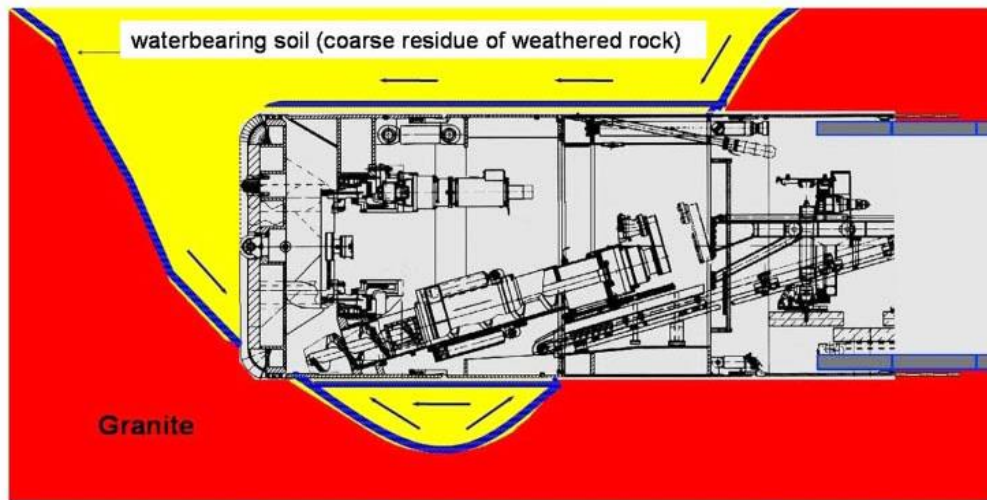
Nota. 1) Acondicionamiento con espumas y suspensión de bentonita en la cabeza de corte, 2) Inyecciones de suspensión de bentonita en el tornillo sinfín, 3) Inyección de polímero a través del mamparo estanco, 4) Inyección de espumas en la cámara de excavación. Obtenido de *Esquema de acondicionamiento en combinación con la inyección de aire comprimido en condiciones de elevadas presiones de agua* de (Comulada M. , 2018, pág. 21)

Erosión del mortero de inyección.

La afluencia excesiva de agua en la zona circundante a la excavación también puede ocasionar la erosión del espacio anular de la excavación y de la inyección del mortero. Cuando ninguna presión de soporte es mantenida en la excavación, el mortero puede comenzar a fluir desde la parte trasera del escudo hacia el interior de la cámara debido a la falta de presión en el frente. Como consecuencia adicional, ingresos de agua pueden ocurrir y los anillos de dovelas pueden no ser completamente cubiertos de mortero resultando en grandes deformaciones del anillo.

Figura 42

Ingreso de Agua desde el Faldón

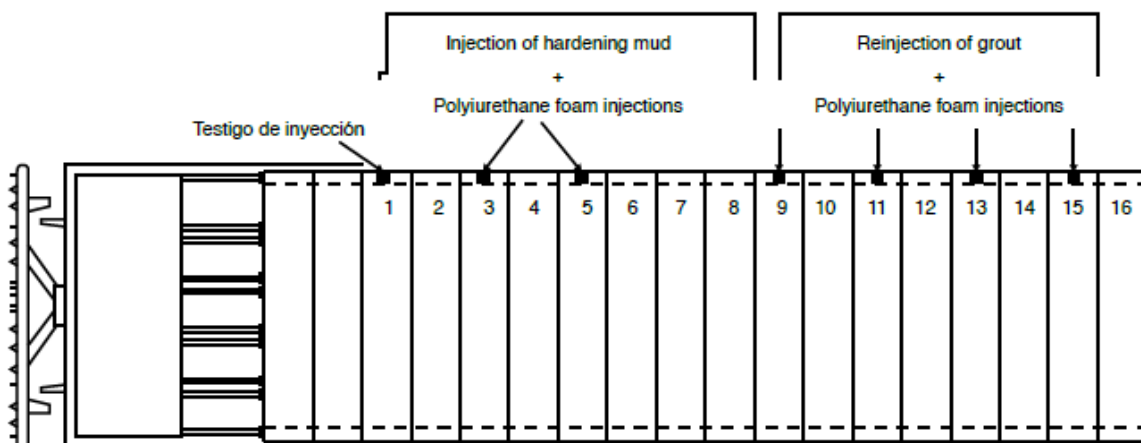


Nota. Obtenido de *EPB-shield in mixed face geology with water ingress from the tail skin* de (Thewes, 2004)

La solución que se ha adoptado para reducir el flujo de agua ha sido la reinyección de mortero y espumas de poliuretano desde los anillos, para esto los segmentos de anillos tienen que ser equipados con aberturas especiales de inyección incluyendo una válvula para evitar el reflujó del mortero.

Figura 43

Reinyecciones en los Anillos de Dovelas



Nota. Obtenido de *Esquema de las campañas de reinyecciones para reducir los flujos de agua provenientes de la parte trasera del escudo* de (Comulada M. , 2018, pág. 21)

Diseño de la TBM

La alta presión de agua en el frente requiere de un diseño con características especiales para reducir o evitar el flujo de agua: un sistema de sellado del rodamiento principal para soportar las grandes presiones de agua, un sistema de drenaje para reducir la presión en la cámara de excavación y un sistema de inyección de mortero en el espacio anular entre los anillos de dovelas y el terreno. Además de esto, desde el punto de vista del control de procesos, se debe garantizar una correcta operación en términos de las presiones de inyección de mortero, la presión de la grasa de cola y el conocimiento preciso de la presión de frente. Es decir, la presión de inyección de mortero debe superar a la de inyección de grasa de cola y éstas, a su vez, deben superar a la presión del frente de excavación para garantizar que el agua de la formación no ingrese al interior de la tuneladora.

Implicaciones Contractuales

Finalmente, en lo que respecta a la presencia de agua en la excavación es esencial la provisión de sumas para el pago del contratista en el manejo de flujo de agua. Algunos expertos comentan que el contrato debe incluir un concepto de pago separado para el manejo del agua con una tarifa de pago calculada con base en la cantidad de agua tratada. Otros prefieren la inclusión de un concepto de pago el cual solo es efectivo cuando la cantidad manejada de agua excede una cantidad especificada para un periodo de tiempo dado. El objetivo de este tipo de provisión es que el manejo de cantidades “normales” de agua debe incluirse en la oferta general del contratista; pero en orden de evitar grandes contingencias, inusuales cantidades de flujo de agua son pagados por separado por el propietario. (Hoek, 1982)

7.8. Intervenciones en el frente de excavación.

Una intervención en el frente es un paro en las actividades de excavación para el mantenimiento, cambio de herramientas y/o reparaciones a la cabeza de corte. Dichas actividades son realizadas dentro del pleno de manera que si este se encuentra lleno, el material debe ser vaciado a un nivel tal que se genere un adecuado espacio de trabajo. En el caso que la estabilidad del terreno permita acceder en abierto a la cámara, no es necesario tomar medidas adicionales en este caso las actividades son conocidas como *intervenciones atmosféricas*. En caso contrario, conviene inyectar aire a presión para estabilizar el terreno y tomar las medidas de precaución necesarias para este tipo de trabajos, conocidos como *intervenciones hiperbáricas*.

Intervenciones atmosféricas

Situación en el que el frente de excavación es estable por lo que el vaciado de la cámara no requiere ningún tipo de tratamiento de estabilización del frente. El procedimiento de intervención inicia con la limpieza e inspección de los cortadores, es esencial que todos los discos sean rotados 180° para revisar cualquier zona plana o que se encuentren bloqueados. El criterio para decidir si se cambia

un disco de corte que no se encuentre dañado es su límite máximo de desgaste. González Páez (2014) comenta que según las recomendaciones de los fabricantes, el límite máximo de desgaste para un disco de corte de 17" es de 25mm y para un disco de corte de 19" generalmente es de 30mm, sin embargo la posición de estos en la cabeza puede reducir este límite. Los discos que se encuentran en las orillas tienen un menor desgaste permisible, cuando uno de estos requiera ser cambiado debe ser movido a una posición frontal o central donde el límite de desgaste es mayor.

Es recomendable que los cortadores sean cambiados en grupos para evitar cargas excesivas en ensambles individuales y tener el uso más eficiente de los cortadores en el tiempo de cambio. Si un cortador se bloquea o se desgasta prematuramente es recomendable reemplazarlo por otro que este parcialmente desgastado para evitar el desgaste excesivo entre anillos (González Izquierdo, 2018).

Conocer los tiempos requeridos para realizar las intervenciones es fundamental en la etapa de planeación y licitación del proyecto, ya sea para estimar el costo por intervención o fijar una tarifa por hora de intervención, además de requerirse para realizar su programación. A este respecto González Páez (2014) menciona algunos parametros para analizar los tiempos de intervenciones:

"El tiempo que se emplea en el recambio de un disco de corte puede ser estimado en función del diámetro del disco y algunos autores consideran que para discos de 17" de diámetro se tarda 45 minutos en hacer el recambio mientras que para discos más grandes se estima una demora de 50 minutos o más" (pág. 130).

Intervenciones hiperbáricas

Técnica mediante la cual se puede incursionar en un medio con presión mayor a la atmosférica valiéndose de diferentes métodos y equipos (SSI DIVING SERVICES, 2015). En situaciones con terreno inestable si la intervención tiene que llevarse a cabo, el frente del túnel tiene que ser soportado con aire comprimido (Thewes, 2009). Los trabajos de aire comprimido en la cámara de excavación son llamados Intervenciones hiperbáricas y pueden presentar serios peligros a la salud del personal. (Herrenknecht & Bäßler, 2007). Es absolutamente esencial para la seguridad y entrega exitosa de los trabajos hiperbáricos que las implicaciones de tener que emprender tales actividades sean consideradas por el propietario del túnel, sus asesores y contratistas desde muy temprano en el proceso de planificación y diseño del proyecto. Es importante en este momento considerar en principio las técnicas de intervención que se llevaran a cabo, ya que los requisitos de las técnicas hiperbáricas seleccionadas afectan el diseño del túnel y la TBM (AITES ITA, BTS, 2018).

Planeación de una Intervención Hiperbárica

El contratista principal del proyecto debe tener el control general de la gestión de los trabajos hiperbáricos; sin embargo, debido a la elevada especialidad de los trabajos es posible subcontratar una empresa especializada que se encargue de llevar a cabo las actividades y de verificar todos los equipos, materiales y condiciones necesarios.

El contratista de los trabajos hiperbáricos debe prever un procedimiento de respuesta de emergencia con personal capacitado y equipado para realizar rescate dentro del ambiente presurizado. Por otra parte, debe notificarse a los servicios públicos de emergencia que en la zona se están realizando operaciones hiperbáricas.

Se debe nombrar un médico para asesorar los aspectos de salud, este deberá tener competencia en medicina hiperbárica. Antes de ingresar a la tuneladora, el personal será evaluado por el médico especialista, el cual certificará que cumplan con las condiciones necesarias para tolerar los efectos físicos y fisiológicos consecuencia del ambiente hiperbárico. Asimismo, durante la intervención, este mantendrá comunicación con los técnicos operadores de cámaras, y coordinará la atención médica pre-hospitalaria en caso de un accidente de enfermedad por descompresión o una lesión de gravedad.

Procedimiento de entrada al frente en EPB

En terreno permeable el material excavado en la cámara de excavación debe ser mezclado con lodo bentonítico durante el último ciclo de avance antes del vaciado del pleno y la entrada a la cámara de excavación; esto con el fin de formar una capa de lodo que selle los poros del terreno y se evite la fuga de aire a través de ellos. En terreno cohesivo la rezaga acondicionada en el pleno puede ser vaciada sin inyección previa de suspensión de bentonita. Donde condiciones muy adversas del terreno sean anticipadas, un circuito de bentonita debe ser provisto en TBM's de tipo EPB para un rellenado o refrescamiento de la capa de bentonita durante largas intervenciones dado que puede perder humedad y capacidad de soporte.

Antes de entrar a la cámara hiperbárica para ser comprimidos, la cámara de excavación debe haber sido presurizada y la presión de aire mantenida por suficiente tiempo sin excesiva pérdida de aire a fin de demostrar la estabilidad del frente, se recomienda que este periodo sea de una hora (AITES ITA, BTS, 2018). Una vez que se haya garantizado la estabilidad del frente los trabajadores pueden entrar a la cámara de excavación. Durante la intervención se debe llevar un monitoreo muy cuidadoso sobre todo en terreno permeable; en particular para evitar una pérdida de presión.

Reinicio del avance

El reinicio de una EPB de manera controlada después de una intervención es una actividad altamente crítica especialmente para máquinas de diámetro grande. Dependiendo de la permeabilidad del frente dos procedimientos son posibles:

- Terreno permeable. Una suspensión de bentonita es bombeada al interior del pleno antes del reinicio del avance.

- Terreno poco permeable. El reinicio se da sin la necesidad de rellenar el pleno bentonita.

Intervenciones sin saturación

Intervención sin saturación con aire comprimido

Este tipo de intervenciones están sujetas a regulaciones de salud y seguridad que establecen límites en los tiempos de trabajo y de descompresión. Cuando se trabaja con aire a presión los tejidos absorberán nitrógeno, la cantidad absorbida dependerá de la presión y el tiempo de exposición. Este nitrógeno puede formar burbujas en el tejido y sangre si se descomprime una persona muy rápido causando daños a su salud. Para reducir la posibilidad de enfermedad por descompresión, horarios especiales de descompresión han sido desarrollados ver Tabla 14; estos horarios toman en consideración la cantidad de nitrógeno absorbida por el cuerpo a varias profundidades y tiempos. **Cuando mayor es la presión menor es el tiempo de trabajo y mayor el de descompresión**, en consecuencia, la duración de las intervenciones va aumentando conforme al incremento de presión.

Tabla 14

Tiempos de Trabajo y de descompresión en Intervenciones Hiperbáricas

Presión (bar) nivel del mar	Mezcla de gases de trabajo	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 30m	88	Oxígeno	5h 58m
1.80	Aire	4h 00m	98	Oxígeno	5h 38 m
1.95	Aire	4h 00m	119	Oxígeno	5h 59 m
2.10	Aire	3h 30m	121	Oxígeno	5h 31m
2.40	Aire	3h 00m	134	Oxígeno	5h 14m
2.70	Aire	2h 30m	145	Oxígeno	4h 55m
3.00	Aire	2h 30m	190	Oxígeno	5h 40m
3.30	Aire	1h 30m	124	Oxígeno	3h 34m
3.60	Aire	1h 30m	147	Oxígeno	3h 57m
3.90	Aire	1h 30m	180	Oxígeno	4h 30m
4.20	Aire	1h 00m	121	Oxígeno	3h 01m
4.50	Aire	1h 00m	142	Oxígeno	3h 22m

4.80	Aire	1h 00m	165	Oxígeno	3h 45m
5.00	Trimix	1h 30m	279	Oxígeno	6h 09m
5.50	Trimix	1h 30m	305	Oxígeno	6h 35m
6.00	Trimix	1h 20m	310	Oxígeno	6h 30m
6.50	Trimix	1h 20m	367	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

Nota.

Trimix es una mezcla respirable de gases de oxígeno, nitrógeno y helio.

Obtenido de *Tiempo de trabajo y tiempo de descompresión en función de la Presión de* (Serradell Mejia, 2017)

La ejecución inapropiada de los trabajos de presurización y despresurización del personal puede conducir a riesgos y problemas graves en su salud. (González Pascual, 2017)

Intervención sin saturación con mezclas de gases

Cuando se trabaja a presiones mayores de 3.5 bares el nitrógeno contenido en el aire comprimido puede provocar *narcosis* afectando la orientación y capacidad de trabajo de los hiperbaristas, además de que dificulta la respiración conforme va aumentando la presión, para evitar esto se utiliza otro tipo de mezcla de gases para respirar, con porcentaje de nitrógeno reducido. Por otro lado, el oxígeno es tóxico a altas *presiones parciales*⁶ y durante largos periodos de tiempo, por lo que se debe regular su presión parcial en la mezcla de gases. “Cualquier mezcla para respirar en uso rutinario siempre debe proporcionarle al usuario oxígeno a una presión parcial mínima de 0.2 bares, pero no superior de 1.4 bares” (ITA Workin Group 5, 2018, pág. 37).

Las mezclas usadas se alimentan a través de una máscara y un cordón umbilical por lo que los trabajadores requieren de un espacio mayor para maniobrar. Esto debe ser tomado en cuenta en la fase de diseño de la TBM.

Límites de exposición en intervenciones sin saturación

La Asociación Internacional de Túneles (ITA) y la Sociedad Británica de Túneles (BTS) en su publicación *Health & Safety in Works In Association with the British Tunnelling Society Compressed Air Working Group* dan a saber ciertos límites en los tiempos de las exposiciones hiperbáricas por temas de confort del trabajador y control de la exposición dependiendo del tamaño de la cámara hiperbárica:

Para cámaras de menos de 1.8m de diámetro interno

⁶ La presión total ejercida por una mezcla de gases es la suma de las presiones parciales de los gases que componen dicha mezcla (iQuimicas, 2020).

