



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**“Proceso de excavación durante la
construcción del Túnel Emisor Oriente en
su Tramo 3, de la Ciudad de México.”**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero Civil

P R E S E N T A

Luis Bernardo López Cárdenas

DIRECTOR DE TESIS

Ing. Marcos Trejo Hernández



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

ÍNDICE	Pág.
INTRODUCCIÓN	5
I. ANTECEDENTES	8
I.1 La cuenca del valle de México.	8
I.2 Historia del drenaje del Valle de México.	10
I.3 Problemática actual.	13
II. PROYECTO EJECUTIVO TÚNEL EMISOR ORIENTE.....	14
II.1 Localización.....	14
II.2 Trazo.	16
II.3 Tramos.	17
II.4 Proyecto.....	21
II.4.1 Construcción de lumbreras.	23
II.4.2 Construcción del Túnel.	29
II.4.3 Máquina excavadora (TBM).....	30
II.4.4 Revestimiento primario del túnel.....	31
II.4.5 Revestimiento definitivo del túnel.....	34
III. PROCESO CONSTRUCTIVO DEL TRAMO 3.....	37
III.1 Lumbreras.....	37
III.1.1 Lumbrera L10.....	41
III.1.2 Lumbrera L11.....	44
III.1.3 Lumbrera L12.....	47
III.1.4 Lumbrera L13.....	50
III.1.5 Procedimiento constructivo de las lumbreras.	54
III.2 Galerías de montaje.	75
III.2.1 Geometría de la Galería	76
III.2.2 procedimiento de construcción.	77
III.3 Ensamble de Máquina tuneladora.	88
III.3.1 Adecuaciones previas en fondo de lumbrera.	90
III.3.2 Ensamble de el “ESCUDO”.	94
III.3.3 Ensamble del “Puente principal”.	100
III.4 Preliminares al proceso de excavación.	102

III.4.1 Estructura de reacción y anillo metálico.....	102
III.4.2 Bachas para extracción de rezaga.....	104
III.4.3 Instalación de Gantry's o back up.	105
III.5 Proceso de excavación.	108
III.5.1 Funcionamiento del EPB.	108
III.5.2 Rueda de corte.	109
III.5.3 Sistema de guiado y articulación.	110
III.5.4 Erector.	114
III.5.5 Faldón.....	114
III.6 Revestimiento definitivo.....	115
III.6.1 Cimbra metálica.	115
III.6.2 Acero de refuerzo.	118
III.6.3 Concreto.	121
III.6.4 Actividades complementarias.	125
IV. PROCESO DE EXCAVACIÓN DEL TRAMO 3.....	127
IV.1 Descripción de las actividades realizadas durante el proceso de excavación.....	127
IV.1.1 Ciclo de excavación.....	127
IV.1.2 Ciclo de suministro y colocación de anillos.	143
IV.1.3 Ciclo de suministro e inyección de mortero.	154
VI.1.4 Inyeccion de grasa (Cepillos).	159
IV.1.5 Sistema de enfriamiento (Agua fría, caliente y residual)	161
VI.1.6 Sistema de ventilación.....	165
IV.1.7 Energía eléctrica.....	167
IV.2 Rendimiento de excavación en diferentes tipos de suelo.	169
IV.2.1 Subtramo L10-L11.....	169
IV.2.2 Subtramo L11-L12.....	191
IV.2.3 Subtramo L12-L13.....	207
IV.2.4 Rendimientos generales por tipo de material.	213
IV.3 Trabajos complementarios durante el proceso de excavación.....	214
IV.3.1 Intervención atmosférica.	214
IV.3.2 Intervención hiperbárica.	229

IV.3.3. Ciclo de trabajo de la intervención hiperbárica realizada en el tramo 3 del TEO.....	240
IV.3.4 Paso por lumbrera.....	248
IV.4 Principales incidencias durante el proceso de excavación.....	266
IV.4.1 Incidencias por operación (Tornillo sin fin).....	267
IV.4.2 Incidencias por operación (Rueda de corte).....	276
IV.4.3 Incidencias por funcionamiento (Cambio de cepillos).....	289
IV.4.4 Incidencias de menor impacto.....	301
IV.5. Análisis costo producción.....	307
IV.5.1 Costo directo por materiales.....	307
IV.5.2 Costo directo por mano de obra.....	312
IV.5.3 Costo por maquinaria y equipo.....	315
IV.5.4 Costo por auxiliares.....	316
IV.5.5 Matriz de costo directo por metro de excavación en base a rendimientos efectivos obtenidos para cada tipo de frente.....	317
IV.6 Control de calidad y supervisión.....	321
IV.6.1 Calidad del anillo.....	321
IV.6.2 Calidad del mortero.....	327
IV.6.2 Supervisión y calidad en Túnel.....	333
V. Conclusiones.....	338
Bibliografía:.....	340
Páginas Web.....	340
Lista de Figuras y sus referencias.....	340

