



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

CONTROL DE PROCESOS PARA LA EXCAVACIÓN DE TÚNELES EN FRENTE
MIXTO CON TBM DE TIPO EPB

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

PRESENTA:
FRANCISCO JOSE PAT PADILLA

TUTOR PRINCIPAL
ING. CARLOS SAÉNZ FUCUGAUCHI
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA

CIUDAD DE MÉXICO, MAYO DE 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México



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. EN I. MORENO Y FERNÁNDEZ ANDRÉS A.

Secretario: M.I. MENDOZA ROSAS MARCO TULIO

Vocal: ING. SÁENZ FUCUGAUCHI CARLOS RENÉ

1^{er.} Suplente: M. EN I. SUÁREZ FINO JOSÉ FRANCISCO

2^{d o.} Suplente: M.I.D.E. PÉREZ REYES JOSÉ ANSELMO

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: Ciudad de México, mayo de 2019

TUTOR DE TESIS:

ING. CARLOS SÁENZ FUCUGAUCHI

FIRMA

DEDICATORIA

A las personas que todos los días de mi vida me han inspirado, apoyado y, primordialmente, me han brindado todo su amor.

A mis Padres,

Rosa María Padilla y Francisco Pat;

A mis Hermanos,

Ros, Caro y Dani;

y a los amigos de toda la vida.

AGRADECIMIENTOS

Quisiera manifestar aquí mi agradecimiento a todos los profesores que, a través de sus enseñanzas a lo largo de los cursos de maestría, han esculpido mi formación tanto en lo profesional como en la parte humana.

Al Ingeniero Carlos Sáenz por brindarme su valioso tiempo, conocimiento y, sobre todo, su confianza y amistad.

Al maestro José Anselmo Pérez por su inestimable asesoría y consejos para la elaboración de este trabajo.

Al maestro José Francisco Suarez por su tiempo, paciencia, y recomendaciones para finalizar el presente trabajo.

Al maestro Andrés Moreno por su atención brindada, comprensión y apoyo.

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

CONTENIDO

RESUMEN.....	15
1. ANTECEDENTES	16
1.1 Introducción.....	16
1.2 Objetivo de la Investigación.....	17
1.3 Justificación.....	18
1.4 Generalidades del Inicio de las Excavaciones con Escudo	19
1.4.1 Comienzo del aire comprimido	22
1.5 Origen del Control de Procesos	23
1.5.1 Evolución en la Operación de la TBM.....	25
2. CONSIDERACIONES GEOTÉCNICAS E HIDROGEOLÓGICAS EN EL FRENTE DE EXCAVACIÓN.....	27
2.1 Objetivo del Capítulo.....	27
2.1.1 Estudio geotécnico	27
2.2 Frente de Suelo.....	28
2.2.1 Clasificación de los suelos.....	28
2.2.2 Clasificación empírica del suelo en proyectos de túneles.	31
2.3 Frente de Roca.....	33
2.3.1 Clasificación de las Rocas	33
2.3.2 Clasificaciones geomecánicas de los macizos rocosos	35
2.4 Frente Mixto	37
2.4.1 Aspectos importantes para la excavación de un frente mixto con TBM.....	39
2.5 Hidrogeología en el Frente de Excavación	40
2.5.1 Formaciones geológicas y su comportamiento frente al agua.....	41
2.5.2 Presiones de poro	43
2.5.3 Permeabilidad hidráulica de los materiales.....	43

2.5.4	Aspectos hidrogeológicos para la excavación con TBM	46
2.6	Reportes Geotécnicos.....	48
2.6.1	Reporte de interpretación geotécnica	48
2.6.2	Reporte Geotécnico de línea Base para la construcción (GBR).....	49
3.	EXCAVACIÓN MECANIZADA DE TÚNELES CON TBM	50
3.1	Objetivo del Capítulo.....	50
3.2	Tipos y Características de lasTuneladoras.....	51
3.2.1	Máquinas para túneles roca.....	52
3.2.2	Máquinas para túneles en terrenos blandos	54
3.3	Operación de una EPB	59
3.3.1	Principales parámetros de operación de una EPB.....	59
3.3.2	Modos de operación de una EPB	64
3.3.3	Principales problemas durante la excavación de un frente mixto con EPB .	65
4.	CONTROL DE PROCESOS DE EXCAVACIÓN CON UNA EPB	75
4.1	Principio del Control de Procesos.....	75
4.2	Análisis de Datos del Control de Procesos	76
4.2.1	Análisis en tiempo real y post-proceso.....	77
4.3	Determinación de los Parámetros Objetivo	78
4.4	Gestión de Datos	82
4.4.1	Data Logger y conexión Web.....	83
4.5	Procesos Clave en una EPB	84
4.6	Plan de Monitoreo.....	86
5.	CASO DE ESTUDIO: TRAMO 4 DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE DE LA CIUDAD DE MÉXICO	88
5.1	Planteamiento	88
5.2	Descripción General del Proyecto.....	88
5.3	Sitio de Interés: Tramo 4.....	91

5.3.1	Dificultades de avance de la EPB en el Tramo 4	92
5.3.2	Condiciones geológicas del Tramo 4	93
5.4	Control de Procesos en el Sitio	97
5.4.1	Características del dispositivo y software de control	98
5.4.2	Monitoreo de los principales parámetros de operación	98
5.4.3	Selección del método de liberación de la TBM	103
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	107
6.1	Acerca del sistema de Control de Procesos.....	107
6.2	Recomendaciones en la Operación de la EPB en Frentes Mixtos	108
6.3	Comentarios Finales	110
BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS		111
ANEXO A.	MÉTODO OBSERVACIONAL.....	114
ANEXO B.	PARÁMETROS OPERACIONALES DEL ANILLO 1299 – 1309.....	116
ANEXO C.	COMPORTAMIENTO DEL ALINEAMIENTO DE LA EPB	127

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 El “Teredo Navalis” trabajando en la excavación y revestimiento de su “túnel”. (Guglielmetti et al., 2008).....	19
Figura 1.2 Escudo de Brunel bajo el Rio Támesis (Guglielmetti et al., 2008).	20
Figura 1.3 Representación del sistema del escudo de Brunel usado en el túnel bajo el Támesis (Londres 1825-1843).....	20
Figura 1.4 Escudo de Greathead usado en City Railway (Cole, 1895).	21
Figura 1.5 Esquema de un modelo de interfaz de usuario. Adaptada de Comulada (2009).	23
Figura 1.6 Esquema de un modelo de control predictivo (Comulada, 2009).	24
Figura 1.7 Operación de una TBM en los años 90’s. (www.tunnelsoft.com).	25
Figura 1.8 Operación de una TBM en la actualidad. (www.tunnelsoft.com).	26
Figura 2.1 Aplicabilidad de las máquinas tuneladoras (Monsees, 1996)	30
Figura 2.2 Transición de la roca intacta a una muy fracturada por el aumento de la escala (Rocscience.com).	36
Figura 2.3 Frente de excavación de material mixto en una Interfaz roca-suelo, Tóth et al. (2013).....	38
Figura 2.4 Frente mixto con bloques de roca en una matriz de suelo, Tóth et al. (2013).	39
Figura 2.5 Terreno mixto de tipo capa de suelo en roca, Tóth et al. (2013).....	39
Figura 2.6 Características de las Formaciones geológicas. (Vallejo, 2002).....	42
Figura 2.7 Trayectorias de filtraciones en el suelo (Vallejo, 2002).....	43
Figura 2.8 Valores de permeabilidad primaria y secundaria para rocas y macizos rocosos. (Hudson y Harrison. 2000).....	45
Figura 2.9 Equilibrio de presiones de una TBM de tipo EPB.	46
Figura 2.10 Régimen hidrogeológico, (Lunardi, 2008).	47
Figura 3.1 Criterio Mitsubishi para la selección de TBM en función del tipo del terreno. López (2011).....	51
Figura 3.2 Clasificación de principales máquinas del tipo TBM. (ITA, 2017)	52
Figura 3.3 Tuneladora de roca “Topo”. (ITA, 2017)	52
Figura 3.4 Detalle de un escudo simple. therobbinscompany.com, 2018	53
Figura 3.5 Detalle de un Doble escudo. therobbinscompany.com, 2018	54
Figura 3.6 Falla por extrusión en la excavación de túneles (LUNARDI, 2008).	55
Figura 3.7 Esquema de una TBM de tipo Slurry. Adaptada de Vittorio et al., (2008).	56
Figura 3.8 Esquema de los componentes de un Hidroescudo. herrenknecht.com, 2018.	57
Figura 3.9 Escudo de presión de tierra (EPB) y sus principales componentes. therobbinscompany.com, 2018	59
Figura 3.10 Esquema del principio de operación de la EPB	60
Figura 3.11 Modos de operación de una EPB. Adaptada de Maidl et al. (2012).	65
Figura 3.12 Representación esquemática de la presión ejercida por los cortadores en el frente mixto. (Zhao, 2010).....	66
Figura 3.13 Desgaste plano y multiplano en discos de corte. (Hongsu et al., 2007).....	67
Figura 3.14 Mantenimiento por desgaste del tornillo sinfín (COMISAA,2017).	68
Figura 3.15 Accionamiento principal (COMISSA,2017).	69

CONTROL DE PROCESOS PARA LA EXCAVACIÓN DE TÚNELES EN FRENTE MIXTO CON TBM DE TIPO EPB

Figura 3.16 Transmisión de la EPB (COMISSA,2017).....	70
Figura 3.17 Detalle de laberinto de una EPB Robbins.....	71
Figura 3.19 Entrada de agua en un frente mixto. (Hongsu et al., 2015)	72
Figura 3.20 Esquema de la función de los cepillos de tres líneas en una EPB.	73
Figura 3.21 Flujo de agua hacia el interior del túnel por daños en lo cepillos;	74
Figura 4.1 Posición de los sensores de presión ubicados en una EPB (Guglielmetti et al., 2008).	76
Figura 4.2 Típico Circuito típico del control de procesos. Adaptada de Comulada (2009).....	77
Figura 4.3 Esquema de los análisis en tiempo real y post-proceso. (Comulada, 2009).....	78
Figura 4.4 Modelo conceptual de las presiones para la simulación numérica de una tuneladora. (Comulada 2009)	80
Figura 4.5 Modelo numérico tridimensional para la simulación del avance de una tuneladora. (Comulada 2009)	80
Figura 4.6 Esquema de fuerzas e interacciones durante la excavación con tuneladora.....	85
Figura 4.7 Diagrama de causa-efecto del flujo de material al interior de la cámara de excavación, Rahm (2012).	86
Figura 5.1 Localización en planta del Túnel Emisor Oriente (COMISSA, 2014).	89
Figura 5.2 Perfil geológico y localización de lumbreras	90
Figura 5.3 Tuneladora “La Corregidora”. (therobbinscompany.com, 2016)	91
Figura 5.4 Corte estratigráfico de la L-15 a la L-14, COMISSA 2017.	94
Figura 5.5 Detalle de la estratigrafía en la zona del atrapamiento, COMISSA 2017.....	94
Figura 5.6 Frente excavación, vista desde el faldón de la EPB, COMISSA 2017.....	95
Figura 5.7 Datos del sondeo 12, COMISSA 2017.....	96
Figura 5.8 Esquema de las condiciones del macizo rocoso tras la inspección, vista en sentido contrario al avance.	97
Figura 5.9 Esquema del sistema de Control de Procesos en el Tramo 4, COMISAA 201	98
Figura 5.10 Parámetros operacionales en la excavación del anillo 1309	100
Figura 5.11 Vista desde el frente de excavación hacia el faldón de la EPB, COMISSA 2017.	102
Figura 5.12 Desbalance de calidades del macizo basáltico en la zona del atrapamiento, COMISSA 2017. ..	103
Figura 5.13 Esquema del atrapamiento de la TBM en el macizo rocoso y las fuerzas involucradas (COMISSA,2017).	104
Figura 5.14 Esquema de “coyotera” y la secuencia de actividades (COMISSA, 2017).	106
Figura 5.15 Frentes de trabajo para la liberación de la tuneladora (COMISSA, 2017).	106
Figura B.1 Parámetros operacionales del anillo 1299.....	116
Figura B.2 Parámetros operacionales del anillo 1300.....	117
Figura B.3 Parámetros operacionales del anillo 1301.....	118
Figura B.4 Parámetros operacionales del anillo 1302.....	119
Figura B.5 Parámetros operacionales del anillo 1303.....	120
Figura B.6 Parámetros operacionales del anillo 1304.....	121
Figura B.7 Parámetros operacionales del anillo 1305.....	122
Figura B.8 Parámetros operacionales del anillo 1306.....	123
Figura B.9 Parámetros operacionales del anillo 1307.....	124
Figura B.10 Parámetros operacionales del anillo 1308.....	125

Figura B.11 Parámetros operacionales del anillo 1309.....	126
Figura C.1 Alineamiento horizontal y vertical del anillo 1299.....	127
Figura C.2 Alineamiento horizontal y vertical de los anillos 1300 y 130.....	128
Figura C.3 Alineamiento horizontal y vertical de los anillos 1302 y 1303.....	129
Figura C.4 Alineamiento horizontal y vertical de los anillos 1304 y 1305.....	130
Figura C.5 Alineamiento horizontal y vertical de los anillos 1306 y 1307.....	131
Figura C.6 Alineamiento horizontal y vertical de los anillos 1308 y 1309.....	132

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1 Clasificación de suelos en función de su granulometría, ASTM 2487. (Budhu, 2011).....	29
Tabla 2.2 Descripción de la resistencia de los suelos según el Índice de Liquidez. (Budhu, 2011).....	31
Tabla 2.3 Descripción de las propiedades de suelos de grano grueso. Vallejo (2002).....	31
Tabla 2.4 Clasificación de suelos para proyectos de túneles (Heuer, 1974)	32
Tabla 2.5 Clasificación geológica de las rocas.	33
Tabla 2.6 Propiedades de la roca matriz y métodos para su determinación (Adaptada de Vallejo, 2002)	34
Tabla 2.7 Clasificación de rocas a partir de su resistencia a la compresión simple. Adaptada de Vallejo (2002)	35
Tabla 2.8 Clasificación Cerchar para abrasividad (López, 2011).....	35
Tabla 2.9 Factores que influyen en la excavación con TBM en frentes mixtos (Hongsu et. al., 2015).	40
Tabla 2.10 Valores típicos de permeabilidad y conductividad en suelos (Budhu, 2011).....	44
Tabla 4.1 Parámetros empleados en el Q_{TBM}	81
Tabla 4.2 Valores de m.....	81
Tabla 4.3 Métodos para la obtención de los parámetros clave (Maidl, 2014)	82
Tabla 5.1 Parámetros clave y rangos de operación del Tramo 4.....	99

RESUMEN

La motivación de este trabajo recae en la necesidad de brindar recomendaciones relacionadas con el monitoreo operativo de la TBM durante la excavación mecanizada en condiciones de frente mixto. El objetivo general de esta tesis es determinar los procesos clave de operación; a su vez, definir los principales parámetros operativos con la ayuda de un sistema de control de procesos que permita analizar las complicaciones inherentes a este tipo de terrenos.

El primer capítulo trata de los antecedentes del tema, en éste se muestra el inicio de la excavación mecanizada con el primer escudo, sus dificultades y la manera en la que se abordaron. Además, se incluye una breve descripción del origen y el inicio del control de procesos en las excavaciones mecanizadas.

El capítulo dos se destinó para describir las características geológicas y geotécnicas de los frentes de excavación que se pueden presentar durante la construcción: frente de suelo, roca, y la combinación de los dos anteriores conocida como frente mixto. Una vez descritos los posibles frentes de excavación, en el capítulo tres, se presentan, de manera general, las características principales y campos de aplicación de cada uno de los tipos de TBM. Seguidamente, dentro del mismo capítulo se enfatiza en la operación de una TBM de tipo EPB y los problemas que se pueden presentar durante la excavación de un frente mixto.

Después de definir las características de la EPB, en el capítulo cuatro se presenta el sistema del control de procesos acorde a este tipo de máquina, haciendo hincapié en sus principios, objetivos, características y ventajas que éste ofrece. Posteriormente, en el capítulo cinco, se expone una problemática relacionada con la operación de este tipo de máquina en un caso de estudio, la cual se analiza con el control de procesos para un mayor entendimiento. Por último, se presentan las conclusiones y recomendaciones en relación con el caso de estudio y la información consultada.

1. ANTECEDENTES

1.1 Introducción

En los tiempos actuales existe una demanda del espacio subterráneo en los países en desarrollo, la cual es provocada por los cambios demográficos, el envejecimiento de la infraestructura en la superficie de las ciudades, cuestiones ambientales, entre otros; de igual forma, dentro de las urbes se requiere de más espacios libres en superficie, que promuevan una mejor calidad de vida a través de ideas sustentables. De esta manera, hoy más que nunca el espacio subterráneo se ha convertido en un recurso valioso para ofrecer servicios a favor de la sociedad, como lo pueden ser, vías de comunicación, sistemas hidráulicos y de drenajes, almacenamiento de sustancias peligrosas, estacionamientos, centros comerciales, etcétera.

Por otro lado, la gran mayoría de los servicios mencionados requiere de la construcción de túneles, los cuales se pueden clasificar según su utilidad o servicio, su localización y geología. Independientemente de la clasificación y el tipo del túnel, la realización de todos estos presentará una gran cantidad de riesgos inherentes a la ubicación que, sin una planeación previa y un control adecuado durante la construcción, podrían afectar los objetivos de tiempo y costo durante la etapa constructiva.

Lo anterior es con base en la variabilidad del terreno, que se rige por la naturaleza del lugar, la cual emite un gran número de incertidumbres durante la excavación, relacionadas con las características geológicas de la zona; este tipo de incertidumbres se transforman en la principal problemática de la excavación de túneles, a diferencia de otro tipo de obras en donde, por lo general, los riesgos por incertidumbre son mucho menores, o bien más fáciles de mitigar. Adicionalmente, si la excavación del túnel se desarrolla mediante técnicas mecanizadas como las tuneladoras, será necesario llevar a cabo un seguimiento muy de cerca de la operación de la tuneladora y su comportamiento ante las características del terreno, lo anterior se logra a través del monitoreo y control de los parámetros operativos de la máquina, mismos que estarán en función de las condiciones del frente de excavación (Capítulo 2).

Por tal motivo, la complejidad en la construcción de túneles encauza a progresos tecnológicos en la excavación mecanizada con las máquinas tuneladoras denominadas TBM, del inglés *Tunnel Boring Machine* (Capítulo 3). Éstas se encuentran en constante evolución tecnológica por los fabricantes, tal es así, que hoy en día el seguimiento de la operación de la TBM se registra a través de sensores y dispositivos instalados en puntos claves de ésta, para medir, registrar y almacenar datos operacionales durante el avance de la excavación. Esto se realiza a través de un sistema denominado *Control de Procesos* (Capítulo 4), con el cual se pueden llegar a realizar análisis en tiempo real y post proceso de los parámetros operativos empleados en la excavación de cada anillo del túnel. Con la finalidad de controlar, detectar y modificar los parámetros, según sea el caso.

En el presente trabajo de investigación, primeramente, se abordan los aspectos generales para la excavación mecanizada de túneles, para después enfocarse en el monitoreo durante el proceso constructivo con la ayuda del sistema de Control de Procesos como herramienta clave en la construcción de este tipo de obras. Asimismo, se presentan los problemas relacionados con la operación de la TBM-EPB al atravesar un frente mixto, adicionalmente, en un caso de estudio (Capítulo 5) se plantea un problema relacionado con la operación de la máquina durante la excavación en dicho terreno, así como la utilidad del control de procesos para analizar las complicaciones enfrentadas y para proponer soluciones.

En la construcción de los grandes y complejos proyectos como los túneles, el comportamiento operativo de la TBM-EPB en relación con el terreno variable, difícilmente se repita bajo las condiciones específicas que se exponen en el caso de estudio del presente trabajo. Sin embargo, los problemas presentados y las recomendaciones planteadas servirán de referencia para casos similares.

1.2 Objetivo de la Investigación

Determinar los procesos clave de operación entre una TBM de tipo EPB y un frente mixto de excavación. A su vez, definir los parámetros operativos mediante la implementación de un sistema de control de procesos en un caso de estudio, que permita analizar las complicaciones inherentes a este tipo de terrenos. De esta forma, plantear algunas recomendaciones de interés para el monitoreo operativo durante la excavación.

1.3 Justificación

El frente mixto es una de las peores condiciones para la excavación de túneles mecanizados con TBM, el cual se conforma por dos o más materiales geológicos, un material blando y otro rígido. Esto provoca una complicación en la operación de la propia máquina debido al contraste de las características geotécnicas.

Dicho lo anterior, se tendrá que tomar medidas preventivas para la operación de la TBM al enfrentarse estos terrenos que, como se ha dicho, son conformados por materiales blandos y rocas duras, lo cual provoca impactos fuertes en las herramientas de corte que llevan a desgastes inusuales, desalineamientos del escudo, entre otros problemas. Esto se traslada a retrasos prolongados en el proceso constructivo del túnel, aplazando el programa de obra, pudiendo llegar hasta las instancias de una elevación del presupuesto inicial del proyecto.

Por lo tanto, se ha considerado trascendente estudiar los parámetros operativos de una TBM de tipo EPB (del inglés *Earth Pressure Balance*) en un frente mixto, empleando el Control de Procesos, mediante un caso de estudio en el que resulta valioso el registro de datos, las características del terreno, y parámetros de la EPB.

1.4 Generalidades del Inicio de las Excavaciones con Escudo

El objetivo de este apartado es dar a conocer la evolución que ha tenido la excavación de túneles mecanizados desde el origen de los primeros escudos y los desafíos que fueron atravesando, los cuales obligaron a los escudos a evolucionar de manera integral. Hoy en día esto se ve reflejado en la forma automatizada en la que estos trabajan, como la colocación del revestimiento, la estabilización del frente de excavación, el registro y almacenamiento de datos al momento de excavar el terreno, entre otros.

Según Guglielmetti et al. (2008), la creación del primer escudo por Sir Marc Isambard Brunel está basada en la observación de un animal molusco en forma de gusano. Con su nombre científico de *Teredo Navalis* (Figura 1.1), este peculiar animal no será considerado el precursor de la excavación mecanizada, pero al menos proporcionó la inspiración para esta tecnología.

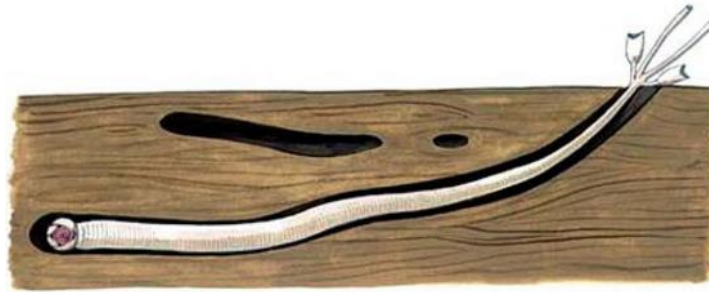


Figura 1.1 El "Teredo Navalis" trabajando en la excavación y revestimiento de su "túnel". (Guglielmetti et al., 2008)

Hasta los principios de 1800, la construcción de túneles era posible aplicando dos métodos diferentes:

- Cortar y recubrir la excavación.
- La excavación del túnel era soportada por marcos de madera que avanzaban en el interior de la cavidad e inmediatamente se revestía con mampostería.

Estos métodos de excavación fueron exitosamente aplicados en dos tipos de suelo, cohesivos y no cohesivos, también en presencia de poca agua filtrada a través de los poros o fisuras, pero realmente nunca bajo el nivel freático.



Figura 1.2 Escudo de Brunel bajo el Río Támesis (Guglielmetti et al., 2008).

La primera idea de la excavación de un túnel bajo el nivel freático fue sugerida por el mismo Brunel, la oportunidad para aplicar su tecnología surgió en 1825, cuando el túnel debajo del río Támesis comenzó a ser excavado (Figura 1.2). El primer intento de excavación fue hecho entre 1825 y 1828 usando un escudo el cual fue considerado inapropiado, y por lo tanto descartado y sustituido por un escudo rectangular. De acuerdo con Stack (1982), describió el escudo de forma rectangular que fue empleado por segundo intento (entre los años 1835-1843). Estaba hecho de hierro fundido, compuesto por 12 compartimientos cada uno alrededor de 1 metro de ancho, dividido en tres celdas (celda superior, media e inferior), cada compartimiento era capaz de moverse independientemente (Figura 1.3).

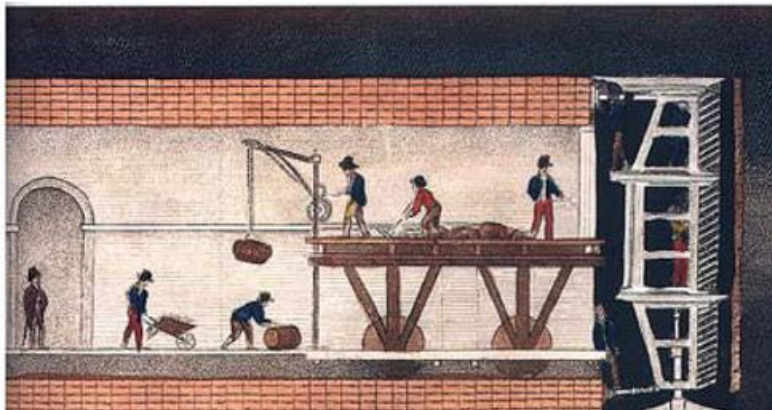


Figura 1.3 Representación del sistema del escudo de Brunel usado en el túnel bajo el Támesis (Londres 1825-1843).

El escudo completo era de 11.43 m de ancho, 6.78 m de alto y 2.74 m de largo. Cinceles en forma de horno estaban unidos en la parte superior e inferior de cada compartimiento, deslizando hacia adelante para cortar y soportar el terreno inmediatamente adelante del escudo. El avance fue por medio de gatos que empujaban en contra de la mampostería terminada del túnel. Cada compartimiento soportaba su parte del frente del túnel por medio de 14 o 15 tableros horizontales.

Después de la exitosa aplicación de la máquina de Brunel, varios inventores sugirieron evoluciones e innovaciones para mejorar la productividad, seguridad y capacidad de hacer frente a una gran afluencia de agua. Entre ellos vale la pena mencionar:

- S. Dunn (1849). Por primera vez surgió una patente para un escudo que avanzaba en una sola pieza.
- P.W. Barlow (1864). Hizo la importante sugerencia de que, el espacio que queda entre la tierra y la extensión del túnel puede ser llenado por inyección de un fluido cementante.

Fueron finalmente A.E. Beach (1826-1896) y J.H. Greathead (1844-1896) quienes en realidad construyeron y usaron escudos incorporando las propuestas anteriores, ambos en el año 1869, pero Beach para el túnel ferroviario neumático en Broadway New York, mientras que Greathead para un nuevo túnel en el río Támesis de Inglaterra.

J.H. Greathead excavó el túnel nuevo de 402 metros de largo debajo del Támesis, esta vez usando un escudo circular con un diámetro externo de 2.18 m. La construcción de este túnel fue sin dificultades particulares, debido a la baja permeabilidad de las arcillas involucradas lo cual garantizó avances sin problemas de infiltración de agua.

Para sostener la excavación, fueron usados anillos de acero por primera vez en lugar de marcos de madera. El escudo de Greathead se convirtió en el modelo de la mayoría de los escudos construidos más tarde (Figura 1.4).

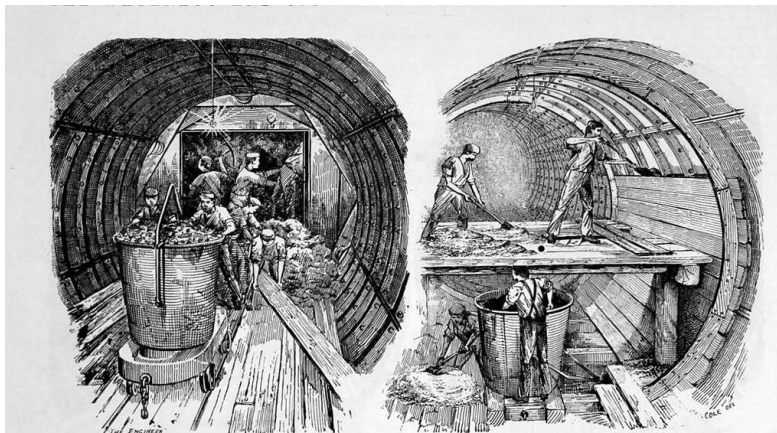


Figura 1.4 Escudo de Greathead usado en City Railway (Cole, 1895).

1.4.1 Comienzo del aire comprimido

A pesar del éxito de la aplicación del escudo de Brunel, aun no estaba resuelto el problema de control del flujo de agua, lo cual provocó que las mejoras posteriores de las TBM se enfocaran primeramente en el sostenimiento del frente, surgiendo así la tecnología del aire comprimido y, en segundo plano, la industrialización del proceso de construcción.

La primera aplicación exitosa para soportar el frente de excavación con la técnica del aire comprimido fue en el túnel Antwerp Dock en 1879 y en el túnel del río Hudson de Nueva York en 1880, por Sir B. Baker y J.H Greathead, respectivamente.

Ambos tuvieron intentos fallidos al tratar de controlar el agua a través de un pozo de cimentación y aire comprimido en el año de 1880. Tal situación los llevó a sugerir la combinación de usar aire comprimido con la tecnología del escudo, para que con ambos se pudiera soportar tanto el frente como el resto del túnel. Este importante mejoramiento, hizo posible construir exitosamente 1130 m de túnel a mediados de 1891 y muchos otros túneles en los siguientes años.

Sin embargo, las mejoras eran todavía necesarias, ya que varios problemas importantes de los trabajadores estaban asociados con el aire comprimido, dado que todo el túnel tenía que mantenerse bajo presión. Estos problemas eran principalmente relacionados con:

- Problemas de salud con los trabajadores, porque tenían que ser movidos con frecuencia y rápidamente de ida tras vuelta entre la sección del frente del túnel bajo presión y la sección posterior del túnel bajo presión atmosférica.
- La aplicación no era efectiva para túneles de gran diámetro, porque la uniformidad del aire comprimido no era compatible con la desigualdad de la presión en el frente, la cual aumenta verticalmente hacia abajo.

No fue sino hasta finales de los años 1950s, que surgió una innovadora solución utilizando un medio de alta densidad para proporcionar soporte en el frente de excavación. Lo cual dio origen a las máquinas modernas, Slurry y EPB (descritas más adelante).

1.5 Origen del Control de Procesos

Así como a los primeros escudos se le fueron sumando y adaptando propuestas innovadoras, según las necesidades a las que se enfrentaban, actualmente las máquinas modernas (tipo Slurry y EPB) están evolucionando cada vez más hacia un horizonte en el que la operación sea completamente automatizada.

De acuerdo con Comulada (2009), el Control de Procesos en operaciones industriales tiene sus orígenes a mediados del siglo XX, inicialmente como simples interfaces de usuario (Figura 1.5). En un sistema de estas características, el operador de una máquina tiene la función de operar, observar y corregir. Las correcciones se ejecutan cuando ciertos parámetros superan unos valores límite de referencia. Los sistemas de Control de Procesos basados en simples interfaces de usuario se muestran insuficientes para procesos complejos como la excavación con tuneladora, dado que faltan herramientas eficientes que permitan captar y reaccionar ante variaciones de la geología y ante la compleja interacción terreno-tuneladora.

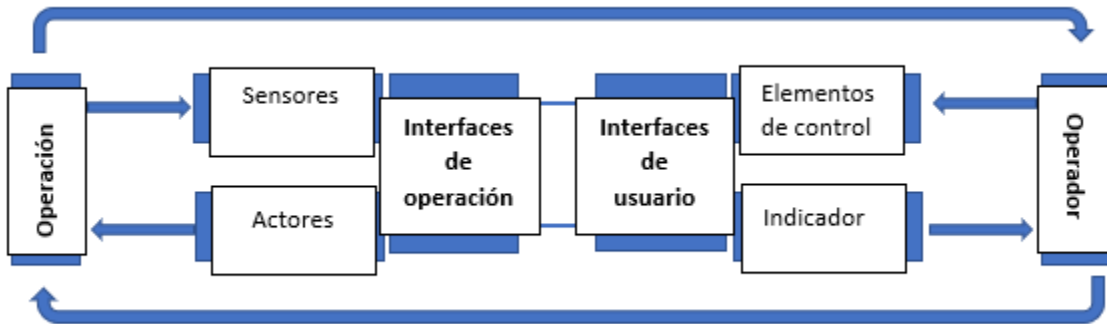


Figura 1.5 Esquema de un modelo de interfaz de usuario. Adaptada de Comulada (2009).

En este sentido, la excavación con tuneladora puede enmarcarse en los denominados sistemas dinámicos. Para el control de sistemas de este tipo, se precisa de modelos de control predictivos, que fueron desarrollados para el control de complejos procesos industriales (Figura 1.6).

No obstante, a diferencia de la mayoría de los procesos industriales controlados, las inesperadas variaciones de la geología e hidrología durante el avance de la tuneladora y la

interacción terreno-tuneladora, no se pueden describir mediante sistemas de ecuaciones diferenciales, sino que se basan en valores de cálculo y de experiencias anteriores.

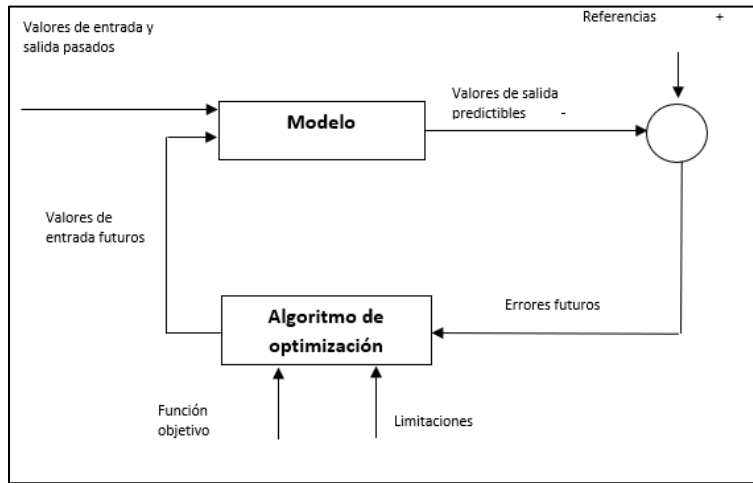


Figura 1.6 Esquema de un modelo de control predictivo (Comulada, 2009).

Hablando del ramo de la construcción, en comparación con otros métodos constructivos, la excavación con tuneladora cumple el prerequisite de proporcionar en tiempo real y en formato digital, un gran número de parámetros de funcionamiento de la máquina que pueden integrarse eficientemente en un circuito de Control de Procesos.

Existen tres factores que se pueden denominar los factores de éxito en la excavación de túneles con tuneladora. Éstos son la seguridad y calidad de la obra, el rendimiento y los costos. Es preciso conocer y dominar los procesos clave del proceso constructivo para conseguir que los factores de éxito del proyecto sean óptimos. Para cumplir estos objetivos, debemos tratar el proceso de excavación con tuneladora, como un proceso industrial que fabrica anillos de dovelas, pero que trabaja en un medio complejo y cambiante (debido a la naturaleza del terreno), y que además interactúa con el entorno, ya sea en una zona densamente poblada, en acuíferos confinados a gran profundidad, o cualquier otra combinación de factores geológicos y urbanos.

1.5.1 Evolución en la Operación de la TBM

En los años noventa, los datos obtenidos de la excavación y el control de calidad se llevaba a cabo a través de una enorme cantidad de documentos escritos. Lo cual daba como resultado una difícil administración de la información, por tanto, almacenarla y disponerla para realizar algún tipo de revisión era una tarea complicada. De igual forma, el envío de información que se generaba día a día, se realizaba de manera deficiente y lenta, desde el Operador de la TBM hacia el sitio de monitoreo en superficie (Figura 1.7).