- Una sola exposición en 24 horas, como para requerir un tiempo de descompresión en el manlock de no más de 2 horas o el período de exposición y tiempo de descompresión combinado no debe exceder las 3 horas.
- No más de cinco exposiciones consecutivas debe trabajarse sin un descanso de mínimo 48 horas a presión atmosférica.

Tales exposiciones normalmente permiten solo la inspección y mantenimiento limitado

Para una cámara de al menos 1.8 m internos de diámetro con un volumen interno de al menos 1.5 m³ por ocupante:

- Un solo período de exposición de no más de 2 ½ horas y tal que el período de exposición y el tiempo de descompresión combinados no excedan las 8 horas. Esto debe seguirse por un mínimo de 24 horas a la presión atmosférica.
- Debe haber un descanso para quitarse la mascarilla de al menos 30 minutos entre terminar el trabajo e iniciar la respiración de oxígeno para la descompresión.
- No más de cuatro exposiciones consecutivas debe trabajarse sin un descanso de al menos 48 horas a presión atmosférica

Intervenciones con saturación

El buceo de saturación es un método que permite a los buzos permanecer en el ambiente de alta presión el tiempo suficiente para que los tejidos del cuerpo se saturen con los componentes inertes de la mezcla de gas que respiran a presión, cuando se llega a esta condición la cantidad de tiempo necesario para la descompresión es la misma ya sea que los buzos hayan permanecido a la misma profundidad un día, una semana o un mes. (Alejandro Echemendia Hdez, 2019).

Este procedimiento supone vivir y trabajar en ambientes hiperbáricos durante largos periodos de tiempo, para esto se necesita una cámara presurizada situada fuera del túnel con literas, baños y duchas, y un sistema presurizado móvil para el traslado de los buzos al hábitat presurizado desde el túnel. La saturación puede ser con aire comprimido o mezcla de gases.

Las técnicas de saturación eliminan gran parte del riesgo para la salud asociado con las descompresiones múltiples requeridas de las exposiciones sin saturación para lograr el mismo tiempo de trabajo productivo, incluso a presiones intermedias (<3.5 bar). “Por razones de seguridad, las exposiciones a presiones de 7 bares o más normalmente deben realizarse utilizando técnicas de saturación” (ITA Workin Group 5, 2018, pág. 39).

La duración máxima de una intervención debe ser normalmente de 8 horas en cualquier periodo de 24 horas. No mas de una intervención por día es recomendada y menos de 28 días bajo presión son recomendados. El periodo de trabajo en cualquier intervención no no deberá exceder de 6 horas y

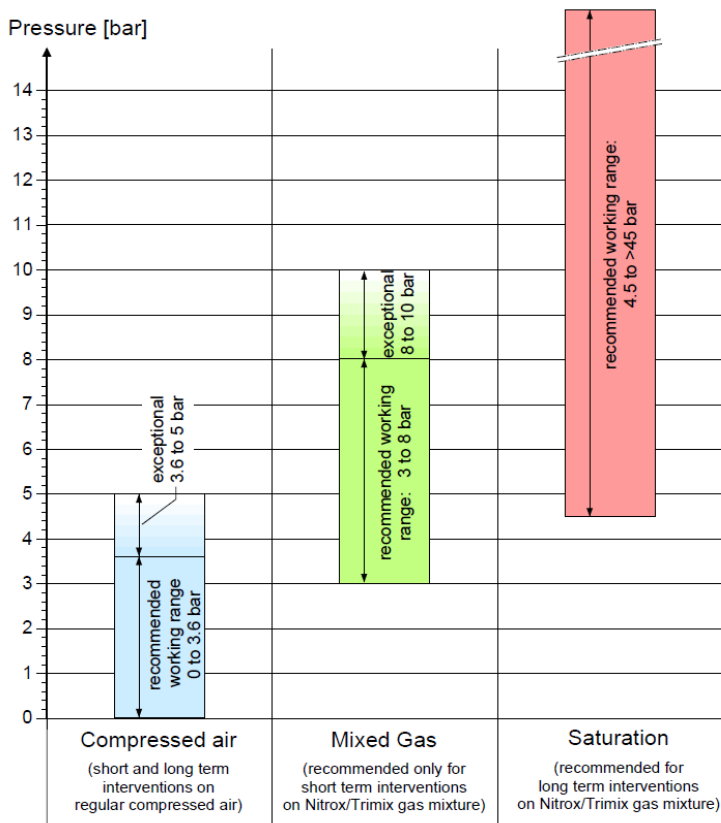
deberá haber un periodo de descanso de al menos 30 minutos a la mitad del periodo de trabajo. (AITES ITA, BTS, 2018)

Elección de la técnica de Intervención hiperbárica

La elección de la técnica de intervención hiperbárica depende de la cantidad de trabajo por realizarse, de la presión, del espacio disponible en la TBM y de la mezcla respirable. Las técnicas sin saturación a alta presión permiten solo periodos cortos, siendo ideal para inspecciones de rutina y mantenimiento limitado. La técnica de saturación es generalmente usada cuando las obligaciones de descompresión en los trabajos no saturados impiden un trabajo continuo generando costos mayores a una intervención por saturación. Donde una considerable cantidad de tiempo de trabajo es requerida bajo presión, la exposición por saturación debería ser considerada.

Figura 44

Técnicas de Intervenciones Hiperbáricas



Nota. Obtenido de (Brockway, 2016, pág. 41).

Equipo para las intervenciones hiperbáricas

Es responsabilidad del propietario, sus asesores y contratistas dar a conocer al fabricante de TBM y de equipo hiperbárico de sus requisitos.

Cámaras hiperbáricas (Man Locks).

Permiten la presurización de los trabajadores al nivel de presión en que se encuentra el pleno y una vez terminados las actividades permitir su despresurización. Para exposiciones sin saturación todas las operaciones asociadas con la intervención deben controlarse desde un panel en la cámara hiperbárica. El panel debe incorporar válvulas y manómetros necesarios para la presurización despresurización. Adicionalmente debe haber medios para monitorear y controlar el suministro y análisis de mezclas respiratorias.

Cuando la presión esperada en el pleno sea mayor de 7 bares son diseñadas 2 cámaras, una es utilizada en caso de emergencia (pérdida de presión en el pleno) o en caso de que una persona requiera atención médica y de esta manera la cámara principal puede estar sellada para que otra persona pueda entrar.

Figura 45

Cámara Hiperbáricas



Nota. Obtenido de Two Double Chamber Man Locks for Diameters > 7,5m de (Brockway, 2016, pág. 46).

En túneles de diámetro pequeño dados los límites de espacio no es posible instalar una cámara hiperbárica (man lock) en la TBM, como opción es posible instalar uno o más mamparos en el túnel a manera de formar compartimentos para la presurización.

Cámara Hiperbárica Móvil

En caso de emergencia permite el traslado a presión de trabajadores lesionados que requieran ser atendidos en el exterior o en un hospital especializado. Esta cámara debe colocarse dentro de un marco protector para facilitar su elevación y minimizar el riesgo de daños por impacto ver Figura 46. Su levantamiento debe hacerse por medio de puntos de izaje situados en el marco protector y no directamente del contenedor. La cámara en su marco debe poderse montar sobre un vehículo para su traslado dentro del túnel. Por otra parte, en caso de trabajos con saturación también permite el traslado de los trabajadores al hábitat presurizado del exterior del túnel.

Se recomienda que la cámara móvil sea doble y con puertas en ambos extremos para una mayor flexibilidad en su uso.

Figura 46

Cámara Hiperbárica Móvil



Nota. Obtenido de ([Herrenknecht](#)).

Contenedor habitacional

Para trabajos de saturación la planta y la TBM deben incluir un hábitat (contenedor habitacional) en la superficie para el almacenamiento del personal que vive bajo presión. El hábitat debe contar con literas, ducha y baños, y una cámara independiente para albergar los ocupantes en una emergencia, capaz de actuar como cámara terapéutica y médica.

Figura 47

Contenedor Habitacional



Nota. Obtenido de (Herrenknecht).

Intervenciones Hiperbáricas en Frentes Mixtos y Alto Flujo de Agua

Presurizar la cámara de excavación con aire comprimido para realizar intervenciones hiperbáricas puede ser muy difícil y demasiado arriesgado en frentes mixtos con alto flujo de agua. Cuando se realizan intervenciones en zonas de roca altamente fracturada o condiciones de frente mixto que resultan prolongadas puede producirse alguna inestabilidad del terreno o un alto asentamiento en superficie, debido a una mayor probabilidad de pérdida de presión en el frente, lo que conlleva al ingreso de agua y material blando al interior de la máquina.

Shirlaw (2015) menciona: “el aire comprimido aplicado durante las intervenciones es constante a lo largo del frente, así que un perfecto balance no puede ser aplicado con presión de agua, el cual crece con la profundidad. En la realidad hay un exceso de presión en la corona. En arenas el exceso de presión seca la arena provocando su caída hacia el túnel. Como sea durante intervenciones prolongadas resultarán en una pérdida gradual de estabilidad, debido al secado en la parte superior del túnel y la lenta erosión en la parte baja” (Shirlaw, 2015, pág. 7).

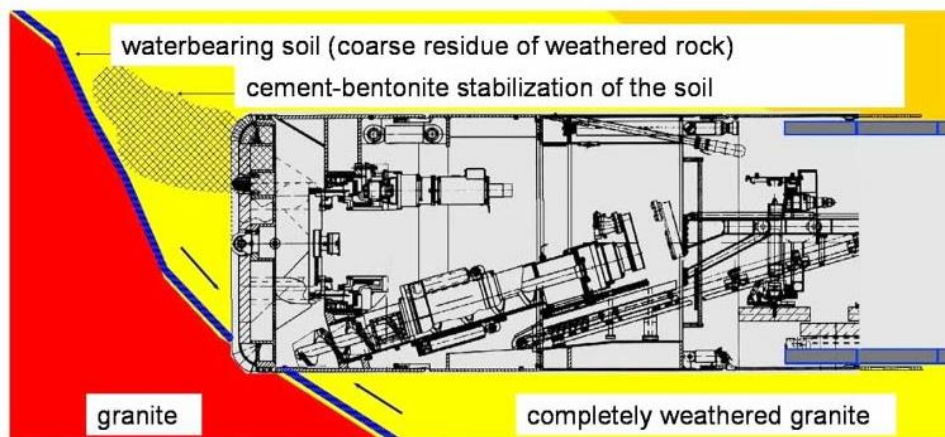
La pérdida de terreno durante las intervenciones puede deberse a muchos factores, incluyendo:

- El uso de una presión de aire menor a la presión hidrostática.
- El proceso de cambio del material contenido en el pleno por aire comprimido puede variar la presión.
- La pérdida gradual de estabilidad
- Efectos desestabilizadores por vibración, pueden darse al rotar la cabeza para acceder a herramientas de corte o durante el reinicio del avance.

En frentes mixtos las intervenciones en el frente son más complicadas por el alto grado de daño y de desgaste que presentan las herramientas por los fenómenos antes mencionados, lo que implica que al entrar a la cámara de excavación los trabajadores puedan encontrar un alto número de herramientas que necesitan ser cambiadas lo que lleva requerir tiempos prolongados para realizar las reparaciones, y en su caso los cambios. Por lo que es preferible evitar las intervenciones hiperbáricas en condiciones de frentes mixtos o tratar de que no resulten prolongadas haciendo intervenciones más seguidas, pero de menor duración debido a los altos riesgos que conlleva su ejecución.

Figura 48

EPB en Frente Mixto con Alto Flujo de Agua e Inyección de Bentonita



Nota. Obtenido de EPB-shield in mixed face geology with high water ingress and cement-bentonite injection de (Thewes, 2004)

Mitigación.

Este tipo de intervenciones en lo primordial deben evitarse debido a los altos riesgos que implica, lo recomendable es cambiar todas las herramientas de corte antes de entrar a largas zonas con presiones mayores que la atmosféricas.

Antes de emprender los trabajos hiperbáricos se debieron haber tomado todas las medidas razonablemente prácticas para minimizar el número de personas, la duración y el nivel de presión de cada exposición.

A veces no es posible evitar las intervenciones en zonas de alta presión de agua, sin embargo, puede ser factible reducir el nivel de presión con técnicas de inyección, de bombeo o congelamiento.

Existen medidas tales como la detección remota de desgaste que se pueden usar para planear mejor las intervenciones a manera de que ocupen el menor tiempo.

En las máquinas de diámetro grande los brazos de la cabeza de corte se pueden fabricar como cajas huecas para el acceso a las herramientas desgastadas o defectuosas bajo presión atmosférica.

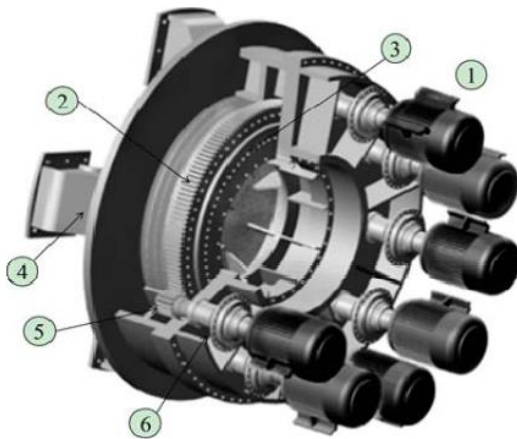
7.9. Fallas Mecánicas

Transmisión de la TBM

La transmisión de una TBM es la encargada de proporcionar el torque y velocidad de rotación a la cabeza de corte. Su composición inicia con los motores que proporcionan la potencia requerida, posteriormente por medio de reductores el poder de los motores se convierte en desaceleración e incremento del torque, el cual es transmitido al engranaje del rodamiento por medio de piñones.

Figura 49

Transmisión Principal de una TBM



Nota.

En la figura se aprecian los componentes principales de una transmisión de TBM: 1 Motores. 2. Engranaje. 3 Rodamiento Principal. 4 Soportes de la Cabeza de Corte. 5 Piñón. 6. Reductores.

Obtenido de *Structural representation of the TBM cutter head drive system* de (Qing-Ping & Yang, 2016, pág. 2).

Falla en el Rodamiento Principal

El rodamiento principal es la parte más sensible de la transmisión a sufrir daños. Este se encuentra en contacto con el terreno excavado y es el encargado de permitir a la cabeza de corte rotar al mismo tiempo de soportar su peso y todas las fuerzas externas actuando en la cabeza, y de transmitir el empuje requerido para que los cortadores penetren en el terreno. Su avería representa las pérdidas más grandes que pueden presentarse en una excavación con TBM, implica que ésta ya no se pueda retirar o recuperar del túnel sino hasta que se definan maniobras como la construcción de un pozo de rescate para la recuperación del rodamiento. Estos costos pueden ocasionar la quiebra de una compañía y varios meses de retrasos por lo que se debe prestar mucha atención en el monitoreo de su estado: su lubricación, el estado de los sellos y filtros.

Una potencial avería de los rodamientos es cuando ingresa material fino a estos y paulatinamente va desgastando los componentes. Es importante que la presión de la grasa de los rodamientos sea superior a la presión del frente para evitar el problema de la entrada de material.

“La importancia de un sistema de sellado confiable es claramente mostrada en el hecho de que la mayoría de las fallas de rodamientos empiezan por una pérdida de lubricante o por la entrada de contaminantes desde el exterior.” (Robbins, 1995)

En cabezas de corte cerradas (bajo porcentaje de apertura) puede contaminarse por lodo presurizado contenido en el pleno. Por lo tanto, es esencial proveer un sello especial:

- El rodamiento principal tiene que ser protegido con sellos. Es importante verificar que el rodamiento este equipado con 2 capas de sellos (4 o 5 por cada uno), en la parte interior y exterior de los anillos.
- El diseño del sello debe prever una lubricación especial (aceite/grasa) el cual asegure la protección total del rodamiento.

Los sellos del sistema automático de engrasado proveen una garantía de su funcionamiento durante la excavación. El sistema protege los sellos con un continuo flujo de aceite/grasa.

Caso de estudio

Un caso muy sonado que muestra a la perfección las implicaciones de una falla del rodamiento principal es el de la tuneladora EPB “Bertha” de 17.4m de diámetro que se construyó para excavar un túnel de 2.6km de largo en Seattle, y en febrero de 2014 se descubrió tenía daños en los sellos del rodamiento por lo que tenían que ser reparados o reemplazados. La única manera de acceder a los sellos de un rodamiento es desmontando completamente este de la TBM por lo que inicialmente se contemplaron dos soluciones para obtener acceso al sistema de sellado del rodamiento principal de la tuneladora, ya sea a través de un pozo de acceso excavado desde la superficie o a través de la parte posterior de la máquina, de cualquier manera, estos procesos llevarían meses.

Finalmente se optó por excavar un pozo desde la superficie para poder extraer el rodamiento para su reparación. Las actividades incluían la inyección de grout, la construcción de pilas, el abatimiento del nivel freático por medio de pozos de bombeo, un avance corto de la TBM hasta atravesar el pozo, la instalación de una grúa y el desmontaje de la cabeza de corte y la transmisión ver Figura 50.