OBJETIVO

Conocer y establecer las principales características del proceso de excavación que se desarrollan durante la construcción del Túnel Emisor Oriente, específicamente en su tramo 3.

INTRODUCCIÓN

El Túnel de drenaje Emisor Oriente (TEO) se encuentra al Nororiente de la ciudad de México, pasa a través de los estados de México e Hidalgo; esta obra de drenaje está constituida principalmente por 62 kilómetros de túnel, además de la lumbrera "L0" denominada así debido a que es en donde inicia el trazo y que es la lumbrera L2 del Túnel Interceptor Río de los Remedios, cuenta con 24 lumbreras que van desde una profundidad de 32 metros hasta los 149 metros y un portal de salida en donde se ubica una planta de tratamiento de aguas residuales.

La construcción del túnel se realiza con máquinas tuneladoras denominadas "TBM" por sus siglas en inglés, que son tecnología de una nueva generación que ofrecen un sistema automatizado de construcción de túneles.

Una de sus principales características es que durante la construcción se van instalando piezas de concreto armado en forma de arcos, conocidas como dovelas y que conforman un revestimiento primario del túnel para dar paso a un revestimiento definitivo a base de concreto reforzado y colocado en sitio.

El tramo 3 comprende desde la lumbrera L10 hasta la lumbrera L13, es decir; cuatro lumbreras que están distantes entre sí aproximadamente 2.5 kilómetros en promedio, se pueden dividir en dos tipos; las lumbreras de montaje y/o extracción del equipo excavador TBM con un diámetro interior terminado de 16 metros, como es el caso de la lumbrera L10 y L13, y las lumbreras de paso con un diámetro interior terminado de 12.00 metros, como en el caso de las lumbreras L11 y L12.

Las lumbreras de montaje y/o extracción, tienen como objetivo la instalación del equipo excavador (TBM) en el fondo lumbrera, así como los trabajos complementarios para el inicio de excavación, como es el caso de la colocación de la estructura de reacción, la instalación del sistema de banda vertical para la extracción del material producto de excavación (rezaga), la instalación de las tuberías para el suministro y extracción del agua hacia la TBM, el ducto de ventilación y el suministro de las dovelas hacia el frente de excavación.

Las lumbreras de paso tienen como objetivo principal realizar los trabajos de mantenimiento que el equipo excavador (TBM) necesita y que son imposibles de realizar durante el proceso de excavación.

El TEO es un túnel de conducción de aguas negras y pluviales, procedentes del Distrito Federal y su zona conurbada, convirtiéndose en un sistema de desagüe alternativo al Emisor Central (actual drenaje profundo) como se muestra en la **Figura 1**, permitiendo incrementar la capacidad de drenaje del profundo del Valle de México, evitando así el posible riesgo de inundación de la Ciudad y su zona conurbada.

El TEO tiene un diámetro terminado de 7.0 metros y su pendiente es; desde la lumbrera L0 a la lumbrera L6 de 0.19% y desde la lumbrera L6 al portal de salida de 0.16%, por él se podrá desalojar hasta 150 metros cúbicos por segundo de agua, duplicando de esta manera la capacidad actual del drenaje.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