Figura 1.7 Operación de una TBM en los años 90's. (www.tunnelsoft.com).

Posteriormente, en estos últimos años se ha visto un brinco en la evolución de las tecnologías, desde la famosa invención del internet, las redes inalámbricas, los teléfonos inteligentes, el almacenamiento masivo de datos, entre otros. Esto ha provocado que todas las industrias, incluyendo el ramo del tunelero, empleen toda la tecnología disponible con el objeto de optimizar los procesos.

Es por esto, por lo que el Control de Procesos ha sido adoptado como pieza clave en la construcción de túneles con TBM, gracias al monitoreo y almacenamiento de datos, teniendo como principal ventaja el aprovechamiento de toda la información disponible en tiempo real del proceso constructivo (Figura 1.8). Asimismo, hoy en día se ha logrado realizar cosas importantes como:

- Enlaces en vivo entre la cabina de obra y las oficinas en superficie.
- Es posible el control remoto.
- Documentación con programas de cómputo especializado.
- La información recolectada, es transmitida, rápida y eficientemente, a los responsables de la construcción mediante la integración de medios de notificación electrónica (correo electrónico, mensajes de texto, GIS, etcétera).



Figura 1.8 Operación de una TBM en la actualidad. (www.tunnelsoft.com).

2. CONSIDERACIONES GEOTÉCNICAS E HIDROGEOLÓGICAS EN EL FRENTE DE EXCAVACIÓN

2.1 Objetivo del Capítulo

Durante la construcción de un túnel pueden presentarse una serie de problemas de índole geológicas y geotécnicas, cuya incidencia depende principalmente del grado de su conocimiento previo. Ahora bien, sabemos que es muy difícil obtener una caracterización perfecta del terreno antes de ser excavado; por tanto, será indispensable llevar a cabo la campaña de estudios en función del tamaño del proyecto.

La caracterización del terreno juega un papel muy importante en la excavación mecanizada puesto que a partir de ésta se selecciona el tipo de tuneladora y se determinan sus parámetros operacionales. Por lo que en este capítulo se tiene como objetivo describir de manera general las características de los posibles frentes de excavación, mejor conocidos en la etapa constructiva como; frente de suelo, frente de roca y frente mixto, este último termina siendo una combinación de los dos primeros, tal y como se detalla más adelante.

2.1.1 Estudio geotécnico

De acuerdo con López (2011), la investigación geotécnica debe proporcionar los datos para posibilitar un diseño seguro y económico. La investigación geotécnica debe responder o ayudar a responder, la pregunta del proyectista acerca de las cargas para las que el revestimiento debe ser diseñado; la pregunta del contratista, qué tipo de terreno será excavado, cómo se comportará durante la construcción, qué método de excavación se ha de emplear y cuánto costará; y las preguntas del promotor o dueño sobre si el presupuesto es adecuado y si se puede cumplir el plazo.

La caracterización geotécnica es comprender el comportamiento del terreno, la cual tiene como prioridad esclarecer sus características; los valores asignados a los materiales, para su identificación y clasificación, no son suficiente. El análisis y las recomendaciones de los especialistas en la adquisición, interpretación y presentación de los datos son vitales en el diseño y construcción de túneles.

Por otra parte, el proceso para la obtención de las características y propiedades del terreno no está en los alcances del presente trabajo, ya que estas se obtienen estrictamente de

pruebas de laboratorio y campo, por lo que si se desea profundizar en el tema, se recomienda la lectura en libros o manuales orientados a las metodologías normalizadas para la obtención de éstas.

2.2 Frente de Suelo

2.2.1 Clasificación de los suelos

Para poder describir un frente de excavación de suelo (firme o blando), primero se necesitan establecer las propiedades que conforman este material, que a su vez éste se subdivide dependiendo de sus propiedades. Como se verá en este capítulo las propiedades pueden ser físicas y mecánicas; en el primero caso, tales como su granulometría, contenido de agua, densidad, entre otras; en el segundo se refiere a los parámetros resistentes y deformacionales. Estas propiedades, son las que rigen el comportamiento del terreno al momento de ser perturbado por una excavación.

De acuerdo con Budhu (2011), los suelos se forman a partir de la exposición a la intemperie de las rocas, lo cual produce cambios físicos y químicos. El deterioro físico implica la reducción del tamaño sin ningún cambio en la composición original de la roca. Los principales agentes responsables de este proceso son la exfoliación, la descarga, la erosión, la congelación y el descongelamiento. Mientras que los cambios químicos causan tanto la reducción del tamaño como la alteración química de la roca original. Los principales agentes de estos cambios son la hidratación, la carbonatación y la oxidación.

2.2.1.1 Granulometría

Para estudiar un material complejo como el suelo (con diferente tamaño de partículas y composición química) es necesario seguir una metodología con definiciones y sistemas de evaluación de propiedades, de forma que se constituya un lenguaje fácilmente comprensible por los técnicos de diferentes especialidades y países. Así, se han clasificado los suelos en cuatro grandes grupos en función de su granulometría.

Los suelos de grano grueso se subdividen en grava y arena, mientras que los suelos de grano fino en limos y arcillas. Cada uno de estos se identifica por el tamaño del grano, como se muestra en la Tabla 2.1. Cuando se obtiene una muestra de suelo de algún sitio, ésta resulta ser una mezcla de estos granos o partículas en distintas proporciones.

Tabla 2.1 Clasificación de suelos en función de su granulometría de acuerdo con ASTM 2487. (Budhu, 2011)

TIPO DE SUELO		DESCRIPCIÓN	TAMAÑO PROMEDIO DEL GRANO
Gruesos	Grava	Rocas duras voluminosas redondeadas y/o angulares	Grueso: 75 mm a 19 mm
			Fino: 19mm a 4.75mm
	Arena	Fragmentos pequeños de roca dura, redondeados y/o angulares	Grueso: 4.75 mm a 2 mm
			Medio: 2.0 mm a 0.425 mm
		Fino: 0.425 a 0.075 mm	
Finos	Limo	Partículas menores a 0.075 mm con una casi nula resistencia en estado seco.	0.075 mm a 0.002 mm
	Arcilla	Partículas menores a 0.002 mm con una cierta resistencia en estado seco, el agua reduce su resistencia.	<0.002mm

Para conocer la proporción de cada material que tiene un suelo se realizan análisis granulométricos, utilizando la vía seca para partículas de tamaños superiores a 0,075 mm, y la granulometría por sedimentación mediante el hidrómetro (vía húmeda) para tamaños iguales o inferiores a 0,075 mm.

Por otra parte, la granulometría del suelo es un factor importante en las excavaciones con escudos, ya que la aplicabilidad de cada tipo de TBM se relaciona con cierta granulometría (Figura 2.1), sin embargo, para la selección de la máquina también se requiere de consideraciones en función de las condiciones hidráulicas del medio, el diámetro del túnel, el sistema de soporte, entre otros.

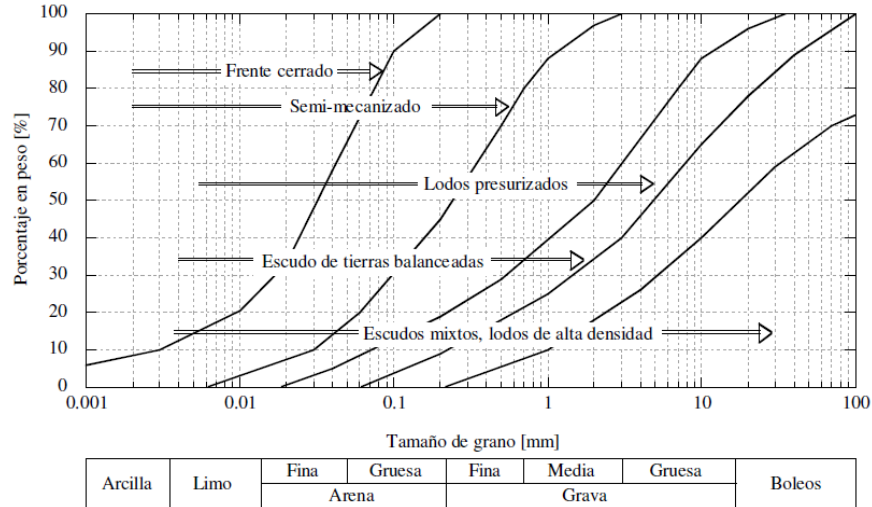


Figura 2.1 Aplicabilidad de las máquinas tuneladoras (Monsees, 1996)

La granulometría proporciona una primera aproximación a la identificación del suelo, pero a veces queda poco claro (arena limo-arcillosa, por ejemplo), por lo que se utilizan unos índices, derivados de la agronomía, que definen la consistencia del suelo en función del contenido en agua, a través de la determinación de la humedad: peso del agua del suelo dividido por el peso del suelo seco (el peso de agua se determina por diferencia entre el peso de la muestra de suelo antes y después de secarlo en estufa).

En lo que respecta a los suelos finos, las características físicas y mecánicas están vinculadas a cuatro estados distintos: sólido, semisólido, Plástico, y líquido, en orden de aumento de contenido de agua. A medida que el suelo continúa secándose, llega a un estado final llamado estado sólido, en este estado, no hay cambio de volumen, ya que casi toda el agua del suelo ha sido eliminada. El contenido de agua en el que el suelo cambia de un semisólido a un sólido se denomina límite de contracción. Este límite es útil para la determinación de la capacidad de abultamiento y contracción de suelos. Los límites líquidos y plástico se llaman los límites de Atterberg, debido a su creador el científico sueco, A. Atterberg (1911).

Dado que los ingenieros están interesados en la resistencia y la deformación de los materiales, podemos asociar características específicas de resistencia con cada una de las consistencias o estados del suelo. En un extremo, el estado líquido, el suelo tiene la resistencia más baja y la más grande deformación. En el otro extremo, el estado sólido, el suelo tiene la mayor resistencia y la más baja deformación. Una medida de la resistencia del suelo utilizando los límites de Atterberg se conoce como el índice de liquidez (*IL*), el cual

es la relación, de la diferencia entre el contenido de agua natural o in situ de un suelo y su límite plástico con su índice de plasticidad. La Tabla 2.2 muestra una descripción de la resistencia del suelo basada en valores de IL , con la cual podemos tener una idea inicial de la consistencia del suelo.

Tabla 2.2 Descripción de la resistencia de los suelos de grano fino según el Índice de Liquidez. (Budhu, 2011)

VALORES DE IL	DESCRIPCIÓN DE LA RESISTENCIA DE SUELO
$IL < 0$	Estado semi-sólido; alta resistencia, frágil, se espera una fractura súbita.
$0 < IL < 1$	Estado plástico, resistencia intermedia, el suelo se deforma como un material plástico.
$IL > 1$	Estado líquido, baja resistencia, el suelo se deforma como un fluido viscoso.

Para el caso de los suelos gruesos, es decir, en las arenas donde la retención del agua es escasa, y la plasticidad es muy baja o nula, no suele hacerse la comparación mencionada anteriormente. Pero sí se hace con la concentración de sólidos. Estos valores se determinan con pruebas de laboratorio y permiten obtener la densidad relativa (D_R). En la Tabla 2.3 se muestra la consistencia del suelo (compacidad relativa) junto con sus valores de densidad seca aparente (γ_d), contenido de humedad (W) y relación de vacíos (e).

Tabla 2.3 Descripción de las propiedades de suelos de grano grueso. Vallejo (2002)

PROPIEDADES DE LOS SUELOS DE GRANO GRUESO				
Suelos de grano grueso	Densidad relativa D_r (%)	Densidad seca γ_d (KN/m^3)	Humedad W (%)	Relación de Vacíos e
Muy Flojos	0-40	<14	>16	0.9
Flojos	40-60	14-16	12-16	0.65-0.9
Medianamente densos	60-80	16-17.5	8-12	0.55-0.65
Densos	80-90	17.5-18.5	6-8	0.4-0.55
Muy densos	90-100	>18.5	<6	<0.4

2.2.2 Clasificación empírica del suelo en proyectos de túneles.

Lo expuesto anteriormente son clasificaciones estandarizadas del suelo a través de pruebas de laboratorio, donde se obtienen características físicas y mecánicas, tales como, propiedades índice y parámetros de resistencia. Ahora bien, durante la excavación de túneles se han observado distintos movimientos y comportamientos del suelo, los cuales están directamente relacionados con las características descritas anteriormente, y se han podido relacionar e identificar de manera empírica.

En la siguiente Tabla 2.4 que se presenta a continuación, se muestra una descripción cualitativa ordenada del mejor al peor comportamiento del suelo en proyectos de túneles, esta clasificación fue modificada por Heuer (1974) a partir de un sistema de clasificación propuesto por Terzaghi (1950).

Tabla 2.4 Clasificación de suelos para proyectos de túneles (Heuer, 1974)

CLASIFICACIÓN DEL SUELO	COMPORTAMIENTO	SUELOS TÍPICOS
1. FIRME	El túnel puede excavarse sin soporte inicial y el revestimiento definitivo puede construirse antes de que el suelo empiece a moverse.	Loes arriba del nivel freático, arcillas duras, margas, arenas y gravas cementadas que no estén sobre esforzadas.
2. GRANEO Lento Rápido	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). En el graneo rápido, el proceso empieza en pocos minutos.	Suelos residuales o arenas con pequeñas cantidades de cementante. Arriba del nivel freático son de graneo lento y bajo el NAF son de graneo rápido. Arcillas firmes fisuradas pueden presentar graneo lento o rápido, dependiendo del grado de sobre esfuerzo.
3. EXTRUIBLE	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 colapso.
4. DESLIZABLE	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, limpios y secos. Cuando existe una cohesión aparente por la presencia de humedad o una cementación débil, que permite que, en un tiempo breve, el material sea estable, a esto, se le conoce como corrida cohesiva.
5. FLUIDO	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.	Limos, arenas o gravas, por debajo del nivel freático, que no contengan arcillas que les puedan dar cohesión y plasticidad.
6. EXPANSIVO	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.

2.3 Frente de Roca.

2.3.1 Clasificación de las Rocas

La descripción de un frente de excavación de roca se hace a través de las clasificaciones geomecánicas, las cuales toman en cuenta la suma de las características físicas y mecánicas tanto de la *roca matriz*¹ como del *macizo rocoso*², así como también factores y propiedades geológicas de la zona.

De acuerdo con Vallejo (2002), las rocas son agregados naturales duros y compactos de partículas minerales con fuertes uniones cohesivas permanentes que habitualmente se consideran un sistema continuo. La proporción de diferentes minerales, la estructura granular, la textura y el origen de la roca sirven para su clasificación geológica. A diferencia de los suelos, la composición, características y propiedades de las rocas son altamente variables, confiriendo a los materiales naturales un carácter heterogéneo y anisótropo, lo que hace que el estudio y la modelización de su comportamiento en el laboratorio sea una labor difícil.

Las clasificaciones geológicas o litológicas son fundamentales en la ingeniería geológica, ya que aportan información sobre la composición mineralógica, la textura y la fábrica de las rocas, así como sobre la isotropía o anisotropía estructural en rocas de determinado origen, como es el caso de las rocas masivas frente a rocas laminadas o foliadas. Así, el término de roca ígnea o metamórfica indica una determinada estructura, textura, composición, tamaño de grano, etc. Estos factores, que se emplean para subclasificar los grupos principales, condicionan las propiedades físicas y resistentes de las rocas (Tabla 2.5).

Tabla 2.5 Clasificación geológica de las rocas.

Clasificación de las rocas por su origen		
Rocas sedimentarias	Detriticas	Cuarcita, arenisca, lutita, limolita, conglomerado
	Químicas	Evaporitas, caliza dolomítica
	Orgánicas	Caliza, carbón, rocas coralíferas
Rocas ígneas	Plutónicas	Granito, gabro, diorita
	Volcánicas	Basalto, andesita, riolita
Rocas metamórficas	Masivas	Cuarcita, marmol
	Foliadas o con esquistosidad	Pizarra, fibita, esquisto, gneiss.

¹ Roca matriz: es el material rocoso exento de discontinuidades, o los bloques de "roca intacta" que quedan entre ellas.

² Macizo rocoso: es el conjunto de los bloques de la roca matriz y de las discontinuidades de diversos tipos que afectan al medio rocoso.

Es preciso comentar que la caracterización de las rocas y de los macizos rocosos y el estudio de su comportamiento mecánico y deformacional, es una tarea compleja debido a la gran variabilidad de características y propiedades que presentan y al elevado número de factores que los condicionan.

2.3.1.1 Propiedades índice y Mecánicas de la Roca matriz

Existen una serie de parámetros que se emplean para la identificación y descripción cuantitativa de las propiedades básicas de las rocas y permiten establecer una primera clasificación con fines geotécnicos, éstas son denominadas propiedades índice, y serán las que determinen en primera instancia, junto con la composición mineralógica, las propiedades y el comportamiento mecánico de la roca matriz (Vallejo, 2002). Mientras que las propiedades mecánicas están relacionadas con los parámetros resistentes y deformacionales de la roca. Entre los que destacan la resistencia a compresión simple o resistencia uniaxial, la resistencia a la tensión y la velocidad de propagación de las ondas, entre otras. En la Tabla 2.6 se incluye una lista de todas ellas y los métodos para su evaluación.

Tabla 2.6 Propiedades de la roca matriz y métodos para su determinación (Adaptada de Vallejo, 2002)

Tipo de propiedad	Propiedades	Métodos de determinación
Propiedades índice y clasificación	Composición mineralógica Fibra y textura Tamaño de grano Color	Descripción visual Microscopía óptica y electrónica Difracción de rayos x
	Porosidad	Técnicas de laboratorio
	Peso específico	
	Contenido de humedad	
	Permeabilidad k	Ensayo de permeabilidad
	Durabilidad Alterabilidad	Ensayo de alterabilidad
Propiedades mecánicas	Resistencia a compresión simple	Ensayo de compresión uniaxial Ensayo de carga puntual Martillo schmidt
	Resistencia al corte	Ensayo de corte directo Ensayo de corte indirecto
	Velocidad de ondas sísmicas	Medida de velocidad de ondas elásticas en laboratorio
	Resistencia (parámetros c y Φ)	Ensayo de compresión triaxial
	Deformabilidad (módulo de elasticidad)	Ensayo de compresión uniaxial Ensayo de velocidad sísmica

Como resultado de la gran variedad de propiedades de la roca, una clasificación para usos ingenieriles es una tarea compleja, ya que las propiedades deben relacionarse con el fin de emplearlas en los cálculos de diseño. Así, los términos cualitativos de roca dura o resistente, blanda o débil deben acotarse mediante determinados valores de su resistencia a la compresión simple: 50 a 100 Mpa para una roca dura y 5 a 12.5 Mpa para una roca blanda

(Tabla 2.7). La dificultad para la clasificación geotécnica recae tanto en el hecho de la alta variabilidad de las propiedades rocosas como en las limitaciones de los métodos y procedimientos para su determinación.

Tabla 2.7 Clasificación de rocas a partir de su resistencia a la compresión simple. Adaptada de Vallejo (2002)

CLASIFICACIÓN DE LAS ROCAS A PARTIR DE SU RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE				
Resistencia a la compresión simple (MPa)	ISRM (1981)	Geological Society of London (1970)	Bieniawski (1973)	Ejemplos
<1	Suelos			
1-5	Muy blanda	Blanda >1.25	Muy baja	Sal, lutita, limolita, marga, toba, carbón.
5-12.5	Blanda	Moderadamente blanda		
12.5-25		Moderadamente dura	Moderadamente dura	Baja
25-50				
50-100	Dura	Dura	Media	Rocas metamórficas esquistosas, mármol, granito, gneiss, arenisca, caliza porosa.
100-200	Muy dura	Muy dura	Alta	Rocas ígneas y metamórficas duras, arenisca muy cementada, caliza, dolomía.
>200				
>250	Extremadamente dura	Extremadamente dura	Muy alta	Cuarcita, gabro, basalto.

En relación con las propiedades de la roca, en la excavación mecanizada de túneles, además de los anteriores, existen otros factores del terreno que juegan un papel muy importante, como lo es la dureza y la abrasividad (Tabla 2.8), esta última tiene una gran influencia en las herramientas de corte, tal y como se describe en el capítulo 3.

Tabla 2.8 Clasificación Cerchar para abrasividad (López, 2011)

CLASIFICACIÓN	ÍNDICE CERCHAR	TIPO DE ROCA
Extremadamente abrasiva	>4.5	Gneis, pegmatita, granito
Altamente abrasiva	4.25-4.5	Anfibolita, granito
Abrasiva	4.0-4.25	Granito, gneis, esquistos, piroxenita, arenisca
Moderadamente abrasiva	3.5-4.0	Arenisca
Abrasividad media	2.5-3.5	Gneis. Granito californiano, dolerita
Poco abrasiva	1.2-2.5	Arenisca Pórtland
Muy poco abrasiva	<1.2	Caliza

2.3.2 Clasificaciones geomecánicas de los macizos rocosos

Al hablar de excavaciones para túneles, el comportamiento del terreno al momento de la excavación no será regido únicamente por las propiedades de la roca matriz, sino más bien, como se comentó al inicio del capítulo, será por las características del macizo rocoso.

Y para el caso de la excavación mecanizada, López (2011) nos dice que si tomamos en cuenta únicamente una resistencia elevada a la compresión simple en una roca matriz, sin considerar que el macizo rocoso se encuentra muy fracturado, esto nos induciría a una elección equivocada de una TBM, lo cual sería inadecuado para las condiciones del terreno (Figura 2.2). Por ello, se ha visto la necesidad de emplear, las ya ampliamente conocidas, clasificaciones geomecánicas para los macizos rocosos.

Según Vallejo (2002), el comportamiento de los macizos rocosos estará determinado por los siguientes factores:

- Propiedades de la roca matriz y litología.
- Frecuencia y tipo de las discontinuidades, que definen el grado de fracturación, el tamaño y la forma de los bloques del macizo, sus propiedades hidrogeológicas, etc.
- Grado de meteorización o alteración.
- Estado de esfuerzos *in si tu*.
- Presencia de agua.

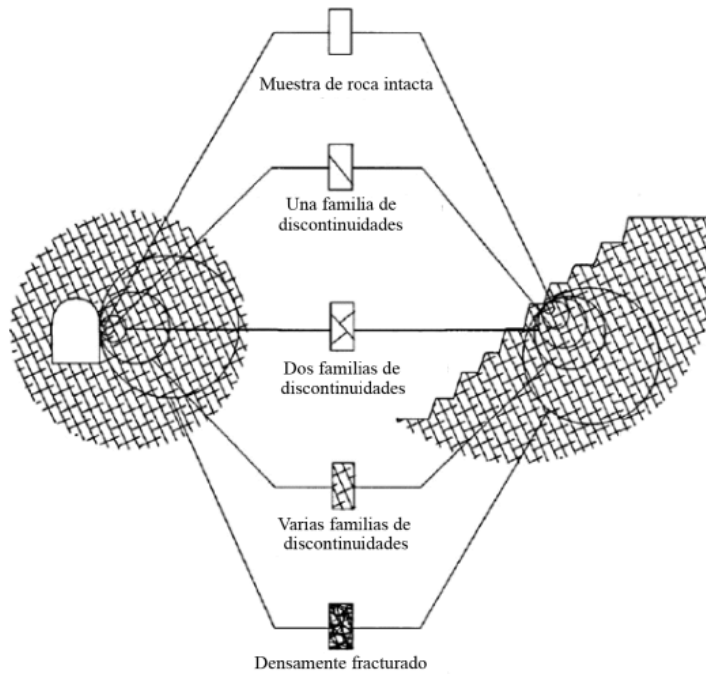


Figura 2.2 Transición de la roca intacta a una muy fracturada por el aumento de la escala (Rocscience.com).

De acuerdo con Sánchez (2015), actualmente, las clasificaciones geomecánicas son una herramienta de uso generalizado en el proyecto y construcción de túneles y, gracias a ellas, es posible obtener un mejor conocimiento, interpretación y aplicación de los datos

geológicos y geotécnicos. Asimismo, dichas clasificaciones son criterios muy útiles que coadyuvan a la representación del comportamiento geomecánico de los macizos rocosos, ya que permiten realizar una primera aproximación de los parámetros mecánicos de diseño, así como de los posibles sistemas de soporte, estabilización y reforzamiento adecuados para el túnel.

Las clasificaciones geomecánicas modernas más difundidas en la ingeniería de túneles son las conocidas como Rock Mass Rating o sistema RMR de Z.T. Bieniawski (1973, 1976, 1979, 1984, 1989), la clasificación del Instituto Geotécnico Noruego, o sistema Q, desarrollado por Barton, Lien y Lunde (1974) y el Geological Strength Index (GSI) desarrollado por Hoek (1985). Las primeras dos clasificaciones se basan en los datos de recuperación de núcleos (RQD, Deere, 1966), número de familias de discontinuidades, rugosidad y estado general de las juntas, presencia de agua y adicionalmente pueden considerar la resistencia de la roca matriz, la orientación de las discontinuidades respecto a la excavación y el tipo de obra de que se trate.

2.4 Frente Mixto

Hasta ahora se ha hablado de las características del terreno en frentes de excavación de suelo y roca, así como sus características principales y necesarias para el estudio del comportamiento de estos materiales.

Ahora bien, cuando el frente de excavación está conformado por dos materiales con calidades muy distintas, como el suelo y la roca, se le denomina frente mixto por la heterogeneidad que presenta el terreno. Actualmente no existen definiciones exactas para subdividir este tipo de terreno, ya que pueden existir distintas maneras en las que se podría presentar la mezcla entre suelo y roca, sin embargo, mientras exista la presencia de roca, se puede hacer uso de las clasificaciones geomecánicas para tener una idea del comportamiento del frente. No obstante, en los últimos años, a través de distintos túneles en el mundo, se han distinguido algunas formaciones usuales en las que se presentan estos terrenos.

De acuerdo con Tóth et al. (2013), el frente mixto es el terreno donde hay dos o más materiales geológicos, presentes de manera simultánea en el frente del túnel con diferencias significativas en las propiedades de los materiales. El medio ha aceptado una definición de frente mixto en una condición donde la relación de resistencia a la compresión

uniaxial (UCS) es igual o inferior a 1/10 entre el material más débil y el más fuerte. Con el fin de ejemplificar las posibles maneras en las que se presenta un frente de terreno mixto, a continuación, se describen las expuestas por Tóth et al., (2013).

Terreno mixto en Interfaz roca-suelo (IRS): Este tipo de suelo mixto se caracteriza por una matriz de suelo que cubre la roca. En zonas cercanas a la superficie la roca es cubierta a menudo por suelos residuales o transportados. De esta forma, al momento de excavar un túnel en esta condición, se encuentran dos materiales muy diferentes, uno suave y uno duro. Áreas de karst relleno y minas llenas de materiales blandos también se consideran como IRS (Figura 2.3).

En relación con la excavación mecanizada de túneles, este tipo de terreno mixto es quizá el frente en condiciones más comúnmente encontrado hasta ahora. Los problemas encontrados durante la excavación en terrenos tipo IRS, son vibraciones en la máquina, cargas de impacto sobre la cabeza de corte y una desigual distribución de fuerzas en el frente del túnel, esto último se describe con más precisión en el siguiente capítulo.

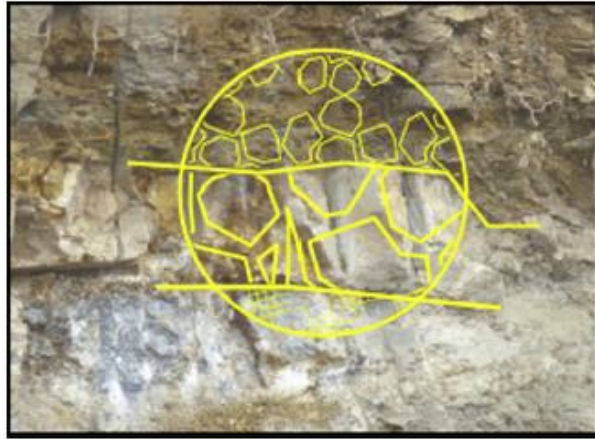


Figura 2.3 Frente de excavación de material mixto en una Interfaz roca-suelo, Tóth et al. (2013).

Boleos de roca en una matriz de suelo (BRS): Este tipo de frente de terreno mixto incluye piedras de río, y rocas incrustadas en una matriz más blanda, como depósitos del río y granito completamente erosionado. El tamaño de los bloques puede variar entre centímetros y metros. El terreno mixto tipo BRS, comúnmente se presenta en los depósitos de aluvión donde piedras de río de diferentes tamaños están rodeados por materiales arenosos y otros tipos de rocas meteorizadas, donde los bloques de roca están incrustados en suelos residuales (Figura 2.4).

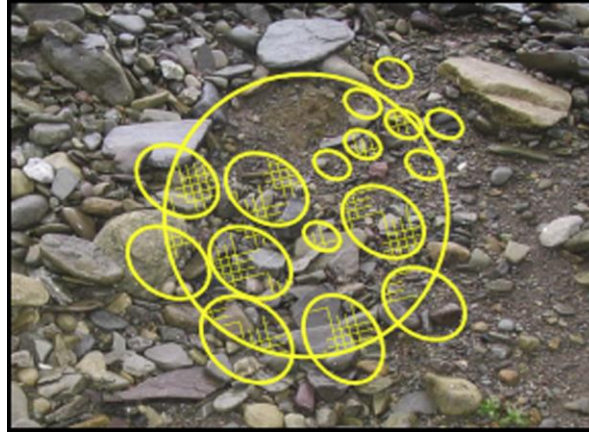


Figura 2.4 Frente mixto con bloques de roca en una matriz de suelo, Tóth et al. (2013).

Intercalaciones de suelo en una matriz rocosa (ISR): Este tipo de terreno mixto está formado por masas de roca en estratos con materiales significativamente diferentes o con distintas propiedades de la roca, como pueden ser típicas formaciones sedimentarias, zonas de fallas e intrusiones en rocas homogéneas. Excavar en un terreno mixto como éste no sólo es influenciado por la relación de área y las propiedades del material en el frente, sino también por la orientación de los estratos mencionados (Figura 2.5).

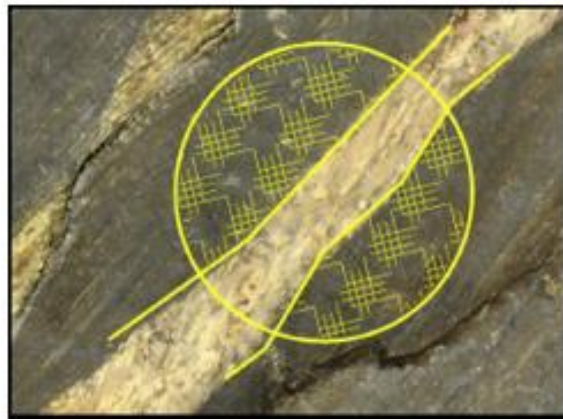


Figura 2.5 Terreno mixto de tipo capa de suelo en roca, Tóth et al. (2013).

2.4.1 Aspectos importantes para la excavación de un frente mixto con TBM

Dado que el rendimiento de la TBM es el resultado de la interacción entre los parámetros operativos y las condiciones geológicas del frente de excavación, para poder atravesar un frente mixto se debe considerar tanto el diseño y operación de la máquina (principales

parámetros operativos, diámetro y longitud del escudo, número de las herramientas de corte, entre otros) como las propiedades geomecánicas del terreno. En la Tabla 2.9 se presentan los factores que influyen en el desempeño de la TBM en este tipo de terrenos. Por otro lado, el tema de los principales procesos y parámetros operativos de la máquina, así como las dificultades durante la excavación en frentes mixtos, se describen en el capítulo 3 (sección 3.3).

Tabla 2.9 Factores que influyen en la excavación con TBM en frentes mixtos (Hongsu et. al., 2015).

Factores del Frente Mixto que influyen en la excavación con TBM		
Parámetros y condiciones del terreno	Consideraciones de la TBM	Parámetros operativos
Propiedades mecánicas: UCS, resistencia al corte, módulo de elasticidad, abrasividad de la roca, resistencia de cohesión del suelo, diferencia entre las propiedades mecánicas de las zonas débiles y las fuertes del frente mixto	Tipo de TBM; validación del modo de operación; disponibilidad del torque y empuje	Empuje Torque
Formaciones geológicas y sus dimensiones: porcentaje del afloramiento de cada tipo de componente en el frente mixto, tamaño y distribución de boleos de roca o piedra de río, presencia de discontinuidades.	Diseño de la rueda de corte (área de apertura, disposición de los rascadores y los discos de corte)	RPM (revoluciones por minuto)
Propiedades hidrogeológicas: distribución y presión del agua subterránea, permeabilidad de la parte denominada como débil y de la interfaz.	Diseño de la rezaga del material excavado.	Método para sostener el frente; Acondicionamiento del material

2.5 Hidrogeología en el Frente de Excavación

De acuerdo con Maidl et. al. (2014), el agua subterránea siempre ha sido uno de los problemas más desafiantes para los ingenieros en la historia del tuneleo. La protección del frente de excavación y de las estructuras contra la entrada de humedad o agua es de gran significado técnico, ya que es tema crítico durante la construcción. Durante la etapa de excavación la entrada de agua desde el terreno excavado debe ser contemplado, así como también en el funcionamiento del propio túnel. La eliminación de agua subterránea a través de distintas técnicas como drenes, sistemas de bombeo, mejoramiento de suelo, entre otros, ha resultado una práctica que sigue siendo una de las tareas más importantes en la construcción de estructuras subterráneas para evitar peligrosos flujos de agua.

Desde el inicio del tuneleo hasta los tiempos actuales el agua subterránea siempre ha sido un tema de gran importancia. Claro está, que las tuneladoras modernas cuentan con la tecnología adecuada para contrarrestar el problema del agua en el frente de excavación. Sin embargo, no deja de ser un reto el atravesar terrenos con flujos y altas presiones de agua subterránea, ya que provocan complicaciones relacionadas con la estabilidad del frente y/o dificultad en la operación de la TBM.

De aquí radica la importancia del conocimiento previo de las condiciones geohidrológicas del terreno, como son el nivel freático, formaciones geológicas de agua, permeabilidad y presiones de poro del terreno, entre otros.

2.5.1 Formaciones geológicas y su comportamiento frente al agua.

Los acuíferos deben ser entendidos como formaciones geológicas subterráneas permeables, susceptibles de almacenar y transmitir el agua. Así, cabe indicar que existe en la naturaleza una amplia gama de formaciones con capacidades muy diversas para almacenar y transmitir el agua; desde el punto de vista hidrogeológico estas formaciones suelen dividirse en cuatro grupos principales (Figura 2.6). A continuación, se presentan los cuatro tipos de formaciones de agua subterráneas y sus características más importantes.

- **Acuíferos:** capaces de almacenar y transmitir el agua (gravas, arenas, materiales calizos, etc.); son formaciones con capacidad de drenaje alta en las que se pueden perforar pozos y sondeos con el fin de satisfacer las necesidades humanas de abastecimiento, agricultura, industria, ganadería, etc. A su vez, los acuíferos se subdividen en tres tipos:
 - *Acuíferos libres:* son aquellos en los que el nivel de agua se encuentra por debajo del techo de la formación permeable. Liberan agua por desaturación, es decir, el agua que ceden es el agua que tienen almacenada; este volumen de agua es alto en comparación con los acuíferos que se citan a continuación.
 - *Acuíferos cautivos o confinados:* son aquellos que están aislados en el subsuelo, rodeados de materiales impermeables por todos sus lados. El nivel de agua en los acuíferos cautivos está por encima del techo del material acuífero; en realidad, están a presión o en carga, debido al peso de los

materiales superiores. El agua que ceden procede de la descompresión de estos niveles superiores, cuando se produce la depresión en el acuífero.