Los altos costos generados para la reparación y recuperación del rodamiento principal llevo a una serie de disputas del contratista con el propietario y la aseguradora de la máquina. El contratista reclamaba que una tubería de acero que no estaba indicada en los documentos contractuales fue la que ocasionó la avería del rodamiento, sin embargo, la empresa Maidl Tunnel Consultants (MTC) realizó una investigación del caso y llegó a la conclusión de e hizo las siguientes observaciones⁷:

- No había daños serios en la cabeza de corte debido a las cargas de choque de la tubería de acero
- El desgaste de los cortadores lucía normal considerando las condiciones del terreno
- Las temperaturas estuvieron debajo de los límites críticos
- El sistema interno de sellado no mostro desgaste significativo
- El sistema externo de sellado sufrió de lubricación inconsistente desde el comienzo de la conducción
- Fracturas en el bloque del rodamiento indican alta deformación
- El empuje y torque después de encontrar la tubería de acero fueron altos, pero aún dentro de rangos especificados
- El análisis estructural original no consideró cargas axiales y un incorrecto nivel freático y cobertura

MTC concluyó que “el diseño subdimensionado causó el daño a la tuneladora, también concluyó que el sistema de lubricación de esta tuneladora no era adecuado para controlar la presión y las cargas de grasa” (Kenyon, Tunnel Talk, 2021). La tuneladora volvió a excavar en el año 2016 después

⁷ Obtenido de (Kenyon, Tunnel Talk, 2021).

de un periodo de dos años de recuperación y reparaciones, pero dejó pérdidas de cientos de millones de dólares y varias disputas aún sin resolver.

Figura 50

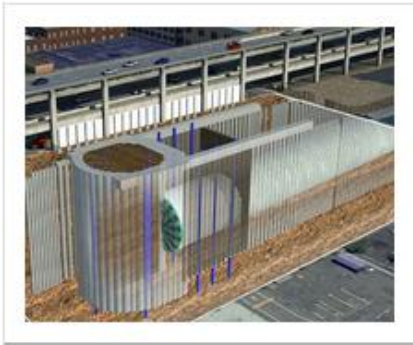
Etapas del Plan de Recuperación del Rodamiento Principal



1. Grout injection



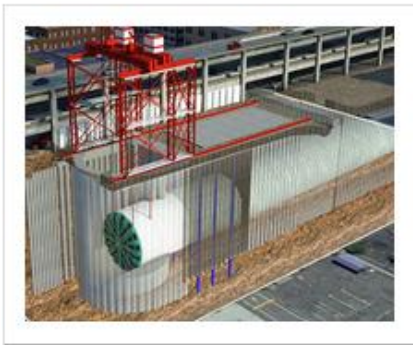
2. Sinking 75 piles



3. Dewatering wells



4. Short drive into shaft



5. Crane installation



6. Lifting main components

Nota. Obtenido de (Kenyon, TunnelTalk, 2021). <https://www.tunneltalk.com/Seattle-Alaskan-Way-25June2014-TBM-Bertha-to-be-strengthened-as-part-of-repair-schedule.php>

Deterioro de los sellos de cola (cepillos)

El espacio anular que queda entre el terreno y la parte exterior de los anillos es continuamente llenado con mortero y/o gravilla para limitar las deformaciones y evitar la entrada de agua hacia el túnel. En la zona de inyección se ubican los **Cepillos** que son un sistema de sellado que impide la entrada del mortero y agua al interior de la TBM, entre cada cepillo se inyecta grasa con presión superior a la de inyección de mortero de esta manera se evita la entrada del mismo al interior de la máquina.

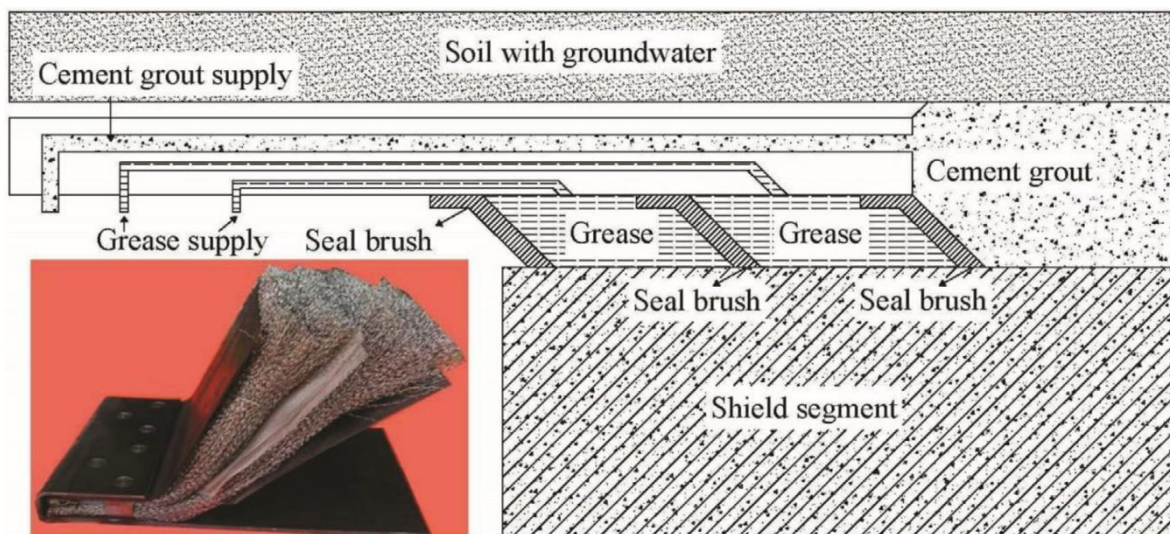
Los cepillos de una TBM son piezas que están sujetas a un desgaste natural e inevitable por el uso de la TBM. Sin embargo, en ocasiones, estos sufren un daño prematuro por mala operación.

Uno de los principales criterios para determinar un posible daño por mala operación, se refiere a verificar que la presión del mortero que se inyecta en el espacio anular nunca supere a la de la inyección de grasa de la zona de los cepillos, de lo contrario, el mortero puede ingresar a dicha zona, solidificar los cepillos y destruirlos durante el avance.

Por otro lado, si las presiones son adecuadas y hay un incremento gradual de los volúmenes de grasa inyectados en dicha zona, es un indicativo de desgaste natural de dichos elementos.

Figura 51

Sistema de Sellos de Faldón



Nota. Obtenido de *The structural diagram of a shield tail and a picture of a brush seal* de (Yu, Zhou, Chen, Arulrajah, & Horpibulsuk, 2020, pág. 107)

Tabla 15

Modos de Falla del Sistema de Sellos del Faldón

Modos de falla	Características	Consecuencias
Falla por punción	Alta presión externa punza alguno de los sellos cepillos (brush seal) La integridad de todo el sistema de sellado está rota.	Puede llevar a una progresiva falla en el faldón del escudo
Falla intercapa	La baja presión de grasa debilita el sellado entre cepillos El sistema de sellado está en riesgo.	Solo el sello cepillo externo es capaz de proporcionar un sellado.
Falla debido a la deformación del terreno	El movimiento del terreno causado por el exceso de lechada produce un espacio (gap) entre los anillos en el faldón.	La fuga local ocurre en el "gap"
Falla debido a la deformación de los sellos cepillo	Daño a los sellos cepillo resulta en el fallo del sistema de sellado multicapa. El daño puede ser atribuido a: un incorrecto posicionamiento del escudo, dislocamiento de los anillos y/o abrasión de los alambres de acero de los cepillos	Puede llevar a una progresiva falla en el faldón del escudo

Nota. Obtenido de *Characteristics of the different failure modes for the multilayer seal systems* de (Yu, Zhou, Chen, Arulrajah, & Horpibulsuk, 2020, pág. 109)

7.10. Atrapamiento de la TBM

El atrapamiento de una TBM es un riesgo inherente en el método mecanizado de excavación de túneles dadas las restricciones geométricas, una excesiva deformación del terreno alrededor de la excavación o el desprendimiento de fragmentos de roca o suelo por aflojamiento pueden aprisionar el escudo impidiendo de esta manera continuar con el avance; así las condiciones geológicas como roca muy fracturada, suelo granular sin cohesión y flujo de agua constituyen situaciones con el potencial de provocar el atrapamiento, por lo que una mala evaluación del riesgo de atrapamiento puede originar grandes costos y retrasos en el proyecto.

Condiciones geológicas con potencial de provocar atrapamiento

- **Macizo rocoso muy articulado.** En roca muy fracturada se corre el riesgo de que el proceso de excavación debilite las uniones entre bloques e induzca una caída con el potencial de atrapar la TBM.
- **Frentes mixtos.** En zonas donde un estrato de roca fracturada yace encima de un estrato de suelo blando de baja resistencia, puede presentarse un atrapamiento debido a la falla del material que subyace provocado por el desconfinamiento, flujo de agua, intemperismo y falta de soporte.

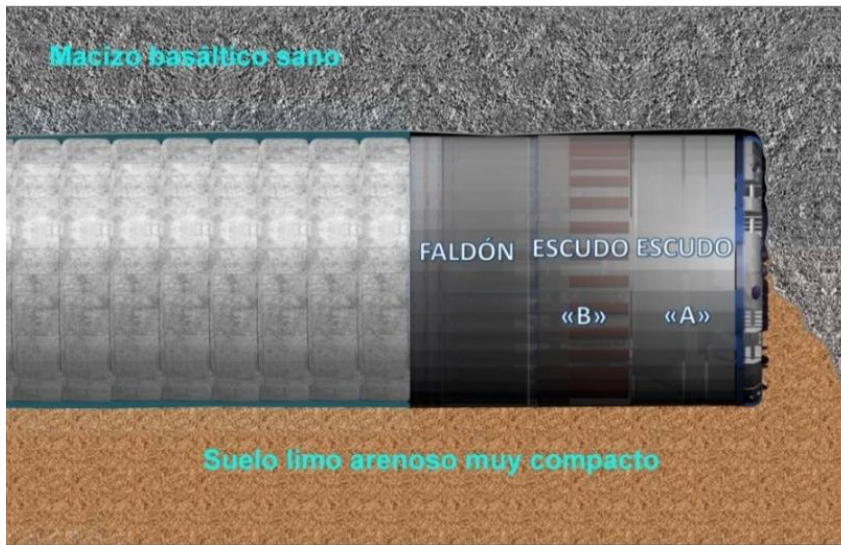
Caso de atrapamiento en frente mixto

Sucedió en la construcción del Túnel Emisor Oriente (TEO) en México en un tramo donde la máquina tipo EPB atravesó una interfaz de suelo limo-arenoso y basalto. “Al entrar al anillo 1235 la TBM fue detenida para llevar a cabo la sustitución de herramientas de corte, con un periodo de duración de tres días. Una vez que se reanudó la excavación, una fuerza de empuje superior a los 100,000 kN fue aplicada, sin que la máquina pudiera avanzar” (González Pascual, 2017, pág. 69).

Durante el tiempo que la máquina estuvo parada, se fue formando una caverna en el frente hacia la parte inferior de dimensiones importantes. Esta caverna muy probablemente se formó por el lavado del suelo que produjo el gran flujo de agua hacia el túnel. Por lo tanto, el fenómeno que atrapó la máquina está asociado a la socavación que produjo el agua en los suelos de la zona inferior, así como al cambio en el estado de esfuerzos efectivos, producto también de la excavación del túnel.

Figura 52

Excavación en Frente de Roca-Suelo



Nota. Obtenido de (Sánchez & Suárez , 2016).

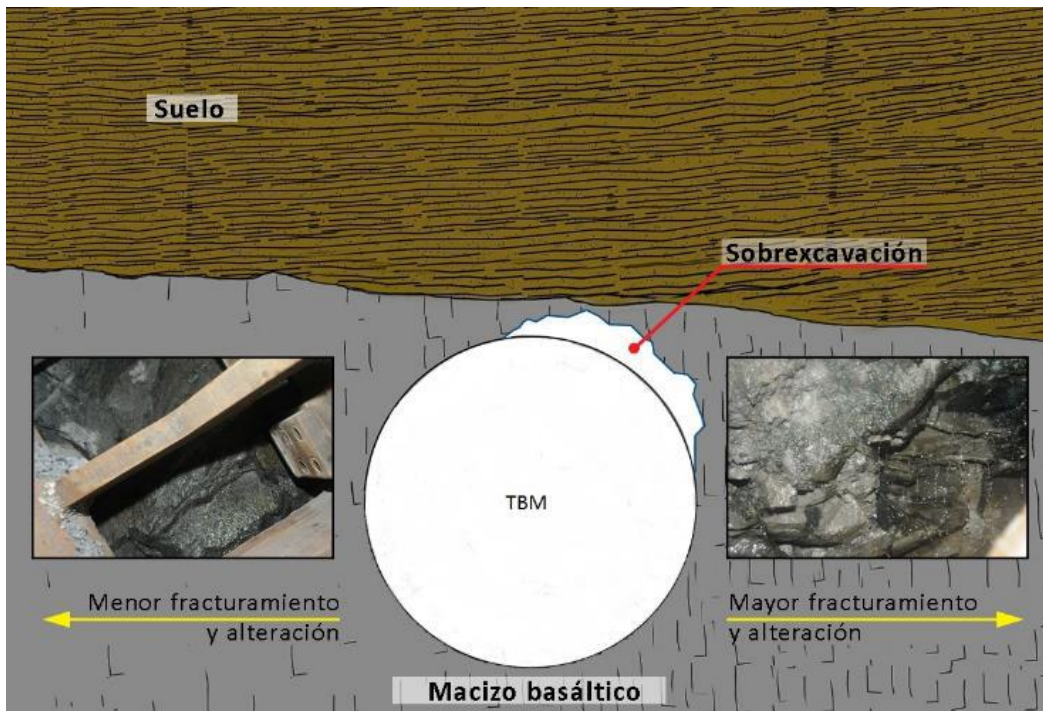
Caso de atrapamiento en macizo rocoso muy articulado

También sucedió en la construcción del TEO de acuerdo con (Saénz Fucugauchi & Hernández Marín, 2018) en el anillo 1308 se presenta un segundo atrapamiento en una zona de diferentes características del macizo rocoso. En la parte izquierda del frente se ubica un macizo basáltico de buena calidad, masivo y compacto, de baja alteración; en contraste en la parte derecha aflora un basalto de mala calidad potencialmente inestable, *brechado*⁸, fracturado y zonas alteradas con un fuerte flujo de agua.

⁸ Formación rocosa compuesta por fragmentos angulares de roca rodeados por material fino (arcilla).

Figura 53

Excavación en Roca Heterogénea



Nota. En la figura se observa el frente de excavación en la zona del segundo atrapamiento de TBM en la obra del TEO. Obtenido de (Saéñz Fucugauchi & Hernández Marín, 2018).

8. Manejo contractual en la construcción de obras subterráneas

“El perfil de ingeniero, el cual concibe la solución de problemas a partir de principios científicos y consideraciones prácticas, debe complementarse con una formación que adopte al diálogo como un mecanismo de sensibilización de las necesidades sociales”.

(Lombardo Aburto & Pérez Reyes)

Durante la etapa de construcción un proyecto no está exento de la aparición de problemas, conflictos y oportunidades de mejora que hacen que las especificaciones iniciales dentro del contrato tengan que ser revisadas y adaptadas. Desviaciones en las condiciones del terreno o en las cantidades de materiales y terreno excavado frecuentemente ocurren, esto puede causar un incremento o reducción en costo y tiempo comparado con lo planeado.

La administración del contrato son las acciones destinadas a cumplir las obligaciones adquiridas, de anticipar y resolver problemas, de la búsqueda de la mejora continua y de construir relaciones basadas en la confianza y el entendimiento mutuo con el fin de la conclusión exitosa del proyecto dentro del plazo establecido.

Una administración efectiva del contrato debe efectuarse mediante la integración de comités de manejo del contrato, que son grupos multidisciplinarios e iniciarse desde la planeación. “La Administración del contrato es un elemento crítico en el ciclo de los proyectos de construcción, se lleva a cabo durante todas las fases – desde la fase de diseño conceptual” (Caporal Velasco, 2013, pág. 22), y aporta las siguientes ventajas:

- Gestión y control del cambio, ajuste a las condiciones contractuales.
- Registros claros y documentados de todo lo que sucede.
- Anticipación y resolución de problemas y conflictos dentro de la ejecución del proyecto, sin afectar al mismo.

8.1. Incertidumbre Geológica

La geología es la principal fuente de incertidumbre en la construcción de túneles, en muchos casos es el factor subyacente de muchos peligros relacionados al diseño, la construcción, el medio ambiente y el contrato. Varios reclamos y errores constructivos tienen su raíz en el hecho de que el contrato y organización no han sido adaptados a la incertidumbre geológica prevaleciente. (ITA, AITES, 2017)

Los peligros relacionados con la incertidumbre geológica tienen que ser evaluados estimando la probabilidad de ocurrencia de eventos no deseados y sus consecuencias respecto a daños a terceros. La probabilidad de ocurrencia y consecuencia de estos peligros representa un riesgo que necesita ser evaluado, analizado, eliminado, mitigado o controlado.