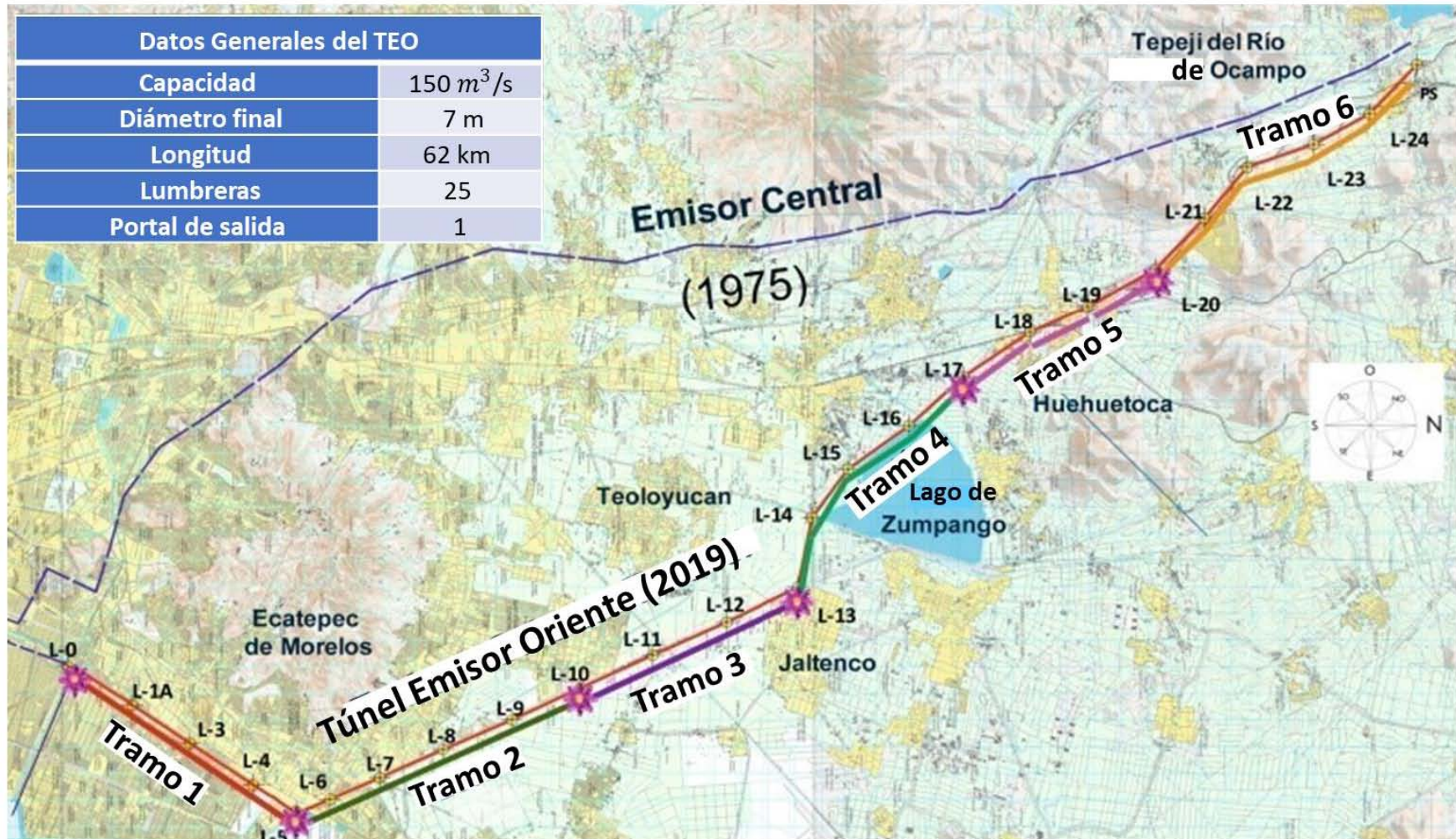


Figura 1. El TEO como sistema de drenaje alternativo al Emisor Central.

I. ANTECEDENTES

I.1 La cuenca del valle de México.

La cuenca del Valle de México es una altiplanicie rodeada de montañas volcánicas, se localiza en la parte centro-oriente de la Faja Volcánica Transmexicana entre los meridianos 98°15'–99°30' y los paralelos 19°00'–20°15', mide en dirección norte sur unos 90 kilómetros y en la dirección este oeste la parte norte casi con 100 kilómetros, mientras que en la sur alcanza 50 kilómetros, su área es aproximadamente 9600 kilómetros cuadrados. La elevación de sus planicies es de 2240 metros sobre el nivel del mar en la parte sur y 2390 metros sobre el nivel del mar en la parte norte, se formó al cerrarse el antiguo Valle de México, como el resultado de una intensidad actividad volcánica, la cual dio origen a la sierra Chichinautzin, estructura formada por rocas andesítico basálticas.