- *Acuíferos semiconfinados*: los materiales que los rodean no son todos impermeables; así, el paquete superior o semiconfinante lo constituyen formaciones semipermeables, que permiten el paso del agua de otros acuíferos superiores al inferior semiconfinado.
- **Acuítardos**: capaces de almacenar el agua en cantidades muy importantes, pero la transmiten con dificultad; se suelen denominar con frecuencia formaciones semipermeables (limos, arenas limosas, arenas arcillosas, etc.), y su capacidad de drenaje es media a baja; no son de interés para la obtención de caudales que puedan servir a alguna necesidad hídrica, pero en la naturaleza, juegan un papel muy importante como elementos transmisores del agua en recargas verticales a través de grandes superficies.
- **Acuicludos**: pueden almacenar el agua en grandes cantidades, pero no tienen la posibilidad de transmitirla y se drenan con mucha dificultad; el agua se encuentra encerrada en los poros de la formación y no puede ser liberada (arcillas, arcillas plásticas, limos arcillosos, etc.); en hidrogeología, se asumen como impermeables.
- **Acuífugos**: formaciones incapaces de almacenar y de transmitir el agua; están representados por las rocas compactas, como granitos y gneises, y a veces incluso calizas muy compactas sin carstificar, se muestran como impermeables salvo que existan fracturas que pueden permitir flujos.

	Capacidad de almacenar	Capacidad de drenar	Capacidad de transmitir	Formaciones características
ACUÍFEROS	ALTA	ALTA	ALTA	GRAVAS, ARENAS, CALIZAS
ACUÍTARDOS	ALTA	MEDIA/BAJA	BAJA	LIMOS, ARENAS LOMOSAS, ARCILLAS
ACUICLUDOS	ALTA	MUY BAJA	NULA	ARCILLAS
ACUÍFUGOS	NULA	NULA	NULA	GRANITOS, MARMOLES, GNEIS

Figura 2.6 Características de las Formaciones geológicas. (Vallejo, 2002)

2.5.2 Presiones de poro

La presión de poro se define como la presión de agua existente entre los poros del suelo, para esto, se debe tener en cuenta que el suelo es un conjunto de partículas entre las que existen huecos o poros interconectados, de manera que el agua puede fluir a través de éste. Como es fácil imaginar, el camino de filtración resulta bastante tortuoso, ya que el agua ha de sortear la gran cantidad de obstáculos que suponen las partículas del suelo (Figura 2.7). En consecuencia, en el proceso se producirán pérdidas de carga hidráulica, y la mayor o menor facilidad para que se produzca este flujo será en función de la granulometría del suelo.

De esta manera, un suelo granular posee partículas de tamaño considerable, de forma que también lo son las dimensiones de los poros entre éstas, lo que ocasiona que el agua fluya con facilidad a través de ellas. Sin embargo, en un suelo fino como una arcilla, las partículas tienen un tamaño demasiado pequeño y sus poros resultan también extremadamente pequeños, en estas condiciones el agua encontrará muchas más dificultades para circular.

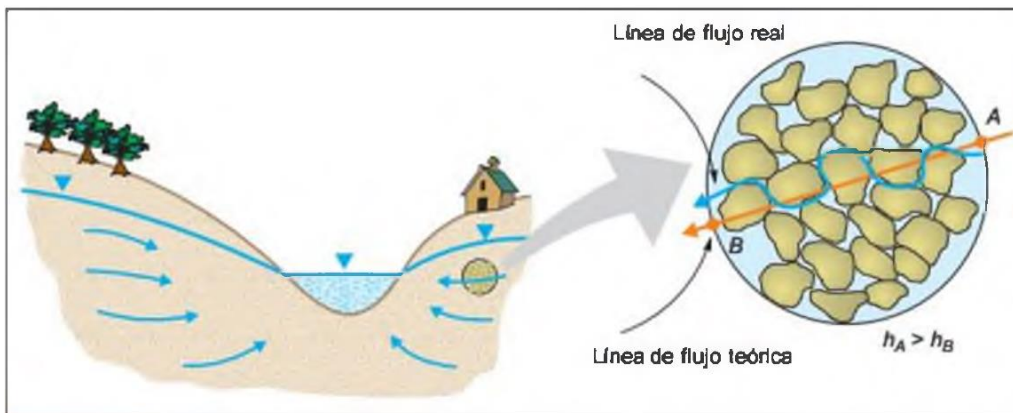


Figura 2.7 Trayectorias de filtraciones en el suelo (Vallejo, 2002).

2.5.3 Permeabilidad hidráulica de los materiales

2.5.3.1 En suelos

El coeficiente de permeabilidad fue enunciado por primera vez por Darcy en 1856. Se mide en unidades de velocidad (m/s, m/día o cm/s) y es quizás el parámetro hidráulico que registra mayores variaciones en función del tipo de suelo. En la Tabla 2.10 se incluyen valores típicos de permeabilidad en suelos. Según Vallejo (2002), se define el coeficiente

de permeabilidad, k , de un suelo como un parámetro que mide, la facilidad para que el agua circule a través de éste, dicha permeabilidad dependerá de:

- La granulometría, es decir, de la distribución de tamaños de los granos del suelo (y por lo tanto de sus poros), siendo k , menor cuánto más pequeñas sean las partículas del suelo.
- La densidad del suelo, dado que, para una misma granulometría, cuanto más denso sea el terreno menor será su volumen de vacíos, y menor será k .
- La forma y orientación de las partículas, ya que, si las condiciones de sedimentación dan lugar a orientaciones preferenciales, la permeabilidad podrá variar sustancialmente en función de la dirección de flujo.

Con base en lo mencionado anteriormente, en las excavaciones mecanizadas bajo el nivel freático, es importante que en todo momento se tenga en cuenta la presión de poro y la permeabilidad de los materiales, ya que en el caso de un frente de suelo conformado en su mayoría por arenas, éste produciría poca presión en el frente pero pudiese generar flujos de agua considerable, mientras que si fuesen arcillas, éstas no producirían flujos debido a su impermeabilidad, pero sí generarían una mayor presión en el frente por su capacidad de retener el agua. En el siguiente apartado del presente capítulo se presentan los aspectos hidrológicos en las excavaciones con TBM.

Tabla 2.10 Valores típicos de permeabilidad y conductividad en suelos (Budhu, 2011).

Tipo de suelo	K (cm/s)	Descripción	Capacidad de drenar
Grava limpia	>1.0	Alta	Muy buena
Arena limpia, mezcla de arena y gravas	1.0 a 10^{-3}	Medio	Buena
Arena fina, limos, mezcla de arenas, limos y arcillas	10^{-3} a 10^{-5}	Baja	Pobre
Arcillas y limos erosionadas y agrietadas	10^{-6} a 10^{-7}	Muy baja	Pobre
Arcilla homogénea	$<10^{-7}$	Prácticamente impermeable	Muy pobre

2.5.3.2 Permeabilidad en la Roca matriz y Macizo rocoso

La permeabilidad de la roca matriz es intergranular, y el agua se transmite a través de los poros y microfisuras interconectados de la roca, recibiendo el nombre de permeabilidad primaria. En los macizos rocosos el agua fluye a favor de las superficies de discontinuidad, y se define como permeabilidad secundaria (Figura 2.8). Por lo general, la permeabilidad

de la roca matriz es despreciable con respecto a la del macizo rocoso fracturado. Una excepción son las areniscas y otras rocas porosas, donde sí es posible el flujo de agua a través de la matriz. Los macizos rocosos karstificados son los que presentan mayores valores de permeabilidad debido a la presencia de discontinuidades muy abiertas y cavidades producidas por la disolución de los materiales carbonatados.

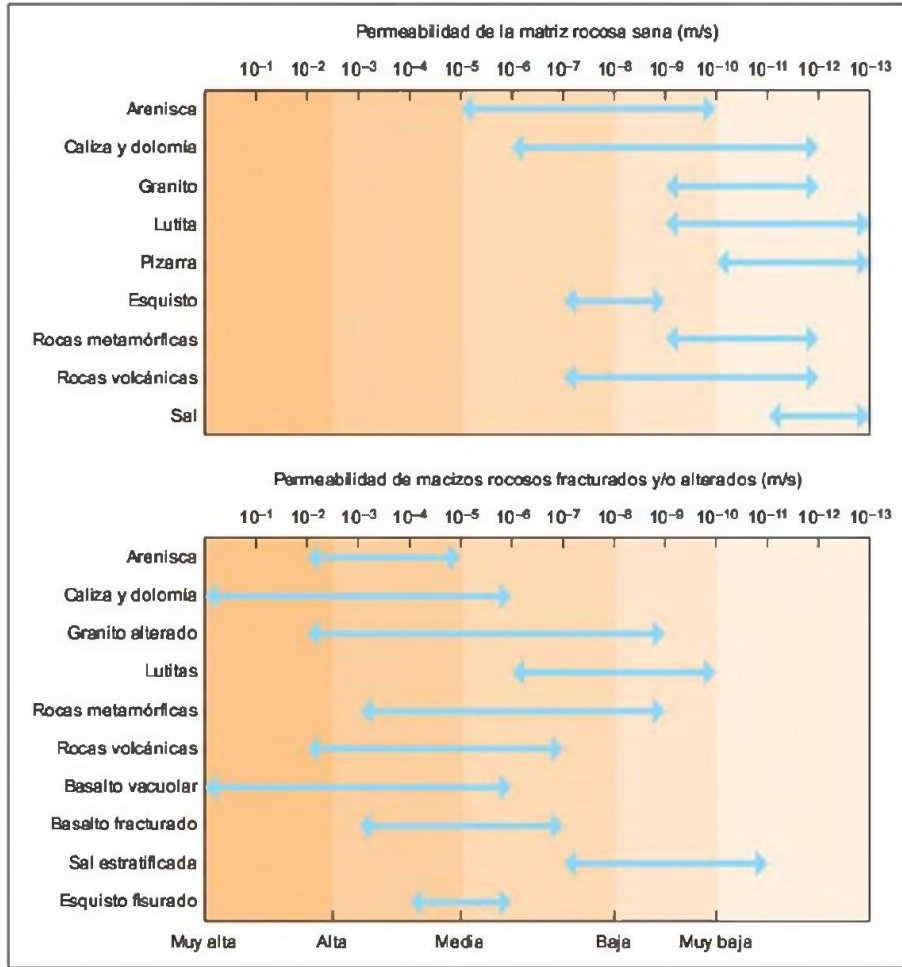


Figura 2.8 Valores de permeabilidad primaria y secundaria para rocas y macizos rocosos. (Hudson y Harrison, 2000)

2.5.4 Aspectos hidrogeológicos para la excavación con TBM

Un túnel que avanza dentro de un acuífero sin ninguna medida para controlar el agua subterránea es susceptible a presentar infiltración a través del frente expuesto. Ya que se crea un efecto de drenaje hacia el interior del túnel, que de no tratarse adecuadamente puede conducir al colapso del frente de excavación.

Sí bien, es sabido que el agua tiene un efecto perjudicial en las características de resistencia y deformabilidad de rocas y suelos. Este efecto, es el resultado de la reducción de la cohesión efectiva y los valores de fricción.

En la excavación de un frente de suelo las condiciones hidrogeológicas (flujos y presiones hidráulicas) pueden afectar la estabilidad del terreno, ya que mientras más alto sea el contenido de agua en el terreno, éste se vuelve menos resistente, debido a una disminución del esfuerzo efectivo y a la vez un aumento en la presión hidráulica.

La alta presión del agua subterránea representa un riesgo para la construcción del túnel con TBM, puesto que ésta debe ser contrarrestada con la presión generada en la cámara de excavación en modo cerrado (Cap. 3 sección 3.3), así la máquina logra realizar el avance y, en caso de existir, evita el flujo de agua excesivo que pudiese causar inestabilidad y/o inundación del túnel (Figura 2.9).

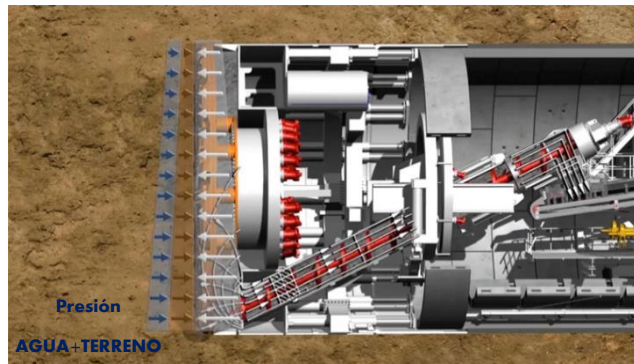


Figura 2.9 Equilibrio de presiones de una TBM de tipo EPB.

En el caso de la excavación de un frente de roca que atraviesa un acuífero, puede ser particularmente negativo en condiciones hidrodinámicas cuando el material cementante en las discontinuidades es lavado por la presencia del agua. Es importante para el ingeniero de diseño, evaluar los efectos de la presencia de agua en el estado de esfuerzo-

deformación en el macizo rocoso alrededor del túnel para evaluar el comportamiento de la excavación a largo y corto plazo.

Para todos los casos, las contramedidas por condiciones hidrogeológicas se deben proponer con base en el caudal de recarga del nivel freático, las características geomecánicas y la permeabilidad del terreno.

Por lo anterior, es importante entender el comportamiento hidrogeológico, para tal efecto es necesario determinar el comportamiento y las características estructurales de las formaciones hidrogeológicas. Lunardi (2008), indica que el objetivo de conocer lo ya mencionado, así como también el régimen hidrogeológico de la zona a excavar (Figura 2.10), es fundamental para poder predecir:

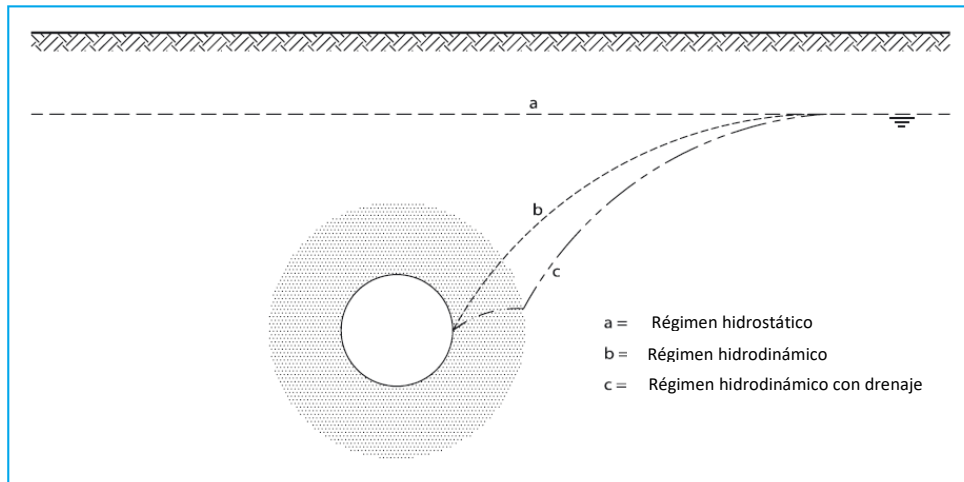


Figura 2.10 Régimen hidrogeológico, (Lunardi, 2008).

- La cantidad de agua que ingresa al túnel
- Los regímenes hidrostáticos e hidrodinámicos y la consiguiente contribución a las cargas asignadas en los revestimientos finales.
- Los riesgos hidrogeológicos asociados al cambio en el régimen del nivel freático, y caudales provenientes de otros acuíferos de la zona.
- Problemas importantes como, asentamientos en superficie y lentos rendimientos de excavación.

Para obtener la información anterior, es necesario la realización de estudios de tipo geomorfológicos, climatológicos e hidrológicos; asimismo, se suma los estudios para la

caracterización de los acuíferos presentes en el terreno, y la medición de cada uno de estos a través de pozos de observación, así como el empleo de métodos geofísicos y geoelectrónicos.

Es inevitable hacer hincapié en la evaluación de los parámetros hidrogeológicos: la permeabilidad, transmisividad, porosidad, coeficiente de almacenamiento. Ya que estos parámetros son la base del cálculo de drenajes, filtraciones, caudales de bombeo, y tiempo de tránsito de sustancias transportadas por el agua subterránea. Debe perseguirse el rigor y la máxima fiabilidad posible en la determinación de estos parámetros, que son, en definitiva, los que definen las características de los acuíferos y su capacidad para almacenar y transmitir el agua subterránea.

2.6 Reportes Geotécnicos

Lo más importante al final de una campaña de estudios para un proyecto, o bien su objetivo final, es el reporte o informe escrito que muestra los hallazgos y las recomendaciones de una manera clara y concisa con el fin de ayudar al proyectista de túneles a realizar un diseño confiable. Posteriormente, el informe también es de ayuda para la elección del método de excavación, diseño de la TBM, presupuesto de construcción y programa de obra.

2.6.1 Reporte de interpretación geotécnica

Este reporte contiene consideraciones subjetivas, interpretaciones y comentarios del ingeniero a cargo, todo de acuerdo con su conocimiento y experiencia. De acuerdo con Chapman (2010), el Reporte de Interpretación Geotécnica (GIR, por sus siglas en inglés) puede ser un informe específico de una zona o de la totalidad del proyecto donde se presenta la interpretación geológica y los datos ingenieriles. En resumen, es un informe único sobre un proyecto bien definido, para abordar los problemas del proyecto y, generalmente, tiene un enfoque para el diseño, asignación de clasificaciones geomecánicas, condiciones y parámetros del terreno para determinar la estabilidad en el frente y para diseñar el revestimiento final, es decir, es un informe principalmente para el uso de los diseñadores.

2.6.2 Reporte Geotécnico de línea Base para la construcción (GBR)

Dentro de los contratos de túneles, una causa importante de sobrecosto ha sido históricamente asociada con las reclamaciones de los contratistas por condiciones del terreno significativamente diferentes de las esperadas en el momento de la licitación. Ha sido difícil evaluar estas afirmaciones sin condiciones de referencia bien definidas y acordadas desde el principio entre todas las partes.

El Reporte Geotécnico de línea Base para la construcción (GBR, por sus siglas en inglés) se ha diseñado como una herramienta para abordar este problema. En dicho reporte se asigna un rango o un valor esperado, denominado línea base, a las condiciones geotécnicas del terreno (P. ej. para cada tipo de material su resistencia, permeabilidad, granulometría, mineralogía, etcétera). Este tipo de reportes no son nada nuevo, es ampliamente usado en países como los Estados Unidos y en el Reino Unido.

Essex (2007), puntualiza que el GBR debe ser preparado por personal con conocimientos y experiencia considerable en geotecnia, diseño y construcción, para el proyecto previsto. Los propietarios del proyecto deberán contratar consultores o equipos de consultores que incluyan a individuos con experiencia en las condiciones geotécnicas locales, y en proyectos similares, así como también experiencia previa en la elaboración de este tipo de reportes en construcciones anteriores.

3. EXCAVACIÓN MECANIZADA DE TÚNELES CON TBM

3.1 Objetivo del Capítulo

La excavación de túneles con TBM ha proporcionado ventajas en la actualidad como lo son las mejoras en las condiciones de salud, seguridad para los trabajadores en el frente de excavación, mayores rendimientos de excavación, entre otros. Por tanto, ha propiciado que el proceso de construcción se industrialice cada vez más de manera eficiente (avance y colocación de dovelas). No obstante, uno de los mayores retos de estas máquinas ha sido el atravesar terrenos con condiciones complejas, asociadas con la geología e hidrogeología del terreno.

El objetivo de este capítulo es hacer ver al lector la variedad y clasificación de las TBM resumidas en dos grandes grupos según el material que se desea excavar, en tuneladoras para roca y en tuneladoras para materiales blandos. Para las de roca, éstas se subdividen en TBM abierta y con escudo; y para las máquinas de materiales blandos, se subdividen en dos grandes tecnologías para soportar el frente de excavación, las de presión bentónica (escudo Slurry e Hidroescudo) y las de presión de tierra balanceada (EPB por sus siglas en inglés). En la última parte del presente capítulo se enfatiza en la operación de una EPB y sus complicaciones más comunes al atravesar un frente mixto.

Cabe señalar que las tuneladoras se necesitan diseñar de acuerdo con las especificaciones de cada proyecto. Por lo tanto, la selección y diseño de una TBM debe venir precedida de una correcta planeación; donde se incluya, entre otras cosas, estudios geotécnicos en toda la zona del trazo del túnel, ya que el tipo de escudo se selecciona según las condiciones del terreno que se requiere excavar, es decir, existen unas más aptas que otras para determinado frente de excavación (Figura 3.1).

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

Figura 3.1 Criterio Mitsubishi para la selección de TBM en función del tipo del terreno. Adaptada de López (2011)

3.2 Tipos y Características de las Tuneladoras

Para clasificar las máquinas tuneladoras, nos podemos basar en la clasificación establecida por la Asociación Internacional de Túneles (ITA, por sus siglas en inglés). Sin embargo, de acuerdo con Vittorio et al. (2008), la Asociación Japonesa de Túneles, fue la primera en subdividir a las tuneladoras de acuerdo con la sección de excavación, si ésta era completa o parcial. Más tarde las tuneladoras fueron subdivididas tomando en cuenta si tenían o no rueda de corte y en su sistema de empuje (grippers o gatos cilíndricos).

Actualmente el término TBM (Tunnel Boring Machine), hace referencia a las máquinas tuneladoras que excavan el terreno en sección circular completa. El esquema de clasificación que se presenta en este trabajo es basado en el que ha desarrollado la ITA en su grupo 14 de Excavación mecanizada (Figura 3.2).

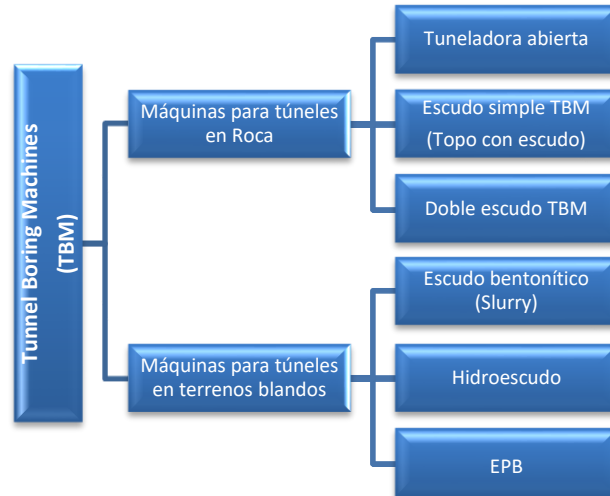


Figura 3.2 Clasificación de principales máquinas del tipo TBM. (ITA, 2017)

3.2.1 Máquinas para túneles roca

3.2.1.1 Tuneladora abierta (Topo)

Conocida como tuneladora de roca dura o topo, en principio una máquina desnuda (o no protegida totalmente) cuyo avance progresa al excavar la roca del frente por medio de sus herramientas de corte mecánico, con las que se aplican los esfuerzos combinados del par de giro de su cabeza y del empuje longitudinal conseguido por la reacción contra la roca de unas zapatas extensibles (conocidas como “los grippers”), con las que se fija la parte estática de la máquina. Tienen como principal campo de aplicación, terrenos con calidades de roca “muy buena” a “media”. Y son también conocidas en el medio como “topos” en español y “mole” en inglés (Figura 3.3).

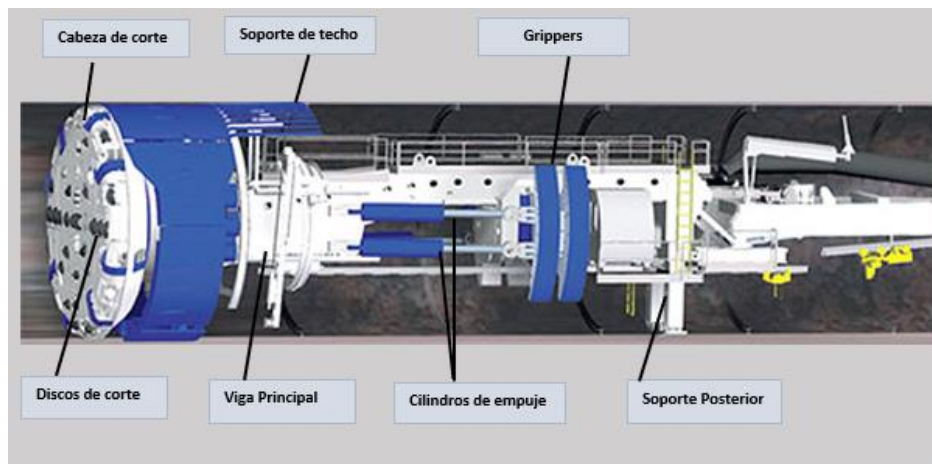


Figura 3.3 Tuneladora de roca “Topo”. (ITA, 2017)

3.2.1.2 Escudo simple

Máquina típica de "roca débil", que se usa cuando es necesario un pronto revestimiento prefabricado para soportar el túnel. Parte de un esquema básico de roca dura, se le añadieron elementos parciales o incluso conjuntos complementos de los escudos, para trabajar de forma alternativa, según lo demandara la roca del macizo. Dicho de otro modo, a una tuneladora de roca dura, es decir, con cabeza con cortadores de disco y con "gripes" para fijarla contra las paredes, se añadieron los elementos imprescindibles para la colocación de anillos, esto es, un erector y otros elementos que ayudan a la colocación de las dovelas manteniendo el esquema de máquina abierta o desnuda (ver Figura 3.4).

En consecuencia, el modo de operación de una tuneladora convencional para roca dura, que, en el caso de un macizo de alta competencia geotécnica, puede decirse que consiste en la reiteración de ciclos de avance, con interrupciones mínimas entre ellos, para la colocación de anclas sobre malla de acero, cambia sustancialmente.

En efecto, la duración del ciclo de colocación de los anillos prefabricados de sostenimiento/revestimiento suele ser, del orden de la mitad de la del ciclo de avance, si bien, al pasar zonas de roca muy alterada, puede aumentar notablemente por la dificultad del relleno con mortero del espacio entre anillo y terreno para su estabilización. Estas máquinas tienen como principal campo de aplicación, terrenos de roca con calidad de "buena" a "pobre".

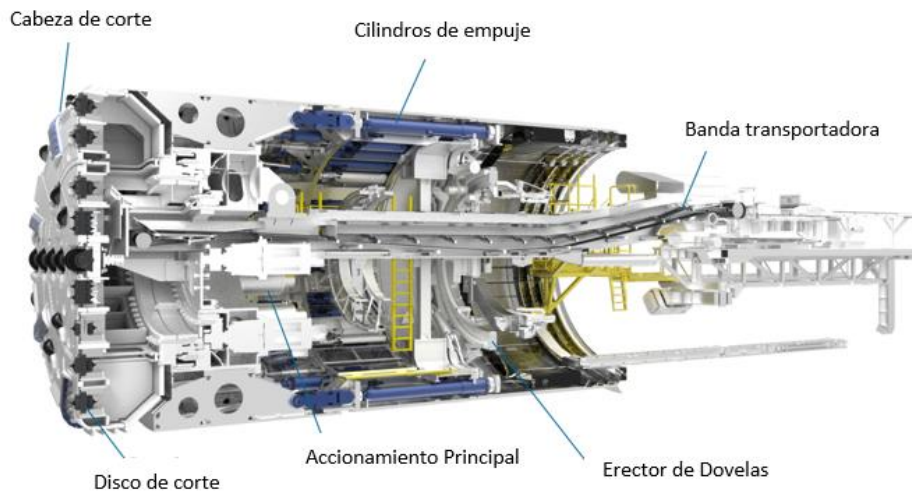


Figura 3.4 Detalle de un escudo simple. therobbinscompany.com, 2018

3.2.1.3 Doble escudo

Este tipo de máquina ha demostrado ser una máquina muy flexible, especialmente útil en condiciones de distintas calidades de roca. El escudo principal se construye en dos secciones telescópicas a las que se llama escudo delantero y escudo trasero (o de “grippers”), siendo el delantero el que contiene el rodamiento principal y el sistema de accionamiento de la cabeza, y el trasero el que lleva incorporado los grippers. La parte que los une se denomina escudo telescópico en el que se sitúan los cilindros de empuje del sistema denominado principal (ver Figura 3.5). Estas máquinas tienen como principal campo de aplicación, terrenos conformados por roca homogénea con calidades desde “muy buena” a “pobre”.

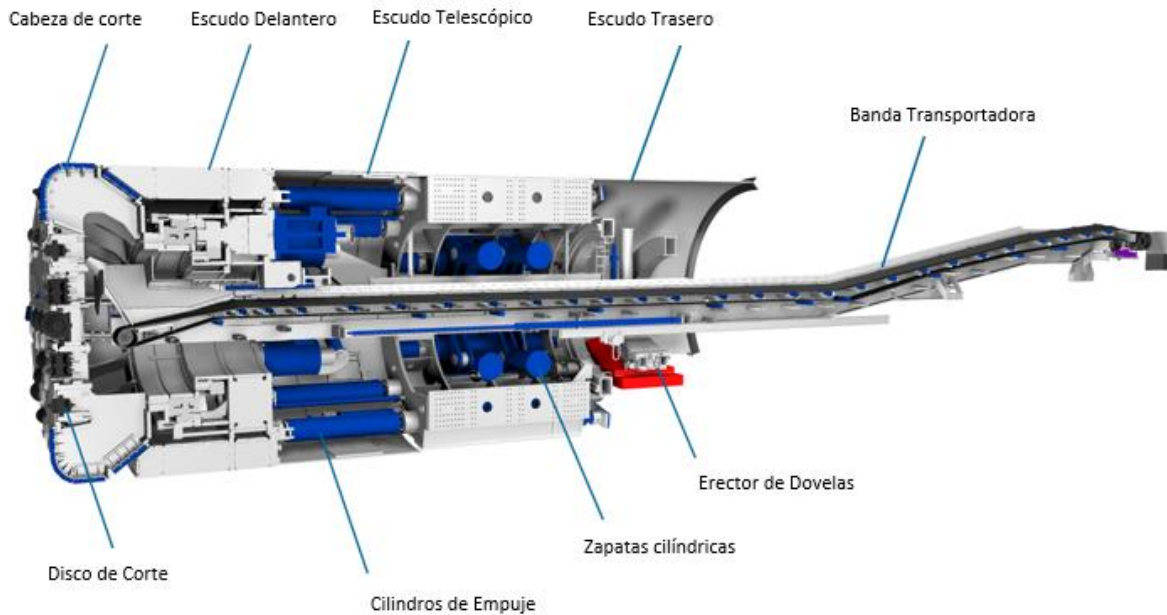


Figura 3.5 Detalle de un Doble escudo. therobbinscompany.com, 2018

3.2.2 Máquinas para túneles en terrenos blandos

La gran problemática para la excavación en terrenos blandos es la capacidad de carga y el tiempo de autosuporte muy reducidos. Lo que obliga a utilizar escudos para poder estabilizar el frente y soportar el terreno al momento de excavar. De esta manera, se procura evitar inestabilidades, como una posible falla por extrusión, en terrenos blandos (Figura 3.6).

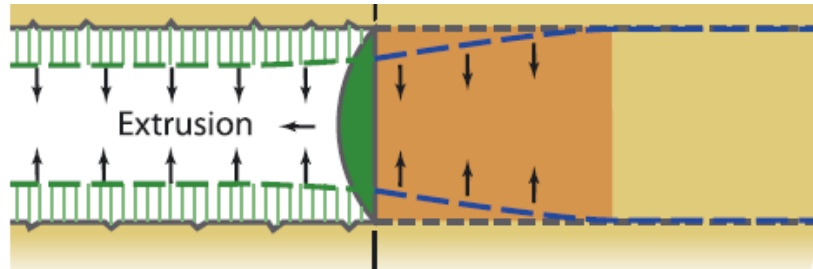


Figura 3.6 Falla por extrusión en la excavación de túneles (LUNARDI, 2008).

De acuerdo con López (2011), el escudo en terrenos blandos es una máquina que incorpora siempre un sistema integral de protección, y en la que el empuje longitudinal se logra por reacción contra un revestimiento, debido a que el terreno no es lo suficientemente competente para poder aplicar los “grippers” contra ella (contrario a la roca).

Los tres elementos distintivos de un escudo son los siguientes:

- La TBM se aloja dentro de una estructura de acero laminar (la coraza o escudo, de donde viene la denominación genérica del grupo), cuya misión es el sostenimiento del terreno en la zona ya excavada y todavía ocupada por la máquina.
- La tuneladora dispone de un sistema de colocación de anillos de revestimiento, de concreto, que permite complementar el ciclo de avance, al sustituir al escudo en su misión de protección integral.
- El diseño básico anterior, ofrece versiones para trabajar en frentes altamente inestables, manteniendo las condiciones de seguridad y salubridad laboral que se exige actualmente en la práctica, en la totalidad de los países.

3.2.2.1 Escudo de frente de presión de lodo (SLURRY)

Se trata de tuneladoras con una cabeza de corte cerrada que proporciona sostenimiento al frente de excavación inyectando fluido a presión dentro de la cámara de la cabeza de corte. Estas máquinas son las más adecuadas para excavar túneles en materiales inestables sometidos a una presión elevada de aguas subterráneas o a filtraciones de agua que deben detenerse proporcionando sostenimiento al frente de excavación utilizando un fluido de excavación sometido a presión (Figura 3.7).

La cabeza de corte funciona como medio de excavación, mientras que el sostenimiento del frente se consigue mediante la contrapresión de lodos, normalmente una suspensión de

bentonita o una mezcla de arcilla y agua. Esta suspensión se bombea hacia el interior de la cámara de excavación, donde llega al frente y penetra en el suelo formando la torta (*cake*) de filtro o el mamparo impermeable (suelos finos) que garantiza la transferencia de la contrapresión al frente de excavación.

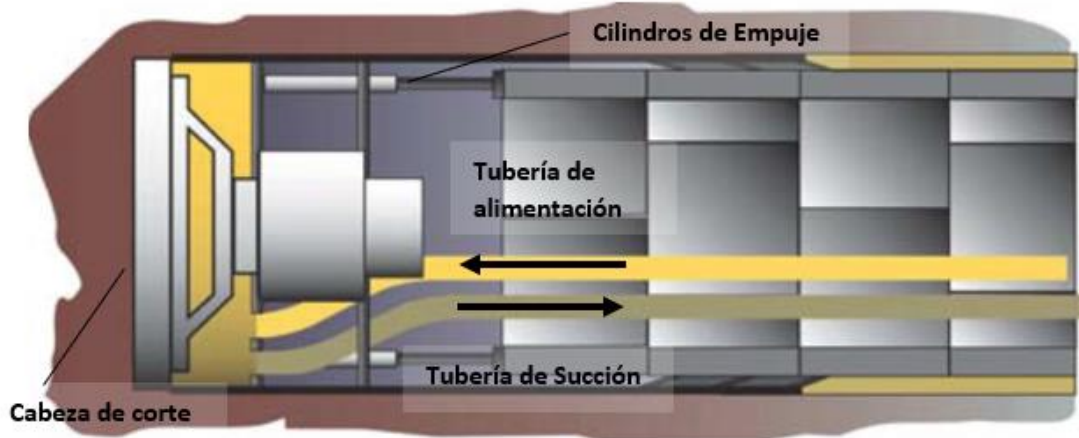


Figura 3.7 Esquema de una TBM de tipo Slurry. Adaptada de Vittorio et al., (2008).

La idea básica consiste en operar con bombeo de lodos arcillosos en un circuito cerrado que incluye el espacio entre frente y cabeza. Por una parte, el terreno arrancado por la rueda de corte se mezcla con los lodos, formando un fluido espeso pero bombeable. La bomba principal lo aspira y envía al exterior por la tubería de salida. Al mismo tiempo, y por la tubería de entrada, se aporta al frente un caudal equivalente de lodos recuperables por separación de escombros de la mezcla, con la que se mantiene la presión en el frente.

Éstos son los principales componentes de la máquina:

- Cabeza de corte, equipada con discos, cuchillas o dientes.
- Escudo protector, que contiene los principales componentes de la máquina. La parte delantera se encuentra sellada por un mamparo que permite separar el escudo y la cámara de excavación (presurizada) que contiene la cabeza de corte.
- Gatos hidráulicos de empuje longitudinal.
- Sistemas de bombeo y separación de lodos.