Gestión de riesgos

Administrar el riesgo requiere mecanismos eficientes y oportunos que permitan defender los intereses de las partes que intervienen en un contrato ante cualquier eventualidad (Caporal Velasco, 2013), en el caso de la construcción de túneles y oras subterráneas se recomiendan las siguientes medidas:

- Una gestión de riesgos.
- La revelación total de la información geotécnica (GDR⁹)
- El uso de un Reporte Geotécnico de Referencia (GBR¹⁰) de las condiciones geotécnicas esperadas durante la construcción.
- Contingencias por parte de los propietarios para enfrentar eventualidades.
- Cláusulas contractuales que proporcionen un remedio para el manejo de riesgos.
- Mecanismos de resolución de controversias.

“Es importante que la gestión de riesgos se realice en un ambiente de buena cooperación entre las partes. Para lograr esto, la asociación puede ser una valiosa herramienta. El proceso de asociación se puede formular como un ejercicio en el fomento de una buena comunicación entre las partes. Puede ser una fórmula para reducir al mínimo costo para el Propietario y aumentar al máximo los beneficios para el Contratista y abarca la planificación conjunta y la resolución de problemas, la

⁹ Geotechnical Data Report se trata de un documento contractual que resume la información recabada durante la etapa de estudios y diseño; y que legalmente es de menor jerarquía que el GBR.

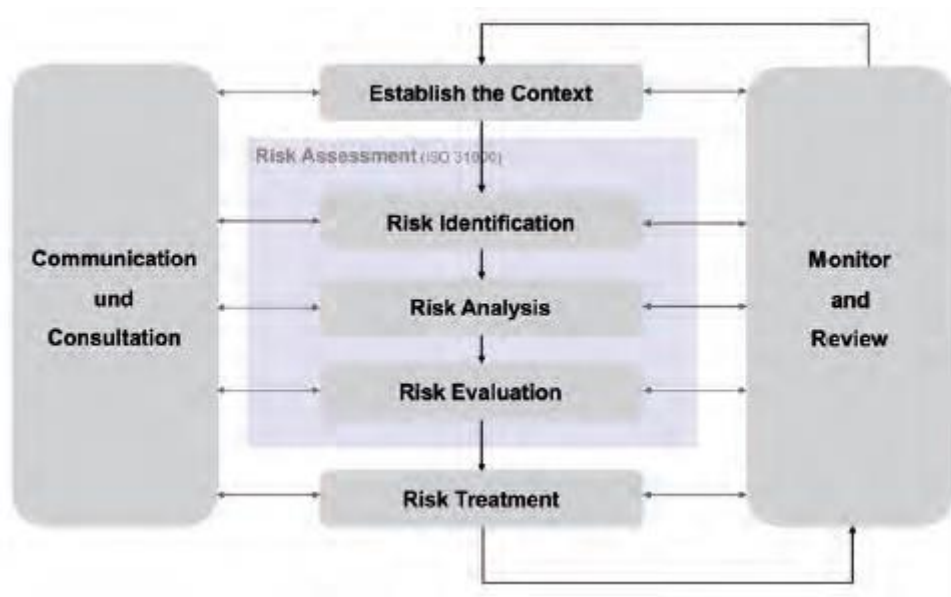
¹⁰ Vid página 104

programación, la mitigación de los retrasos y la *ingeniería de valor*¹¹. El proceso de " asociación " puede ser visto como una medida de mitigación de riesgos para el Propietario y el Contratista" (Degn Eskesen, Tengborg, Kampmann, & Veicherts, 2004, págs. 218-219).

Para una gestión eficaz es importante que se inicie desde la etapa de diseño donde decisiones como la alineación y selección del método de construcción son tomadas junto con sus peligros y consecuencias.

Figura 54

Gestión de Riesgos



Nota. Obtenido de *Risk management process according to ISO 31000* de (WG19, 2016).

Factores de Riesgo

Diferentes factores de riesgo pueden impactar en las asunciones y estimaciones realizadas en la planeación de un túnel. Para su identificación puede basarse en: (i) una revisión de la experiencia de proyectos similares, (ii) el estudio de los riesgos asociados con el tipo de trabajo que es llevado a cabo, y (iii) las discusiones con el personal cualificado y experimentado del equipo de proyecto y otras organizaciones de todo el mundo. Es importante identificar los riesgos potenciales en un proceso estructurado. Una sugerencia para la clasificación de riesgos se propone en la Tabla 16.

¹¹ Es una metodología para resolver problemas y/o reducir costos, al mismo tiempo que mejora los requerimientos de desempeño/calidad (IMT, 2020).

Tabla 16

Factores de Riesgo Constructivo y Contractual

Factores de Riesgo Constructivo	Factores de Riesgo Contractuales y Legales
Cambios en el proyecto	Resolución de disputas
Disponibilidad de Recursos	Negociación de cambios
Falta de permisos de acceso y construcción	Errores en las especificaciones
Retraso en planos de construcción e instrucciones	Desconocimiento de la naturaleza de las obras subterráneas
Diseño defectuoso	Errores en las cantidades de trabajo
Método de construcción inadecuado	Condiciones físicas inesperadas
Inexperiencia del Contratista	Retrasos en la construcción
Incompatibilidad de la TBM con el terreno	Inadecuada o inexistente repartición de riesgos
Operación inadecuada de la TBM	Modelo de contrato inadecuado
Insuficiente investigación del terreno	Falta de GBR
	Inadecuado programa de obra
Condiciones físicas inesperadas	Errores, ambigüedades y contradicciones en los documentos contractuales
Fallas mecánicas de la TBM	Daños a personas o propiedad
Mala interpretación geotécnica	Factores de Riesgo Financiero
Condiciones físicas adversas	Insolvencia del contratista
	Retraso de pagos
Insolvencia del contratista	Falta de reservas de capital
Actos de fuerza mayor	Insolvencia del propietario
Interferencias de (terceros)	Inflación
Atrapamiento de la TBM	Financiamiento
	Seguros

8.1.1. Mitigación de Riesgos Geotécnicos

“No existe ningún proyecto subterráneo que esté libre de riesgo. El riesgo debe ser manejado, repartido, transferido o aceptado. Nunca debe ser ignorado”
Sir Michael Latham, 1994, U.K.

Riesgos relacionados con la geología y con cuestiones relacionadas con el comportamiento de estructuras permanentes o con los trabajos de construcción son llamados riesgos geotécnicos. (ITA, AITES, 2017)

Los riesgos pueden ser evitados, mitigados o transferidos. Algunos riesgos pueden ser evitados adaptando un método de excavación más robusto, otros pueden ser transferidos a compañías de seguros; sin embargo, la mayoría de los riesgos geotécnicos tienen que ser mitigados. El riesgo puede ser reducido obteniendo más información sobre las condiciones geológicas en las etapas de planeación, diseño, licitación y construcción. Las investigaciones geotécnicas son llevadas a cabo para reducir la incertidumbre geológica.

El grado de incertidumbre dependerá de las condiciones del sitio como la profundidad de la excavación, la complejidad de la geología, la facilidad para realizar las investigaciones, la naturaleza y extensión de las investigaciones e incluso factores políticos y sociales.

Investigaciones geológicas

Una importante cuestión que requiere cuidadosa consideración en el inicio de cualquier proyecto de excavación subterránea es: ¿Qué constituye una realista investigación del sitio para el proyecto? Y ¿En qué medida se puede esperar que dicha investigación del sitio minimice las incógnitas que podrían dar lugar a dificultades contractuales?

El primer hecho es que no existe un procedimiento estándar de investigación geológica para un túnel, las condiciones geológicas de un sitio pueden variar significativamente respecto a otro; sin embargo, existe un primer paso para lograr una investigación apropiada, la creación de un modelo geológico del trazo del túnel para guiar la caracterización geotécnica y la identificación de peligros, el enfoque es ir de lo general a lo particular en orden de ir investigando las zonas donde existe mayor incertidumbre ver Figura 55.

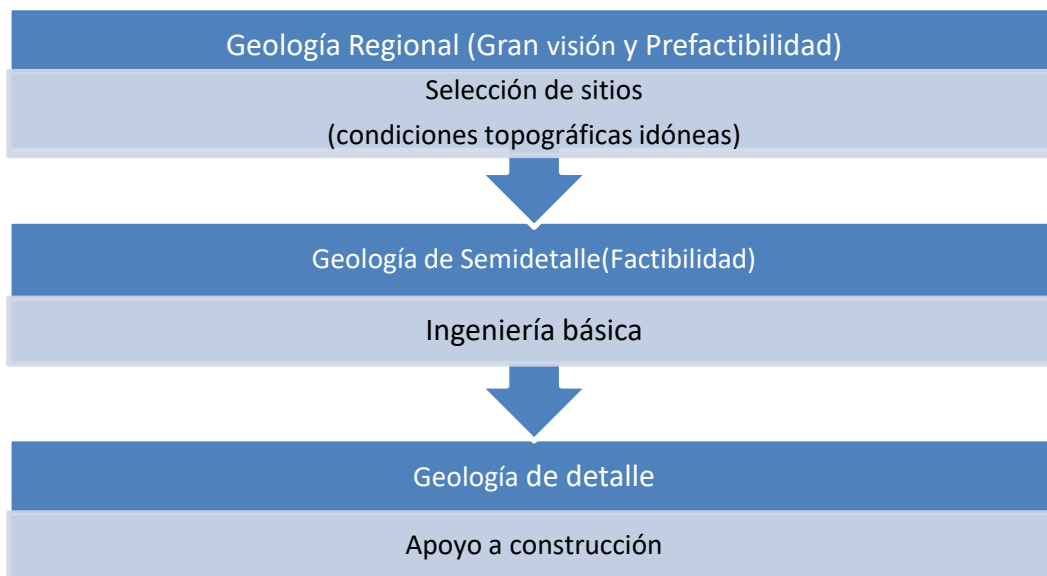
Una referencia básica para saber si una investigación del terreno es pobre o bien desarrollada es la *densidad de sondeos* de reconocimiento y de exploración indirecta; el primero de ellos debe entenderse como el número de sondeos realizados por km de trazado. Varias fuentes indican que no debería ser menor a 1 sondeo cada 100m¹²; sin embargo, por cuestiones de costos, plazos o

¹² (Mendaña Saavedra, 2012)

dificultad de acceso para realizar los sondeos no es posible, por lo que se debe prever otro tipo de investigación y contemplar los riesgos de contar con poca información geológica en la selección del método de excavación y modelo de contratación.

Figura 55

Etapas de los Estudios Geológicos



La topografía también juega un rol importante en la extensión de las investigaciones geológicas. En zonas de bajo relieve los túneles serán poco profundos y es posible llevar a cabo un programa razonablemente completo a un costo moderado. En zonas urbanas tal vez no existan permisos o accesos para realizar algunas perforaciones por lo que se deberán utilizar otras técnicas como la investigación geofísica. Donde el túnel atraviesa una montaña la extensión y el costo de las investigaciones depende de la accesibilidad del sitio, puede ser que se necesiten crear caminos de acceso y los costos de movilización pueden ser altos, por lo que la cantidad de perforaciones es reducida.

Otro aspecto que influye en el nivel de incertidumbre es el político, puede ser que “los equipos técnicos y legales de los propietarios de las obras se ven obligados a someterse a las prioridades políticas y administrativas de los proyectos, haciendo a un lado la viabilidad técnica y legal de estos últimos con consecuencias nefastas” menciona Hernández García (2016) proponiendo lo siguiente:

“Que las asociaciones especializadas mantengan posturas firmes ante proyectos que no son viables de ejecutar en los tiempos y formas que piden las convocantes por razones políticas y/o administrativas. De preferencia que se tengan criterios definidos y se formalicen lineamientos entre las autoridades y las organizaciones para hacer prevalecer la ejecución de los proyectos en forma técnica y legal, y no atendiendo a tiempos administrativos y políticos que hacen inviable la ejecución en los términos esperados”

8.1.2. Condiciones Geológicas Inesperadas

Se debe tener claro que el conocimiento completo de las condiciones geológicas del túnel no se conocerá completamente hasta que este sea excavado. Algunas condiciones pueden quedar ocultas entre los puntos de perforación como obstrucciones (naturales o artificiales), cuerpos intrusivos o cavernas, e incluso puede haber errores en la estimación del comportamiento del terreno, por lo que es común durante la construcción encontrar zonas de excavación con condiciones geológicas no contempladas.

Un evento inesperado en la excavación de un túnel puede causar serios problemas si no se cuenta con un mecanismo que indique la procedencia ante estas situaciones. Este consiste en establecer una cláusula contractual de condiciones inesperadas, esta cláusula incluida en las condiciones generales de un contrato proporciona un remedio para el manejo de riesgos en condiciones no contempladas, de manera que sea manejado por la administración del contrato.

El propósito de una cláusula es permitir que el propietario asuma el riesgo condiciones desconocidas del subsuelo y para reducir la necesidad de grandes contingencias de los contratistas en las ofertas. Obviamente, esta cláusula solo puede operar de manera efectiva si se puede establecer qué condiciones son válidas para aceptarse como inesperadas. (Hoek, 1982)

No indicar la procedencia ante una condición de sitio diferente a la asentada en el contrato implica la presentación de propuestas más costosas por parte de los licitantes al incluir un porcentaje de imprevistos para cubrir el riesgo de encontrar condiciones subterráneas adversas (Lombardo Aburto & Pérez Reyes, 2013).

En la manera en que está redactada la cláusula sólo el contratista puede iniciar un reclamo, sin embargo, existe una variante en que el propietario tiene derecho a un ajuste de precio hacia abajo por condiciones más favorables que las asentadas en las líneas base, sin embargo, esta práctica lleva a los licitantes a aumentar los precios de su oferta, motivo por el cual no se recomienda una cláusula deductiva.

Si el contratista encuentra condiciones físicas las cuales el considera haber sido imprevisibles y que tendrán un efecto adverso en el progreso y/o incremento de costo en la ejecución de los trabajos, el siguiente procedimiento deberá ser aplicado:

Informe del contratista

Después de descubrir tales condiciones, el contratista deberá notificar al propietario lo siguiente:

- Dar tan pronto como sea practico y en buen tiempo oportunidad al personal del propietario de inspeccionar e investigar las condiciones físicas prontamente y antes de que sean perturbadas.
- Describir las condiciones físicas, así poder ser investigadas e inspeccionadas prontamente por el personal del propietario.
- Establecer las razones de por qué el contratista considera las condiciones físicas como imprevisibles.
- Describir la manera en que las condiciones físicas tendrán un efecto adverso en el progreso y/o incremento del costo de la ejecución de los trabajos.

Esta notificación puede incluir las propuestas del contratista para tomar medidas para investigar y/o mitigar tales condicione físicas.

Inspección e investigación del propietario

El personal a cargo del propietario deberá inspeccionar e investigar las condiciones físicas (sujeto a la seguridad del lugar) inmediatamente o dentro de un periodo de días convenido con el contratista, después de recibir la notificación del contratista.

El contratista deberá continuar con la ejecución de los trabajos, usando sus propias y razonables medidas apropiadas para las condiciones físicas y habilitar para que el personal del propietario pueda investigar e inspeccionar tales condiciones.

Sumas Provisionales

La posibilidad de que se presenten eventos inesperados durante la construcción puede derivar en sobrecostos y retrasos. Dada la naturaleza de los sobrecostos de generar conflictos se requiere de mecanismos para su gestión, siendo estos los presupuestos de contingencia por parte del contratista y las reservas de capital por parte del propietario, definidos de la siguiente manera:

- Porcentaje de contingencia. Cantidad reservada por el contratista para cubrir las diferencias inevitables entre lo presupuestado y costos reales.
- Reserva de capital. Es una reserva del propietario para el crecimiento o cambios imprevistos o deseados del alcance del proyecto.

“Todos los presupuestos del proyecto también deben incluir una contingencia para cubrir catástrofes significativas, eventos para los cuales el estado, la ocurrencia y / o los hechos son inciertos, y la experiencia muestra que probablemente resultarán, en conjunto, en costos adicionales. Los criterios importantes para estos eventos significativos / catastróficos

son la singularidad del evento. Tal evento sucederá o no sucederá durante la fase de ejecución del proyecto y, si tal evento ocurre, tendrá un mayor impacto en los costos. Un ejemplo común son las condiciones climáticas adversas que exceden la norma en el área en la que se está construyendo el proyecto. Otro ejemplo común es el descubrimiento de condiciones de subsuelo imprevistas u ocultas en el sitio del proyecto. El riesgo de tales eventos generalmente se asigna en el contrato entre el propietario y el contratista. La parte a quien el riesgo que se asigna será responsable de los costos adicionales que surjan de estos eventos de riesgo, y el presupuesto de esa parte debe incluir una cantidad para cubrir dichos costos” (Hughes, Jr. & Stenman, 2006, pág. 4).

Sumas Provisionales pueden requerirse para partes del trabajo que no se tiene certeza de si se ocuparan o se desconoce la cantidad total durante el proyecto como pueden ser Intervenciones Hiperbáricas, tratamientos del terreno, o para manejar una gran incertidumbre respecto a condiciones subterráneas. Es esencial definir el alcance de cada concepto de suma provisional.