Estas máquinas resultan especialmente adecuadas para excavar el suelo con una capacidad de autoaporte limitada, y como principal campo de aplicación de estas tuneladoras resultan especialmente adecuadas para la excavación en arenas y gravas con limos.

3.2.2.2 Hidroescudo

Es idéntico al escudo Slurry descrito anteriormente, la diferencia está en la forma de transferir la presión de soporte en el frente. Ya que en un hidroescudo hay dos mamparos: uno separa la cámara de trabajo del túnel y el segundo divide en dos partes la cámara, dejando una comunicación en la parte inferior. La parte superior de la cámara intermedia es llenada con aire a compresión, enlazado con un compresor de aire y un sistema de válvulas que permite ajustar la presión del frente independientemente del circuito hidráulico (Figura 3.8).

Estas máquinas comparten los mismos componentes que el escudo Slurry, a diferencia de lo ya mencionando. Así como también comparten el mismo campo de aplicación.

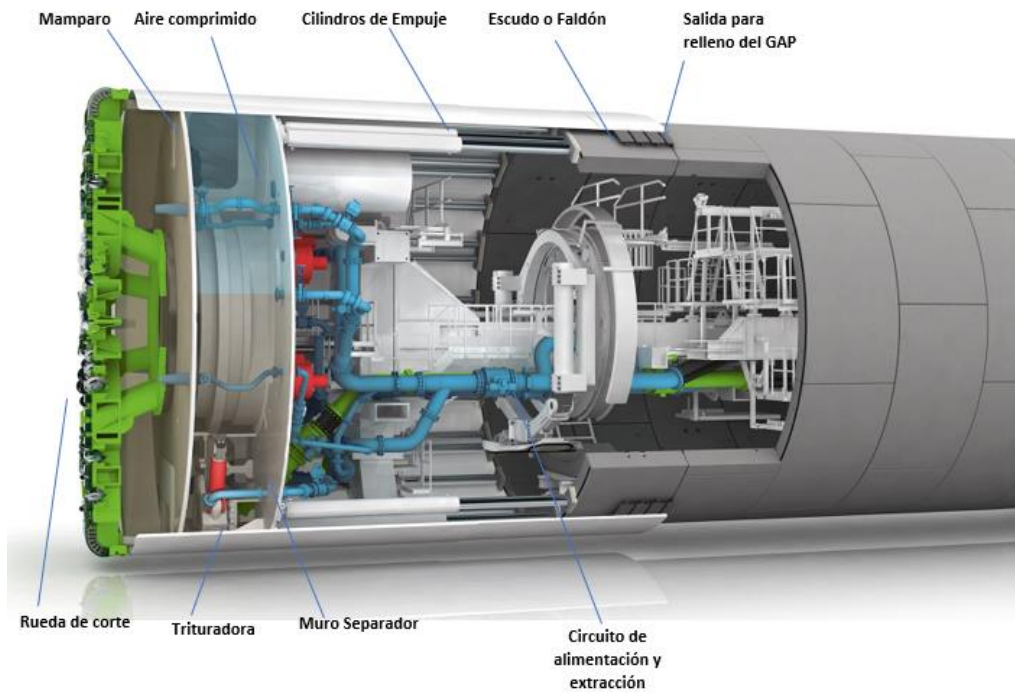


Figura 3.8 Esquema de los componentes de un Hidroescudo. *herrenknecht.com, 2018.*

3.2.2.3 Escudo EPB

Las tuneladoras de escudo de presión de tierras (EPB), sirven para excavar en suelos donde el sostenimiento del frente y la contrapresión de las aguas subterráneas se consigue con el propio material excavado por la cabeza de corte, que, al mismo tiempo, hace la función de medio de sostenimiento.

La cabeza de corte sirve de mecanismo de excavación, mientras que el sostenimiento del frente se realiza por medio de la tierra excavada, que se mantiene a presión dentro de la cámara de excavación gracias a los gatos hidráulicos que empujan el escudo. Estos gatos transmiten la presión al mamparo de separación que hay entre el escudo y la cámara de excavación y, por lo tanto, a la tierra excavada. El material excavado se retira de la cámara mediante un tornillo sinfín, que permite reducir la presión gradualmente (Figura 3.9).

La EPB está conformada principalmente por los siguientes componentes:

- Cabeza de corte: Que gira y está equipada con varios brazos de corte.
- Escudo protector similar al que utilizan las tuneladoras tipo Slurry.
- Tornillo sinfín, que se encarga de extraer el material de la cámara presurizada a medida que avanza la excavación, lo cual permite controlar la presión del interior de la cámara.
- Sistema de empuje: Gatos hidráulicos longitudinales que se apoyan contra el revestimiento de dovelas prefabricadas.

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

- Estabilizar el frente con un material a presión, que es el propio escombros excavado, una vez convertido, con productos de adición (espumas y aditivos), en una mezcla de consistencia visco-plástica.
- Lograr que la mezcla tenga la consistencia adecuada para ser extraída y seguidamente transportada por una banda y vagón.
- Conseguir que esa mezcla se pueda extraer sin perder la presión en el frente.

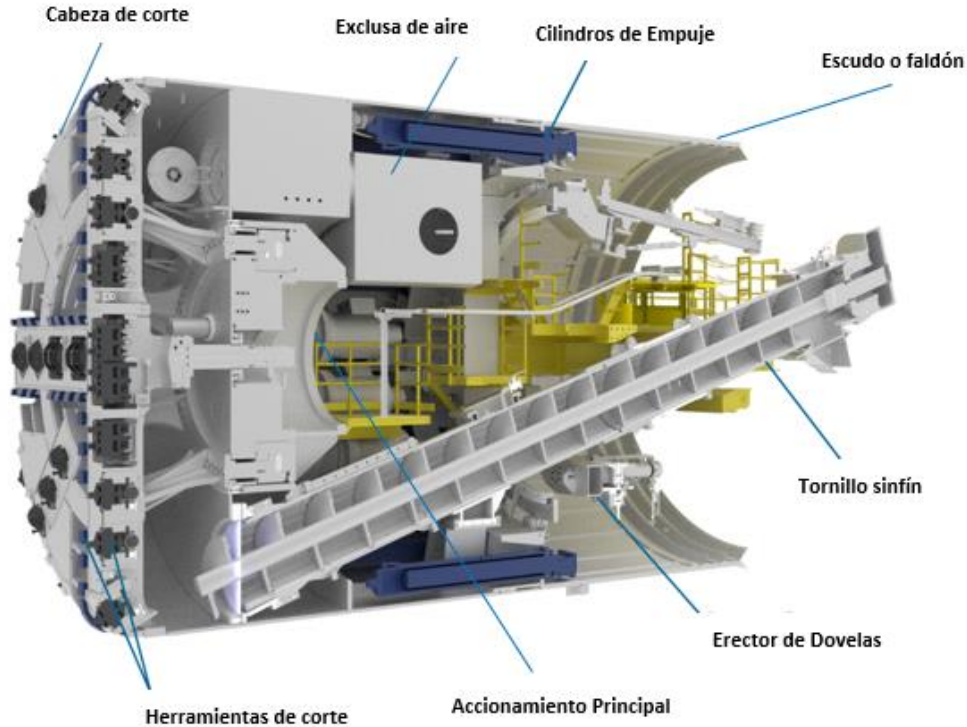


Figura 3.9 Escudo de presión de tierra (EPB) y sus principales componentes. *therobbinscompany.com, 2018*

3.3 Operación de una EPB

Puede decirse que las máquinas de tipo EPB se han ideado inicialmente para excavar suelos arcilloso-limosos y limo arenosos de consistencia entre pastosa y blanda, con un contenido mínimo de finos del orden del 30%. Por ello, cuando el material no tiene esas características, debe ser acondicionado debidamente en la cámara, hasta conseguir la mezcla idónea (López, 2011).

3.3.1 Principales parámetros de operación de una EPB

Ahora bien, el diseño de los escudos tipo EPB, es mucho más sensible a los cambios de las características, debido al principio de operación (Figura 3.10). Por ello es fundamental operar la máquina de acuerdo con un plan de avance con valores de referencia y rangos de operación de los siguientes parámetros básicos.

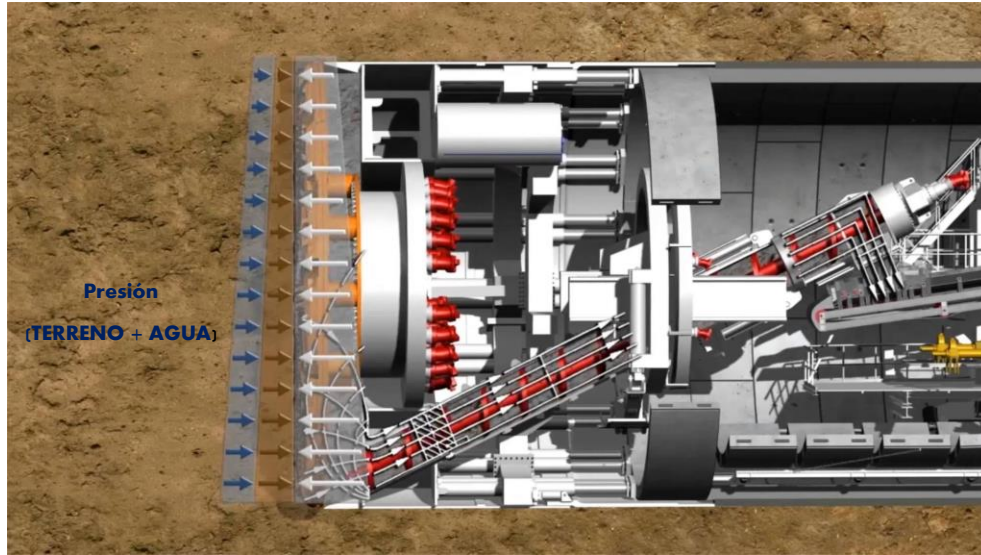


Figura 3.10 Esquema del principio de operación de la EPB

a) Presión de sostenimiento del frente y densidad del material en la cámara.

Juntamente con el control del peso del material extraído en cada avance, el control de la presión de sostenimiento del frente es de importancia vital para garantizar un funcionamiento satisfactorio de una tuneladora EPB y se ha de requerir, además, que la presión de sostenimiento se transfiera, desde el mamparo hasta el frente a través de partículas sólidas y no solamente a través de la presurización de la cámara mediante aire comprimido. La consecuencia de tener la cámara llena de material sólido con densidad adecuada, establecida aproximadamente en 14-15 KN/m³, es conseguir los siguientes objetivos:

- Aplicar la presión efectiva necesaria en función de las condiciones del terreno (empuje activo + carga freática)
- Mantener la cámara llena de un material sólido e incomprensible, con lo cual, en el caso de inestabilidad en el frente no haya suficiente espacio vacío para que el terreno se derrumbe dentro de la cámara evitando así asientos incontrolados en superficie.

Como medida de seguridad, la presión de sostenimiento se mide siempre en las células de la parte superior del mamparo (normalmente colocadas 1m por debajo de la clave del escudo) de modo que la lectura de otras presiones deberá ser siempre más alta. La densidad del material en la cámara se estima en función de diferencias de presión a distintas alturas del mamparo estanco.

b) Acondicionamiento del terreno en la cámara.

Como el terreno natural rara vez posee propiedades que le permitan ser fácilmente moldeado y confinado al nivel de la presión deseada en la cámara, la tecnología EPB depende de manera crítica del acondicionamiento del terreno para modificar sus propiedades. Esto se hace normalmente inyectando espumas, soluciones de polímeros o una combinación de estos productos en la rueda de corte y en la cámara de excavación para convertir el material excavado en una mezcla homogénea de relativa baja resistencia al corte, de baja permeabilidad y con un comportamiento elástico que permita mantener la presión de sostenimiento necesaria en la cámara de excavación.

La cantidad de agua en el terreno debe estar comprendida entre 20-30%. Por debajo de este rango, la mezcla terreno/agua es difícilmente maleable y por encima del 30% la mezcla es demasiado líquida, con problemas para asegurar la estanqueidad en el tornillo sinfín y dificultades para transportar mezclas tan líquidas en las bandas.

La espuma es una mezcla de aire y agua con tensoactivo, producto capaz de producir una burbuja como el jabón, con buenas características de estabilidad bajo presión y a lo largo del tiempo. Los polímeros son productos constituidos de moléculas de cadenas largas, que le dan una verdadera característica mecánica a la burbuja.

Según López (2011), la selección del tipo de aditivo depende principalmente de la clase de terreno y de las características de la tuneladora y como parámetros generales de los mismos, para el acondicionamiento del terreno, puede indicarse lo siguiente:

- Solución espumante: La concentración de la solución espumante (CF) se encuentra en el rango del 0.5 al 5%; en la mayoría de los casos alrededor del 3%. Estas concentraciones dependen fuertemente de la cantidad de agua que se inyecta o la que ya está presente en el terreno.
- Tasa de expansión: La tasa de expansión de las espumas (FER) debe estar comprendido entre 5 y 30, en la mayoría de los casos alrededor de 10. Cuanto más alto es el FER, la espuma generada debe ser tanto más seca. Cuanto más húmedo sea el suelo la espuma, deberá ser muy seca y viceversa.
- Tasa de inyección: La tasa de inyección de las espumas (FIR) suele estar comprendido entre el 10% y el 80%, en la mayoría de los casos entre el 30% al 60%. Para determinar mejor el FIR deben realizarse ensayos de laboratorio.

- Polímeros: En algunos casos se agregan polímeros para mejorar la estabilidad de la espuma o para ajustar la consistencia del suelo que circula a través de la cámara o del tornillo sinfín

Otros aditivos pueden ser los productos desestructurantes, que evitan taponamiento cuando se excavan materiales muy arcillosos, además de la bentonita como adición de partículas finas a los suelos con carencias de finos.

c) Control del peso de escombros extraído en cada avance.

Siempre habrá dificultades para el control de peso del material excavado que se deberá evaluar en cada avance, debido a las variaciones de la densidad del material excavado y a la cantidad de aditivos inyectados para el acondicionamiento del terreno.

Para la medida del peso del material excavado se utilizan dos básculas que se ubican en la banda del back-up³ (error máximo en la pesada del $\pm 2.5\%$). El dato del peso que dan las básculas se suele considerar como peso bruto del que hay que sustraer el peso de los agentes acondicionadores, añadidos durante la excavación, para poder comparar con el valor de referencia o estimación del peso teórico del material excavado.

d) Control de inyección de mortero para el relleno del “GAP”.

El relleno del “GAP” o espacio entre el espacio anillo y terreno se realiza empleando un sistema de inyección continua de mortero de cemento por la parte posterior, procedimiento de inyección que ha de controlarse por presión y no por volumen, es decir, hay que considerar que se ha terminado de inyectar cuando la presión alcance el límite superior, y no cuando llega al volumen teórico en el relleno del gap. El volumen de referencia para rellenar el volumen teórico del “gap” debe establecerse en función del sobrecorte con el que esté operando la rueda de corte y las presiones de la inyección se deben elegir teniendo en cuenta:

- Los valores anormales, servirán de señal de alerta para las correcciones debidas.
- Evitar que las aguas subterráneas o el material excavado entren en el espacio anular.

³ Detrás de los equipos de excavación y avance, se sitúa el equipo de rezaga y carros cargadores de la tuneladora, lo cuales reciben la denominación inglesa de “back up”.

- Inyectar de forma continua por cola y a medida que avanza la máquina, manteniendo la presión de inyección de 0.3 bar a 0.5 bares por encima de la presión del frente de excavación.

En segundo nivel, y siguiendo la tendencia del trabajo de la máquina, así como toda la información de utilidad disponible, cabe destacar los siguientes parámetros:

- **Tiempo:** registra la fecha y hora del avance, por cada ciclo completo, así como el tiempo de traslado de la cabeza y el tiempo de parada.
- **Empuje nominal total:** (F o F_n , en KN), es la fuerza total medida en dirección axial, que la maquina transmite al frente durante la excavación.
- **Empuje de contacto:** (F_c , KN), es el empuje total medio que llega a la cabeza de corte, descontando las perdidas por rozamiento y que permite a las herramientas de corte hacer su trabajo.
- **Par de giro máximo nominal o Torque:** (M , en KN x m), es el momento al que está sometida la rueda de corte para lograr el efecto de corte mecánico.
- **Velocidad de rotación de la rueda de corte:** (w , en r.p.m.), es la velocidad de giro de la cabeza o rueda de corte.
- **Velocidad de avance:** (A , en mm/min), mide el avance de la tuneladora por unidad de tiempo en minutos.
- **Penetración:** (p , en mm/rev), mide la penetración de las herramientas de corte en la roca del frente, por cada vuelta o giro de la cabeza de corte.
- **Potencia de accionamiento:** (POT, en Kw). Es la suma de las potencias requeridas de los motores de accionamiento para girar la cabeza de corte, cuando está sometida a un empuje frontal.
- **Control de consumos de grasas:** Miden el suministro y la presión de inyección de grasas, las cuales fungen como obturantes de la transmisión principal y de los cepillos de cola.

3.3.2 Modos de operación de una EPB

De acuerdo con Maidl et al. (2012), la ventaja especial de un escudo EPB es su flexibilidad al momento de excavar, ya que ofrece cuatro diferentes modos de operación, que difieren según el sostenimiento del frente y el transporte del material excavado; modo abierto, modo semiabierto y modo cerrado.

El modo cerrado se da cuando el material excavado junto con otros aditivos para acondicionarlo, llenan completamente la cámara de excavación. Manteniendo así una presión que hace la función de soportar el frente de excavación. En esta modalidad el material se debe remover con el tornillo sinfín (Figura 3.11a).

El modo abierto se emplea cuando se excava en roca o terrenos fáciles, en estos casos los escudos de presión de tierra a menudo trabajan en modo abierto, es decir, sin ejercer soporte contra la presión de tierra o agua. No obstante, en ocasiones cuando se opere en zonas bajo el nivel freático, es posible aplicar aire comprimido en la cámara de excavación durante los paros tras el cierre de la compuerta del tornillo sinfín (Figura 3.11b), de igual forma, en el modo abierto el tornillo sinfín puede ser sustituidos por otro sistema de rezaga, el cual consiste en una banda transportadora y cangilones (Figura 3.11c).

Cuando se trata de terrenos temporalmente estables con entradas de agua, el tipo de operación descrito anteriormente puede utilizarse con una reducción parcial, lo cual se conoce como modo semiabierto (Figura 3.11d). La parte superior de la cámara de excavación se llena con aire comprimido, de esta forma, el agua que se encuentra en los poros y las juntas del material es desplazada con el fin de mitigar la entrada de flujos.

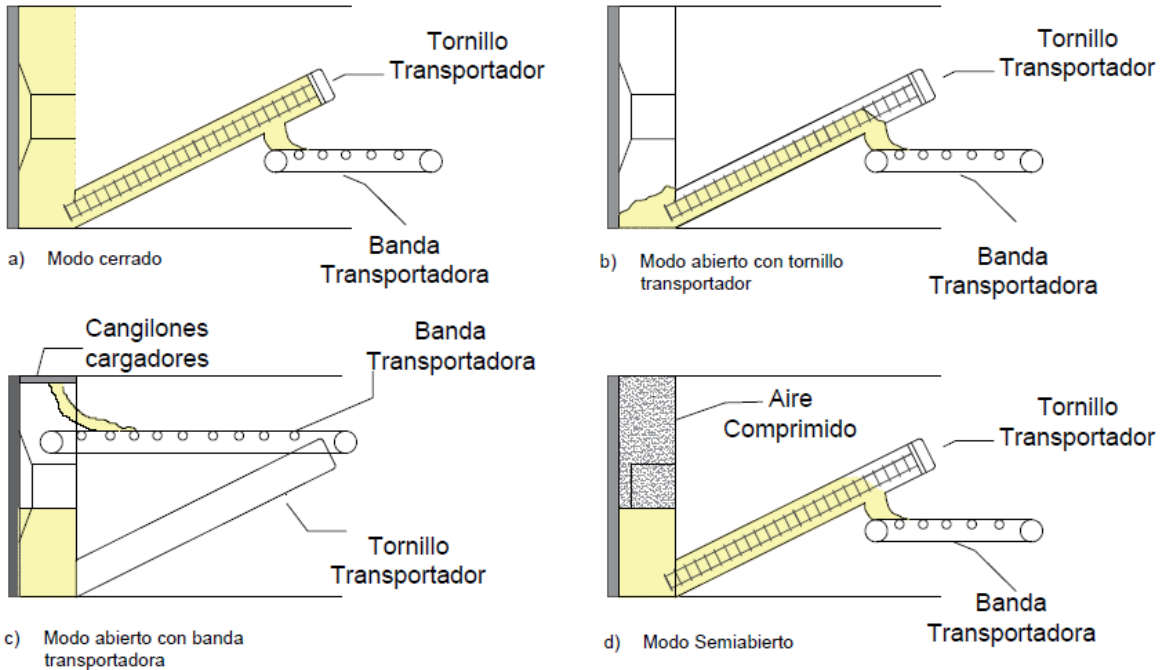


Figura 3.11 Modos de operación de una EPB. Adaptada de Maidl et al. (2012).

3.3.3 Principales problemas durante la excavación de un frente mixto con EPB

Las características y condiciones asignadas al terreno desde la etapa de proyecto son propensas a modificaciones durante la construcción por cambios imprevistos del terreno. Es por eso, que el atravesar con cierta certeza el terreno (en toda la longitud del túnel) con las condiciones previstas, está directamente relacionado con la eficacia de la campaña de estudios realizados en la zona.

Actualmente el excavar un túnel en condiciones de frente mixto, habiéndose previsto o no, será una tarea difícil, ya que es uno de los principales retos de ingeniería en lo que respecta a la construcción de túneles mecanizados. Esto se debe, entre otras cosas, a que el desgaste y deterioro de las herramientas de corte es más difícil de calcular que el resto de los parámetros de la máquina debido a la complejidad de la interacción entre herramientas de corte y terreno.

Tal como mencionan Lombardo & Pérez, (2013), el desgaste de las herramientas de corte es el parámetro más difícil de calcular debido a la complejidad de la interacción entre las propias herramientas y el terreno; por lo tanto, la mayor dificultad durante el proceso de excavación radica en el grado de incertidumbre del terreno a excavar, inherente a las obras subterráneas que, en algunos casos, presentan condiciones verdaderamente imprevisibles.

Steingrímsson et al., (2002), nos confirman que, mediante un estudio aplicado acerca de la distribución de empuje, los discos cortadores que trabajan en la parte dura del frente, están tomando mayor empuje que los que están en la parte blanda (Figura 3.12). Teóricamente, a mayor empuje aplicado en la parte dura del frente resultará una mayor tasa de penetración. Sin embargo, las experiencias en condiciones de un frente mixto han dado resultados distintos, debido al gran contraste de calidades de los materiales (característica principal de los frentes mixtos).

Otro problema incurre cuando los discos cortadores están rebotando en las secciones que pasan de material blando a duro, debido al giro de la rueda de corte; como resultado se pueden experimentar unas vibraciones masivas. Para prevenir los daños en la TBM debido a las fuertes vibraciones, el nivel de empuje debe disminuirse y, consecuentemente, también la penetración, igualmente si tomamos en cuenta el dominio del material blando sobre el duro, el nivel del torque disminuirá.

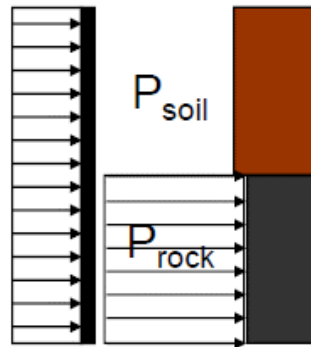


Figura 3.12 Representación esquemática de la presión ejercida por los cortadores en el frente mixto. (Zhao, 2010)

Las condiciones del terreno como la presencia de accidentes geológicos, la alta abrasividad de los materiales a excavar y las demás características de un frente mixto; en donde bloques de roca dura aparecen junto con materiales blandos en diferentes proporciones y competencias, determinan diversos problemas de trabajo. A continuación, se describen las dificultades más comunes en la excavación de un frente mixto con EPB.

a) Desgaste anormal de las herramientas de corte

Como se ha mencionado, en un frente mixto donde se involucra la presencia de roca fuerte o moderadamente resistente en combinación con suelos, se requieren discos para excavar la roca y “rippers” (también llamados picas de arrastre) para excavar el suelo. Por ello, desde el punto de vista operativo de la excavación de túneles con equipos EPB, uno de los aspectos más importantes es el desgaste indeseado de estas herramientas de corte, ya

que para su inspección y sustitución comúnmente son necesarios trabajos bajo condiciones de presurización en el frente.

El rendimiento de la máquina en condiciones de frente mixto se ve seriamente afectado por las características geotécnicas, ya que las cargas que provocan sobre los cortadores son muy distintas, dependiendo de la posición en que se encuentren. Lo que convierte a los discos de corte, en las herramientas más susceptibles al desgaste en estas condiciones.

La presencia de material blando no proporciona suficiente fuerza de rodamiento para que los discos superen el pretorque existente en los rodamientos y como consecuencia se producen interrupciones en su rotación. El diferencial de carga se produce, debido a que los cortadores que excavan el material de mayor resistencia reciben casi la totalidad de las fuerzas netas de empuje, mientras que los que excavan el material blando prácticamente perciben carga nula. Lo anterior se acompaña de un desgaste en la periferia de los discos. Este problema se puede agravar a tal grado que el disco ya no pueda girar. A partir de entonces, este tipo de herramientas deja de fungir como mecanismo de corte y empieza a funcionar como una especie de sostenimiento en el frente, lo que conduce al desgaste plano (Figura 3.13).



Figura 3.13 Desgaste plano y multiplano en discos de corte. (Hongsu et al., 2007)

Por ello, durante la planificación de un proyecto, se requiere de una evaluación precisa de las variables geotécnicas que intervienen en el proceso de excavación, entre otras cosas, y como parámetro más relevante para los discos de corte se encuentra el efecto de la abrasividad.

b) Desgaste del tornillo sinfín.

El transporte de material a través del tornillo sinfín se da mediante el tránsito longitudinal dentro del “tubo sinfín” por causa del empuje que la hélice ejerce al material en dirección de avance; su funcionamiento es eficiente debido a la componente de fricción normal a la

cara anterior del tubo y que se da a consecuencia de la fricción por peso propio entre el material excavado y la cara anterior del tubo; dicha fricción impide que el material rote dentro del tubo con el giro de la hélice, lo cual permite el recorrido en sentido longitudinal al tornillo.

Como consecuencia del paso del material excavado y la fricción que éste ejerce, se genera determinado desgaste el cual se reduce mediante la implementación de algunos productos que permiten el incremento de la componente rotacional y la disminución de la fricción entre ambos elementos, con la consecuente mejora del transporte de material a lo largo del tornillo. Si se transporta material líquido baja el rendimiento de transporte y se origina un aumento del desgaste debido al flujo de material líquido que tiene lugar entre las cámaras que conforman cada paso de hélice

Sin embargo, el concepto de tornillo sinfín está enfocado a su uso en suelos y rocas acondicionables; para el caso de rocas fracturadas y/o abrasivas, como en el caso de los frentes mixtos, existen diferentes riesgos, entre los que destacan: a) el de obstrucción por el diámetro de los bloques de roca que pretenden ingresar al elemento; b) el desgaste de elementos por materiales altamente abrasivos junto con las consecuentes dificultades en el procedimiento de excavación debidas a la necesidad de revisión y mantenimiento (Figura 3.14).



Figura 3.14 Mantenimiento por desgaste del tornillo sinfín (COMISAA,2017).

c) Problemas relacionados con la transmisión principal

El denominado “Accionamiento Principal” tiene como función primordial el proporcionar el par o torque necesario a la rueda de corte de la máquina tuneladora TBM-EPB, para los procesos de excavación, con giro en ambos sentidos (Figura 3.15).

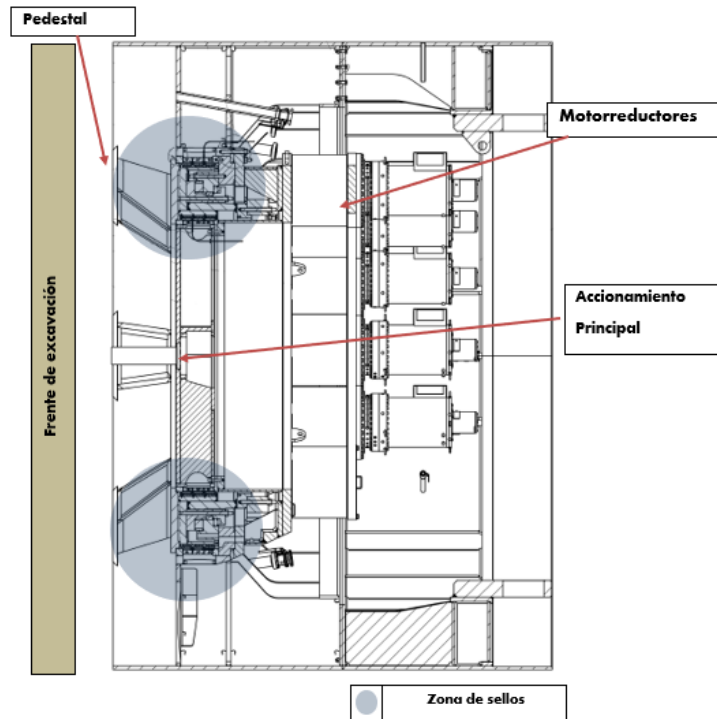


Figura 3.15 Accionamiento principal (COMISSA,2017).

La potencia se proporciona con motores eléctricos de inducción acoplados cada uno de ellos a un reductor de velocidad, para obtener una reducción primaria en la velocidad angular o de giro; a la vez que se incrementa el par o torque.

Para protección del rodamiento principal y también de la transmisión final (Piñones y corona) se dispone de un sistema de sellos constituido por 3 hileras de sellos; tanto en la parte interior como en la exterior (Figura 3.16).

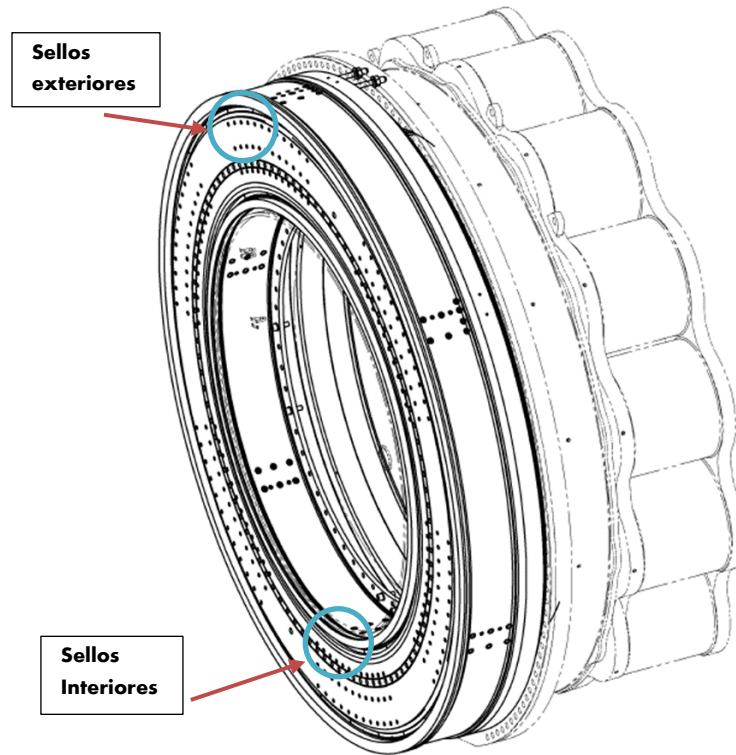


Figura 3.16 Transmisión de la EPB (COMISSA,2017).

De acuerdo con el acomodo de los sellos, por su ubicación de trabajo en el arreglo se denominan: Frontales, medios e internos o interiores. Cada sello se desliza sobre una pista maquinada y rectificada en contacto con una cámara de refrigeración para enfriamiento de los sellos y evitar el incremento de temperatura en éstos debido a la fricción, lo que impide que se cristalicen o hidrolícen y fallen.

La función principal de los sellos es impedir que los materiales producto de la excavación y/o el agua en el frente se introduzcan hacia el rodamiento y la transmisión final. Dado el papel importante que juega la grasa en el sistema de sellos del Accionamiento Principal, se hace una breve descripción del proceso de lubricación: la grasa se suministra hacia los sellos desde una estación de lubricación fija, montada en el tren auxiliar en el carro puente compuesta por un depósito de grasa y una bomba de desplazamiento positivo, conductos y distribuidores de grasa con sensores de presión; así como accesorios.

De acuerdo con el diseño de la máquina, la grasa es aplicada directamente en cada juego de sellos y se desplaza hacia la cámara de rezaga para fluir a través de un espacio de 5 mm denominado "laberinto" (Figura 3.17), donde se forma un sello hidráulico, a la vez que

barre con partículas extrañas para expulsarlas hacia la cámara y no lleguen a los sellos y menos aún a la transmisión mecánica.

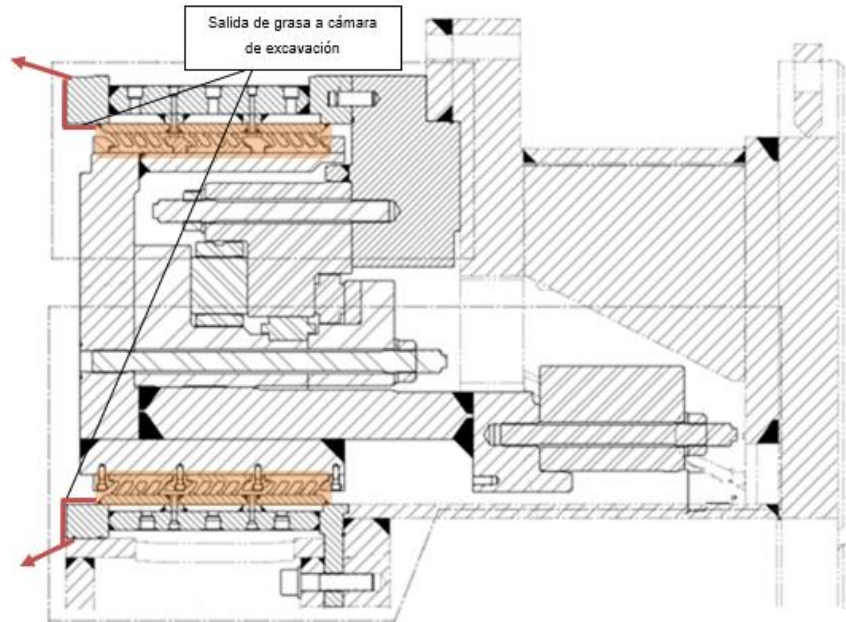


Figura 3.17 Detalle de laberinto de una EPB Robbins.

Por lo tanto, cuando se excavaba en frente de suelo y roca, se puede desgastar de manera prematura e importante la zona del laberinto debido a la presencia de materiales abrasivos excavados.

Este problema, genera paros intermitentes en la excavación dado que, por el desgaste, la presión de grasa disminuye a niveles no recomendables y se tiene la necesidad de inyectar grasa sin avanzar hasta lograr la presión necesaria, lo que deriva en avances lentos y altos consumos de grasa en estos terrenos.

d) Problemas con el flujo de agua en el frente de excavación

De acuerdo con Hongsu (2015), la condición de frente mixto, por lo general, vendrá acompañada de flujos de agua debido a la gran permeabilidad que caracteriza a los frentes heterogéneos. Los flujos de agua provenientes del frente disminuyen de manera significativa la estabilidad de la excavación y dificulta la rezaga del material. De igual forma, los flujos de agua subterránea pueden provocar una erosión del mortero del espacio anular, lo cual arrastra otra serie de complicaciones.

Los problemas más comunes podemos dividirlos de la siguiente manera:

- La inestabilidad de la excavación provocada por un gradiente hidráulico elevado cerca de las paredes del túnel.
- La disminución de las propiedades resistentes del terreno
- Asentamientos de las estructuras apoyadas en depósitos del terreno.