8.2. Reporte Geotécnico de Referencia (GBR)

Se trata de un documento contractual para uso en las etapas de licitación y construcción. Su principal propósito es establecer *líneas base* realistas y claras de las condiciones geotécnicas que se espera encontrar durante la construcción y sirvan de referencia para la elaboración de las ofertas, la asignación de riesgos, y sobre todo para la resolución de controversias y la administración del contrato durante la construcción. “Su principal objetivo es evitar, en la medida de lo posible, las disputas entre las partes durante la construcción de un proyecto, las cuales en definitiva consumen tiempo y recursos importantes entre ellas” (Lombardo Aburto & Pérez Reyes, 2016, pág. 6)

El problema de no incluir este documento dentro del contrato es que no permite la designación clara de las responsabilidades para cada parte. En dichas condiciones el contratista no puede identificar las implicaciones técnicas del proyecto, por lo que puede incurrir en interpretaciones muy optimistas que, al no cumplirse, repercuten en reclamos hacia el contratante por circunstancias no previstas. (Lombardo Aburto & Pérez Reyes, 2016)

Otros objetivos del GBR incluyen:

- La presentación de las consideraciones geotécnicas y constructivas que fueron base para el diseño de los elementos de sostenimiento y los requerimientos que pueden ser incluidas en las especificaciones.
- Asistencia al ofertante en la evaluación de los requisitos de excavación y sostenimiento del terreno.
- Orientación al propietario en la administración del contrato y seguimiento al desempeño del contratista durante la construcción.

El GBR es usado por:

- La entidad que prepara las especificaciones técnicas en casos donde los métodos y medios de construcción son especificados.
- El equipo de diseño como base en la preparación de un costo estimado de construcción, incluyendo contingencias.
- Los licitantes para conocer las condiciones del terreno esperadas y los riesgos geotécnicos asignados al contratista.
- El contratista o propietario para la selección de los medios, métodos y equipos de construcción.
- El propietario y contratista durante la construcción para comparar las condiciones encontradas con las asentadas en las líneas base.
- Los Dispute Boards para la resolución de controversias.

Líneas base

Dentro de su elaboración las líneas base deben ser útiles, razonables, realistas, y basadas en los datos de las investigaciones geotécnicas y experiencia previa; así evitar escritos pobres, interpretaciones ambiguas, e inconsistencias entre el GBR y otros documentos contractuales como podrían ser los términos de referencia.

Los parámetros contenidos en el GBR deben enfocarse en el comportamiento y/o respuesta del terreno mas que en parámetros geológicos. En lo máximo posible las líneas base deben ser descritas usando términos cuantitativos que puedan ser medidos y verificados durante la construcción.

Los Elementos abordados en las líneas base deben incluir:

- Los montos estimados y la distribución de las diferentes unidades geotécnicas en el proyecto;
- Descripción de resistencia, granulometría, consistencia, pegajosidad y abrasividad de los diversos materiales a excavar;
- Calidad del macizo rocoso y características de las discontinuidades, incluida la rugosidad, los materiales de relleno, la alteración, orientación y permeabilidad;
- Condiciones del agua subterránea: flujos de entrada, tasas de bombeo estimadas, Química prevista, presión, flujos permisibles, y procedimiento de medición en sitio;
- Comportamiento esperado de la excavación e impacto del agua subterránea respecto a los métodos de excavación, los sistemas de sostenimiento requeridos, las deformaciones esperadas y/o permisibles del terreno y los medios para controlarlas
- Zonas de falla, zonas de corte, frentes mixtos, zonas de bloques, zonas de flujo y presión de agua
- Otras fuentes potenciales de dificultades o peligros que puedan impactar el proceso constructivo como, pilas abandonadas, contactos geológicos, impactos a construcciones existentes, gases, y contaminación al terreno y agua subterránea.

Figura 56

Repartición de Riesgos del GBR



Nota. Condiciones dentro de las líneas base son asumidas por el contratista, y fuera de las líneas base son asumidas por el propietario. Obtenido de (Essex R. J., 2016).

Riesgos asociados a condiciones menos adversas que las líneas base son asignadas al constructor, mientras que condiciones más desfavorables son aceptadas por el propietario. Esta conclusión se deriva de que el propietario es dueño del terreno, así como cualquier obstrucción en él, si se determina que las condiciones son más adversas que las establecidas, el propietario paga cualquier costo adicional para superar esas condiciones.

Líneas base más adversas. El propietario puede decidir asignar ciertos riesgos y costos de posibles condiciones diferentes del sitio al Contratista mediante el uso de líneas base más adversas, esto generalmente dará como resultado un aumento en el precio de oferta.

Líneas base menos adversas. Alternativamente, el propietario puede optar por compartir los riesgos y costos a través de líneas base menos adversas y la utilización de disposiciones de pago alternativas. En este caso, el propietario puede disfrutar de un precio de oferta más bajo.

En cualquier caso, los costos asociados con la manipulación de las condiciones del sitio son responsabilidad del propietario. La diferencia es que, en el último caso, el propietario acumulará ciertos beneficios financieros si las condiciones adversas no se cumplen. Por lo general el mejor enfoque es establecer líneas base realistas e incorporar contingencias para condiciones adversas

Líneas Base para Frentes Mixtos

Bloques y boleos

Referenciar en líneas base las condiciones de los bloques y/o boleos que se espera encontrar durante la excavación del túnel es recomendado para ayudar a los ofertantes en la determinación de los métodos de tuneleo, estimar avances, estimar desgastes de los cortadores y costos de reemplazo.

¿Qué referenciar?

- Cantidades y rangos anticipados de tamaños de los bloques.
- Distribución de bloques y boleos a lo largo del túnel (aislado o agrupado) para cada unidad geológica.
- Mineralogía del clasto y tipo de roca.
- Abrasividad del clasto.
- Rangos de resistencia a la compresión no confinada del clasto.
- Tipo de matriz de suelo, resistencia, densidad, permeabilidad y abrasividad.

Aspectos adicionales incluyen forma de los clastos y clasificación del comportamiento de la matriz.

La manera de evaluar si las condiciones encontradas difieren de las referenciadas en caso de que el acceso al frente es limitado y/o el sistema de rezaga reduzca el tamaño de los bloques resultando en la imposibilidad de determinar su contenido es durante las intervenciones periódicas, mediante barrenaciones suplementarias, por evaluación de los parámetros operacionales de la TBM tales como velocidad de rotación y torque, y por monitoreo de vibración de la TBM.

El tamaño y cantidad de bloques y boleos puede establecerse por uno o los tres métodos siguientes:

- Suponiendo o estimando de una experiencia pasada del sitio.
- Métodos de relación de volúmenes de bloques.
- Métodos probabilísticos o estadísticos.

Suponer es muy riesgoso y no recomendado. La experiencia local pasada es valiosa, pero debe ser analizada con investigación geológica.

Cuando no se pueda medir de manera razonable las cantidades y tamaños de los bloques y/o boleos puede optarse por establecer tasas de avance e intervenciones, por ejemplo, una reducción en la tasa de avance del 20% podría establecerse como indicación de terreno con boleos o bloques. El pago puede ser por tarifa unitaria o por longitud de túnel con avance reducido.

Porcentaje de Finos

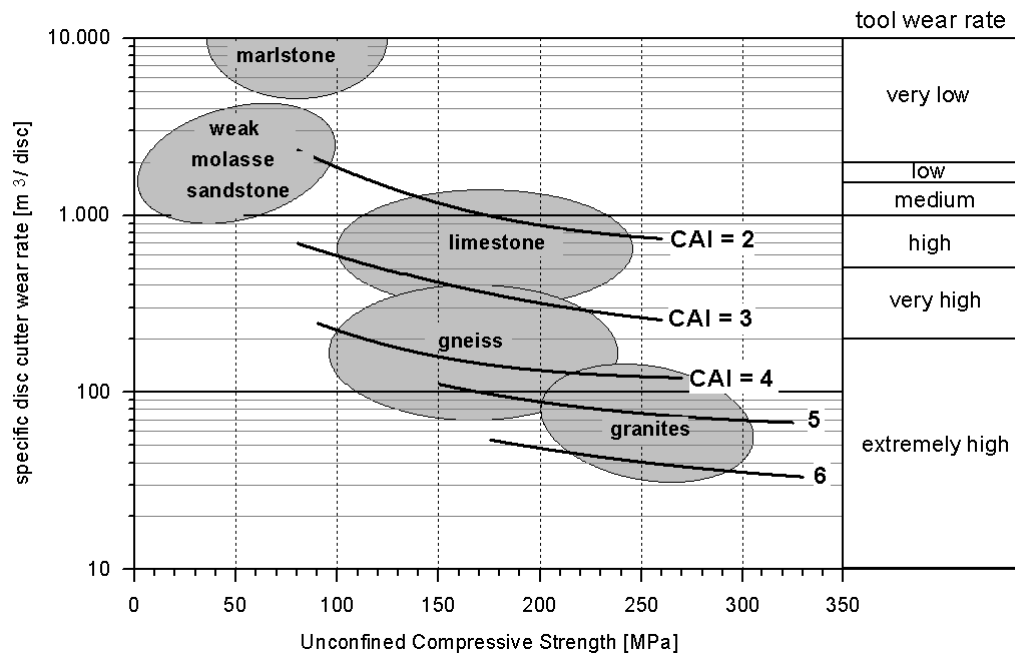
Es importante establecer en el GBR una referencia del porcentaje de finos que se encontraran a lo largo del alineamiento del túnel para que los ofertantes puedan estimar el tipo de aditivos que se van a requerir en la excavación, se debe establecer las zonas con porcentaje de finos menor a 30% cuando se excava con EPB. Longitudes, no localizaciones se deben referenciar para anticipar los modos de operación. Cuando un material de pocos finos es encontrado, ajustes a los parámetros de operación deben ser hechos como se requiera para mantener la estabilidad del terreno y control de asentamientos.

Propiedades de los materiales

Las características importantes de las formaciones de roca que se deben referenciar en el GBR son la resistencia UCS y el nivel de Abrasividad. La resistencia de la roca influye en el tamaño de los discos de corte a utilizar en la TBM y el nivel de penetración durante la operación. Por su parte la Abrasividad de la roca es necesario referenciarla ya que determina el desgaste que sufrirán las herramientas de corte. Existen varias clasificaciones de abrasión para rocas por lo que se debe indicar que criterio se está tomando. La Figura 57 muestra la correlación entre el desgaste de Discos de Corte, la clasificación CAI y la resistencia UCS para diferentes tipos de roca. El contratista debe tomar los valores del GBR como referencia para estimar los consumos de herramientas de corte.

Figura 57

Correlación entre Desgaste, UCS y CAI



Nota. Obtenido de (Maidl B. S., 2001)

En otro aspecto se debe indicar en el GBR el potencial de pegajosidad del terreno para que los ofertantes puedan estimar la cantidad de aditivos a emplear. Si el nivel de pegajosidad es alto se deberá tener en cuenta también el tamaño de las aberturas en la cabeza de corte en el diseño de la TBM.

Para el caso de aditivos que mejoran las propiedades del material se recomienda fijar una referencia para los parámetros que influyen en su selección y cantidad, como el contenido de agua del suelo, las características de plasticidad, resistencia y distribución del tamaño de partículas.

Presión y Flujo de Agua

Dado que en la excavación con TBM el excesivo flujo de agua causa muchos problemas en la operación y desempeño de las TBM y posibles daños económicos y ambientales, no es recomendable y permitido el libre flujo del agua a través del túnel. Contractualmente se deben

establecer los niveles de flujo de agua permitidos. Básicamente hay dos maneras de evitar o disminuir la entrada de agua a la excavación:

- Reduciendo la permeabilidad del terreno por medio de inyecciones de mortero o
- Presurizando el frente de excavación para contrarrestar la presión hidráulica.

La selección de un método depende del tipo de TBM utilizada, y de la presión de agua. En caso de que se pueda evitar o reducir el flujo de agua por medio de frente presurizado se debe indicar en las líneas base la presión máxima de agua esperada, esto para el correcto diseño de la capacidad del tornillo sinfín, sistemas de sellos y sistemas de drenaje cuando se valla a utilizar un EPB.

También se deben asentar las zonas y longitudes de alta presión y flujo de agua que requieran la operación de la TBM con presurización del frente, y el flujo de agua permitido y como medirlo en sitio.

Intervenciones Hiperbáricas

Es de vital importancia para la ejecución segura de los trabajos hiperbáricos que la estabilidad del terreno sea mantenida con la integridad estructural del sostenimiento. La interacción entre el terreno y la estructura del túnel también debe considerarse. Todo esto es responsabilidad del contratista principal. Adicionalmente el contratista principal debe cerciorarse que la correcta presión de aire se mantenga en la cámara de excavación sin pérdida excesiva de aire. Una pérdida excesiva puede definirse como superar el doble del flujo de ventilación requerido en una presión intermedia la cual es 0.3m³ por minuto o más del 30% de la capacidad de suministro de aire comprimido. (AITES ITA, BTS, 2018)

8.3. Dispute Boards

A mayor tiempo en la solución de la disputa, mayor costo¹³.

Una controversia es una falta de consenso entre los actores de un contrato, aparece cuando este no es claro o suficientemente amplio debido a aspectos impredecibles que no se consideraron inicialmente. Estas controversias pueden arreglarse por acuerdo mutuo mediante *negociación*, *mediación* o *conciliación*; o con base en un sistema de carácter obligatorio previsto por las partes cómo *arbitraje* o Paneles de Resolución de Disputas (*Dispute Boards*) o mediante *litigios* en tribunales judiciales.

En lo que respecta a megaproyectos de construcción las controversias requieren de medios de solución en tiempo real, es decir, que se vayan resolviendo según vayan surgiendo, a la par de la ejecución del proyecto, sin necesidad de esperar a que las obras se terminen, y con carácter efectivo. Surgen así los dispute Boards como la opción más viable en la gestión de conflictos dada la metodología que emplean.

Caporal Velasco (2013, pág. 108) menciona que los Dispute Boards son “tribunales arbitrales sui generis que navegan junto con una obra y se activan exclusivamente si surge una controversia. Dado que están enterados de la obra, pueden ponerse en acción de la noche a la mañana”. Por tanto, los integrantes se nombran desde el inicio del proyecto para que lo conozcan, visiten el sitio regularmente y sepan de su desarrollo día a día.

A su vez Hernández García dice: “Se trata de un mecanismo de solución de controversias en el que una persona o un panel, compuesto por tres miembros independiente especialistas en el tema (ingenieros o abogados), son nombrado por ambas partes de un contrato para que dicha persona o panel resuelva durante la ejecución del proyecto las controversias que se susciten” (2014, pág. 26).

Su implementación “no implica la eliminación de los tribunales judiciales... sino que debe utilizarse como una forma de filtrar los temas que no deberían llegar a estas últimas instancias de forma automática. Muchos temas pueden resolverse mediante este mecanismo y son aceptados por las partes, y otros por su gran relevancia, son objeto de revisión judicial o arbitral” (Hernández García, 2014, pág. 29).

¹³ (Cushman, Myers, Butler, & Fisher, 1997)

Ventajas

- “Se incluye un tercero que modifica la dinámica de las partes contratantes hacia un sentido objetivo y no orientado hacia una de ellas” (Hernández García, 2016, pág. 5).
- “Favorece el seguimiento del proyecto a través de visitas y comunicaciones en las que las partes hacen todos sus esfuerzos para mostrar que “están haciendo bien las cosas” ante el DB” (Hernández García, 2016, pág. 5).
- La solución se dicta dentro del plazo de ejecución del proyecto para evitar interrupciones de flujos de efectivo o de los trabajos.
- Prevé la posibilidad de que quienes resolverán las controversias puedan ser consultados informalmente por las partes para conocer opiniones que pueden guiar a las partes a una negociación exitosa.
- Tiene reglas claras y precisas universalmente aceptadas, que permiten una seguridad jurídica tanto de las partes como de la propia mesa de resolución de controversias.
- Favorece y privilegia la ejecución del proyecto en tiempo y forma.

Tipos

Paneles de Revisión (Dispute Review Boards). “Emiten “recomendaciones” que no son inmediatamente obligatorias. En ocasiones, lo que se necesita es adoptar una solución temporal que permite reducir los efectos negativos del statu quo, sujeto a lo que determine en definitiva el tribunal arbitral” (González de Cossío, 2013, pág. 455).

Paneles de adjudicación (Dispute Adjudication Boards). “Emiten “decisiones” que son inmediatamente obligatorias. Ello permite obtener soluciones temporalmente —además de sustantivamente— adecuadas” (González de Cossío, 2013, pág. 455).

Paneles combinados (Combined Dispute Boards). “El panel puede decidir emitir una decisión o una recomendación. Al hacerlo, tomará en cuenta las circunstancias de la disputa. Esta facultad da el valor (adicional a las anteriores dos) que permite adoptar una mejor solución no sólo de fondo, sino de forma. Si la solución de la disputa es mejor lograda mediante el vehículo de una “recomendación” no vinculatoria (obligatoria), así se hará” (González de Cossío, 2013, pág. 455).

Independencia e Imparcialidad

Los miembros de los Paneles de Disputas deberán:

- No tener intereses financieros en el contrato o en el proyecto del cual son parte, excepto para el pago de sus servicios. Es decir, los integrantes de dicho panel no deberán pertenecer a ninguna de las partes que integran el contrato.
- En los diez años anteriores a su nombramiento no haber sido empleado como un consultor u otra cosa por el propietario o el contratista.
- No haber actuado ni actuar en cualquier evento judicial o de arbitraje en relación con el contrato.
- Haber divulgado en escrito al propietario, el contratista, y otros miembros si hubiera cualquier:
 - Relación pasada o existente con cualquier director o empleado del propietario o contratista
 - Hechos o circunstancias que puedan cuestionar su independencia o imparcialidad
 - Intervenciones previas en el proyecto
- Mientras sea miembro del Panel de Disputas no ser contratado o entrar en discusión o hacer cualquier acuerdo respecto a una futura contratación con el propietario o contratista.
- No solicitar, aceptar o recibir (directa o indirectamente) cualquier regalo, gratificación, comisión u otra cosa de valor por parte del propietario o contratista excepto el pago por sus servicios.

Resolución Amistosa

En circunstancias donde los paneles de disputas dan su decisión, pero una o ambas partes están en desacuerdo con la decisión, se debe preparar una cláusula para animar a las partes a solucionar la disputa amistosamente, sin la necesidad de arbitraje.

Las partes pueden interactuar activamente entre si para solucionar su disputa por medio de los siguientes ejemplos:

- Negociación directa entre altos ejecutivos de ambas partes
- Mediación
- Determinación de un experto
- Otra forma alternativa de solución de disputas que no es tan formal, larga y costosa como el arbitraje

A este respecto es recomendado la consideración de un periodo mayor a 28 días para la solución amistosa de la disputa.

Arbitraje

El contrato debe incluir provisiones para la resolución por arbitraje de cualquier disputa no solucionada amistosamente por las partes.

El arbitraje tiene ciertas ventajas respecto a otros mecanismos: los árbitros elegidos emiten una sentencia de carácter obligatorio sobre las controversias resolviendo así la posible negación de las partes a negociar o a aceptar las recomendaciones de una mediación o conciliación, de ese mismo modo evita tener que recurrir a los tribunales donde según González de Cossío, (2013) estos tienen tiempo limitado para conocer de las controversias, además de ver la misma como al resto de los expedientes en su oficina: como un pendiente que debe resolver dedicándole la menor cantidad de tiempo posible.

La Ley de Obras Públicas de México en su capítulo tercero permite la utilización de arbitrajes o de medios alternativos (Dispute Boards) para resolver las disputas que surjan de la interpretación de los contratos, y salvo que no se haya pactado en una cláusula el arbitraje u otro medio alterno o se demuestre la nulidad de la sentencia arbitral estas serán resueltas por tribunales federales.

Nulidad del Arbitraje

De acuerdo con el (Código de Comercio) del cual se rige la ley en términos de arbitraje, en el Título Cuarto del Libro Quinto Capítulo VIII menciona cuando una sentencia arbitral puede ser anulada:

I.- La parte que intente la acción pruebe que:

- a) Una de las partes en el acuerdo de arbitraje estaba afectada por alguna incapacidad, o que dicho acuerdo no es válido en virtud de la ley a que las partes lo han sometido, o si nada se hubiese indicado a ese respecto en virtud de la legislación mexicana;
- b) No fue debidamente notificada de la designación de un árbitro o de las actuaciones arbitrales, o no hubiere podido, por cualquier otra razón, hacer valer sus derechos;
- c) El *laudo*¹⁴ se refiere a una controversia no prevista en el acuerdo de arbitraje o contiene decisiones que exceden los términos del acuerdo de arbitraje. No obstante, si las disposiciones del laudo que se refieren a las cuestiones sometidas al arbitraje pueden separarse de las que no lo están, sólo se podrán anular estas últimas; o
- d) La composición del tribunal o el procedimiento arbitrales no se ajustaron en el acuerdo celebrado entre las partes, salvo que dicho acuerdo estuviera en conflicto con una disposición del presente título de la que las partes no pudieran apartarse o, a falta de dicho acuerdo, que no se ajustaron al presente título; o

¹⁴ Es la resolución dictada en el procedimiento arbitral (Biberley, 2020).

II.- El juez compruebe que, según la legislación mexicana, el objeto de la controversia no es susceptible de arbitraje, o que el laudo es contrario al orden público.

Arbitrajes Internacionales

En contratos internacionales, la Cámara Internacional de Arbitraje tiene numerosas ventajas sobre litigación en tribunales nacionales y es más aceptable entre las partes. Es importante que en contratos internacionales las partes acuerden el número de árbitros y el lenguaje del arbitraje. El país sede del arbitraje debe ser diferente al del contratista y el propietario, este país debe tener una ley moderna y liberal de arbitraje, y tener una convención bilateral o multilateral.

A menos que se resuelva amistosamente cualquier disputa que no haya sido final y *vinculante*¹⁵, deberá ser resuelta por arbitraje internacional.

- La disputa deberá finalmente ser resuelta bajo las reglas de arbitraje de la cámara internacional de comercio.
- La disputa deberá ser resuelta por uno o tres árbitros nombrados en acordancia por estas reglas
- El arbitraje deberá conducirse en el lenguaje definido en el contrato.

Los árbitros deberán tener total poder para abrir, revisar cualquier certificado, determinación, instrucción, opinión o valuación y cualquier decisión del Dispute Board relevante en la disputa.

¹⁵ Que es de acatamiento obligatorio.

8.4. Normatividad y aspectos contractuales

“Un buen contrato no solamente divide las responsabilidades del proyecto; es una fuerza unificadora, un acuerdo comprometiéndolo a ambas partes en un único objetivo común”.

(National Academy of Sciences, 1976)

EL Contrato

Un contrato es un medio con fundamento en la ley por el cual dos o más personas se ponen de acuerdo para llevar a cabo alguna actividad; así dentro de un contrato de construcción son tres los principales actores: el propietario, el diseñador y el contratista (Arrigoni, 2016, pág. 8). El propietario en virtud de su política de asumir riesgos y su capacidad financiera elige el esquema o modalidad de contrato para la construcción de un túnel. Estos modelos de acuerdo con las implicaciones al momento de asignar riesgos pueden ser de dos tipos: contratos en el que el diseño del túnel corre a cargo completamente por el propietario (Diseño-Licitación-Construcción “DLC”) y contratos en el que al contratista le es encargado el diseño del proyecto (Diseño-Construcción “DC”).

“El problema de los modelos de contrato radica en que propician una actitud de confrontación, cada parte tiende a evitar en lo posible asumir riesgos y sacar el mayor provecho de la situación contractual” (Arrigoni, 2016, pág. 8).

Por ello, resulta indispensable establecer en el contrato las cláusulas que le permitan hacer frente a los cambios de condiciones que se puedan presentar durante la ejecución de los trabajos, evitando conflictos entre las partes que afecten o detengan el desarrollo de la obra. Es conveniente delimitar claramente las responsabilidades de cada uno, evaluar los riesgos y sus impactos (Lombardo Aburto & Pérez Reyes, 2016).

Deben de generarse mecanismos contractuales que prevean la posibilidad de resolver los temas que surjan en cualquier momento, y por lo tanto se enfrenten en forma eficiente y de ser posible en forma inmediata.

Factores de Riesgo Contractuales

Inexperiencia del Contratista.

El problema radica en adjudicaciones a empresas que, aun no teniendo suficiente capacidad técnica-financiera y experiencia, son seleccionados por tener la “oferta económica más baja”. Siendo que

debería seleccionarse el licitante con la oferta de mejor valor, entendiéndose esta como la mejor combinación en calidad y precio. La calidad en este contexto significa:

- Las medidas del contratista para asegurar el cumplimiento de los requerimientos del proyecto.
- El tipo y calidad de su organización de sitio.
- Medidas para asegurar la funcionalidad del proyecto.
- El tipo de garantía de calidad.
- Las medidas de mitigación para la protección ambiental.
- Identificación de riesgos. Información general y descripción de los principales riesgos percibidos por el licitante.
- Estrategia para la gestión y mitigación de riesgos.
- Acreditar experiencia del personal encargado en gestión de riesgos, en proyectos similares y sus resultados, de operadores.

Lombardo Aburto & Pérez Reyes, (2016) mencionan que: las políticas de contratación deben considerar un enfoque integral que coteje requisitos de calidad, funcionalidad, impacto ambiental, durabilidad, factibilidad de mantenimiento, costo, programa y las tecnologías requeridas para llevar el proyecto a buen fin, y de acuerdo con ellos una propuesta adecuada debe considerar:

- Un enfoque estratégico para la gestión de cada elemento del proyecto.
- La definición clara de las responsabilidades de cada parte.
- Enfoque hacia la experiencia y capacidades, no hacia el precio.
- Reconocimiento de la incertidumbre geológica inherente a este tipo de proyectos.
- Gestión de riesgos (evaluación y mitigación).
- Formación de vínculos y mecanismos de comunicación entre las partes involucradas en la obra

Una oferta adecuada debe considerar: experiencia, optimizaciones en las metodologías de construcción y una estrategia que origine acciones rentables y que se justifiquen en un ciclo de vida global que considere una oferta razonable que repercuta en una mayor mitigación de riesgos y en el cumplimiento de los programas, lo que también reeditarán en menor cantidad de disputas entre las partes.

- El Contratista debe demostrar su capacidad para organizar su cadena de suministro de tal manera que pueda alcanzar el rendimiento ofrecido.
- El Contratista deberá demostrar su capacidad para cumplir con los estándares de calidad requeridos, los valores objetivo y el sistema de control requerido con su oferta.
- Los aspectos ambientales serán un criterio de adjudicación y podrán decidir el método de tunelización en esta etapa.

Anexo a la oferta económica de los licitantes se deberá presentar la siguiente información con el fin de garantizar una base para evaluar y comparar los licitantes:

- Acreditar experiencia del personal encargado en gestión de riesgos en proyectos similares y sus resultados.
- Información general y descripción de los principales riesgos percibidos por el licitante.
- Estrategia propuesta por el licitante para la gestión de riesgos.

Desconocimiento de la naturaleza de las obras subterráneas

Hernández García (2016) menciona que la falta de entrenamiento y experiencia de muchos actores en el desarrollo de los proyectos subterráneos impiden su ejecución en la forma adecuada y conforme a las mejores prácticas de la industria y propone que:

“Que las asociaciones especializadas en proyectos subterráneos, y que representan a los miembros del sector, exijan a las dependencias y entidades contratantes de este tipo de proyectos, que cuenten con equipos de técnicos calificados y certificados en la materia con alta calidad técnica y moral. Lo anterior para que no solamente las contratantes cuenten con capacidades técnicas suficientes para enfrentar los proyectos, sino para que estos especialistas enfrenten con firmeza a aquellos que, por desconocimiento, o por intereses políticos y administrativos, quieren desarrollar los proyectos subterráneos en formas y tiempos no viables” (Hernández García, 2016, pág. 3).

Ambigüedades y discrepancias en los documentos del contrato.

Cierta información planteada ya en un documento contractual no debe ser repetida en otro, solo se debe referenciar para evitar discrepancias.

“Si algo se dice dos veces, aunque sea ligeramente diferente un elemento se crea ambigüedad. Al igual que con las especificaciones, la regla básica es Dígallo una vez y dígallo bien” (Essex R. J., 2007, pág. 39).

Interferencia de terceros

Al respecto de este punto Lombardo Aburto & Pérez Reyes (2016) mencionan:

“En el pasado, la relación entre el contratante y el contratista era mucho más simple ya que ambas partes ejercían y entendían sus responsabilidades sin necesidad de la mediación de terceros. Hoy en día encontramos que el contratante se complementa con la gestión de la Supervisión, los medios de comunicación, la auditoría y la asesoría especializada, lo cual conlleva un alto nivel de escrutinio que obliga al contratista a cumplir, en un tiempo más corto, con una gran cantidad de documentos que cada parte impone como requisito y que, por su misma diversidad, involucran desarrollos complejos que en muchas ocasiones

implican la asignación de riesgos sobre los cuales el contratista tiene poco control. A su vez, durante la etapa de licitación, estos requerimientos involucran un mayor tiempo de revisión y eventualmente pueden desembocar en disputas y reclamos que alimentan los riesgos inherentes al proyecto” (Lombardo Aburto & Pérez Reyes, 2016, pág. 4)

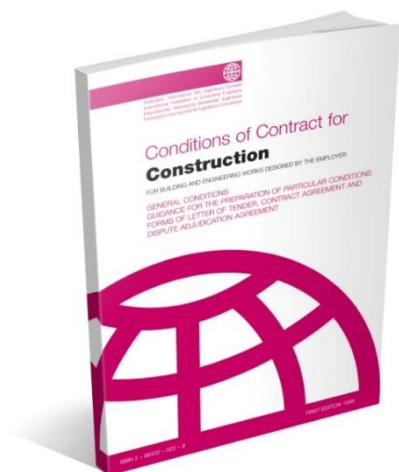
Contratación Diseño-Licitación-Construcción (DLC)

Este tipo de modelo de contratación es recomendado cuando el proyecto de la obra es proporcionado por el dueño o encargado por este a terceros. La obra debe ejecutarse por el contratista en conformidad a las especificaciones entregadas por el propietario, los riesgos son distribuidos entre las partes, considerando la capacidad de cada parte para prever el riesgo, de mitigar sus efectos con sistemas flexibles y adecuados para la incorporación de los cambios de circunstancias que se presenten.

“Es usual que en este tipo de contratos el propietario asuma genéricamente los riesgos de las condiciones geotécnicas adversas, de la ocurrencia de eventos asociados a la fuerza de la naturaleza o a cuestiones propias del proyecto, con exclusión de las condiciones climáticas” (Figuroa Valdes, pág. 3). “El problema principal que se ha identificado se debe a la mala preparación de los proyectos ya que, con frecuencia, la planeación previa a la licitación y la contratación de proyectos es deficiente” (Díaz Padilla, 2016, pág. 20).

Figura 58

Libro Rojo de FIDIC



Nota. Este libro es publicado por la Federación Internacional de Ingenieros Consultores (FIDIC), y establece recomendaciones que deben seguir los contratos tipo DLC. Obtenido de (Díaz Padilla, 2016).

Recomendaciones del manejo del GBR para contratos DLC¹⁶

Para una contratación DLC la preparación del GBR deberá iniciar sólo después de que el diseño este avanzado a un cierto nivel (usualmente el 50 o 60%), y debe ser un esfuerzo de colaboración entre los representantes del equipo de diseño, incluyendo el consultor geotécnico y el propietario.

El equipo de diseño debe:

- Proporcionar expertos en exploración de sitio, recolección de datos y preparación de reportes para el tipo de construcción que se llevara a cabo.
- Preparar interpretaciones de la información que aborden opciones geotécnicamente factibles de diseño y construcción.
- Proveer ingenieros con experiencia en el tipo de diseño y construcción factible para preparar los planos, especificaciones y el GBR.
- Informar y concientizar al propietario sobre el propósito y uso de las líneas base.
- Escribir líneas base claras, concisas, definitivas y realistas que sean compatibles con dibujos y especificaciones, y puedan ser evaluadas objetivamente.
- Explicar las declaraciones de las líneas base y sus consecuencias al propietario y contratista.
- Indicar como las condiciones establecidas se medirán y evaluarán en el campo.

El contratista debe:

- Compartir la información del GBR y GDR y su interpretación de las condiciones del terreno con sus principales proveedores de equipos y materiales, subcontratistas y consultores de diseño.
- Aceptar la responsabilidad por la selección de medios, métodos y equipos, y su impacto en el comportamiento del terreno.
- Proveer medios, métodos y equipo consistente con las condiciones de las líneas base y otras indicaciones en el contrato.
- Hacer prontamente los ajustes requeridos si los métodos y medios son inapropiados.

¹⁶ De acuerdo con (Geotechnical Baseline Reports for Constructions, 2007).

Contratación Diseño-Construcción (DC)

Modelo de contratación en el que el propietario anuncia y licita el diseño y construcción del túnel basado en un diseño preliminar que varía de un 20 a 35% del diseño final (ITA, 1996), así los licitantes elaboran su propuesta con base en un diseño preliminar, un GBR inicial, y en los requerimientos y especificaciones de los *términos de referencia*.

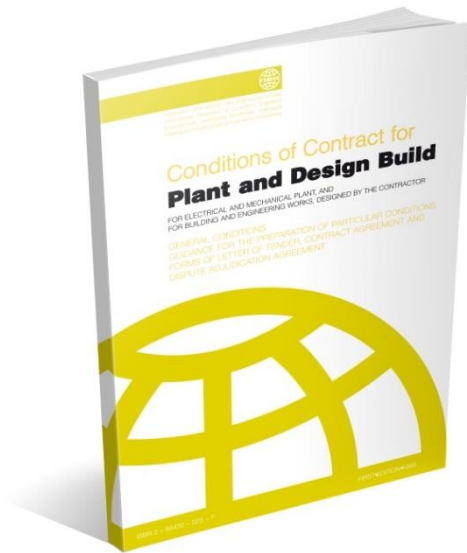
Las ventajas de este esquema es que reduce el tiempo de licitación y de diseño. El propietario puede pedir el financiamiento del proyecto y el pago a través de una oferta a *precio alzado*. Para ser empleado se requiere que exista una gran certeza acerca del precio final y el tiempo de la obra, ya que el contratista asumirá la total responsabilidad tanto por el diseño como por la ejecución del proyecto y su puesta en marcha. Lo usual es que en este tipo de contratos los contratistas incrementen su precio para afrontar esos riesgos adicionales (Podetti, 2004).