Los túneles que van bajo el nivel del nivel freático están sometidos a la presión del agua, que incrementa la presión del terreno. Esto ocurre sobre todo en formaciones geológicas recientes de terrenos aluviales permeables. Un buen drenaje en los túneles, con evacuación de aguas recogidas, reducirá las presiones hidrostáticas al rebajar el nivel freático.

En algunas ocasiones en terrenos calizos se pueden contar con túneles en zonas carstificadas con redes de galerías por donde, en determinadas épocas del año, circulan grandes cantidades de agua que pueden irrumpir violentamente en las obras. En general en rocas rígidas y frágiles (brechas, areniscas, calizas etc.) los esfuerzos tectónicos existentes producen fracturas que tienden a permanecer abiertas, aumentando la permeabilidad de las rocas.

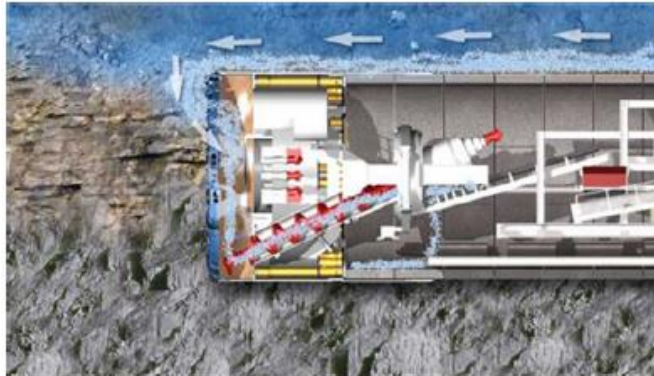


Figura 3.18 Entrada de agua en un frente mixto. (Hongsu et al., 2015)

e) Desalineamiento del escudo

Las tuneladoras son muy propensas a presentar desviaciones cuando trabajan en frentes con terrenos muy heterogéneos o cuando aparecen cavidades cársticas. La combinación del terreno blando y duro (frente mixto) provoca desviaciones de la máquina hacia la parte blanda, y cuando dicho terreno se encuentra en la parte inferior de la sección, la tuneladora puede hundirse de forma progresiva hasta llegar al límite de tener que detener el avance para proceder a su realineación. Cuando se utilizan escudos largos, la máquina trabaja

como un voladizo con su parte final fija y con una clara tendencia a hundirse en la parte de la rueda de corte.

Por lo anterior, es importante cuidar el alineamiento mediante los datos de posición obtenidos del equipo topográfico de la tuneladora y, a su vez, transmitirlos de manera correcta a los mandos de los cilindros de empuje y guiado.

f) Problemas relacionados con los cepillos de la TBM.

El sistema de sellos de las TBM-EPB se compone de líneas de cepillos en el perímetro del faldón, que a su vez entre estas líneas se forman cámaras para la inyección de grasas (Figura 3.19).

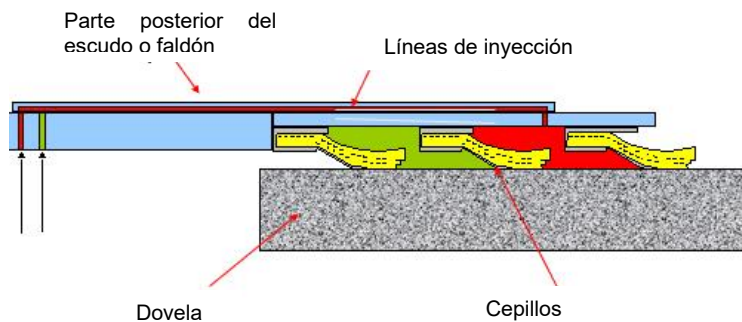


Figura 3.19 Esquema de la función de los cepillos de tres líneas en una EPB.

De acuerdo con las características de una TBM-EPB, es importante mencionar que debido al problema del desalineamiento, descrito anteriormente, el espacio existente entre el diámetro exterior de la dovela y el diámetro interior del faldón (extradós), se reduce; lo que podría ocasionar el arrastre y la deformación permanente de los cepillos por los siguientes factores:

- La diferencia en la resistencia de los materiales existentes en el frente de excavación (mixto) provoca una tendencia a la desalineación del escudo por su inercia natural de comportamiento hacia los materiales blandos, lo que implica un desvío recurrente que provoca la disminución del Gap y, en el peor de los casos, el contacto entre la dovela y el faldón.
- A su vez y asociado al punto anterior, debido a las condiciones mixtas y con frentes de roca muy fracturados, la excavación no es concéntrica al escudo lo que origina

que el faldón⁴ pegue con el terreno circundante, se deforme y origine contactos puntuales con la dovela.

- Otro efecto ligado al desalineamiento de la máquina y deterioro de los cepillos es la vibración que se genera en el escudo cuando se está excavando un frente mixto de roca-suelo.
- Además del desalineamiento del escudo, los terrenos mixtos, por lo general, presentan alta permeabilidad, en donde los flujos de agua originan que el mortero del GAP se degrade y éste ingrese paulatinamente en la zona de cepillos dañándolos y, consecuentemente, provocando interrupciones en el avances (Figura 3.20).



Figura 3.20 Flujo de agua hacia el interior del túnel por daños en lo cepillos; a) clave del túnel; b) cubeta del túnel.

⁴ En el medio del tuneleo se conoce como *Faldón* a la parte posterior del escudo, la cual tiene una ligera reducción de diámetro respecto a la rueda de corte.

4. CONTROL DE PROCESOS DE EXCAVACIÓN CON UNA EPB

4.1 Principio del Control de Procesos

Los túneles hechos con escudos pueden ser considerados como obras de infraestructura con un alto grado de dificultad, por una pronunciada interacción entre las características del terreno y los parámetros operativos, y la estructura del túnel. Todos estos son sujetos a un riesgo natural, debido al principal material de construcción, el terreno circundante, el cual es difícil de reconocer y describir debido al gran número de variables que lo conforman, tal y como se vio al principio de este trabajo, son muchos los factores que engloban la caracterización del terreno. Por lo tanto, la seguridad y la eficacia de la utilización de los recursos en la construcción de túneles con alto grado técnico de dificultad pueden mejorarse considerablemente a través de un monitoreo constante de los parámetros operativos empleados en los procesos clave.

El objetivo de controlar los procesos clave de operación, es analizar el comportamiento creado a través de la interacción entre los parámetros de la tuneladora y el terreno en tiempo real. Para realizar la visualización de los parámetros involucrados se requiere de un servidor web y una base de datos para recibir y almacenar los valores, de esta forma, el personal encargado de monitorear los parámetros en tiempo real, coteja los valores reales con los valores objetivo de diseño, y, en el caso de que los valores medidos durante la excavación estén fuera del rango esperado, se tomen las medidas de reajuste o corrección de estos.

De acuerdo con Stascheit (2014), hoy en día la tecnología con la que están equipadas las tuneladoras (dispositivos/sensores) registra y almacena entre 200 y 1000 valores cada 10 segundos, esto quiere decir que en una jornada se pueden registrar de 2 a 4 millones de datos. Posteriormente, con esta información que se registra y almacena, se procede a realizar un análisis sistemático, también conocido como análisis post-proceso, el cual, de forma general, tiene como objetivo principal detectar errores de operación en los anillos previamente excavados, para aplicar, en caso de ser necesario, el debido ajuste a los parámetros de la máquina.

Sin embargo, para conseguir un eficiente control, análisis y evaluación del proceso de excavación, es necesario identificar y comprender los procesos clave de la máquina, en

este caso de una EPB. Comulada (2009), nos dice que el control de procesos alcanzará su máxima eficiencia cuando el tiempo entre el registro de datos del proceso constructivo, el análisis de estos y la toma de decisiones se reduzca los más cercano posible al tiempo real.

4.2 Análisis de Datos del Control de Procesos

El sistema de Control de Procesos debe ser alimentado con suficientes datos para poder llevar a cabo un análisis fundado en los mismos. Actualmente, la mayoría de las tuneladoras están equipadas con un gran número de sensores que registran todos los parámetros involucrados en el funcionamiento de las máquinas, desde presiones y desplazamientos, hasta caudales y pesos (Figura 4.1). Cuantos más datos se registren, más eficiente puede llegar a ser el sistema de control de procesos y sus análisis. El típico circuito de control en tuneladoras se representa mediante el esquema de la Figura 4.2.

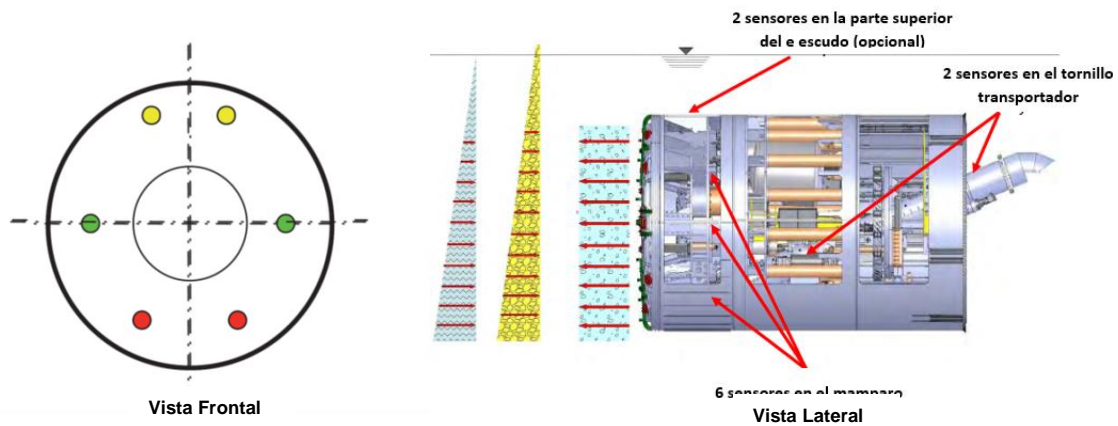


Figura 4.1 Posición de los sensores de presión ubicados en una EPB (Adaptada de Guglielmetti et al., 2008).

Los parámetros operacionales de la tuneladora se registran y almacenan digitalmente durante el avance de excavación, el circuito de control principalmente se basa en la comparación de los parámetros reales medidos con los valores objetivos de referencia. Esta comparación es realizada generalmente por los ingenieros en obra y puntualmente por expertos, debe realizarse tomando en consideración las condiciones geológicas e hidrogeológicas en las que se encuentra la tuneladora. El objetivo de esta comparación es tomar decisiones fundadas en la información recabada para poder adaptar la operación de la tuneladora a las condiciones del terreno.

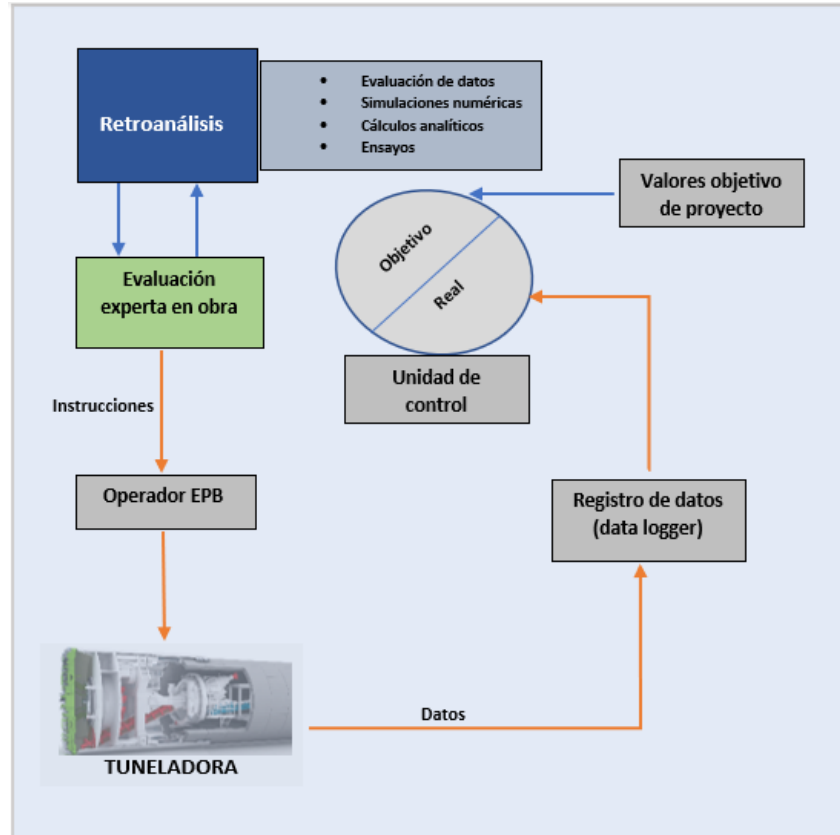


Figura 4.2 Típico Circuito típico del control de procesos. Adaptada de Comulada (2009)

4.2.1 Análisis en tiempo real y post-proceso

El análisis de datos del control de procesos en tiempo real y post-proceso, es la pieza clave de esta herramienta en las tuneladoras. Ya que debido a la gran heterogeneidad que presenta el terreno en la mayoría de los casos, no se es posible, hasta ahora, automatizar el control de procesos en toda la longitud de excavación. De tal forma que lo más cercano a esta automatización son los análisis mencionados. (Figura 4.3). Cabe recalcar que esta etapa del análisis se realiza junto con el criterio de la gente con experiencia en el área, los cuales dictaminarán los ajustes pertinentes para continuar adecuadamente con el avance de la máquina, considerando lo factores de costos, plazos, calidad y seguridad del trabajo.

Primeramente, es posible evaluar el proceso constructivo en tiempo real. De esta forma el objetivo es comprender en todo momento el funcionamiento de la tuneladora y detectar a tiempo errores u operaciones no adecuadas que puedan causar problemas en el desarrollo de la excavación.

En lo que respecta al análisis post-proceso, el objetivo es estudiar situaciones ya ocurridas con objeto de aplicar las conclusiones que se deriven para el resto del proyecto o incluso para otros proyectos.

TIPOS DE DATOS PARA EL CONTROL DE PROCESOS

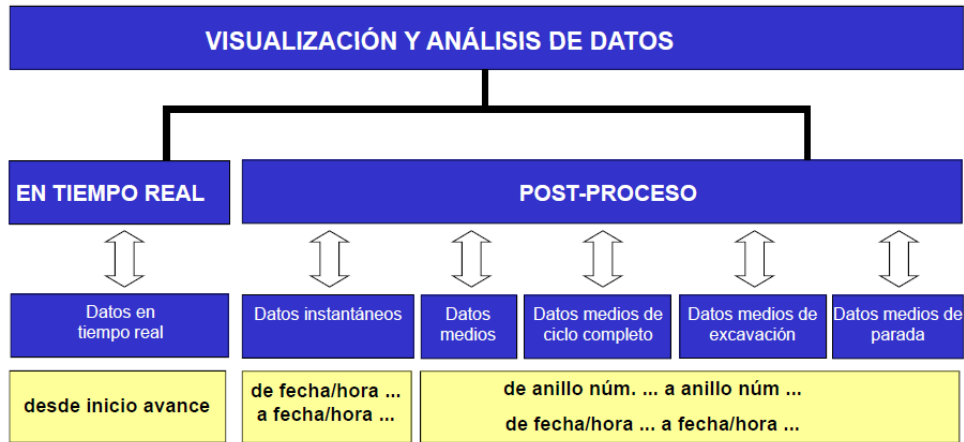


Figura 4.3 Esquema de los análisis en tiempo real y post-proceso. (Comulada, 2009)

4.3 Determinación de los Parámetros Objetivo

Con objeto de asegurar la estabilidad del terreno y la minimización de asentamientos superficiales y los efectos inducidos a edificios e infraestructuras, es preciso definir de antemano los valores objetivos para los principales parámetros operacionales de la tuneladora.

De acuerdo con Comulada (2009), es necesario que se desarrollen y empleen modelos matemáticos, analíticos y numéricos realistas, que permitan simular tanto el proceso constructivo con tuneladora, como las más relevantes condiciones de contorno que lo enmarcan. Durante la etapa o fase de proyecto estos modelos proporcionan los valores objetivos de referencia para la operación de la tuneladora. Mientras que, durante la fase de construcción se registran los valores (reales) de la excavación, seguidamente se lleva a cabo el análisis y validación. De esta manera se permite mejorar las hipótesis de cálculo adoptadas.

Desde hace años se dispone de métodos empíricos o semiempíricos para estimar los asentamientos inducidos por la excavación (Mair et al. 1996) y métodos analíticos para el cálculo de las presiones de sostenimiento del frente de excavación. No obstante, actualmente para la excavación en condiciones heterogéneas y complejas es conveniente apoyar la determinación de los valores referencia con base en métodos numéricos, estos

proporcionan una simulación realista del proceso constructivo y de su interacción con el terreno. Entre las principales ventajas que ofrece un modelo numérico, se encuentran las siguientes:

- Permite la simulación de las secuencias de construcción
- Se pueden tratar las condiciones complejas del terreno
- Modelo de comportamiento más realista
- Permite manejar condiciones hidráulicas complejas
- Permite simular el tratamiento del terreno
- Toma en cuenta las estructuras y servicios adyacentes
- Simular condiciones a medio y largo plazo
- Tratar con múltiples túneles

De acuerdo con Maidl et. al, (2014) uno de los métodos mas empleados en los proyectos de tuneles es el Método de los Elementos Finitos (MEF), el cual es una herramienta importante para representar el avance del escudo y la determinación de las especificaciones de diseño. Con la ayuda de la Simulación MEF es posible, con el estado actual de la tecnología, proyectar las interacciones extremadamente complicadas en terrenos heterogéneos. La Simulación MEF se puede estructurar en las siguientes fases:

- Modelado geométrico y de los procesos clave con la discretización realista de todos los elementos de la máquina (presión de sostenimiento del frente, relleno del gap, inyección de bentonita en el escudo, etc.).
- Modelización de materiales con la selección de una ley constitutiva adecuada (considerando presiones de poro, efectos de fluencia (creep), comportamiento no lineal-elástico, etcétera).
- Análisis paso a paso considerando los efectos entre los diferentes procesos de construcción y el estado de esfuerzo del terreno.
- Verificación de los resultados y factores de seguridad.

En la Figura 4.4 se muestra el modelo conceptual empleado para la simulación numérica de la excavación con tuneladora. Cuando una tuneladora trabaja en modo cerrado, ésta se puede simular como un sistema de presiones intercomunicadas que se pueden operar desde la tuneladora.

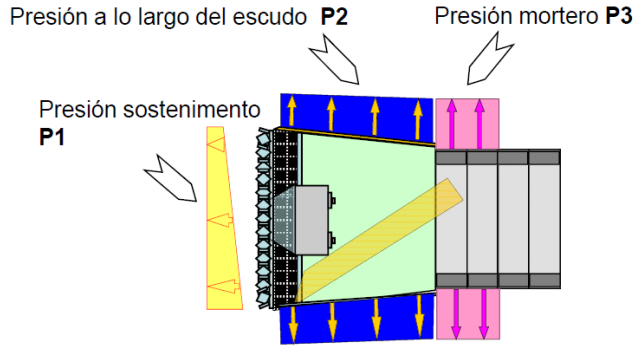


Figura 4.4 Modelo conceptual de las presiones para la simulación numérica de una tuneladora. (Comulada 2009)

La integración de este sistema de presiones en modelos numéricos en 3D (Figura 4.5), permite llevar a cabo estudios paramétricos para determinar los rangos óptimos de presiones de trabajo de la tuneladora y para obtener estimaciones realistas de los asentamientos inducidos. De esta manera, permiten determinar el rango óptimo de presiones en el que deberá trabajar la tuneladora.

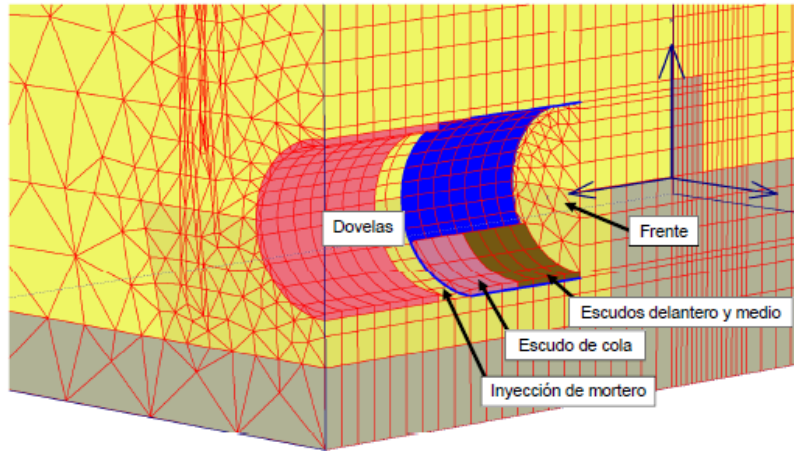


Figura 4.5 Modelo numérico tridimensional para la simulación del avance de una tuneladora. (Comulada 2009)

Por otra parte, los parámetros mecánicos de la máquina tales como, empuje, torque, penetración, etcétera, se estiman con la ayuda de cálculos analíticos y empíricos. Sin embargo, la mayoría de estos cálculos se han realizado con la hipótesis de un frente de excavación conformado totalmente por roca o suelo. No obstante, actualmente existen métodos para para estimar el torque y empuje en frentes mixtos como el propuesto por González (2016), y para la estimación del rendimiento de la TBM, Vergara (2017) ha presentado un método en frentes mixtos, denominado *Mixedface Penetration Index* (MFPI).

El MFPI toma en cuenta la fuerza de empuje total ejercida por la TBM en el frente (MN) y la penetración (mm/rev). El índice se correlaciona con el porcentaje de roca en el frente, la resistencia a la compresión uniaxial (UCS) de la roca intacta y el RQD del macizo rocoso.

Otro modelo ampliamente abordado para el rendimiento de la TBM es el método Q_{TBM} por Barton (1999), para predecir la penetración (PR) y la velocidad de avance (AR). Este método se basa en la clasificación del macizo rocoso por el método Q, y se expresa de la siguiente manera:

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

Tabla 4.1 Parámetros empleados en el Q_{TBM}

$RQD=$	Primer parámetro del índice de Barton, es lo mismo que RQD% pero medido en orientación longitudinal al túnel
$J_n=$	Segundo parámetro de la clasificación de Barton que depende del número de familias de discontinuidades
$J_r=$	Tercer parámetro de la clasificación de Barton que depende de la rugosidad de las discontinuidades que más favorecen la penetración de los cortadores
$J_a=$	Cuarto parámetro de la clasificación de Barton que depende del grado de alteración de las discontinuidades que más favorecen la penetración de los cortadores.
$J_w=$	Quinto parámetro de la clasificación de Barton que depende de la presión y caudal de agua en el túnel.
$SRF=$	Sexto parámetro de la clasificación de Barton relacionado con las tensiones que soporta el macizo rocoso y su resistencia, con el que se trata de tener en cuenta los casos de: fluencia, expansividad y estallidos de roca
$SIGMA=$	Factor dependiente de la resistencia de la roca (UCS-MPa).
$F=$	Fuerza promedio por cortador, en la misma zona.
$CLI=$	Índice de vida del cortador, (por ejemplo 4 para Cuarzita, 90 para Caliza).
$q=$	% de contenido de cuarzo
$\sigma_\theta=$	Estado biaxial de esfuerzos en el frente del túnel (MPa) en la misma zona (valor estimado normalizado a 100 m de longitud de túnel).

Finalmente, Barton define a la penetración (PR) como:

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

y velocidad de avance (AR) como:

$$AR=5(Q_{TBM}^{-0.2}) \times T^m$$

donde T es el tiempo total en horas (24 por día, 168 por semana, etc.) y “m” se define a partir de los siguientes datos empíricos:

Tabla 4.2 Valores de m

Excelente rendimiento	m= -0.13 a -0.17
Bueno	m= -0.17
Adecuado	m= -0.19
Malo	m= -0.21
Extremadamente malo	m= -0.25

Para determinar el valor de cada parámetro involucrado en los procesos de la TBM-EPB se pueden emplear distintos métodos, según las condiciones y exigencias del proyecto, en la Tabla 4.3 se presentan los comúnmente empleados para cada proceso.

Tabla 4.3 Métodos para la obtención de los parámetros clave (Maidl, 2014)

Proceso Parcial	Análisis del proceso	Parámetros clave
Excavación del terreno/ Desgaste de las herramientas	Modelo de cálculo analítico de capacidad de corte (balance de fuerzas), modelo de cálculo estructural basado en pruebas de laboratorio.	Fuerza de contacto, empuje, torque, penetración, fricción del escudo, densidad del material en la cámara, índice de capacidad de corte.
Presión en el frente	Simulación MEF, cálculo cinemático de la presión, modelo de cálculo analítico para control del volumen	Presión de frente, presión de inyección de espuma, distribución de densidad en la cámara.
Acondicionamiento del terreno	Simulación MEF de los procesos hidráulicos, modelos de cálculo analítico.	Distribución de la presión en el frente, presión de inyección de espuma, parámetros de la espuma
Relleno del GAP	Simulación MEF, modelos de cálculo analítica.	Volumen de mortero bajo condiciones desfavorables, la presión de inyección
Separación de suelos	Modelos de cálculo analítico	Densidades de suspensión, contenido de sólidos, medidas de viscosidad, resistencia a la fluencia

4.4 Gestión de Datos

Tal como se ha comentado antes, es imprescindible disponer de un sistema adecuado de gestión de datos si se desea implementar un sistema de Control de Procesos en la obra. Las fuentes de alimentación del Control de Procesos son variadas y, principalmente, destacan la información geológica e hidrogeológica del proyecto, los cálculos y resultados

para la determinación de valores objetivo, los datos de la tuneladora, las lecturas del programa de instrumentación y datos e información de otros proyectos de referencia.

Para poder llevar a cabo la comparación de valores objetivo con valores reales y para poder evaluar las interacciones en el proceso constructivo, se requieren distintas herramientas. Éstas deben permitir simplificar el análisis y la evaluación de la información y, consecuentemente, reducir los tiempos de reacción. Una eficiente gestión de datos es tanto más importante cuando además se toma en consideración que la excavación con tuneladora se caracteriza por sus elevados rendimientos.

El registro y el almacenamiento de los datos debe llevarse a cabo en el marco de una estructura claramente predefinida. La información debe ser centralizada en una base de datos que sea accesible a las personas responsables (Comulada, 2009). La estructuración de datos varía según el tipo de proyecto y de tuneladora, actualmente existen en el mercado varios softwares para la gestión de toda la información recaudada, cada uno de éstos cuenta con sus propias características, pero tienen el mismo objetivo de simplificar el análisis.

4.4.1 Data Logger y conexión Web

Como se ha dicho una base de datos es de gran importancia para una eficiente gestión de toda la información proveniente de la excavación. Esta información se obtiene a través de un registrador de datos o también conocido en el medio por su nombre en inglés, “*data logger*”, el cual es instalado en la obra para monitorear, registrar y controlar los parámetros de excavación. Como se mencionó al inicio del presente capítulo, es necesario tanto el equipamiento como el mantenimiento y revisión de los sensores/dispositivos, en los puntos claves a monitorear de la tuneladora; a continuación, se enlistan los más importantes dentro de los procesos clave:

- Sensores en la cámara de excavación y en el tornillo sinfín.
- Medidores de peso y volumen para el material excavado.
- Medidores para todos los parámetros mecánicos de la TBM: velocidad de rotación de la cabeza de corte y penetración, velocidad de rotación del tornillo sinfín.
- Sensores para la presión de inyección y medidores del flujo para monitorear el relleno con mortero en el espacio anular o GAP.
- Sensores de presión de grasas obturantes para el sistema de cepillos y la transmisión principal.

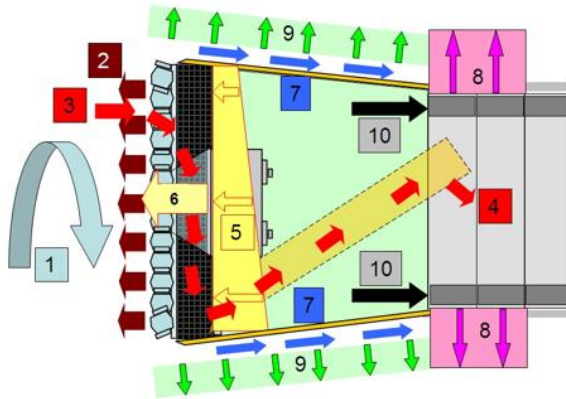
Con el fin de dar conocer lo que está sucediendo en tiempo real a todos los involucrados en el proyecto, tanto en el túnel como en la superficie, debe emplearse un sistema de monitoreo computarizado conectado a la WEB, que integre los parámetros operacionales, el comportamiento del terreno en el frente y los asentamientos en superficie.

4.5 Procesos Clave en una EPB

La metodología que lleva el Control de Procesos, medir y corregir, no se podría llevar a cabo sin un entendimiento integrado de los procesos clave durante la operación de la tuneladora, dado que el comportamiento de un parámetro puede causar alteraciones en otro. Y aunque se llegara a recaudar demasiada información, sin la comprensión de todos los procesos, no se alcanzaría a tener una imagen clara del comportamiento operativo de la máquina.

Durante la operación de una EPB en terrenos inestables, es necesario aplicar presión en la cámara de excavación con objeto de estabilizar el frente. Cuanto mayor es la presión del frente en la cámara, mayores serán el torque de la rueda de corte y el desgaste de herramientas, lo cual puede acabar repercutiendo en una disminución de la velocidad de avance. La fuerza resultante de la presión en la cámara reacciona contra el mamparo estanco y debe ser vencida por la fuerza de los cilindros de empuje. La mencionada fuerza resultante de presión en la cámara no sólo depende de la presión que se aplique para sostener el frente, sino que también depende de la densidad del material excavado. Por ello, es de crucial importancia mantener la densidad del material en la cámara suficientemente baja, tanto para minimizar la fuerza de empuje, como para permitir un adecuado flujo del material a través de la cámara; lo anterior se muestra en el esquema de la Figura 4.6.

Otras fuerzas que deben ser contrarrestadas por la fuerza de empuje total son las fuerzas de fricción con el terreno, que pueden ser minimizadas con un adecuado guiado de la máquina y verificando el correcto posicionamiento del faldón del escudo. Además, con la presión a lo largo del escudo, que está en función de las presiones de frente y de inyección de mortero, se puede controlar la deformación del terreno alrededor del escudo y con ello se puede reducir la fricción (Comulada, 2009).



Secuencia operativa:

1. Giro de la rueda de corte.
2. Empuje transmitido a la cabeza.
3. Flujo de material a través de la cabeza de corte.
4. Material rezagado a través de tornillo sinfín.
5. Presión en la cámara de excavación.
6. Fuerza de empuje.
7. Estado de inercia del escudo.
8. Inyección de mortero.
9. Fuerza de fricción entre el terreno y el escudo.
10. Empuje de gatos reaccionando en dovelas.

Figura 4.6 Esquema de fuerzas e interacciones durante la excavación con tuneladora.

Hemos visto que el principio de operación consiste en un equilibrio de fuerzas para llevar a cabo el avance y, a la vez, mantener la estabilidad en el frente. Al enfocarnos en el material excavado, el cual entra por las aberturas de la rueda de corte para ingresar a la cámara de excavación, podemos notar las dependencias que existen entre el volumen de la cámara, nivel de llenado, los agentes acondicionantes y el tornillo sinfín; para cada ciclo de avance. Rahm (2012), nos describe cualitativamente las dependencias que existen en este proceso:

- a) Si las condiciones del terreno son favorables para la excavación, aumentará tanto la velocidad de avance como el material excavado.
- b) Si las condiciones del terreno no son favorables para el proceso de excavación, aumentará la cantidad de agentes acondicionantes.
- c) El flujo dentro de la cámara de excavación es incrementado por el material excavado y los agentes acondicionantes.
- d) El flujo de material hacia el interior de la cámara incrementa su contenido.
- e) Si se aumenta el ingreso de material en la cámara de excavación, también aumenta el flujo de extracción de éste.
- f) La extracción de material de la cámara de excavación, disminuye el contenido de ésta.
- g) Si la cámara de excavación está llena, el siguiente ciclo de excavación estará limitado.

h) Para la restricción anterior g), la cantidad total a excavar se reducirá adicionalmente por la cantidad del agente acondicionante necesario.

En la Figura 4.7 se muestra un diagrama de causa-efecto de las dependencias anteriormente mencionadas, la cuales se cumplen al tener llena la cámara de excavación. Las relaciones se indican como flechas entre dos valores, una polaridad positiva entre la causa y el efecto se visualiza mediante un signo más (+) e implica una mejora/aumento del valor dependiente si el valor de origen es mejorado/aumentado. Si un aumento del valor del origen provoca una disminución del valor dependiente, se utiliza un signo menos (-) para indicar la polaridad negativa.

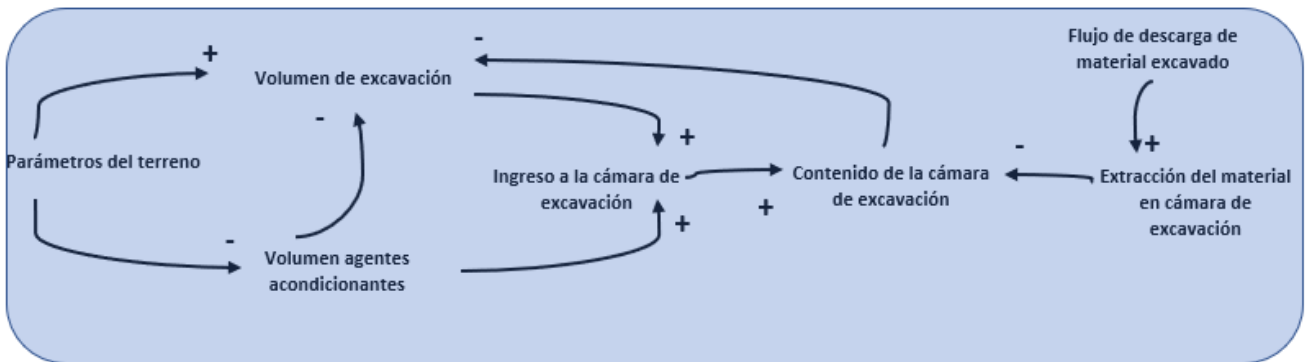


Figura 4.7 Diagrama de causa-efecto del flujo de material al interior de la cámara de excavación, Rahm (2012).

Lo anterior nos lleva a decir que cuando la cámara de excavación se encuentra a su máxima capacidad, la cantidad de material que entra es la misma que sale de ella a través del tornillo (considerando el volumen de material más acondicionantes), por tanto, el tornillo deberá tener un dimensionamiento acorde al rendimiento de la rueda de corte para realizar el desempeño de la extracción del material.

4.6 Plan de Monitoreo

De acuerdo con Maidl et al. (2012) los túneles operados con escudos se pueden considerar como construcciones con un alto grado de dificultad, debido a la acentuada interacción entre la tuneladora, terreno y los alrededores de la obra. Sin embargo, el tuneleo mecanizado se puede mejorar considerablemente a través de un análisis completo de los datos de excavación, ofreciendo las ventajas ya mencionadas en este capítulo.

Ahora bien, para abordar el control procesos de forma correcta además de lo descrito anteriormente, también es necesario establecer un plan de monitoreo antes de iniciar la construcción del túnel, el cual marque las pautas a seguir durante todo el proceso de excavación.

De igual forma Maidl et. al. (2012), indican que para obras geotécnicas complejas como los túneles, un plan de monitoreo adecuado debe seguir la Metodología Observacional de ÖNORM EN 1997-1 Eurocodigo 7 (Anexo A). Para el caso de la excavación mecanizada, el propósito es verificar durante la construcción que los parámetros operacionales estén dentro de los rangos permitidos, esto se logra con la ayuda de un sistema de monitoreo (Control de Procesos). La operación pronosticada se modificará cuando el terreno y la estructura se comporten de una manera no esperada. Por último, si la seguridad estructural y de la obra están en peligro, se tomarán las contramedidas de acción, las cuales también se deben establecer en el plan de monitoreo.