En proyectos con este tipo de contratos los roles y responsabilidades no están bien definidos y, en consecuencia, asignar o compartir el riesgo es más difícil de interpretar y puede desembocar en controversias y reclamos. A fin de lograr una asignación de riesgos equitativa se requiere considerar los siguientes factores:

- El contratista es responsable de que el diseño de los componentes de obra permanentes sea consistente con los criterios, requerimientos y normas estipulados por el propietario, y de la idoneidad y constructibilidad del diseño.
- El propietario es responsable de reunir toda la información recabada en los estudios de sitio del diseño preliminar, a fin de condensar toda la información útil para el desarrollo de los diseños y selección de los métodos de excavación por parte de los licitantes DC. No obstante, puede buscar transferir responsabilidades de las investigaciones y diseño geotécnico al contratista para lograr eficiencias en el cronograma, transferir el riesgo geológico u otras razones.
- El contratista es responsable de errores en la estimación de tiempos y cantidades.
- Los errores en las especificaciones y términos de referencia son responsabilidad del propietario, así como sus consecuencias.

Figura 59

Libro Amarillo de FIDIC



Nota. Publicado por la Federación Internacional de Ingenieros Constructores (FIDIC) en el que se dan recomendaciones en contratos tipo Diseño-Construcción (DC). Obtenido de (Díaz Padilla, 2016).

Recomendaciones del manejo del GBR en contratos DC

Se recomienda un proceso de tres pasos para la adjudicación del contrato en cuestión del manejo del GBR:

- Paso 1. El propietario prepara un GBR Inicial sobre la información obtenida para el diseño preliminar que provee unas bases comunes para los licitantes.
- Paso 2. Cada licitante interpreta el reporte y lo complementa con sus consideraciones de diseño quedando así un GBR final, teniendo la oportunidad de obtener información adicional donde lo requiera.
- Paso 3. El propietario examina el GBR final de los licitantes, negocia modificaciones en caso de ser necesarias y selecciona un ganador para reemplazar el GBR inicial e incorporar el del ganador al contrato.

El propietario debe proporcionar una revisión exhaustiva de los diversos documentos de los licitantes, examinar cualquier diferencia que exista entre las diferentes propuestas y negociar una las líneas base de lo que se convertirá el GBR en el contrato DC.

Métodos de pago

La forma de pago en un contrato también define el nivel de riesgo que asumen las partes contratantes. Para obras de túneles el método elegido debe repartir los riesgos de manera equitativa y a quién mejor pueda manejarlos.

Contratos a base de *Precios Unitarios*, el proyecto se paga por concepto de trabajo. El pago total está basado en las cantidades de trabajo estimadas multiplicadas por el precio calculado para cada una, el cual incluye costos por materiales, mano de obra, equipos, gastos generales y una utilidad. El propietario asume los riesgos de errores en las cantidades de obra y cambios en el proyecto por imprevistos geológicos, mientras que el contratista toma los riesgos de errores en la estimación de gastos y rendimientos de trabajo; esto genera una repartición equilibrada de riesgos.

Contrato a Precio Alzado, se fija un precio por la totalidad del proyecto. El contratista asume todo el riesgo por errores en la estimación de gastos, rendimientos y cuantificación de cantidades, y si se estipula en el contrato también por imprevistos geológicos lo cual no es recomendado ya que eleva el costo del proyecto al hacer que los ofertantes se protejan contra el riesgo con porcentajes elevados para imprevistos, que tal vez no ocurran. Por tal motivo en proyectos de túneles solo se recomienda utilizar este tipo de contratos cuando se cuente con una buena cantidad de información del terreno como la construcción de un túnel paralelo a uno existente del que se dispone de registros o a la parte que corresponde solamente al Diseño.

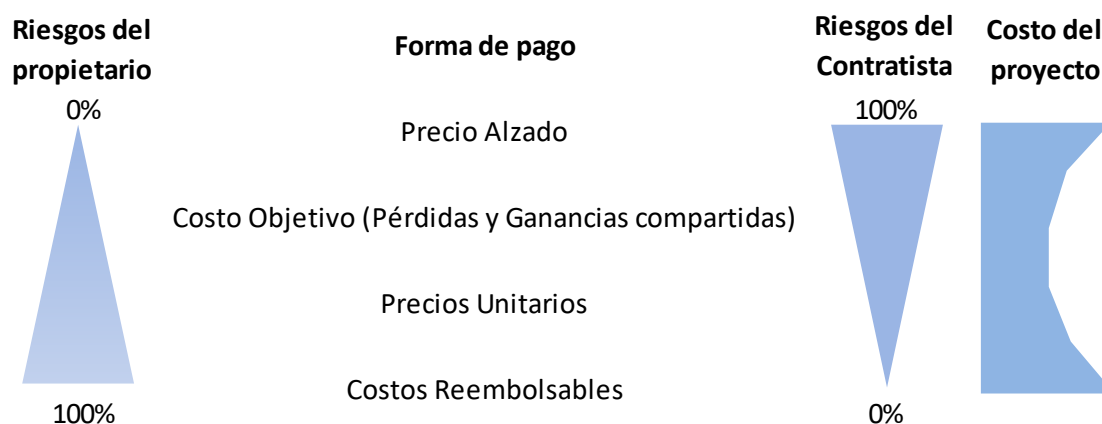
Otros métodos de pago a considerar son:

Costos Reembolsables, se refiere a la devolución de los gastos reales incurridos por el contratista en la realización de los trabajos, la mayor desventaja que refleja este sistema es que los costos pueden subir rápidamente, y se requiere de una revisión exhaustiva de los gastos del contratista, por otra parte, no hay certidumbre de cuál será el costo final. El propietario asume todos los riesgos.

Costo Objetivo. Se fija un costo total estimado del proyecto entre ambas partes, cuya meta en común es no rebasar ese monto. Se revisan los gastos realmente incurridos y estos se reembolsan al contratista más un monto fijo por gastos indirectos y utilidad, y en caso de que el monto final sea superior o inferior al estimado las pérdidas o ahorros son repartidos entre el propietario y el contratista. También requiere una exhaustiva revisión de gastos.

Figura 60

Repartición de Riesgos de acuerdo con el Método de Pago



Nota. Obtenido de *Total costs in function of the payment method (for underground construction)* de (AITES, 2016).

Documentos contractuales

Anexados al contrato se tiene una serie de documentos con información de tipo técnica como los parámetros de operación de las TBM, la clasificación geotécnica del terreno, las especificaciones del túnel entre otros; que en caso de existir algún conflicto, ambigüedad o discrepancia entre ellos debe establecerse la prioridad de cada uno de ellos: La FIDIC y la ITA en su libro (*Conditions of Contract for Underground Works*, 2019, pág. 11) establecen el siguiente orden jerárquico:

1. El acuerdo de contrato firmado
2. La carta de aceptación
3. La carta de la oferta
4. Las condiciones particulares del contrato
5. El Reporte Geotécnico de Referencia GBR
6. Las condiciones generales del contrato
7. Términos de referencia (Los requerimientos del propietario)
8. Reporte de Información Geotécnica, Registro de riesgos y el Plan de Gestión de Riesgos

El Proyecto ejecutivo.

Contiene:

- Una descripción del terreno (modelo geológico con la distribución de los tipos de terreno en la sección longitudinal) y sus parámetros clave.

- Una descripción de los posibles riesgos y de factores de influencia relevante, el análisis de riesgos realizado, y el modelo geotécnico.
- Una descripción y ensayos previos de cualquier mejoramiento del terreno y la justificación para la selección de un método específico de mejoramiento del terreno (congelamiento, jet-grouting, bombeo de drenaje).
- Una descripción de cualquier método adicional para el control de deformaciones del terreno en superficie y a profundidad, de estructuras, incluyendo métodos de pre-sostenimiento, inyección de mortero, y/o apuntalamiento.
- Especificación de la excavación y sostenimiento, escenarios relevantes considerados, análisis aplicado y resultados.
- Especificaciones detalladas (incluyendo medidas a tomar en sitio si hay).
- La determinación de tipo de excavación y sostenimiento, su distribución a lo largo del trazo.

Términos de referencia

De acuerdo con el (Reglamento de la Ley de Obras Públicas y Servicios Relacionados con las Mismas, pág. 79); los términos de referencia es el documento en el que se plasman los requisitos y alcances que precisa el objeto del servicio... deberán indicar dentro de los términos de referencia de la convocatoria a la licitación pública, entre otros, los siguientes datos:

- I. La descripción precisa y detallada de los servicios que se requieren;
- II. Los plazos de ejecución, incluyendo un calendario de prestación de los servicios;
- III. La información técnica y recursos que proporcionará la convocante;
- IV. Las especificaciones generales y particulares del proyecto;
- V. El producto o los documentos esperados y su forma de presentación, y
- VI. En su caso, la metodología a emplear en la prestación del servicio.

Conformidad con leyes

El contratista y el propietario deberán cumplir con todas las leyes aplicables en la realización del contrato.

- a) El propietario deberá obtener el permiso de construcción, licencias y/o aprobaciones para los trabajos permanentes. El contratista será indemnizado de las consecuencias de cualquier retraso o falla en la obtención de los permisos, a menos que la falla sea causada por el contratista.
- b) El contratista deberá dar todas las notificaciones, pagar todos los impuestos, deberes y honorarios y obtener todos los otros permisos, licencias y aprobaciones requeridos por las leyes en relación con la ejecución de los trabajos. El contratista deberá indemnizar al propietario de cualquier consecuencia de alguna falla en la obtención de estos permisos a menos que la falla sea causada por el propietario.
- c) Dentro del tiempo establecido en los requerimientos del propietario el contratista deberá proveer asistencia y cualquier documento al propietario para permitirle obtener los permisos descritos.

Si en el cumplimiento el contratista sufre algún retraso y/o incurre en un costo como resultado del retraso o falla del propietario en la obtención de los permisos, el contratista tendrá derecho a una reclamación de pago y/o extensión de tiempo.

Si el propietario incurre en costos adicionales como resultado de la falla del contratista en el cumplimiento, el propietario tendrá derecho a un reclamo de pago por parte del contratista.

En México todo contrato de obra queda regido por un marco normativo entendiéndose este como el conjunto de leyes, reglamentos, disposiciones y acuerdos a los que deben apegarse y alinearse.

Figura 61

Marco Legal de la Obra Pública en México



Nota. La figura muestra en orden de jerarquía las leyes que rigen la obra pública en México, empezando por La Constitución Política y los Tratados Internacionales.

9. Conclusiones

1. *La incertidumbre geológica es inherente en la construcción de túneles y es fuente de distintos riesgos, no puede ser eliminada completamente, solo es posible mitigar su impacto por medio de una adecuada investigación geológica y/o adoptando prácticas que motiven la ejecución de anteproyectos e ingenierías que incidan positivamente en el conocimiento geológico del proyecto y en consecuencia beneficien el tiempo y costo de ejecución del proyecto.*
2. *La excavación mecanizada de túneles requiere de una extensa investigación geológica del sitio ya que las TBM son muy sensibles a cambios inesperados en las condiciones de excavación. Por lo tanto, la correcta fabricación de este tipo de equipos dependerá de que está considere la mejor aproximación a las practicas que se describan de acuerdo con lo señalado en el punto 1.*
3. *La condición de frentes mixtos representa una fuente de riesgos constructivos y contractuales si no se evalúan adecuadamente sus implicaciones. Representan mayor desgaste en los componentes y herramientas de corte, menores rendimientos y mayores riesgos constructivos que deben ser analizados durante la planeación del proyecto para reducir sus efectos.*
4. *La alta presión y flujo de agua durante la excavación de un túnel con TBM requiere de un plan de acción para su manejo durante la construcción, de manera que se reduzca su impacto al proceso constructivo y la seguridad.*
5. *El correcto control de procesos de una TBM permite la construcción de túneles de manera eficiente al maximizar rendimientos con el menor desgaste posible de sus componentes; evita fallas mecánicas graves y daños a terceros; reduce riesgos geotécnicos y brinda seguridad a los trabajadores.*
6. *Un proyecto exitoso esta caracterizado por el entendimiento del personal involucrado de las implicaciones técnicas y contractuales de las obras subterráneas.*
7. *Se deben contar con mecanismos de gestión de riesgos en la construcción de túneles, como cláusulas de condiciones inesperadas, capitales de reserva para imprevistos, reportes geotécnicos de referencia y paneles de resolución de disputas.*
8. *Las condiciones esperadas del terreno deben ser establecidas en el contrato de manera que sirvan de base para el diseño y establecimiento de los parámetros operacionales de la TBM, la preparación de las ofertas y el diseño del túnel.*
9. *Un cambio no contemplado en estos parámetros durante la construcción puede ser indicador de una condición imprevista del sitio por lo que debe ser informado inmediatamente al propietario.*
10. *Un modelo de contrato debe evitar la confrontación y promover la alianza de ambas partes hacia un objetivo común que es la realización de la obra en el que los riesgos son repartidos de manera equilibrada y a la parte que mejor puede manejarlos.*
11. *Las mejores prácticas en el manejo contractual de túneles no se limitan a aplicar leyes, elaborar adecuados contratos y administrar riesgos, sino en un enfoque integral de todos los procesos que rodean la construcción de un túnel, desde la planeación, el diseño, la*

procuración, hasta la resolución de la última controversia; así las dificultades de excavar en las condiciones más desfavorables como frentes mixtos con alta presión y flujo de agua pueden reducirse y lograr un proyecto exitoso en tiempo, forma y con calidad.

Bibliografía

- Bakhshandeh Amnieh, H., Saber Zamzam, M., & Mozdianfard, M. (June 2016). Geological Hazards analysis in Urban Tunneling by EPB Machine (Case study: Tehran subway line 7 tunnel) . *Int. J. Min. & Geo-Eng Vol.50, No.1, 23-36.*
- Hughes, Jr. , W. H., & Stenman, E. G. (2006). Expecting The Unexpected: Anticipating and Managing Key Risks to Successful Projects. *American Bar Association Forum on the Construction Industry/ TIPS Fidelity & Surety Law Committee.*
- Abe, T., Sugimoto, Y., & Ishihara, K. (1978). Development and application of environmentally acceptable new soft ground tunneling method., (págs. 315-320). Tokyo.
- AITES ITA. (2009). *General Report on Conventional Tunnelling Method.*
- AITES ITA, BTS. (2018). *Health & Safety in Works In Association with the British Tunnelling Society Compressed Air Working Group.*
- AITES, I. (2016). *Recommendations on the development process for mined tunnels.* France: ITA AITES.
- AITES, ITA. (18 de Junio de 2019). *Asociación Internacional de Túneles y Espacio Subterráneo.* Obtenido de <https://tunnel.ita-aites.org/en/how-to-go-underground/construction-methods/mechanized-tunnelling/epbs-shield>
- Alber, M. (2013). ISRM Suggested Method for Determining the Abrasivity of Rock. *Rock Mechanics and Rock Engineering.*
- Alber, M., Yarali, O., Dahl, F., Bruland, A., Kasling , H., Michalakopoulos, T. N., . . . Ozarslan, A. (2013). ISRM Suggested Method for Determining the Abrasivity of Rock by the CERCHAR Abrasivity Test. *Rock Mechanics and Engineering.*
- Alejandro Echemendia Hdez. (28 de Mayo de 2019). Obtenido de <http://www.alejandroechemendia.com/p/la-saturacion-fisicamente-no-es-mas-que.html>
- Arrigoni, G. A. (2016). Manejo Contractual del Riesgo de Construcción. *Obras Subterráneas, 8-24.*
- ASTM D 2487 – 06. (s.f.). Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System).
- Babendererde, S., Hoek, E., Marinos, P., & Silva Cardoso, A. (2004). Geological risk in the use of TBMs in heterogeneous rock masses – The case of “Metro do Porto” and the measures adopted . *Course on Geotechnical Risks in Rock Tunnels, 15.*
- Barla, G., & Pelizza, S. (2000). TBM tunnelling in difficult ground conditions.