De la misma manera Chapman et. al. (2010), afirman que el Método Observacional es de gran soporte en proyectos de ingeniería geotécnica, el cual siempre se lleva a cabo, ya sea de manera formal o informal. Nicholson et al. (en Chapman et. al 2010) define el método observacional, como un proceso de continua gestión de revisión y monitoreo de la de integración del diseño junto con el control de la construcción, lo cual permitirá realizar modificaciones durante la etapa constructiva.

5. CASO DE ESTUDIO: TRAMO 4 DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE DE LA CIUDAD DE MÉXICO

5.1 Planteamiento

Como se mencionó anteriormente la metodología del control de procesos, la visualización y análisis de datos, puede ser en tiempo real y post proceso. En este caso de estudio se realizaron ambos para revisar una complicación de importancia durante la excavación, la cual se describe con detalle más adelante en este capítulo, en importantes apartados que encierran lo siguiente:

Se revisaron los principales parámetros de operación en la zona donde se presentó una dificultad de avance de tal forma que la EPB, la cual atravesaba un frente mixto, se vio atrapada por el terreno circundante. Con base en los registros de la máquina se logró ver el comportamiento de los parámetros operativos en los anillos previos, así como también en el anillo donde se presentó el atrapamiento. Posteriormente, se propuso el método para llevar a cabo la liberación de la máquina, considerando la información recabada de los parámetros junto con una inspección en el frente de excavación.

Asimismo, se presentan las características principales del proyecto y se resumen algunos aspectos como la estratigrafía atravesada, las propiedades mecánicas de los materiales excavados, y los parámetros operacionales asignados a la EPB.

5.2 Descripción General del Proyecto

Como caso de estudio se seleccionó el Túnel Emisor Oriente (TEO), localizado en el Valle de México, con una longitud de 63 km, un diámetro interior de 7 m y exterior de 8.4 m para los primeros 21 km y de 8.6 m para el resto del túnel; con una pendiente descendiente inicial hacia el Norte de 0.19% y, a partir del km 13+460, de 0.16%

Se ubica al Nororiente de la Ciudad de México, pasando por el Distrito Federal, y los Estados de México e Hidalgo. Inicia en la intersección de las Av. Gran Canal y Río de los Remedios; corre casi paralelo a la margen izquierda del Gran Canal con dirección Norte-Oriente unos 10 km; cambia su dirección hacia el Norte-Poniente, por la margen derecha del Gran Canal, y cruza los municipios de Ecatepec, Coacalco y Tultepec a lo largo de otros 20 km. A partir de aquí se separa del Gran Canal, pasa al poniente de la Laguna de

Zumpango y cruza los municipios de Teoloyucan y Huehuetoca por 20 km más; después sigue por la margen derecha del Tajo de Nochistongo, atraviesa el municipio de Melchor Ocampo, y llega al Portal de Salida en el Ejido de Conejos, en el Estado de Hidalgo (Figura 5.1)

El portal de salida se ubica paralelo a la desembocadura actual del Emisor Central del drenaje profundo, en el Río El Salto, en el Estado de Hidalgo.

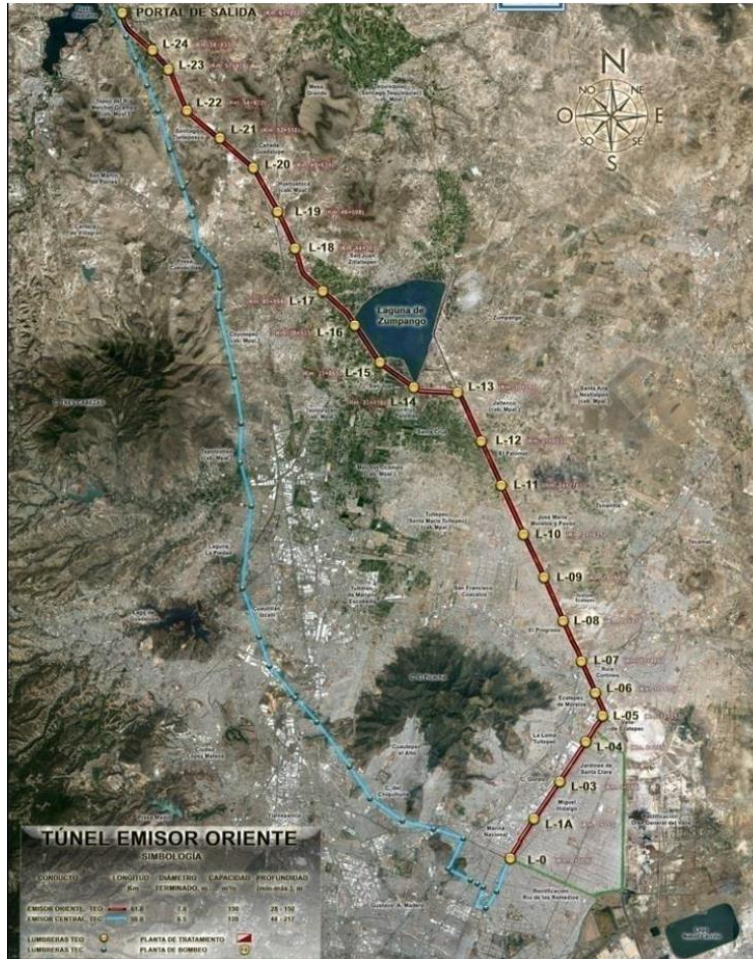


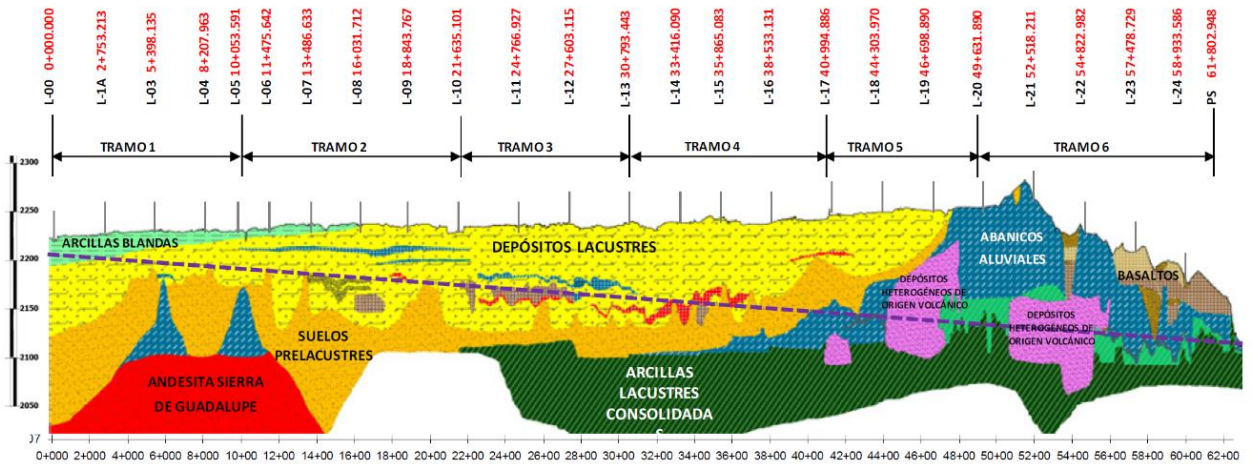
Figura 5.1 Localización en planta del Túnel Emisor Oriente (COMISSA, 2014).

Sus coberturas son variables y van desde los 28m, en la Lumbra 0, hasta los 155m en la lumbra más profunda, que es la número 20. Considerando su longitud y emplazamiento y a partir de diversos estudios geológicos y geotécnicos que se han realizado a lo largo de su trazo, se ha identificado una importante variedad de formaciones geológicas que se deberán atravesar y que van desde arcillas de alta plasticidad, suelos arenoarcillosos de

origen pluvial, depósitos de origen volcánico de mediana a alta resistencia, y, suelos arcillosos, fuertemente consolidados con lentes de boleos empacados en arcilla y limos.

Para su construcción el TEO se dividió en 6 tramos:

- Tramo 1 de la Lumbreira 00 (km 0+000) a la Lumbreira 05 (km 10+053)
- Tramo 2 de la Lumbreira 05 (km 10+053) a la Lumbreira 10 (km 21+635.101).
- Tramo 3 de la lumbreira 10 (km 21+635.101) a la lumbreira 13 (km 30+793.443).
- Tramo 4 de la lumbreira 13 (km 30+793.443) a la lumbreira 17 (km 40+994.886).
- Tramo 5 de la lumbreira 17 (km 40+994.886) a la lumbreira 20 (km 49+631.757).
- Tramo 6 de la lumbreira 20 (km 49+631.757) al portal de salida (km 61+802.948).



- **Figura 5.2 Perfil geológico y localización de lumbreiras**

Se determinó utilizar 6 máquinas tuneladoras tipo EPB (Earth Pressure Balanced), asignada una para cada tramo establecido. Este tipo de máquinas fueron seleccionadas para la totalidad de este túnel debido a su amplia aplicación y versatilidad para atacar diferentes condiciones de terrenos.

El TEO cuenta con 24 lumbreiras profundas: seis para el montaje de los escudos y con un diámetro interno de 16 m; el resto con 12 m de diámetro diseñadas para la operación y mantenimiento del túnel. La distancia entre lumbreiras es de 2.5 km en promedio y su profundidad varía entre 28 y 155 m.

5.3 Sitio de Interés: Tramo 4

Para el caso de estudio del presente trabajo se eligió el Tramo 4, el cual abarca de la lumbrera 13 con el cadenamiento km 30+793.44 a la lumbrera 17 con el cadenamiento km 40+994.88, del TEO. Y específicamente nos centramos en el subtramo entre la lumbrera 14 y la lumbrera 15, éste, según sus características, se clasificó como un frente mixto.

La característica principal de la EPB empleada es que está conformada por una rueda de corte capaz de excavar frentes de suelo y roca, equipada con un total de 48 discos de corte, con diámetro de 17 pulgadas y una separación promedio de 80 milímetros entre sí. Además de las siguientes características de diseño:

- Marca: Robbins
- Diámetro de excavación: 8.93 m
- Torque nominal: 14.916 KN-m
- Velocidad de rueda de corte: 0 a 3 rpm
- Fuerza nominal de empuje: 80,000 KN
- Número de cilindros de empuje: 28 cilindros simples
- Potencia instalada: 1,900 Kw



Figura 5.3 Tuneladora "La Corregidora". (therobbinscompany.com, 2016)

5.3.1 Dificultades de avance de la EPB en el Tramo 4

De acuerdo con la planeación original del programa de obra, la tuneladora Robbins “Corregidora” excavaría el Tramo 4 del TEO (véase Figura 5.2) partiendo de la lumbrera L-17 hacia la L-13 para ser extraída. Sin embargo, en enero del 2017 se excavaba el subtramo de la lumbrera L-15 a la lumbrera L-14, en donde se atravesó un macizo rocoso de tipo basáltico muy fracturado, cuyas características se describirán más adelante, lo cual incitó dificultades en el avance de tal forma que la EPB se vio atrapada en el macizo rocoso tras una intervención de rutina.

5.3.1.1 Antecedentes del atrapamiento en el Tramo 4

De acuerdo con los registros de avance de la EPB en el Tramo 4, se describen los acontecimientos previos al problema del atrapamiento.

- a) El 03 de enero/2017, se detuvo el avance de la excavación en la posición del anillo 1309, para llevar a cabo una intervención e inspección de las herramientas de corte.
- b) El 04 de enero/2017, una vez realizada la intervención antes mencionada, se reanudó con la excavación para el anillo #1309 en el cadenamiento 33+898.81, pero sin lograr avance.
- c) Durante la intervención mencionada, se revisó el desgaste de los discos de corte, los cuales se encontraban dentro de los rangos permisibles. Asimismo, con la finalidad de continuar la excavación del anillo No. 1309, se verificó con el sistema de guiado el alineamiento de la máquina y los Gaps existentes entre el faldón y las dovelas, de esta manera se confirmó que estaban dentro de los rangos aceptables.
- d) Se realizó un intento por reiniciar la excavación, pero solo se avanzaron 20 mm y se tomó la decisión de no continuar con el avance debido a que la *fuerza de empuje* (parámetro clave de operación de la EPB) rebasó el rango permitido en dicho intento.
- e) Ante esta situación se realizó una inspección en el frente de excavación, en la que se encontró un frente de roca muy alterado, con múltiples fracturas tanto en la clave como en los hastiales, así como el desprendimiento de algunos bloques sobre el escudo.

5.3.2 Condiciones geológicas del Tramo 4

Como se mencionó en el capítulo 2, la campaña de estudios geológicos y geotécnicos debe proporcionar los reportes con la información suficiente para posibilitar el diseño y la construcción de forma segura. A continuación, de manera general se describen las condiciones geológicas que se reportaron en el subtramo de interés.

5.3.2.1 Geología de Proyecto Ejecutivo.

De acuerdo con el marco geológico de Proyecto Ejecutivo, la tuneladora “Corregidora” excavaría el Tramo 4 del TEO, de la lumbrera L-17 hacia la lumbrera L-13, atravesando materiales constituidos predominantemente por limos arcillosos lacustres compactos (“tobas”), con horizontes de arena fluvial pumítica y basáltica de grano fino a grueso, así como arenas limosas y arcillosas, con gravas aisladas, muy compactas y frentes mixtos constituidos por las mismas tobas y basalto andesítico (Figura 5.2).

5.3.2.2 Geología real.

Adicionalmente, durante la construcción se realizaron sondeos, con lo cuales se logró tener una representación más realista del terreno donde se encontraba atrapada la TBM. En la Figura 5.4 se muestra el corte estratigráfico del subtramo de la lumbrera L-14 a la lumbrera L-15 con el registro de los materiales realmente encontrados, y en la Figura 5.5 se muestra un detalle de la zona de basalto, incluyendo dos de estos sondeos (denominados, sondeo-11a y sondeo-12), los cuales sirvieron para confirmar la presencia y fronteras del macizo rocoso. De acuerdo con los resultados de los sondeos se estimó que aproximadamente se tenía una longitud de roca de 430 m, antes de llegar a la lumbrera L-14.

CONTROL DE PROCESOS PARA LA EXCAVACIÓN DE TÚNELES EN FRENTE MIXTO CON TBM DE TIPO EPB

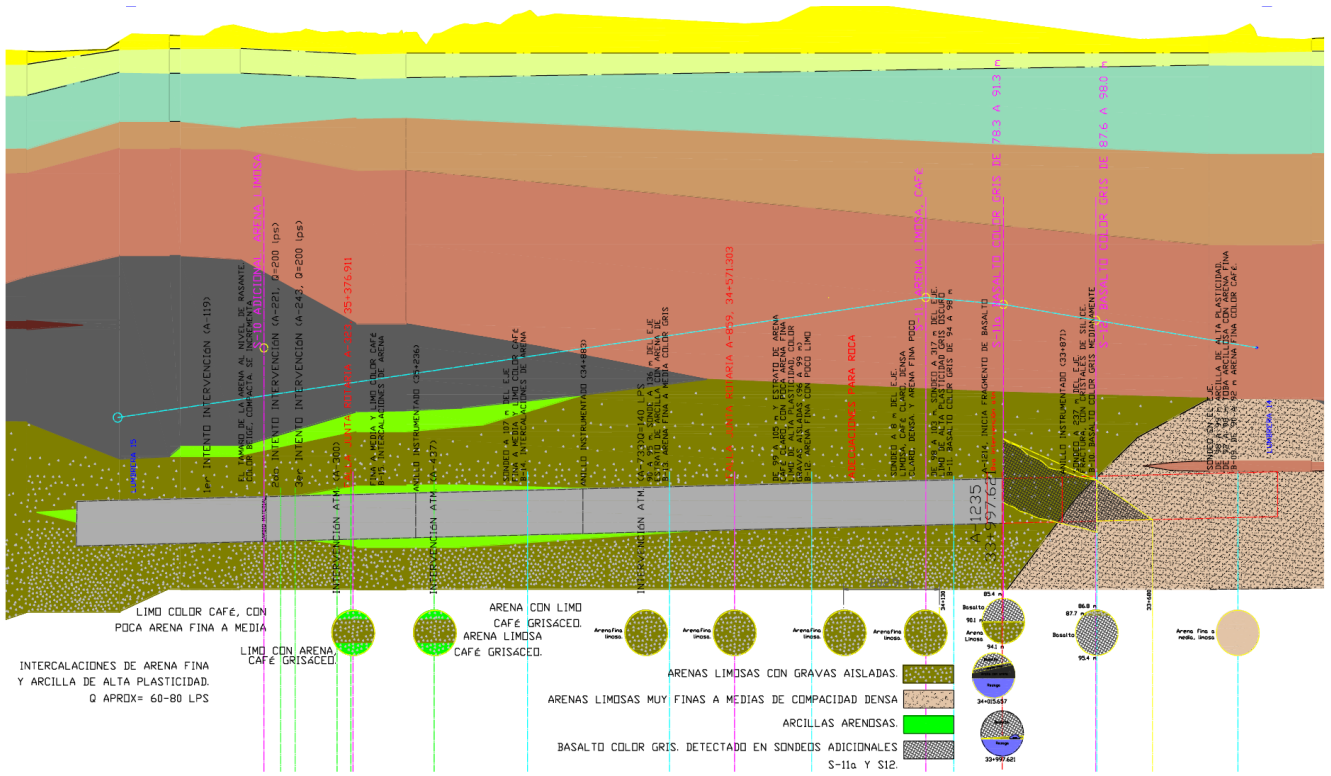


Figura 5.4 Corte estratigráfico de la L-15 a la L-14, COMISSA 2017.

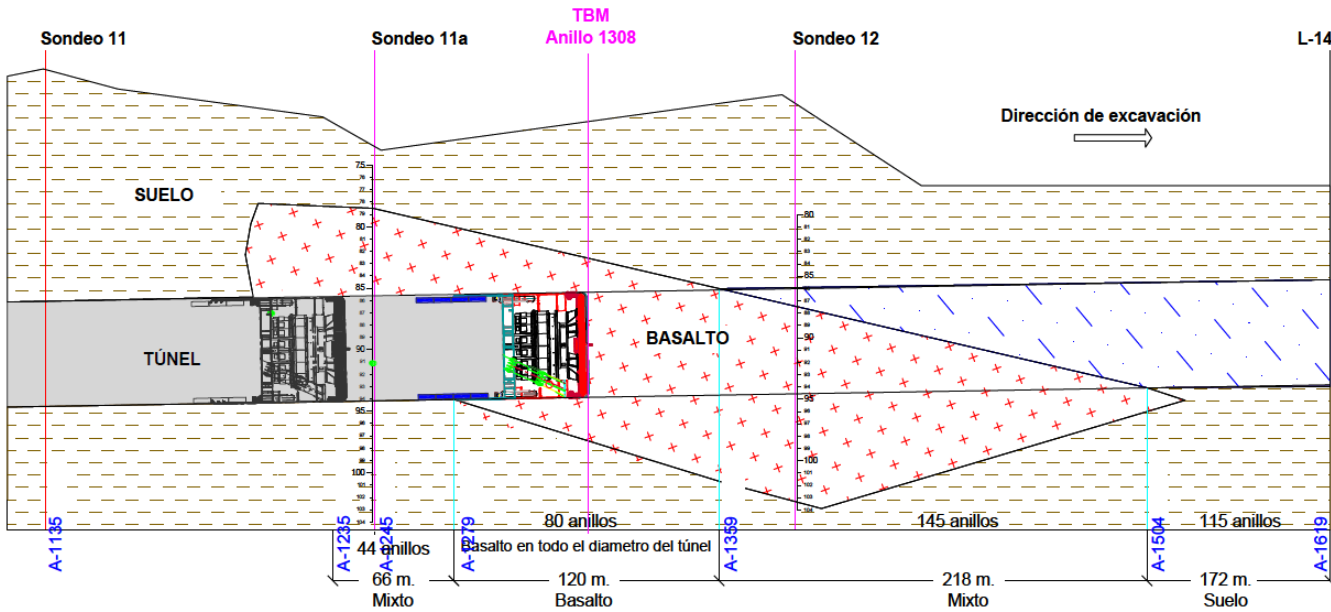


Figura 5.5 Detalle de la estratigrafía en la zona del atrapamiento, COMISSA 2017.

5.3.2.3 Inspección del frente de excavación

Después de verificar que la máquina no avanzaba, se realizó una inspección en el frente de excavación, en donde se observó la existencia de un frente de roca fracturado de mala calidad y separado hasta 60 cm en algunas secciones de la rueda de corte. Así mismo, se inspeccionó la sección superior del escudo a través de las ventanas de la misma rueda, y se encontró roca fraccionada de diferentes tamaños gravitando sobre el mismo (ver Figura 5.6).

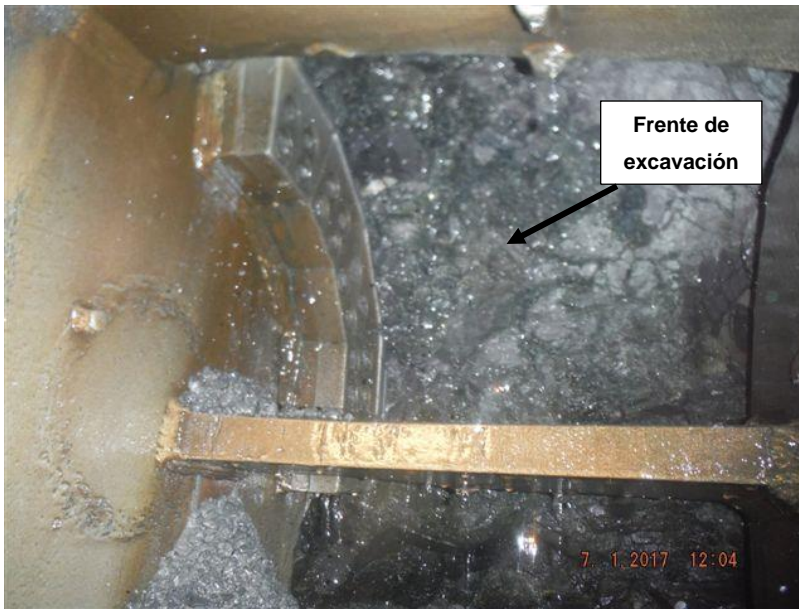


Figura 5.6 Frente excavación, vista desde el faldón de la EPB, COMISSA 2017

Como ya se anticipó, a partir de las observaciones en el frente se identificó que la tuneladora se encontraba dentro de un macizo rocoso compuesto por un basalto muy fracturado, con estructura de bloques en el que se aprecian fracturas con superficies alteradas.

Para corroborar lo anterior, resulta particularmente interesante observar los núcleos obtenidos del del Sondeo-12, mismo que se encontraba por delante de la posición del frente del atrapamiento (Figura 5.7).

Profundidad de Interes (m)	Descripción y Clasificación (SUCS)	% de Recuperación	RQD (%) en Roca
83	Arena limosa (SM) color café oscuro con fragmentos de basalto mezclados con limos de alta plasticidad (MH), color café oscuro.	100	-
84			-
85			-
86			-
87		100	-
88			
89	Basalto gris, poco fracturado	100	46
90			
91		100	65
92			
93		100	64
94			50
95			
96		100	100
97		100	88
98			



Figura 5.7 Datos del sondeo 12, COMISSA 2017.

En el denominado sondeo-12, se puede observar cómo en un tramo que va de los 83 a los 88 metros se tiene un terreno compuesto por arena limosa con fragmentos de basalto; luego, entre los 88 y los 90 metros, se tiene una roca basáltica con un índice de calidad RQD promedio de 46%, lo cual indica un grado de fracturamiento importante; más adelante, entre los 90 y los 95 metros, el RQD mejora un poco, oscilando entre los 50 y los 65 puntos y no es sino hasta los 95 m que alcanza valores altos (entre 88 y 100 puntos).

Lo anterior, es un indicativo muy claro de que el escudo estaba en una zona de transición entre el macizo sano y los estratos limo-arenosos que como se puede observar, de abajo

hacia arriba, va de una roca sana, pasando por una roca cada vez más fracturada, luego una roca alterada y muy fracturada que poco a poco se mezcla con los limos, los cuales gradualmente van predominando hasta que se termina por completo la roca.

En términos generales, el índice RQD global del macizo sano, que en general se consideró alto, no podía considerarse como un indicativo de estabilidad para la totalidad de la excavación; por el contrario, en este caso, el carácter transicional que se apreció a medida que se acercaba al contacto con los depósitos de cenizas (limos arenosos) y dada la inclinación del bloque, hacía que las zonas de debilidad se localicen en el sector superior derecho del frente de excavación; mientras que del lado izquierdo y hacia la parte baja del frente se tenía un macizo de buena calidad (Figura 5.8).

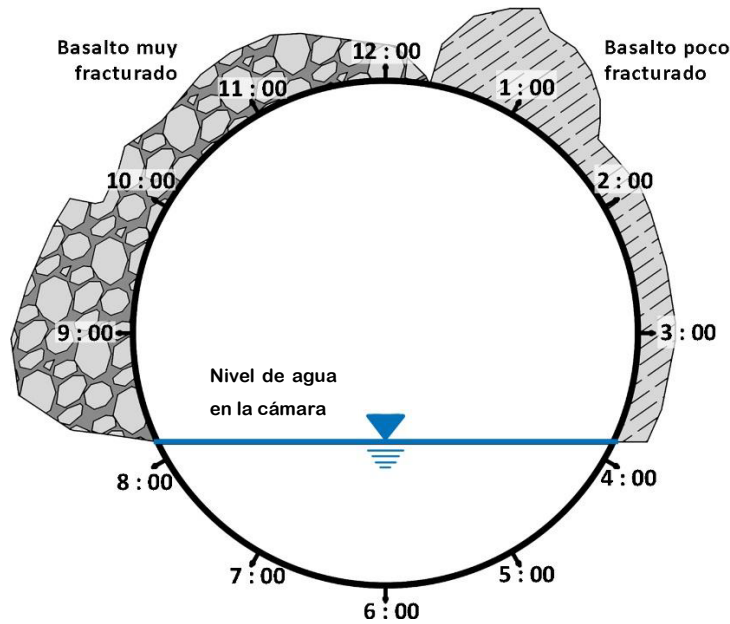


Figura 5.8 Esquema de las condiciones del macizo rocoso tras la inspección, vista en sentido contrario al avance.

5.4 Control de Procesos en el Sitio

Como se ha descrito anteriormente, el frente de excavación estaba conformado por un basalto fracturado en una zona de transición; por tanto, los valores objetivo para el subtramo de interés se propusieron para este tipo de terreno (frente mixto).

5.4.1 Características del dispositivo y software de control

Los elementos del control de procesos descritos en el capítulo 4, fueron los mismos que se emplearon en el sistema base para la gestión del monitoreo en este caso, el cual consistió en la implementación de un software de gestión (ARIGATAYA) que tenía como labor enlazar la base de datos de la EPB con un servidor central que almacenaba y procesaba la información para posteriormente repartirla entre los responsables del proyecto, tal y como se observa en el esquema de la Figura 5.9.

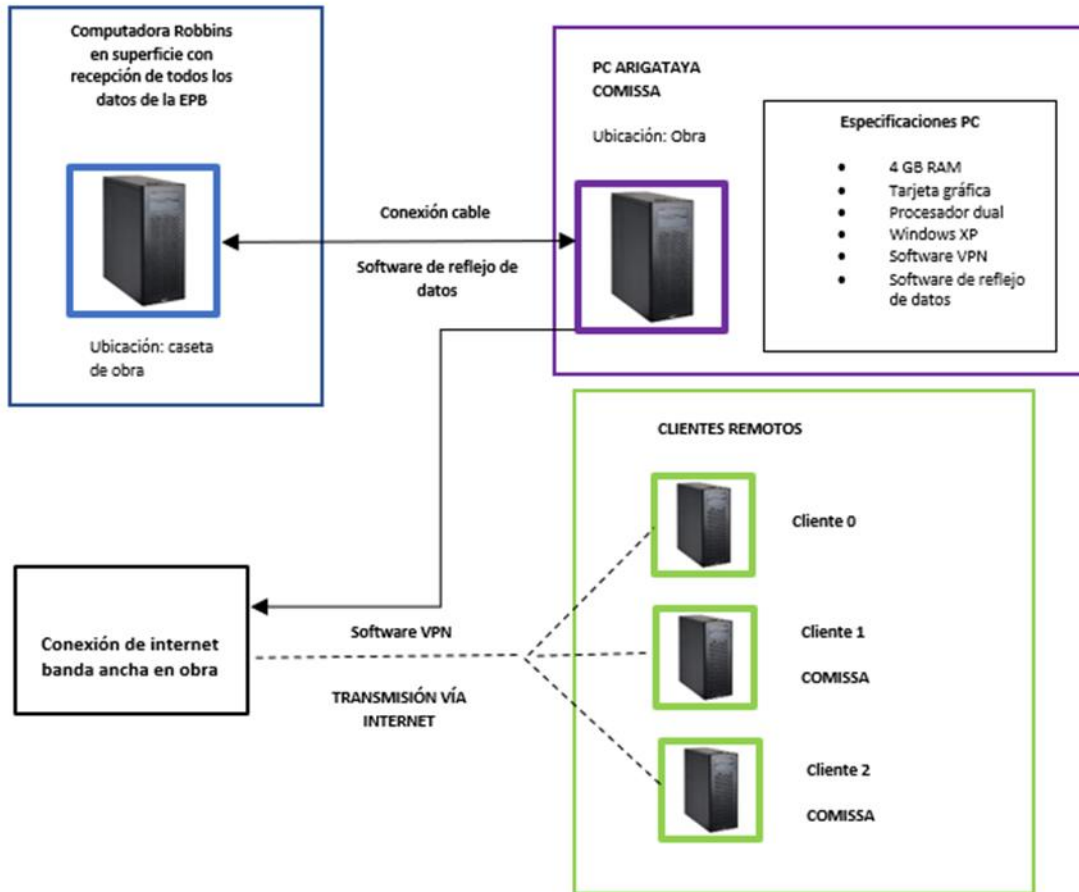


Figura 5.9 Esquema del sistema de Control de Procesos en el Tramo 4, COMISAA 201

5.4.2 Monitoreo de los principales parámetros de operación

Los valores de referencia para los parámetros operacionales fueron definidos previamente en la etapa de proyecto en función de las características de la EPB junto con las condiciones geológicas, geotécnicas y geohidrológicas. De igual forma, se establecieron rangos permisibles (valores máximos y mínimos) en cada parámetro de operación; partiendo de

estos rangos de operación, se llevó a cabo el monitoreo en tiempo real durante el proceso de excavación.

Teniendo presente los rangos permisibles de operación, se podía evaluar el comportamiento operativo de la máquina tanto en los avances como en las intervenciones. De acuerdo con las condiciones geológicas que conforman al subtramo de frente mixto en el Tramo 4, se propusieron los siguientes parámetros para la operación de la TBM- EPB:

Tabla 5.1 Parámetros clave y rangos de operación del Tramo 4

Condiciones del terreno	Frente Mixto Basalto-Arenas Aluviales	
Modo de Operación	Semi-Cerrado	
Penetración (mm/Rev)	5 a 9	mm/rev
Velocidad Angular de la rueda	1 a 1.8	RPM
Velocidad de avance	5 a 16.2	mm/min
Presión de frente	1.8 a 2.5	Bar
Fuerza de empuje	20,000 a 40,000	KN
Torque	2.5 a 3.5	MNm
FIR	80 a 100	%
FER	15-20	-

Los parámetros más importantes durante la excavación de un frente mixto son, el empuje, la penetración y el torque, ya que estos están en función del porcentaje de roca en el frente y éstos pueden ser indicadores de posibles anomalías o cambios geológicos.

De acuerdo con los antecedentes del atrapamiento de la tuneladora, se realizó, sin mayor problema, una intervención para la inspección de las herramientas de corte, seguidamente se procedió a continuar con el avance, pero al tratar de reiniciar la excavación del anillo No.1309 se avanzaron únicamente 20 mm (un avance completo es de 1500 mm), empleando una fuerza de empuje de 65 000 kN (Figura 5.10), misma que estaba por encima de su valor máximo de referencia de 40 000 kN, y se tomó, como medida preventiva, la decisión de no continuar con los intentos de avance, hasta después de haber realizado un análisis de los parámetros en los anillos previos (tipo post-proceso) al que se encontraban, y una inspección en el frente de excavación.

TRAMO 4, TBM Robbins - Corregidora, Anillo, 1309			
Parámetros correspondientes a la minuta del 31/10/2016			
Items evaluados	Parámetros minuta	Parámetros Data Logger	Gráficas
Penetración (mm/rev)	5 - 9	Máximo 10.4 Prom. 9.3	<p>Penetración</p>
Revoluciones (RPM)	1 - 1.8	1.3	<p>Velocidad cabeza de corte</p>
Velocidad de Avance (mm/min)	5 - 16.2	Máximo 25 Prom. 12.9	<p>Velocidad de avance</p>
Fuerza de Empuje (KN)	20,000 - 40,000	Máx. 68000 Prom. 52333	<p>Fuerza de empuje</p>

Figura 5.10 Parámetros operacionales en la excavación del anillo 1309

Después de las observaciones comentadas anteriormente, se consideraron tres posibles causas del atrapamiento:

- 1.º- Una operación de la EPB fuera de los rangos permisibles que pudiese generar un desalineamiento de la TBM y en consecuencia un atoramiento paulatino.
- 2.º- Pérdida del GAP, debido al desgaste de los discos periféricos de la rueda de corte.
- 3.º- Los fenómenos geológico-geotécnicos y geohidrológicos asociados a la excavación y a la parada de la máquina, produjeron el colapso de los basaltos de la parte superior atrapándola.

Con la ayuda del control de procesos se realizó a una revisión de los parámetros de operación y del alineamiento de la máquina en los anillos previos al No.1309, de esta manera se analizó la primera y segunda causa.

5.4.2.1 Revisión de los parámetros para determinar la causa del atrapamiento

A través del sistema de control de procesos se realizó un análisis post-proceso de los parámetros de operación y alineamiento con los valores registrados en el desarrollo de los últimos 10 anillos (ver Anexo B y Anexo C).

Durante la excavación en rocas abrasivas, como en el caso estudiado, una de las causas que pueden incrementar el torque y la fuerza de empuje es el daño o desgaste de las herramientas de corte; cuando sucede lo mencionado, entre otras cosas; se pierde el GAP, debido a que los discos periféricos de la rueda de corte, por estar desgastados, no realizan el sobre corte deseado para generar el espacio anular, y el cuerpo del escudo queda en contacto con el terreno. Esto no sucedió, lo cual se demuestra con los datos del torque registrados en los últimos 10 anillos.

A su vez, la fuerza de empuje para los mismos anillos no tuvo un incremento significativo que supusiera un atoramiento paulatino del escudo con la roca, salvo en el anillo No.1309 el cual sí registró un valor por encima de lo acordado, pero sucedió cuando se quería reactivar el avance, por lo tanto, se descartó. Además de la verificación de los parámetros, se revisó el desgaste de los discos cortadores, los cuales estaban dentro del rango permisible.

Para el resto de los parámetros clave se pudo observar que el comportamiento de los parámetros registrados se mantuvo dentro del rango permitido, así como también el alineamiento que la tuneladora registró. Lo que indicó que no se originó el posible desgaste de las herramientas, y tampoco la pérdida del GAP.

Una vez verificado lo siguiente:

1. Revisión de posibles desvíos en los rangos permisibles de los parámetros.
2. Revisión de la pérdida del GAP, y desgaste de los discos periféricos.

Se procedió a determinar si el atrapamiento fue derivado por la tercera causa, condiciones geológicas imprevistas, esto se confirmó con los resultados de la inspección realizada en el frente (ver sección 5.3.2) donde se encontraron bloques de roca en contacto con el escudo, según se observa en la siguiente Figura 5.11.



Figura 5.11 Vista desde el frente de excavación hacia el faldón de la EPB, COMISSA 2017.

El reporte de la inspección determinó que las características del macizo rocoso encontrado en el frente de excavación, reflejaban un alto grado de fracturamiento y alteración, lo que provocó que se tuvieran procesos de mayor descompresión comparados con un macizo rocoso sano y, por lo tanto, las cargas de aflojamiento en la clave y en los hastiales se incrementaron provocando presiones mayores en el contacto del escudo con el terreno.

De acuerdo con las características geológicas del frente de excavación, se observó un desbalance de calidades tan intensamente marcado, lo cual es un factor muy importante para que se produjera un atrapamiento (Figura 5.12).

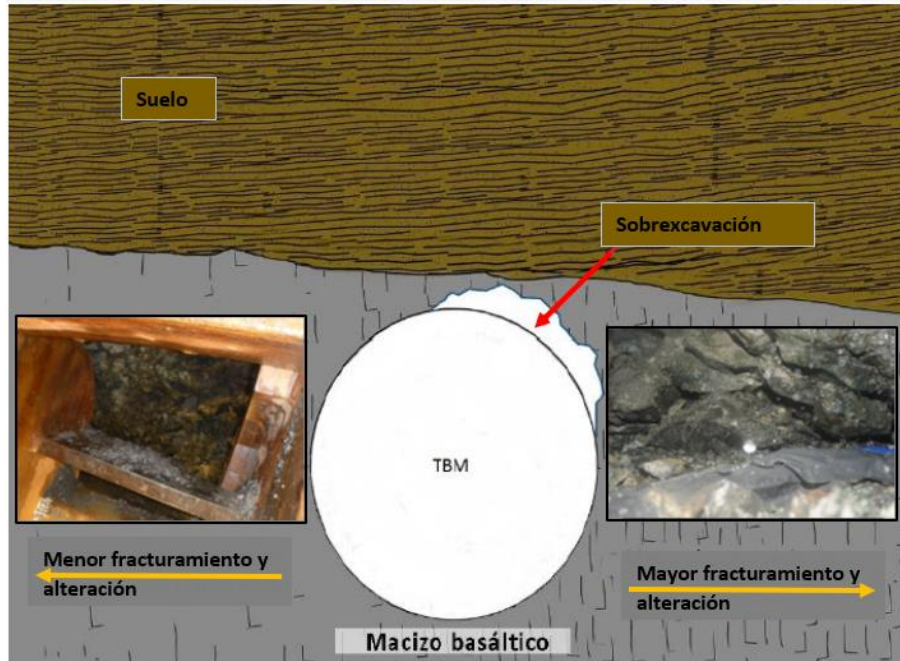


Figura 5.12 Desbalance de calidades del macizo basáltico en la zona del atrapamiento, COMISSA 2017.

5.4.3 Selección del método de liberación de la TBM

Una vez cotejada toda la información con la que se disponía a través del control de procesos (parámetros operativos), junto con el reconocimiento geológico del frente. Era necesario decidir la manera en que se debería solucionar el problema por cambios geológicos imprevistos en el frente, con la finalidad de continuar la excavación con los ajustes necesarios en los parámetros operativos.

De acuerdo con el diseño de la máquina descrito al inicio del presente capítulo, en donde se menciona que ésta cuenta con un sistema de empuje conformado por 28 cilindros. Este parámetro, debido a las condiciones de frente mixto, durante la excavación debería oscilar entre los valores de 20 000 kN y 40 000 kN, lo cuales son los rangos mínimo y máximo de operación respectivamente. Sin embargo, el sistema de empuje ordinario se podía elevar hasta su máxima capacidad, misma que fue empleada durante el atrapamiento, con una fuerza de empuje de 75 000 kN, pero sin lograr el avance. Además del sistema ordinario de empuje, la máquina contaba con un sistema extraordinario, el cual también se utilizó

durante el atrapamiento empleando fuerzas de empuje entre los 100 000 kN y 110 000 kN, pero, tampoco se tuvieron los resultados deseados para despegarse del macizo rocoso.

Después de haberse realizados múltiples intentos de empuje, los cuales se abordaron con la finalidad de liberar a la máquina de una manera rápida, por así decirlo, más lo observado en la inspección del frente, se concluyó que las fuerzas de fricción que ejercían los bloques del macizo rocoso sobre el cuerpo del escudo eran de una dimensión mayor a las que podía generar el sistema de empuje de la máquina (Figura 5.13). Por lo dicho anteriormente, el método de liberación a través del sistema de empuje se detuvo por ser inviable.

Es preciso comentar que los empujes con el sistema extraordinario, mencionados anteriormente, no son una práctica común durante el desarrollo de la excavación, ya que estos pueden llegar a dañar el mecanismo interno de la máquina (la transmisión), debido a la gran fuerza que se transmite de los cilindros hacia la rueda de corte, por lo que como su nombre lo indica, solo debe emplearse en casos extraordinarios y bajo la supervisión de los encargados de la máquina.

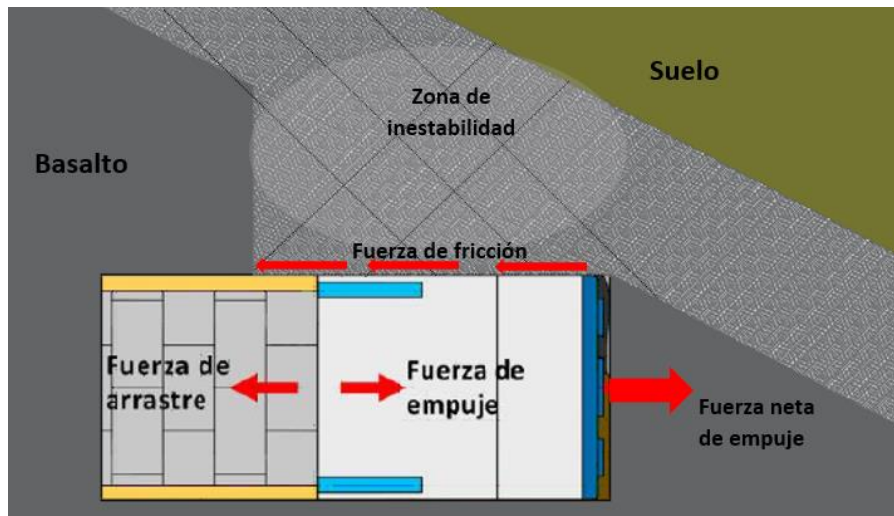


Figura 5.13 Esquema del atrapamiento de la TBM en el macizo rocoso y las fuerzas involucradas (COMISSA,2017).

5.4.3.1 Solución del atrapamiento

El hecho de tener un paro prolongado representó un problema general para todos los involucrados en el proyecto ya que el objetivo común de todas las partes, continuar excavando y culminar de forma correcta el túnel, se vio interrumpido. Pues la máquina para ejecutar los trabajos se encontraba inhabilitada. Por tanto, el primer paso que se abordó en el atrapamiento descrito fue saber el por qué sucedió (cual fue la causa), una vez que se

determinó lo anterior el siguiente paso fue proponer la solución más factible, considerando el costo, tiempo y la calidad de los procesos.

Como se mencionó anteriormente, durante los empujes extraordinarios se pudiese llegar a dañar el mecanismo de la transmisión, el cual es el encargado de accionar la rueda de corte y seguidamente junto con el sistema de empuje activar el avance. Por lo tanto, si no se tiene el cuidado adecuado se podría llegar a la instancia de dañar dicho mecanismo, como consecuencia la TBM, además de estar atrapada en el macizo, estaría totalmente inmovilizada por no contar con su mecanismo de avance.

Con este escenario hipotético anterior, se estaría en una situación aún más difícil, ya que se perdería el sistema de empuje y el accionamiento principal como herramientas de apoyo para lograr la liberación, es aquí es donde entra el rol de la experiencia del ingeniero constructor de túneles para tomar las decisiones a favor del proyecto. Como una posible solución del problema mencionado, donde el sistema de avance estaría averiado, se podría proponer una excavación con medios convencionales desde la lumbrera más próxima hasta la zona del atrapamiento.

Sin embargo, para el caso estudiado, el sistema de control de procesos permitió corroborar las condiciones de la máquina, es decir, su mecanismo de operación y las partes que la conforman se encontraban en buen estado.

Para proponer el método de liberación se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones:

- Se disponía del mecanismo de avance (la transmisión y empuje) de la máquina;
- Sin embargo, las fuerzas del sistema de empuje de la TBM no eran suficientes para liberar el escudo, debido a las condiciones geológicas ya mencionadas.

Tomando en cuenta lo anterior, se propuso la realización de un método de liberación a través de excavaciones por medios convencionales en las zonas laterales y en la parte superior del escudo, partiendo desde el interior de la TBM. Primeramente, realizaron “coyoterías” de acceso y se conformaron tres frentes de ataque, seguidamente se llevaron a cabo dos cortes laterales en el faldón, uno de lado izquierdo y otro de lado derecho, con la finalidad de llegar a la zona de contacto entre los bloques y el escudo.

De modo que cuando el escudo se libró de gran parte de los bloques, se empleó nuevamente el sistema de empuje considerando que, a diferencia de los intentos anteriores,

las fuerzas de fricción ejercidas por los bloques sobre el escudo habían sido suprimidas por las excavaciones convencionales de los frentes de ataque; por consiguiente, con la secuencia de estas actividades se logró la liberación de la TBM (Figura 5.14 y 5.15).

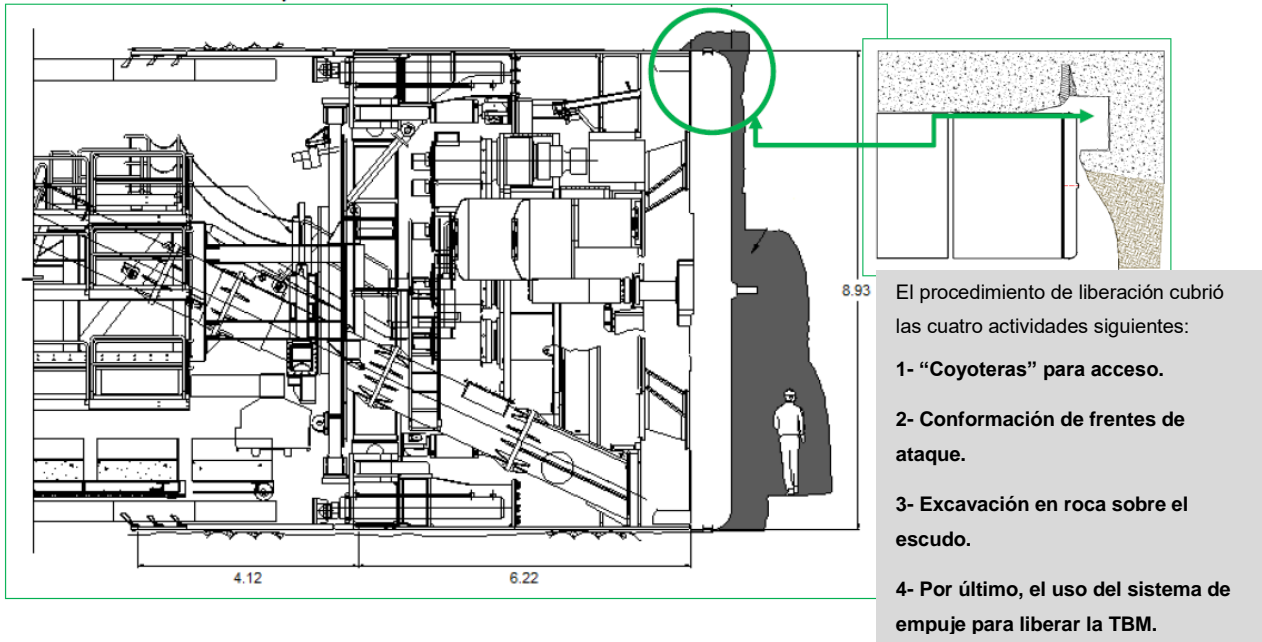
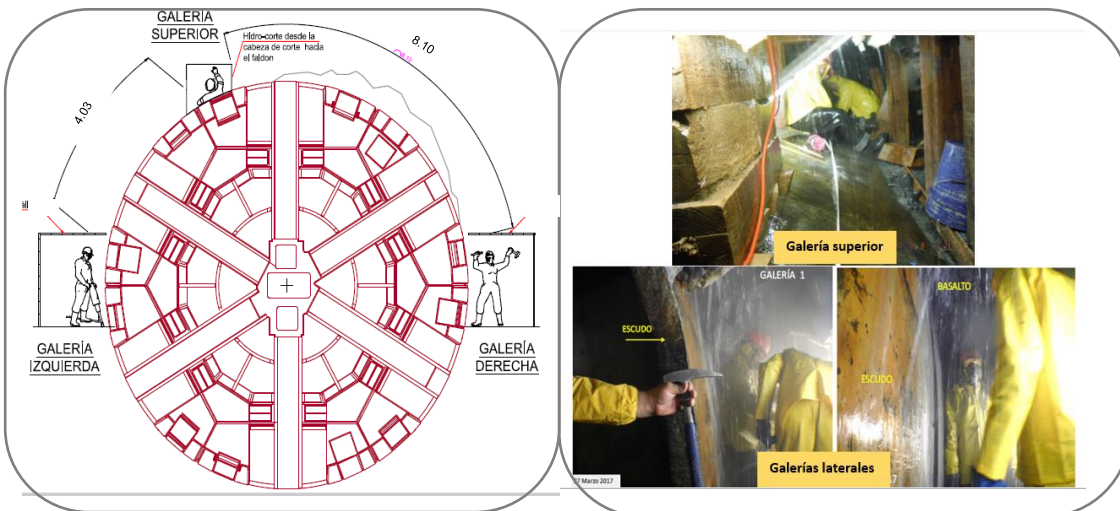


Figura 5.14 Esquema de "coyotera" y la secuencia de actividades (COMISSA, 2017).



a) Distribución de los frentes de ataque

b) Trabajos previos a la liberación

Figura 5.15 Frentes de trabajo para la liberación de la tuneladora (COMISSA, 2017).

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este trabajo se ha presentado la importancia del sistema de Control de Procesos como herramienta fundamental en el desarrollo de la excavación mecanizada, dado que a través de éste se abordó tanto el análisis como la solución del atrapamiento en el caso de estudio.

El análisis post-proceso se empleó para descartar las posibles causas del atrapamiento relacionadas con la operación de la máquina, donde se observó una operación dentro de los rangos permitidos. Mientras que el análisis en tiempo real se empleó en un principio para detener los intentos fallidos de liberación con el sistema de empuje y posteriormente para monitorear la liberación de la TBM.

A pesar de que la máquina estuvo atrapada por las condiciones geológicas de un macizo basáltico fracturado, el mecanismo y las partes más importantes de ésta no sufrieron daño alguno que provocase otra complicación, esto se debió en gran parte por:

- La interpretación correcta y oportuna de los datos monitoreados;
- Implementación de contramedidas convenientes a la situación

De esta manera todos los datos registrados por el control de procesos (en el “*data logger*”) fueron empleados para comprender cada una de las posibles causas, y finalmente para la selección del método de liberación.

6.1 Acerca del sistema de Control de Procesos

Como se ha visto en el caso de estudio y de acuerdo con la información consultada, el control de procesos nos permite validar, controlar y optimizar el procedimiento constructivo.

Después de haberse enfrentado con problemas como el atrapamiento, se establecen los siguientes aspectos que se deberán considerar antes y durante el monitoreo de una excavación.

- Previamente a los inicios de construcción se deberá contar con un plan de monitoreo en donde se tengan bien definidos los valores de referencia y los rangos de operación.

- Predefinir las contramedidas necesarias en caso de que se presentaran anomalías en el frente y/o rebases de los rangos permitidos; con un mecanismo de activación apropiado para el proyecto.
- La información que se registra y analiza en tiempo real y post-proceso deberá estar disponible para todas las entidades involucradas (cliente, contratista y supervisión), quienes también deberán tener experiencia en la operación de la máquina y una estrecha comunicación para proponer soluciones factibles con base en la información que se llegara a registrar.
- Se deberán programar revisiones preventivas a lo largo de toda la excavación, para corroborar el funcionamiento de todos los sensores y dispositivos que engloben el sistema del control de procesos.

6.2 Recomendaciones en la Operación de la EPB en Frentes Mixtos

Para el caso de los frentes mixtos, el control de procesos resulta una herramienta esencial debido a la precisión que se requiere en la operación de la TBM-EPB, ya que como se ha visto la interacción entre el frente de excavación y la tuneladora puede ser crítica en estas condiciones. Lo anterior, es debido a la importante cantidad de parámetros que se deben analizar simultáneamente para lograr un óptimo avance y sin el riesgo de daño a los elementos de la máquina.

En el presente trabajo se describieron los principales problemas durante la excavación en frentes mixtos, a continuación, se plantean las recomendaciones de acuerdo con la información estudiada en este trabajo.

Como regla básica, se deberá seguir muy de cerca cualquier cambio anormal en los parámetros, es decir, a los repentinos aumentos y disminuciones en la velocidad de penetración, fuerza de empuje y torque, este último es el principal indicador de inestabilidades en el frente o cambios repentinos de material. En caso de que esto suceda, para evitar daños en la TBM, el encargado de operación deberá realizar lo siguiente:

- Mantener de forma constante la presión en el frente.
- Reducir la velocidad angular de la rueda de corte a $< 1\text{RPM}$.
- Reducir la velocidad de avance a $< 15\text{ mm/min}$.
- Reducir la velocidad de rotación del tornillo sinfín, como consecuencia de la penetración reducida, para mantener la presión constante.

En caso de que persisten las anomalías, se deberá realizar una intervención e inspección en el frente, y específicamente para el cuidado de los discos cortadores se recomiendan criterios de inspección que incluyan la determinación de umbrales paramétricos que indiquen cuando será requerida una inspección a las herramientas de corte.

Para la rezaga de material, se necesitará que fluya de tal forma que alcance la reología idónea para una adecuada extracción. Esto se logra en asociación de espumas, polímeros, según la presencia de agua en el frente y cantidad de finos que contenga el terreno. Por lo tanto, de acuerdo con lo registrado en el presente trabajo, se recomienda que la cámara de excavación contenga un 30% de finos, que la tasa de inyección (FIR) esté entre 80-100% y la tasa de expansión (FER) entre 15-20.

Para el cuidado del accionamiento principal, en terrenos donde exista una combinación de materiales abrasivos y presiones altas dentro de la cámara de excavación, se sugiere que la inyección de grasa en el juego de sellos de la transmisión, sea constante y se mantenga una presión superior a la cámara de excavación en un orden de 0.5 bar, con la finalidad de impedir el ingreso de residuos de material provenientes del frente o de la misma cámara.

En lo que respecta a la alta permeabilidad que caracteriza a los frentes mixtos, en donde los flujos de agua originan que el mortero destinado al GAP se degrade y éste ingrese paulatinamente en la zona de cepillos dañándolos y, como consecuencia, posibles infiltraciones de agua desde el faldón. Resultará necesario un diseño de mezclas adecuado que considere aditivos que incrementen la viscosidad del mortero y eviten el "lavado".

Otro factor importante en el cuidado de los cepillos es su sistema de sellos, el cual consiste en la inyección de grasa a presión entre las filas de los cepillos para evitar el ingreso del mortero destinado al GAP, por tanto, durante el monitoreo se deberá cuidar que la presión de inyección de grasa supere a la inyección del mortero en un orden de 4 bar.

Con el propósito de que se distingan las diferentes presiones que se necesitarán monitorear y controlar de manera simultánea durante la operación de la EPB, se recomienda tener en cuenta la siguiente Tabla de presiones:

Tabla de Presiones en la Operación de la EPB.

Presiones en la operación de la EPB		Condición Sugerida
P1	Presión de la cámara de excavación.	<i>Ad hoc</i> a las condiciones del terreno.
P2	Presión de inyección de mortero del GAP.	$P2 > P1$; en un orden de 0.3 a 0.5 bar.
P3	Presión de inyección de grasa en el sistema de sellos del accionamiento principal.	$P3 > P1$; en un orden de 0.5 bar.
P4	Presión de inyección de grasa por cola (sello de cepillos).	$P4 > P2$; en un orden de 4.0 bar.

6.3 Comentarios Finales

Para este caso de estudio en particular, las condiciones geológicas imprevistas tuvieron un gran impacto desfavorable durante la construcción. Por tal motivo, para cualquier proyecto de túnel se requerirá llevar a cabo los estudios necesarios, geológicos, geohidrológicos y geotécnicos, para el reconocimiento previo. De acuerdo con Chapman et. al. (2010), entre 1% y 3% del costo total del proyecto se deberá destinar a la campaña de estudios, por lo que es necesario una administración eficiente de esta cantidad con la finalidad de reducir los riesgos subsecuentes en la etapa de construcción.

Por último, debido a limitaciones de tiempo y recursos, hay temas de investigación relacionados con el control de procesos durante la excavación en frentes mixtos que no se abordaron a profundidad en el presente trabajo. Por lo que se espera que este trabajo de investigación sirva para definir futuras líneas de investigación; por tanto, a continuación, se presentan los principales temas omitidos total o parcialmente en este trabajo, que pueden desarrollarse en futuras investigaciones: Determinar correlaciones entre parámetros operativos y características del terreno a partir de registros anteriores y métodos estadísticos; integración del sistema de instrumentación con el control de procesos, donde se tome en cuenta el control del peso del material extraído, ya que este parámetro resulta de mucha utilidad en túneles urbanos por la estrecha relación que tiene con los asentamientos; predicción de rendimientos de la TBM en frentes mixtos con materiales abrasivos.

BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

- Babendererde, L., Stahl, F., & Elsner, P. (n.d.). *www.tunnelsoft.com*.
- Budhu, M. (2011). *SOIL MECHANICS AND FOUNDATIONS*. USA: JOHN WILEY & SONS, INC.
- Chapman, D., Stark, A., & Metje, N. (2010). *Introduction to Tunnel construction*. ROUTLEDGE.
- Cole, J. c. (1900). *The Engineer Magazine* *www.theengineer.co.uk*.
- Comulada M, & Maidl, U. (2009). Process controlling and data management for shield tunnelling. *2nd International Conference on Computational Methods in Tunnelling*.
- Essex, R. J. (2007). *GEOTECHNICAL BASELINE REPORTS FOR CONSTRUCTION*. Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers.
- Eurocode-7, T. E. (2004). *Geotechnical Design- Part 1: General rules (English version)*. Bruselas: CEN .
- González, C. (2016). Thrust and torque components on mixed-face EPB drives. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 47-54.
- Guglielmetti, V., Grasso, P., Mahtab, A., & Xu, S. (2008). *Mechanized Tunnelling in Urban Areas*. Londres: Taylor & Francis.
- Heuer, R. E. (1974). *Important ground parameters in soft ground tunneling*. New York: ASCE.
- Hongsu, M., Lijun, Y., Qiuming, G., & Ju, W. (2015). TBM tunneling in mixed-face ground: Problems and solutions. *International Journal of Mining Science and Technology*.
- IMCYC. (2001, Diciembre 20). *Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto A.C.* Retrieved from <http://imcyc.com/biblioteca/ArchivosPDF>
- ITA. (2017). *INTERNATIONAL TUNNELLING AND UNDERGROUND SPACE ASSOCIATION*. Retrieved from www.ita-aite.org
- Lombardo, A., & Pérez Reyes, J. A. (2013). Excavación de frentes mixtos altamente abrasivos y su relación con los. *Cuarto Congreso Mexicano de Ingeniería de Túneles*

- y Obras Subterráneas; El Espacio Subterráneo, Opción del Futuro* (p. 1). Ciudad de México: AMITOS.
- López, c. J. (2011). *Manual de túneles y obras subterráneas*. Madrid: Gráficas Arias Montano, S.A.
- LUNARDI, P. (2008). *DESIGN AND CONSTRUCTION OF TUNNELS*. Milan: Springer.
- Maidl, B., Herrenknecht, M., Maidl, U., & Wehrmeyer, G. (2012). *Mechanised Shield Tunnelling*. Berlin: Wiley company.
- Maidl, B., Thewes, M., & Maidl, U. (2014). *Handbook of Tunnel Engineering II*. Berlin, Alemania: Ernst & Sohn.
- Maidl, U., & Stascheit, J. (2014). Real time process controlling for EPB shields. *Geomechanics and Tunnelling* 7, 64-71.
- Monsees, J. (1996). *Soft Ground Tunneling, Tunnel Engineering Handbook*. Chapman & Hall, Segunda edición.
- Moreno, P., Ruiz, M., & Gorines, F. (2015). TBM Process Data Management System. *IACSIT International Journal of Engineering and Technology, Vol. 7, No. 5*, 431-437.
- Perez Reyes, J. A. (2013). Instrumentación y control de procesos de excavación a partir de un sistema. *Cuarto Congreso Mexicano de Ingeniería de Túneles y Obras Subterráneas*. Ciudad de México: AMITOS.
- Rahm, T. (2012). Process Simulation of Earth Pressure Balanced Shield Machines. *Process Simulation of Earth Pressure Balanced Shield Machines*. Bochum: Ruhr-Universität Bochum.
- Sanchez, F. (2015). *Ingeniería de Túneles*. Ciudad de México: Reg. # 03-2015-012110003000-1, SEP-INDAUTOR.
- Steingrimsson, J., Grøv, E., & Nilsen, B. (2002). The significance of mixed-face conditions for TBM performance. *World Tunnell*, 435-441.
- Tóth, Á., Gong, Q., & Zhao, J. (2013). Case studies of TBM tunneling performance in rock-soil interface. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 140-150.
- Vallejo, L. I. (2002). *Ingeniería Geológica*. Madrid: Pearson-Prentice Hall.

Vergara, I. M., & Saroglou, H. (2017). Prediction of TBM performance in mixed-face. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 116-124.

Zhao, J. (2010). *TBM Tunnelling in Mixed Ground* (p. 18). Barcelona: EPFL-LMR.

Zhao, J., Gong, Q., & Eisensten, Z. (2007). Tunnelling through a frequently changing and mixed ground:. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 388-400.

ANEXO A. MÉTODO OBSERVACIONAL

Se presenta el método observacional mencionado en este trabajo, extraído del *Eurocódigo 7: Diseño Geotécnico. Parte 1: Reglas generales*. En términos de aplicación, su principal objetivo es restar las incertidumbres del terreno, aplicando la mayor cantidad de recursos disponibles para mantenerlas a niveles aceptables de riesgo.

- 1) Cuando la predicción del comportamiento geotécnico es difícil (condiciones heterogéneas), puede ser apropiado aplicar el enfoque conocido como "el método observacional", en el cual el diseño es revisado durante la construcción.

- 2) Deberán cumplirse los siguientes requisitos antes de que se inicie la construcción:
 - Se establecerán límites aceptables de comportamiento (rangos mínimos y máximo de operación, y condiciones del frente);
 - Se evaluará el rango de comportamientos posibles y se demostrará que existe una probabilidad aceptable de que el comportamiento real estará dentro de los límites aceptables;
 - Se elaborará un plan de control que mostrará si el comportamiento real se encuentra dentro de los límites aceptables. El monitoreo deberá dejar en claro esto y con intervalos suficientemente cortos, para permitir que las acciones de contingencia se emprendan con éxito.
 - El tiempo de respuesta de los instrumentos y los procedimientos para el análisis de los resultados serán suficientemente rápidos en relación con la posible evolución del sistema;
 - Se elaborará un plan de acciones de contingencia, que podrá adoptarse si el seguimiento revela comportamientos fuera de los límites aceptables.

- 3) Durante la construcción, el monitoreo deberá llevarse a cabo según lo planeado.

- 4) Los resultados del monitoreo se evaluarán en las etapas apropiadas y las acciones de contingencia previstas se pondrán en funcionamiento si se exceden los límites de comportamiento.

- 5) El equipo de control se sustituirá o ampliará si no suministra datos confiables de tipo adecuado o en cantidad suficiente.

ANEXO B. PARÁMETROS OPERACIONALES DEL ANILLO

1299 – 1309

Se revisaron los parámetros operacionales (ítems evaluados) de los últimos diez anillos previos al atrapamiento en el anillo No. 1309, se hizo la comparación con los rangos permisibles acordados (parámetros minuta), y se pudo constatar que se encontraban en rangos aceptables (parámetros Data Logger).

TRAMO 4, TBM Robbins - Corregidora, Anillo, 1299			
Parámetros correspondientes a la minuta del 31/10/2016			
Items evaluados	Parámetros minuta	Parámetros Data Logger	Gráficas
Penetración (mm/rev)	5 - 9	Máximo 10.2 Prom. 7.4	
Revoluciones (RPM)	1 - 1.8	1.5	
Velocidad de Avance (mm/min)	5 - 16.2	Máximo 14.6 Prom. 12.3	
Fuerza de Empuje (KN)	20,000 - 40,000	Máx. 22000 Prom. 18900	

Figura B.1 Parámetros operacionales del anillo 1299.

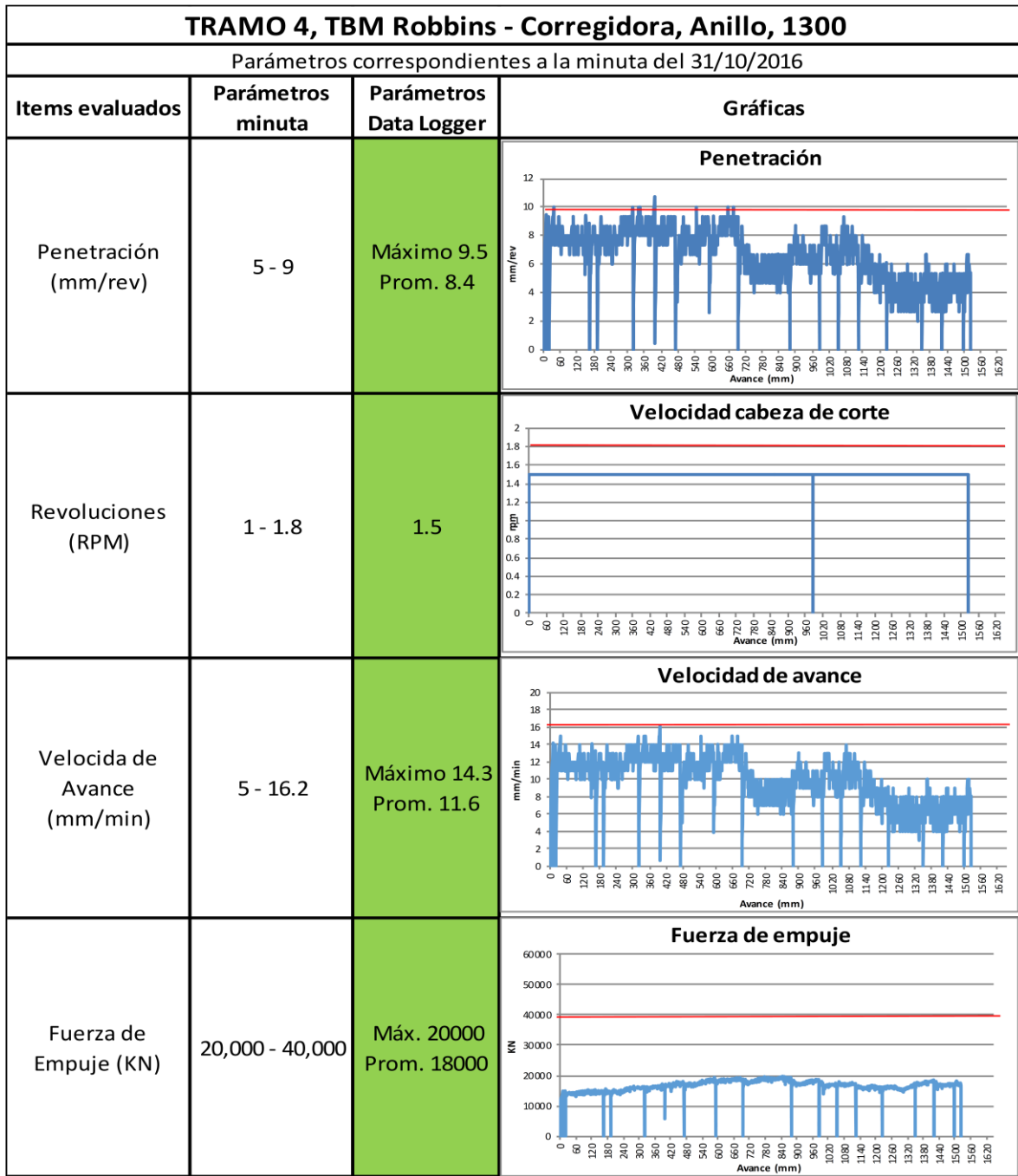


Figura B.2 Parámetros operacionales del anillo 1300.

TRAMO 4, TBM Robbins - Corregidora, Anillo, 1301			
Parámetros correspondientes a la minuta del 31/10/2016			
Items evaluados	Parámetros minuta	Parámetros Data Logger	Gráficas
Penetración (mm/rev)	5 - 9	Máximo 10.1 Prom. 8.1	<p>Penetración</p>
Revoluciones (RPM)	1 - 1.8	1.5	<p>Velocidad cabeza de corte</p>
Velocidad de Avance (mm/min)	5 - 16.2	Máximo 14.6 Prom. 12.3	<p>Velocidad de avance</p>
Fuerza de Empuje (KN)	20,000 - 40,000	Máx. 22000 Prom. 19000	<p>Fuerza de empuje</p>

Figura B.3 Parámetros operacionales del anillo 1301.

TRAMO 4, TBM Robbins - Corregidora, Anillo, 1302			
Parámetros correspondientes a la minuta del 31/10/2016			
Items evaluados	Parámetros minuta	Parámetros Data Logger	Gráficas
Penetración (mm/rev)	5 - 9	Máximo 9.1 Prom. 7.9	
Revoluciones (RPM)	1 - 1.8	1.5	
Velocidad de Avance (mm/min)	5 - 16.2	Máximo 14.2 Prom. 11.9	
Fuerza de Empuje (KN)	20,000 - 40,000	Máx. 19900 Prom. 19500	

Figura B.4 Parámetros operacionales del anillo 1302.

TRAMO 4, TBM Robbins - Corregidora, Anillo, 1303			
Parámetros correspondientes a la minuta del 31/10/2016			
Items evaluados	Parámetros minuta	Parámetros Data Logger	Gráficas
Penetración (mm/rev)	5 - 9	Máximo 7.4 Prom. 5.9	<p>Penetración</p>
Revoluciones (RPM)	1 - 1.8	1.5	<p>Velocidad cabeza de corte</p>
Velocidad de Avance (mm/min)	5 - 16.2	Máximo 11.1 Prom. 9.1	<p>Velocidad de avance</p>
Fuerza de Empuje (KN)	20,000 - 40,000	Máx. 27000 Prom. 22000	<p>Fuerza de empuje</p>

Figura B.5 Parámetros operacionales del anillo 1303.