- BASF. (s.f.). Tratamiento de terreno en construcción de túneles con tuneladoras de equilibrio por presión de tierras (TBM-EPB).
- Biberley. (11 de Diciembre de 2020). *Biberley el valor de la confianza*. Obtenido de <https://www.iberley.es/temas/laudo-arbitral-caracteristicas-55681>
- Brockway, J. (2016). EPB Machines and Interventions. *Tunneling Short Course*.
- Büchi, E. M. (1995). Rock abrasivity a significant cost factor for mechanical tunnelling in loose and. *Tunnel 5*, 38-43.
- Budhu, M. (2015). *Soil Mechanics Fundamentals*. United Kingdom: John Wiley & Sons.
- Caporal Velasco, A. (2013). *Análisis Y Administración de Contratos de Construcción en la Obra Pública*. México.
- Charoenngam, C., & Yeh, C.-Y. (1999). Contractual risk and liability sharing in hydropower. *International Journal of Project Management*, 17, págs. 29-37.
- Cheng, C., Liao, S., Chen, L., & Zhou, Z. (2016). Comparative Study on Suitability of EPB Machine in Typical Sandy Cobble Ground in China.
- Código de Comercio. (2018). Capítulo VIII De la Nulidad del Laudo. En *Título Cuarto Libro Quinto*.
- Comulada, M. (2018). Particularidades de la excavación con TBM de los Túneles para el Tren Interurbano México-Toluca. *Obras Subterráneas*, 18-21.
- Comulada, M., Maidl, U., Silva, M., Aguiar, G., & Ferreira, A. (2016). Experiences gained in heterogeneous ground conditions at the twin tube EPB shield tunnels in São Paulo Metro Line 5. *ITA-WTC2016*.
- Comulada, S. M., & Maidl, U. (s.f.). Control de procesos y gestión de datos para la excavación de túneles con tuneladora.
- Connors, R. (2017). The Challenges of Tunnelling with Slurry Shield Machines in Mixed Ground. *The David Sugden Young Engineers Writing Award*.
- Conrads, A., Scheffer, M., König, M., & Thewes, M. (2018). Robustness evaluation of cutting tool maintenance planning for soft ground tunneling projects. *Underground Space Volume 3*, 72-85.
- Crespo Villalaz, C. (1996). *Mecánica de Suelos y Cimentaciones*. México: Limusa.
- Cushman, R. F., Myers, J. J., Butler, S. D., & Fisher, L. N. (1997). *Construction Dispute Resolution Formbook*. Wiley Law Publications.
- DAUB. (2010). *Recommendations for the selection of tunnelling Machines*.

- Degn Eskesen, S., Tengborg, P., Kampmann, J., & Veicherts, T. (2004). *Guidelines for tunnelling risk management: International Tunnelling Association*. Suecia: ITA/AITES.
- Díaz Padilla, J. (2016). Los Contratos FIDIC. *Simposio FIDIC-CAIC*. Baja California Norte.
- EFNARC. (2005). *Specification and Guidelines for the use of specialist products for Mechanised Tunnelling (TBM) in Soft Ground and Hard Rock*.
- Essex, R. J. (2007). *Geotechnical Baseline Reports for Constructions*. United States of America: American Society of Civil Engineers.
- Essex, R. J. (2007). *Geotechnical Baseline Reports for Constructions Suggested Guidelines*. United States of America: American Society of Civil Engineers.
- Essex, R. J. (2016). *MANAGING UNDERGROUND RISKS: GEOTECHNICAL BASELINE REPORTS . Breakthroughs in Tunneling Short Course* . Colorado.
- Figueroa Valdes, J. (s.f.). Los contratos de construcción FIDIC frente al derecho Chileno.
- Frenzel, C., Käsling, H., & Thuro, K. (2008). Factors Influencing Disc Cutter Wear.
- Fulcher, B., Home, L., & Hudson-Smith, E. (2017). Proceso de decisión y criterios para seleccionar el método más adecuado para la construcción de un túnel. *Obras Subterráneas*, 13-31.
- GmaxPower. (26 de 07 de 2019). Obtenido de http://www.gmaxpower.com/cutters_for_tbm.php
- Gonçalves de Oliveira, D. G. (2018). *EPB Excavation and Conditionig of Cohesive Mixed Soils: Clogging and Flow Evaluation*. Ontario, Canada: Queen's University.
- González de Cossío, F. (2013). *El arbitraje como solución al dilema de las obras de infraestructura*. México: Instituto de Investigaciones Jurídicas UNAM.
- González de Vallejo, L. I., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2002). *Ingeniería Geológica*. Madrid: Pearson Educación.
- González Izquierdo, R. (2018). TBM en interfase suelo roca y suelo mixto.
- Gonzalez Izquierdo, R. (2018). TBMs para Roca en terreno fracturado. México.
- González Páez, C. V. (2014). *Rendimiento, desgaste y abrasividad en excavación*. Barcelona: UPC.
- González Pascual, A. (2017). *Excavación de túneles en frentes mixtos mediante tuneladora tipo EPB*. México: UNAM.
- González Valderrama, C. (2016). *ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD PARA LA CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES DE METRO MEDIANTE MÁQUINAS TUNELADORAS*. Santiago de Chile: Universidad de Chile.

- greenpackonline*. (17 de 10 de 2018). Obtenido de <http://www.greenpackonline.org/english/environmental-components.php?id=03-04-07-01>
- Grothen, B. (2015). Optimizing Soft Ground Excavation: Development and Design of EPB and Slurry Cutterheads. *SEE Tunnel: Promoting Tunneling in SEE Region*. Dubrovnik, Croatia: ITA WTC 2015 Congress and 41st General Assembly .
- Guglielmetti, V., Grasso, P., Mahtab, A., & Xu, S. (2008). *Mechanized Tunnelling in Urban Areas*. Turin, Italy: Taylor & Francis.
- Hernández García, R. (2014). Administración contractual preventiva y dispute boards en proyectos de infraestructura. *IC Ingeniería Civil*, num. 541, 25-29.
- Hernández García, R. (2016). Manejo Contractual de Riesgos en Proyectos Subterráneos en México: Una Aproximación Meta-Contractual. *4° Simposio Internacional sobre Túneles y Lumbreras en suelos y roca* . México.
- Herrenknecht*. (2016). Obtenido de <https://www.herrenknecht.com/en/products/core-products/tunnelling/epb-shield.html>.
- Herrenknecht. (21 de 02 de 2019). *Herrenknecht*. Recuperado el 23 de Octubre de 2018, de <https://www.herrenknecht.com/en/products/core-products/tunnelling/epb-shield.html>
- Herrenknecht. (18 de Diciembre de 2020). *Herrenknecht* . Obtenido de <https://www.herrenknecht.com/de/produkte/productdetail/mixschild/>
- Herrenknecht. (s.f.). *All around #3 Extreme Tunnelling*.
- Herrenknecht, M., & Böppler, K. (2007). Compressed air work with tunnel boring machines. *Underground Space*.
- Heuer, R. E. (1974). *Important ground parameters in soft ground tunnelling*. New York.
- Hoek, E. (1982). Geotechnical considerations in tunnel design and contract preparation. *Sir Julius Wernher Memorial Lecture*.
- Hollman, F., & Thewes, M. (2013). *Assessment method for clay clogging and disintegration of fines in mechanised tunnelling*. Bochum, Germany: Elsevier.
- Hunt, S. W. (2017). Tunneling in Cobbles and Boulders. *Breakthroughs in Tunnelling 2017* .
- IMT. (11 de Diciembre de 2020). *Instituto Mexicano del Transporte*. Obtenido de <https://imt.mx/resumen-boletines.html?IdArticulo=182&IdBoletin=60>
- Indian Minerology. (20 de 02 de 2019). *Indian Minerology*. Recuperado el 17 de 10 de 2018, de <https://indianminerology.blogspot.com/2016/11/how-to-describe-rock-mass.html>

- iQuimicas. (11 de Diciembre de 2020). *iQuimicas*. Obtenido de <https://iquimicas.com/gases-vi-ley-dalton-presion-parcial/>
- ITA. (1996). ITA Position Paper on Types of Contract. *Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 11, No. 4*, 411-429.
- ITA Workin Group 5. (2018). *Guidelines For Good WorkinG Practice in HiGH Pressure compRESSED air*. ITA.
- ITA, A. (2007). Settlements induced by tunneling in Soft Ground. En *Tunnelling and Underground Space Technology* (págs. 119-149).
- ITA, AITES. (2017). *Geological Uncertainties in Tunnelling - Risk Assessment and Quality Assurance*.
- ITA, F. &. (2019). *Conditions of Contract for Underground Works*. Switzerland.
- Kenyon, P. (24 de Febrero de 2021). *Tunnel Talk*. Obtenido de <https://www.tunneltalk.com/Seattle-SR99-Alaskan-Way-27Aug2015-Insurers-refuse-to-pay-out-for-damaged-TBM-Bertha.php>
- Kenyon, P. (24 de Febrero de 2021). *TunnelTalk*. Obtenido de <https://www.tunneltalk.com/Seattle-Alaskan-Way-25June2014-TBM-Bertha-to-be-strengthened-as-part-of-repair-schedule.php>
- Lindsay, J. (2016). Soil Conditioning Additives. *Breakthroughs in Tunneling Short Course*.
- Lombardo Aburto, A. (2017). *Capítulo IX Un caso en construcción. El túnel emisor oriente (TEO)*. México.
- Lombardo Aburto, A., & Pérez Reyes, J. A. (2013). Excavación de frentes mixtos altamente abrasivos y su relación con los parámetros de avance de un escudo del tipo EPB. *Cuarto Congreso Mexicano de Ingeniería de Túneles y Obras Subterráneas*. México.
- Lombardo Aburto, A., & Pérez Reyes, J. A. (2016). Manejo Contractual del Riesgo. *4° Simposio Internacional sobre Túneles y Lumbreras en suelos y en roca*. México.
- Maidl, B. S. (2001). *Tunnelbohrmaschinen im Hartgestein*.
- Maidl, B., Herrenknecht, M., Maidl, U., & Wehrmeyer, G. (2012). *Mechanised Shield Tunnelling*. Berlin, Germany: Wilhelm Ernst & Sohn.
- Maidl, U. (1995). *Erweiterung der Einsatzbereiche der Erddruckschilde durch Bodenconditionierung mit Schaum*. German: Ruhr-Universität Bochum.
- Marinos, V. (2012). Assessing Rock Mass Behaviour for Tunnelling. *328 Environmental & Engineering Geoscience, Vol. XVIII, No. 4,*, 327-341.

- McFeat Smith, I. (2001). TBM selection for control water ingress and face stability for tunnelling in the widest range of geological conditions. En *Proceedings of Underground Singapore* (págs. 159-168).
- Mendaña Saavedra, F. (2012). La abrasividad de los terrenos: un parámetro básico para la estimación de los costes de los túneles construidos con tuneladora. *Revista de Obras Públicas*, 45-68.
- Moreno y Fernández, A. A. (2017). Construcción de un proyecto subterráneo. *Curso Propedéutico Maestría en Túneles y Obras subterráneas*, (pág. 3). México.
- mosen. (20 de Julio de 2020). Obtenido de <https://mosen.global/2019/09/tunnelling-journal-profiles-mosen-ltd/>
- Narimani Dehnavi, R., Shamsaddini, A., Koohsari, A., Akbar, A., & Hamidi, K. (2017). Challenges of excavation through mixed-face grounds by hard rock TBMs: the case study of Kerman water conveyance tunnel. *International Conference on Tunnel Boring Machines in Difficult Grounds (TBM DiGs)*. Wuhan.
- National Academy of Sciences. (1976). Executive Presentation -recommendations on better contracting for underground construction.
- Oliveira, D., Diederichs, M., Thewes, M., Freimann, S., & Aguiar, G. (2017). EPB Conditioning of Mixed Transitional Ground: Investigating Preliminary Aspects. *Proceedings of the World Tunnel Congress 2017 – Surface challenges – Underground solutions*. Bergen, Norway.
- Podetti, H. (2004). *Contrato de construcción*. Argentina: Astrea.
- Qing-Ping, C., & Yang, Z. (2016). Development and Key Technology of the TBM Cutter Head Drive System. *2016 International Conference on Mechanics Design, Manufacturing and Automation (MDM 2016)*.
- Reglamento de la Ley de Obras Públicas y Servicios Relacionados con las Mismas. (2010). *Capítulo Décimo, Sección I Generalidades, Art.251*. México: DIARIO OFICIAL DE LA FEDERACIÓN.
- Robbins. (1995). *Main Bearings for Advanced TBMS*.
- Robbins company. (20 de 02 de 2019). *Robbins*. Recuperado el 11 de Abril de 2018, de <http://www.therobbinscompany.com>
- Robbins Company. (29 de Diciembre de 2020). *Robbins*. Obtenido de <https://www.therobbinscompany.com/es/neustros-productos/tunnel-boring-machines/sistemas-back-up/>

- Robbins, T. (2018). *The Robbins Company*. Recuperado el 23 de 10 de 2018, de <http://www.therobbinscompany.com/products/tunnel-boring-machines/earth-pressure-balance/epb-tbm-detail/>
- Rostami, J., & Chang, S.-H. (2017). A Closer Look at the Design of Cutterheads for Hard Rock Tunnel-Boring. *Engineering*, 892-904.
- Saénz Fucugauchi, C. R., & Hernández Marín, G. (2018). Excavación con tuneladora en transición de suelos mixtos a roca. México.
- Saenz Fucugauchi, C. (s.f.). Construcción de túneles y lumbreras en suelos blandos y firmes.
- Sánchez Reyes, F. (2014). Fundamentos teóricos para el diseño geotécnico de obras subterráneas. En F. Sánchez Reyes, *Ingeniería de Túneles*. México.
- Sánchez, F., & Suárez, J. (2016). *Memoria técnica de los estudios y los trabajos realizados para la liberación de la tuneladora "La Corregidora"*. México.
- Serradell Mejia, D. (2017). *Análisis de rendimientos en las diferentes etapas de excavación de un túnel en suelo firme, utilizando un escudo EPB*.
- Shirlaw, J. N. (2015). Mixed Face Conditions and the Risk of Loss of Face in Singapore.
- SSI DIVING SERVICES. (2015). *PROCEDIMIENTO DE EMERGENCIA PARA INTERVENCIONES HIPERBARICAS EN TBM*.
- Stille, H., & Palmström, A. (2008). Ground behaviour and rock mass composition in underground excavations. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 46-64.
- Therobbinscompany*. (2016). Obtenido de <http://www.therobbinscompany.com/es/our-products/tunnel-boring-machines/mainbeam/>.
- Therobbinscompany*. (2017). Obtenido de <http://www.therobbinscompany.com/es/our-products/tunnel-boring-machines/singleshield/>.
- Thewes, M. (2004). *Shield Tunnelling with Slurry- or EPB-support in transition zones with rock and soft ground*.
- Thewes, M. (2007). *TBM tunneling challenges – redefining the state of the art*. Prague: ITA-AITES WTC.
- Thewes, M. (2009). Bentonite slurry shield machines: State of the Art and Important Aspects for Application. En *Jornada Técnica: Operación y Mantenimiento de Escudos: Presente y futuro* (págs. 41-68). Barcelona: UPC.

- Thewes, M., & Budach, C. (2010). Soil Conditioning with Foam during EPB-Tunnelling (Konditionierung von Lockergesteinen bei Erddruckschilden). *Geomechanics and Tunnelling, Vol. 3, No. 3*, 256-257.
- Thewes, M., & Burger, W. (2004). *Clogging risks for TBM drives in clay*. . Tunnels and Tunnelling International 36.
- Tóth, Á., Gong, Q., & Zhao, J. (2013). Case studies of TBM tunneling performance in rock–soil interface mixed ground. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 140-150.
- Tunnel Business magazine*. (11 de Septiembre de 2020). Obtenido de <https://tunnelingonline.com/the-real-deal-on-rapid-excavation-its-about-logistics-communication-planning/>
- TunnelTalk. (10 de Diciembre de 2020). *TunnelTalk*. Obtenido de <https://www.tunneltalk.com/Paris-16Aug2018-Bessac-to-supply-EPBM-for-RER-Meudon-safety-chamber.php>
- Warren, S. N., Kallu, R. R., & Barnard, C. K. (2016). Correlation of the Rock Mass Rating (RMR) System with the Unified Soil Classification System (USCS): Introduction of the Weak Rock Mass Rating System (W-RMR).
- WG19, I. W. (2016). *Recomendations on the Development Process for Mined Tunnels*. Francia.
- Wikipedia. (20 de 02 de 2019). *Wikipedia La enciclopedia libre*. Recuperado el 29 de Agosto de 2017, de <https://es.wikipedia.org/wiki/Polipasto>
- Wikipedia. (21 de 02 de 2019). *Wikipedia La enciclopedia libre*. Obtenido de https://es.wikipedia.org/wiki/Ingenier%C3%ADa_del_valor
- Willis, D. (2011). Innovations and Limitations of Two Long-Standing Soft Ground TBM. *tunnel*, 42-49.
- xataka*. (20 de Julio de 2020). Obtenido de <https://www.xataka.com/otros/china-tiene-tunel-metro-largo-mundo-otros-dos-tuneles-record-que-esta-venir>
- Xinggao, L., Dajun, Y., & Qingfei, H. (2017). Cutterhead and Cutting Tools Configurations in Coarse Grain Soils. *The Open Construction and Building Technology Journal*, 182-199.
- Yi, K. H., Tong, S. Y., Casasús, A., Tang, S. K., & Yoon, J. W. (2014). Tunnelling in Mixed Ground Condition - A Challenge to Design and Construction. *Proceedings of the World Tunnel Congress 2014*.
- Yu, C., Zhou, A., Chen, J., Arulrajah, A., & Horpibulsuk, S. (2020). Analysis of a tunnel failure caused by leakage of the shield tail seal system. *Underground Space*, 105-114.

Zhao, Y., Li, P., & Tian, S. (2013). Prevention and treatment technologies of railway tunnel water inrush and mud gushing in China. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 468-477.