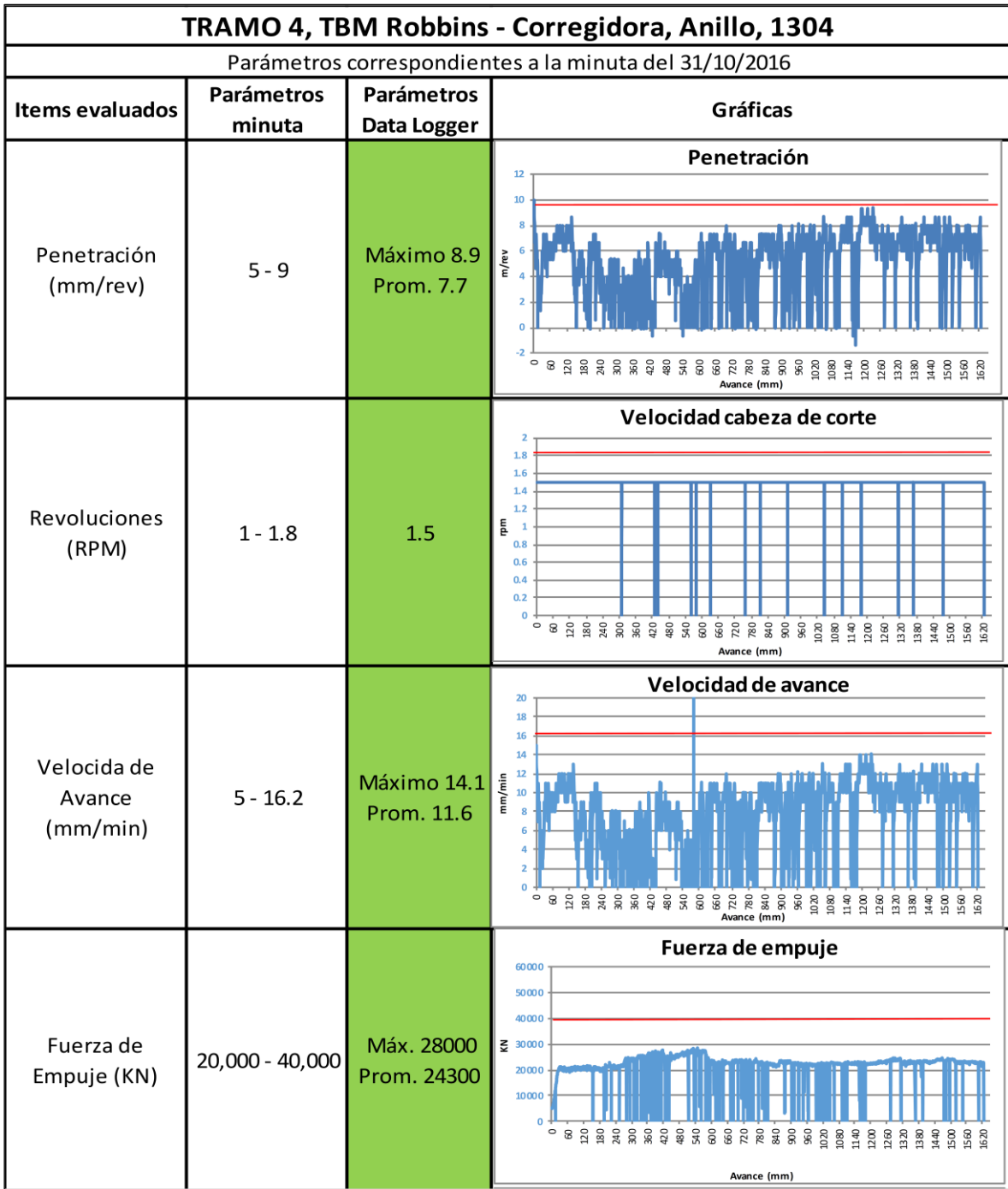


Figura B.6 Parámetros operacionales del anillo 1304.

TRAMO 4, TBM Robbins - Corregidora, Anillo, 1305			
Parámetros correspondientes a la minuta del 31/10/2016			
Items evaluados	Parámetros minuta	Parámetros Data Logger	Gráficas
Penetración (mm/rev)	5 - 9	Máximo 10.1 Prom. 9.5	<p>Penetración</p>
Revoluciones (RPM)	1 - 1.8	1.5	<p>Revoluciones cabeza de corte</p>
Velocidad de Avance (mm/min)	5 - 16.2	Máximo 16.3 Prom. 14.1	<p>Velocidad de avance</p>
Fuerza de Empuje (KN)	20,000 - 40,000	Máx. 24000 Prom. 21800	<p>Fuerza de empuje</p>

Figura B.7 Parámetros operacionales del anillo 1305.

TRAMO 4, TBM Robbins - Corregidora, Anillo, 1306			
Parámetros correspondientes a la minuta del 31/10/2016			
Items evaluados	Parámetros minuta	Parámetros Data Logger	Gráficas
Penetración (mm/rev)	5 - 9	Máximo 10 Prom. 7.9	
Revoluciones (RPM)	1 - 1.8	1.5	
Velocidad de Avance (mm/min)	5 - 16.2	Máximo 14.5 Prom. 11.2	
Fuerza de Empuje (KN)	20,000 - 40,000	Máx. 27000 Prom. 24800	

Figura B.8 Parámetros operacionales del anillo 1306.

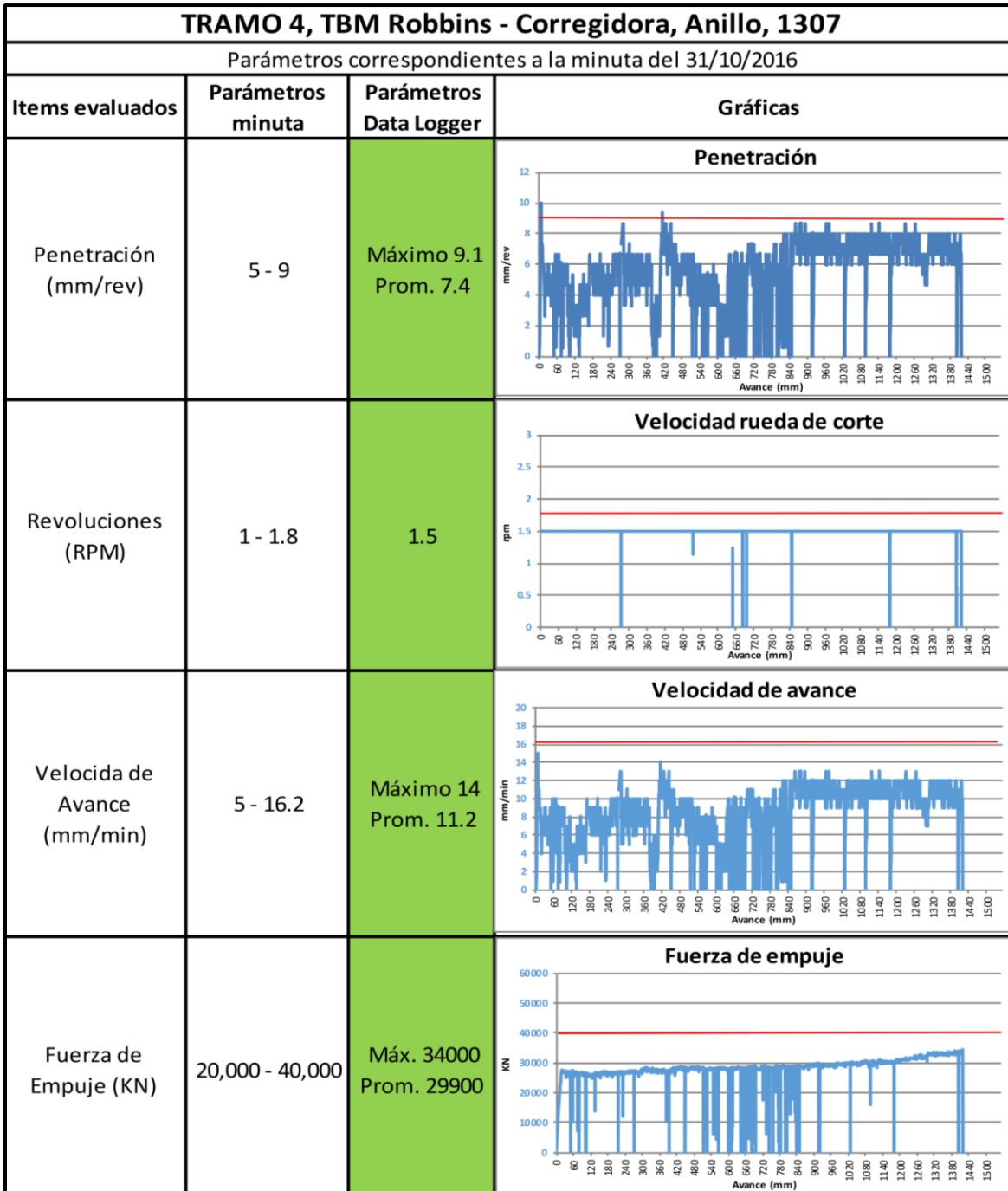


Figura B.9 Parámetros operacionales del anillo 1307.

TRAMO 4, TBM Robbins - Corregidora, Anillo, 1308			
Parámetros correspondientes a la minuta del 31/10/2016			
Items evaluados	Parámetros minuta	Parámetros Data Logger	Gráficas
Penetración (mm/rev)	5 - 9	Máximo 9.3 Prom. 8.1	
Revoluciones (RPM)	1 - 1.8	1.5	
Velocidad de Avance (mm/min)	5 - 16.2	Máximo 14.3 Prom. 11.7	
Fuerza de Empuje (KN)	20,000 - 40,000	Máx. 42000 Prom. 35800	

Figura B.10 Parámetros operacionales del anillo 1308.

TRAMO 4, TBM Robbins - Corregidora, Anillo, 1309			
Parámetros correspondientes a la minuta del 31/10/2016			
Items evaluados	Parámetros minuta	Parámetros Data Logger	Gráficas
Penetración (mm/rev)	5 - 9	Máximo 10.4 Prom. 9.3	
Revoluciones (RPM)	1 - 1.8	1.3	
Velocidad de Avance (mm/min)	5 - 16.2	Máximo 25 Prom. 12.9	
Fuerza de Empuje (KN)	20,000 - 40,000	Máx. 68000 Prom. 52333	

Figura B.11 Parámetros operacionales del anillo 1309.

ANEXO C. COMPORTAMIENTO DEL ALINEAMIENTO DE LA EPB

Para la revisión del alineamiento se empleó un sistema de guiado PPS-TBM, el cual está diseñado para proporcionar la máxima información posicional al operador de una TBM, de manera rápida y precisa. El sistema determina automáticamente la posición y dirección exactas de la TBM en 3 dimensiones. Y como característica principal, proporciona toda la información necesaria sobre la desviación de la máquina respecto a la línea de diseño o eje de proyecto.

A continuación, se presentan las pantallas de PPS del anillo 1299 hasta el 1309, en las cuales se observa que el alineamiento vertical y horizontal se encuentra dentro de los rangos normales de operación.

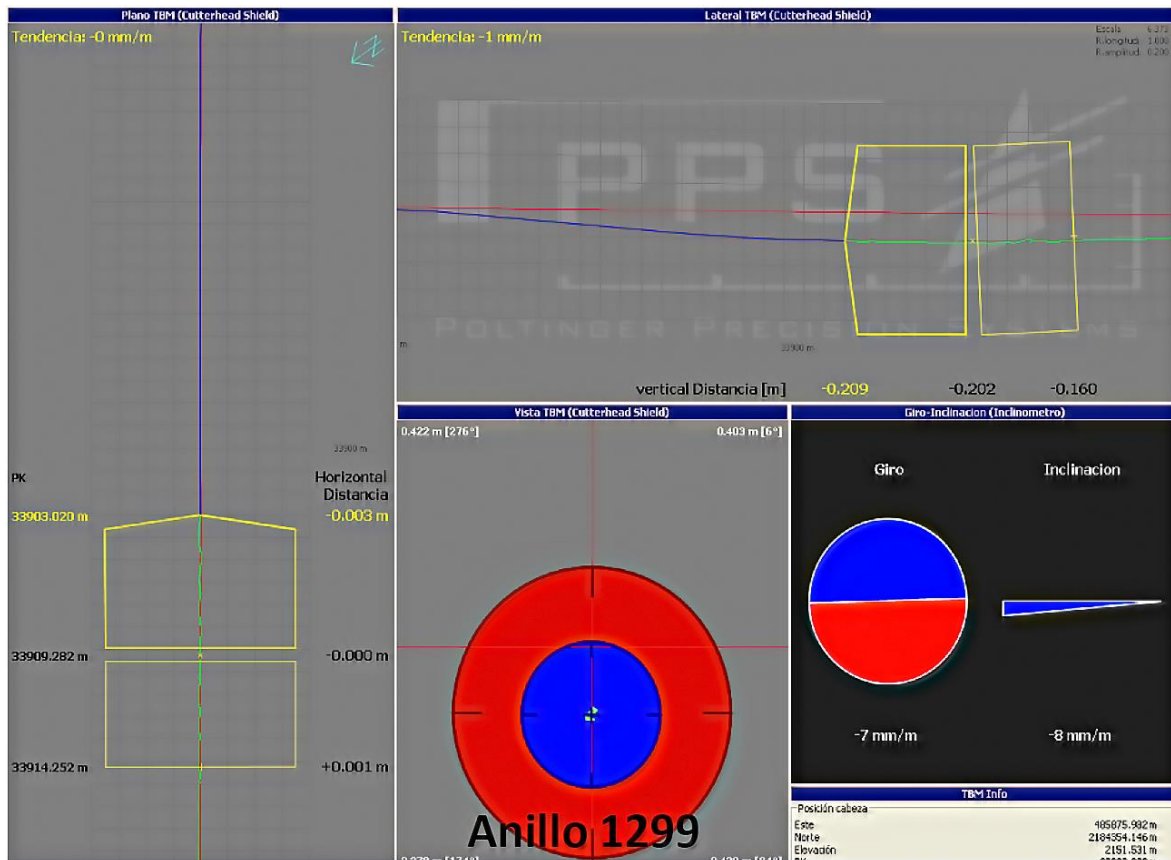


Figura C.1 Alineamiento horizontal y vertical del anillo 1299.

CONTROL DE PROCESOS PARA LA EXCAVACIÓN DE TÚNELES EN FRENTE MIXTO CON TBM DE TIPO EPB

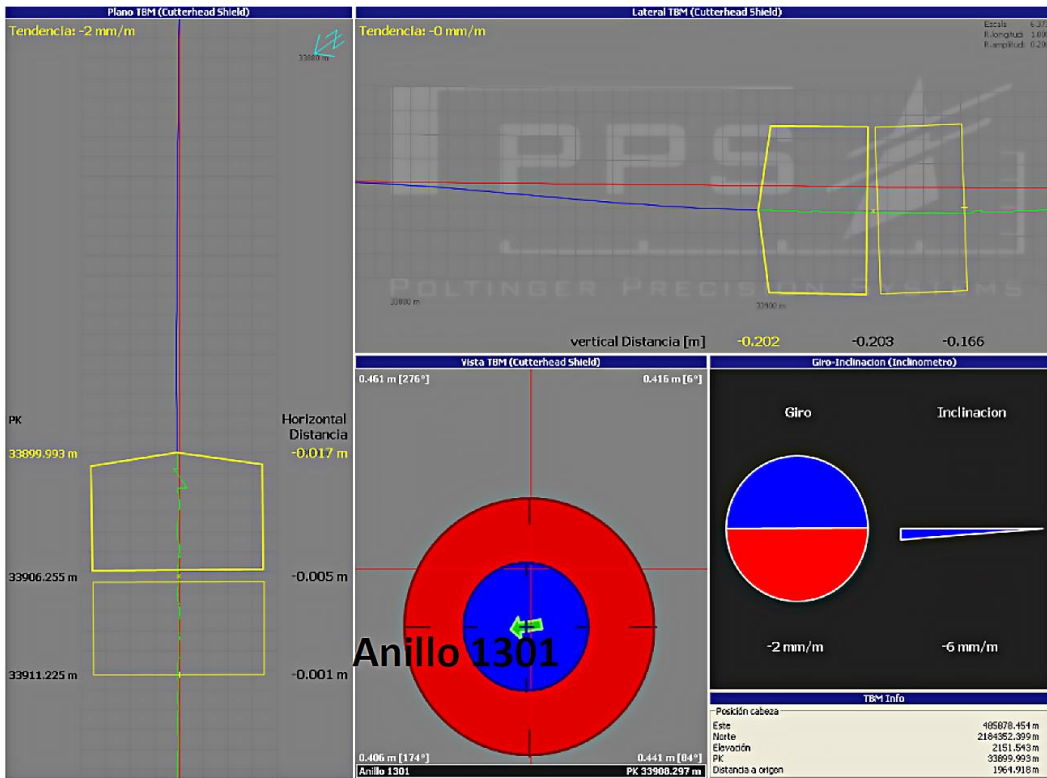
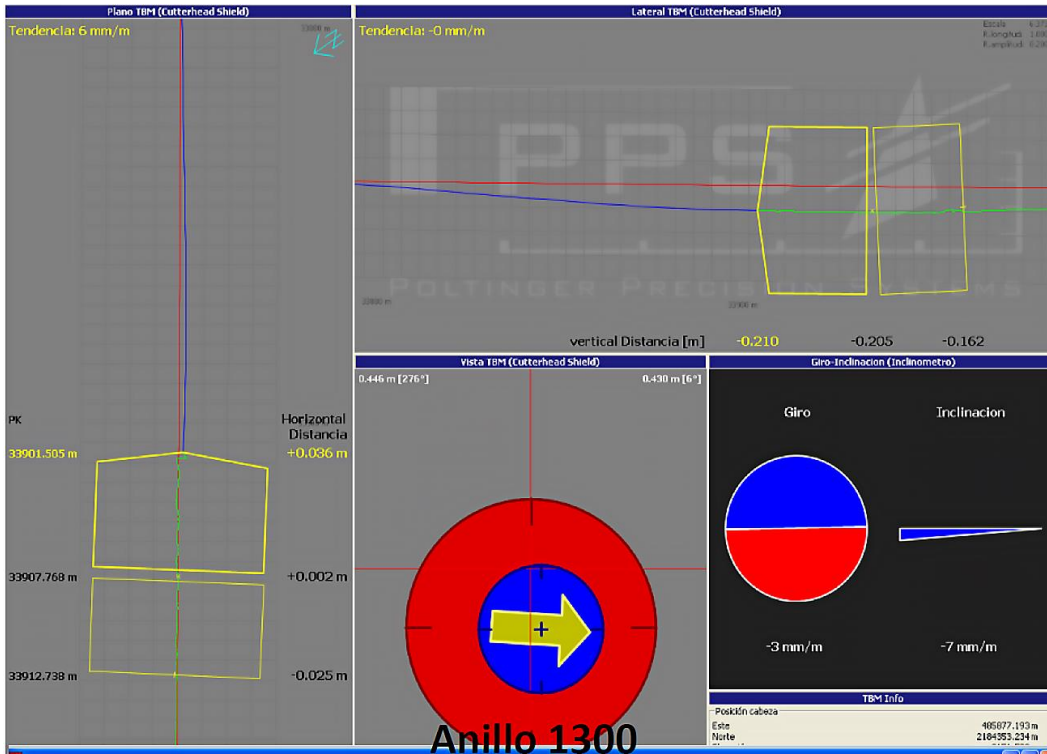


Figura C.2 Alineamiento horizontal y vertical de los anillos 1300 y 130

CONTROL DE PROCESOS PARA LA EXCAVACIÓN DE TÚNELES EN FRENTE MIXTO CON TBM DE TIPO EPB

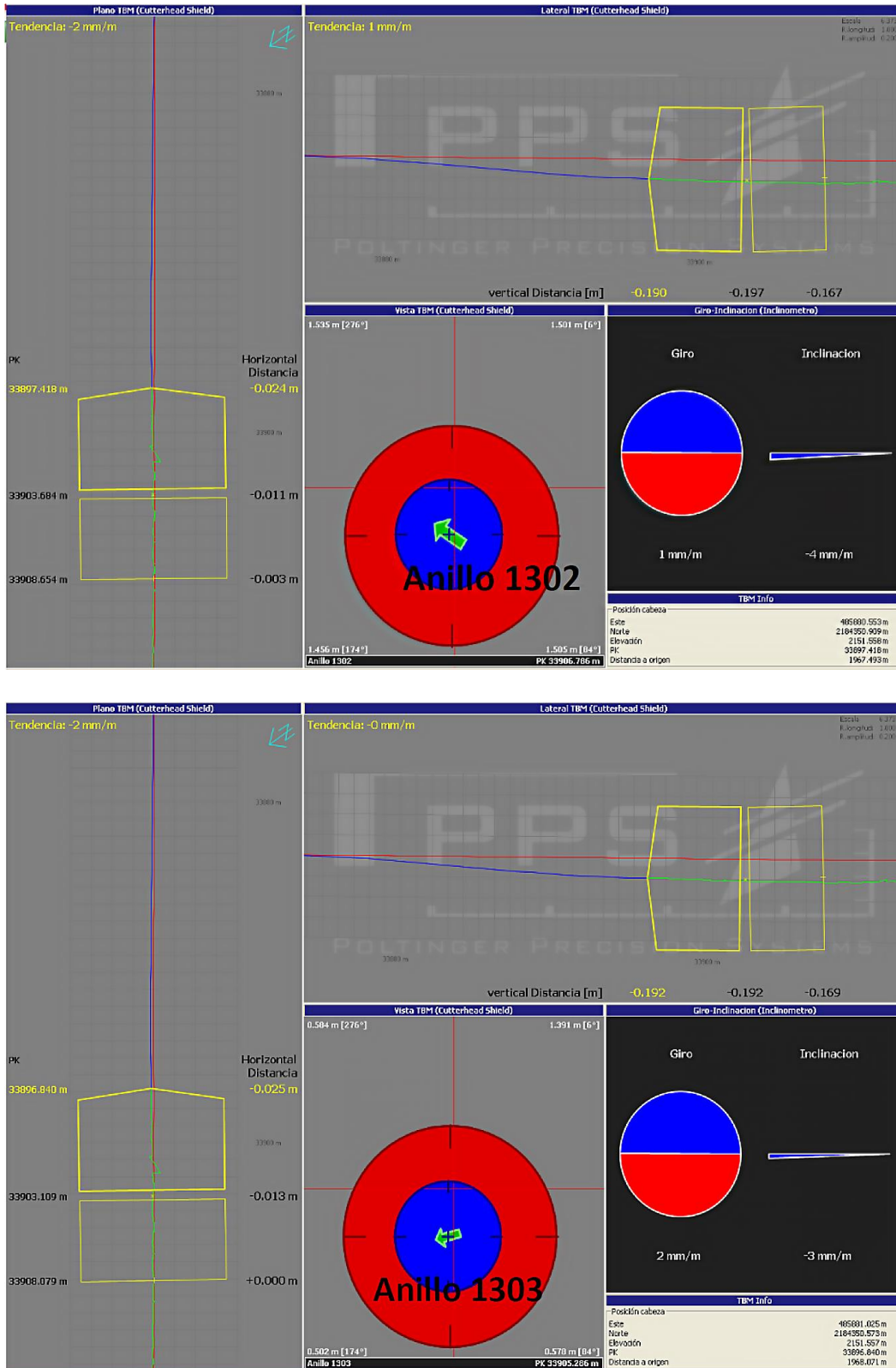


Figura C.3 Alineamiento horizontal y vertical de los anillos 1302 y 1303.

CONTROL DE PROCESOS PARA LA EXCAVACIÓN DE TÚNELES EN FRENTE MIXTO CON TBM DE TIPO EPB

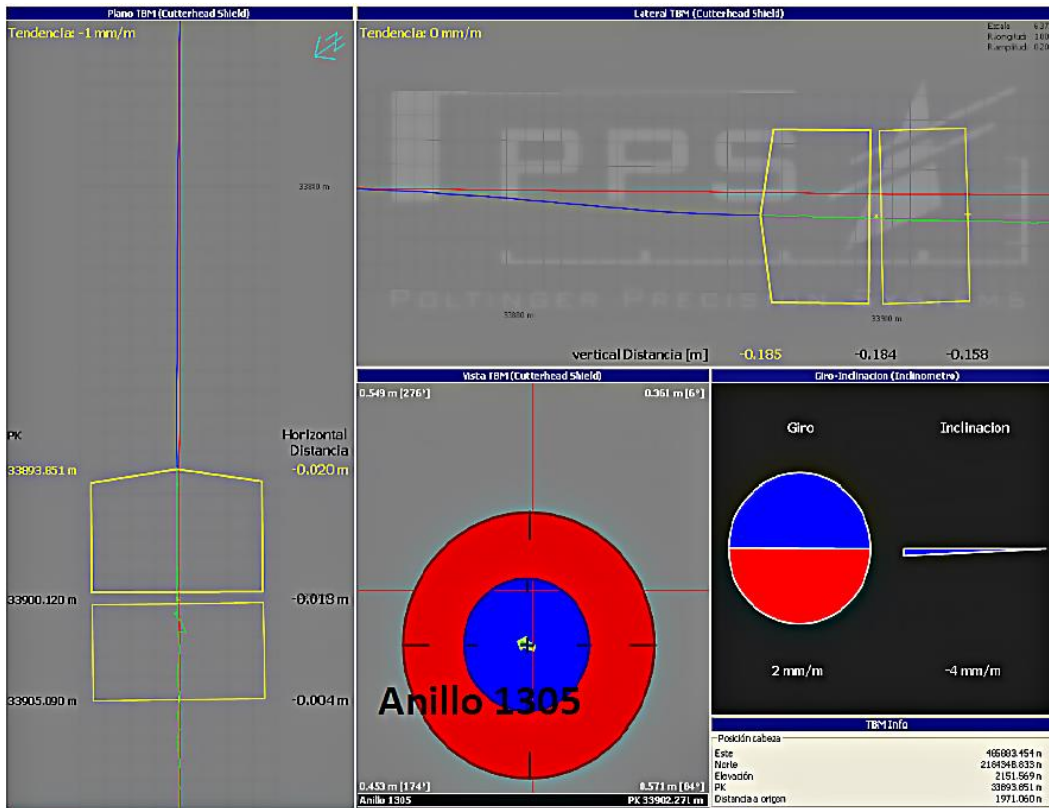
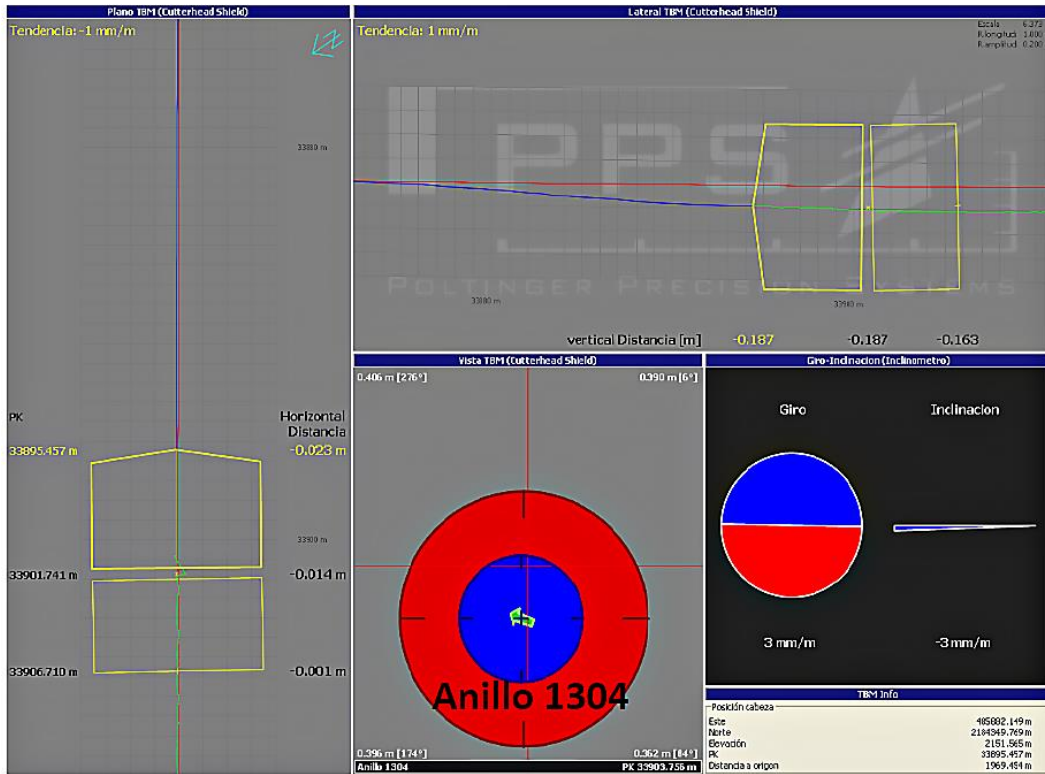


Figura C.4 Alineamiento horizontal y vertical de los anillos 1304 y 1305.

CONTROL DE PROCESOS PARA LA EXCAVACIÓN DE TÚNELES EN FRENTE MIXTO CON TBM DE TIPO EPB

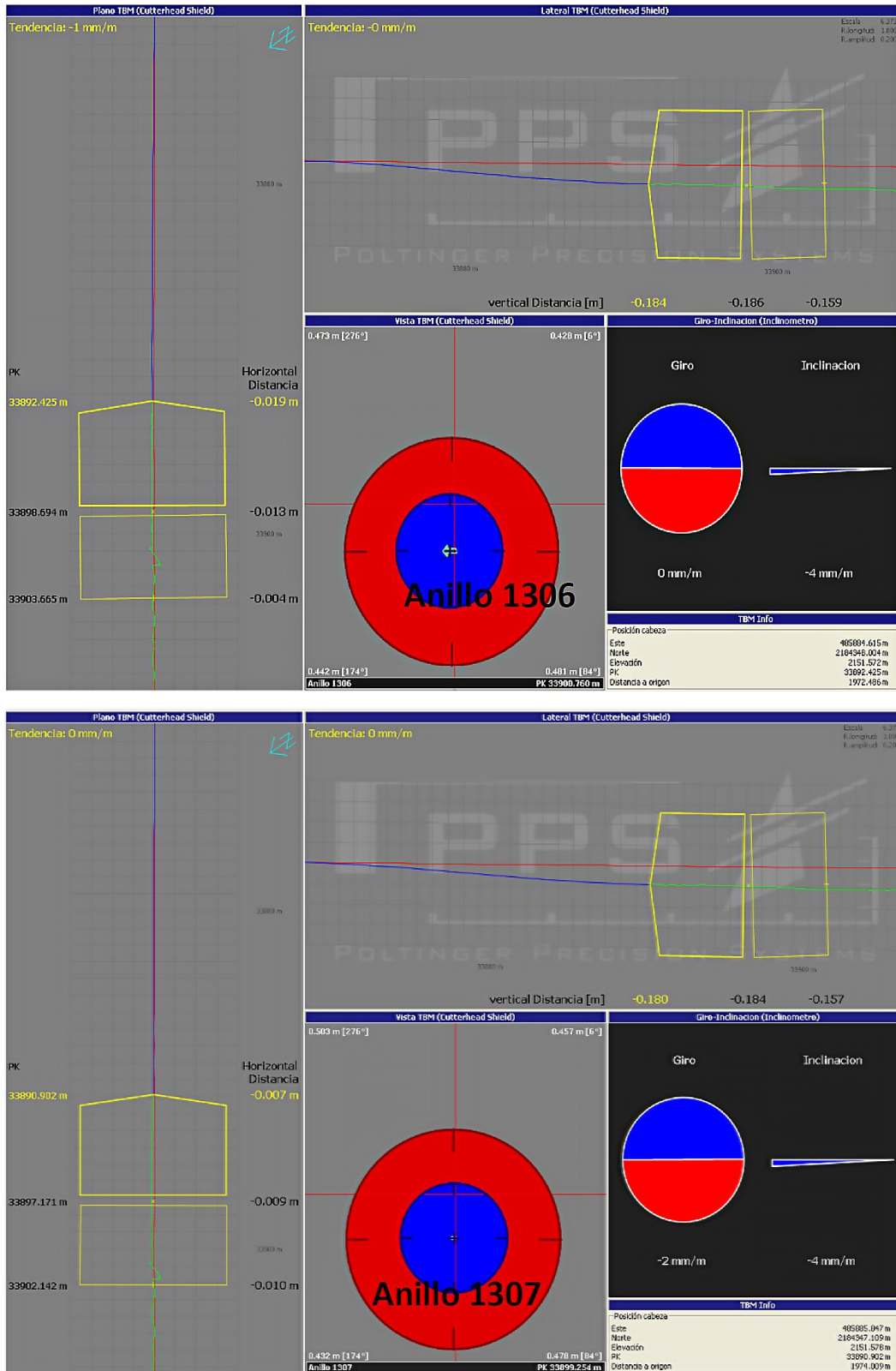


Figura C.5 Alineamiento horizontal y vertical de los anillos 1306 y 1307.

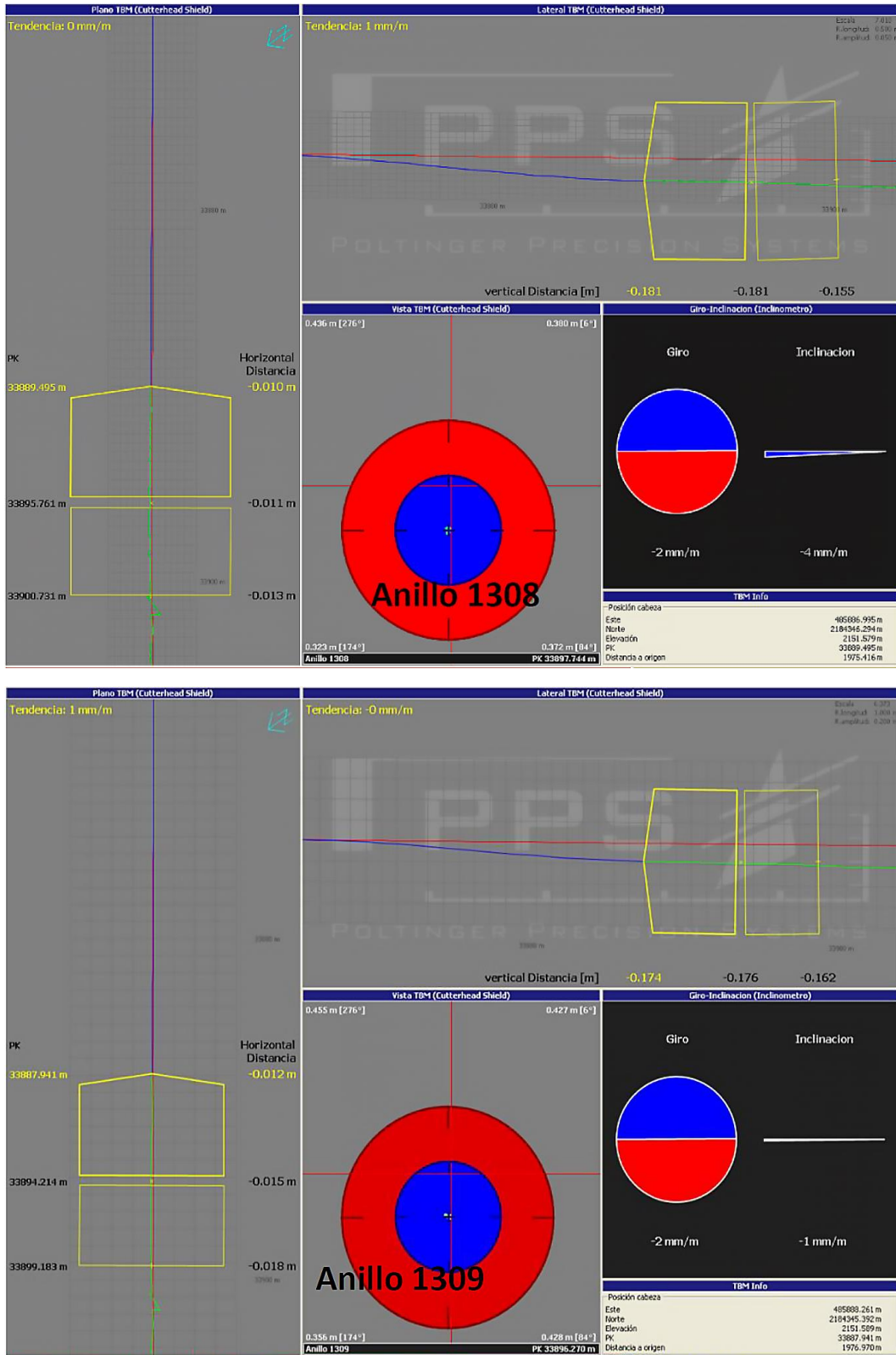


Figura C.6 Alineamiento horizontal y vertical de los anillos 1308 y 1309.