A la llegada de los españoles, el Valle de México estaba ocupada por una región lacustre, cuyo recipiente mayor era el lago de Texcoco, ubicado en la parte central y más baja, al norte y en más altos niveles estaban los lagos de Xaltocan y Zumpango, por el sur y separados por el dique de Mexicaltzingo estaba el lago de Xochimilco, y éste a su vez separado del de Chalco por el dique de Cuitláhuac, como se aprecia en la **Figura 2**. En época de lluvias, estos lagos se convertían en uno solo de dos mil kilómetros cuadrados de superficie. Esta condición explica las periódicas inundaciones que desde la fundación de Tenochtitlan han enfrentado sus habitantes, así como la necesidad de construir importantes obras de drenaje para el control y desalojo de las aguas residuales y pluviales del valle.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO



Figura 2. Los 5 lagos de la Cuenca del Valle de México durante la conquista.

I.2 Historia del drenaje del Valle de México.

Desde la fundación de Tenochtitlán, en el año de 1325, existió el problema de procurar agua para la subsistencia y de realizar obras de protección contra las inundaciones en el Valle de México. Con forme crecía la ciudad, los problemas de agua que tenían los Aztecas se agudizaban por haberse establecido en una isla dentro del lago, el cual era el punto final del agua pluvial dentro de una cuenca cerrada, modelada por el vulcanismo, y a una altitud de 2240 metros sobre el nivel del mar.

El genio de Nezahualcóyotl resolvió los problemas de abastecimiento de agua y defensa contra las inundaciones de su época, mandando a construir un albarradón de 16 kilómetros de longitud con el que se separaban las aguas saladas y se aislaba la acumulación de volúmenes escurridos para proteger la isla.

Al conquistar la ciudad, Hernán Cortes rompió el albarradón para el paso de sus bergantines y después del periodo de sequía por el que pasó, se olvidó del peligro y por ende de la reparación de esta obra. Pero la abundancia de la lluvia de la época que siguió hizo necesaria la construcción del albarradón de San Lázaro, luego de las inundaciones consiguientes al sobrepasar el lago sus límites normales.

Se continuaron construyendo calzadas, diques y rellenos, con el objetivo de evitar las inundaciones. Enrico Martínez logró sacar de la cuenca a las aguas del río Cuautitlán con un socavón de 10.5 metros cúbicos de sección, y 7.0 kilómetros de longitud aproximada, en el año de 1630 se ordena al fin que el desagüe se haga en tajo, para sustituir el socavón por una excavación abierta.

El desagüe de la ciudad se hacía por las acequias y los canales que llevaban las aguas al lago de Texcoco. Por orden de los virreyes, se construyeron presas, diques y calzadas para confinar los prejuicios que la abundancia de lluvias causaba a una ciudad que con el tiempo se seguía extendiendo.

Después de las obras del Socavón y más tarde del tajo de Nochistongo; construido en el año de 1607, no se hizo nada radical para defender a la ciudad de México de las inundaciones, hasta que se iniciaron los trabajos del túnel de Tequixquiac y del Gran Canal del desagüe, en 1856. Estas obras sufrieron una serie de interrupciones durante su ejecución hasta concluirse en marzo de 1900.

Además del tajo de Nochistongo y del túnel (viejo) de Tequixquiac, el valle cuenta con otro túnel nuevo de Tequixquiac, que fue construido entre el año de 1940 y 1952.

Conforme fue creciendo la población y la ciudad se fue extendiendo, fue necesario continuar con la construcción de obras de drenaje, dando como resultado que en 1962 se inaugurara el Túnel Emisor Poniente, el cual conducía un caudal de 25

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

metros cúbicos por segundo a través de túneles de 15 kilómetros de longitud y de un canal revestido a cielo abierto.

Entre 1963 y 1964 el interceptor se amplió a 32.3 kilómetros y aumentó su capacidad a 80 metros cúbicos por segundo.

Sin embargo, en el año de 1967 se comenzó la construcción del Drenaje Profundo integrado actualmente por un Emisor Central y nueve Interceptores, con una longitud total de 153.3 kilómetros. Fue en 1975 cuando concluyó la obra del Emisor Central, componente principal del actual drenaje profundo. El Emisor Central tiene una longitud de 50 kilómetros y 6.5 metros de diámetro. Su trazo inicia en Cuauhtepac, en la delegación Gustavo A. Madero y concluye en el Valle del Mezquital, en el estado de Hidalgo.

El interceptor oriente, con una longitud de 10 kilómetros, se construyó para aliviar al Gran Canal, y el interceptor central de 8 kilómetros de largo aliviaría la parte central y norte de la ciudad como se muestra en la **Figura 3**.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

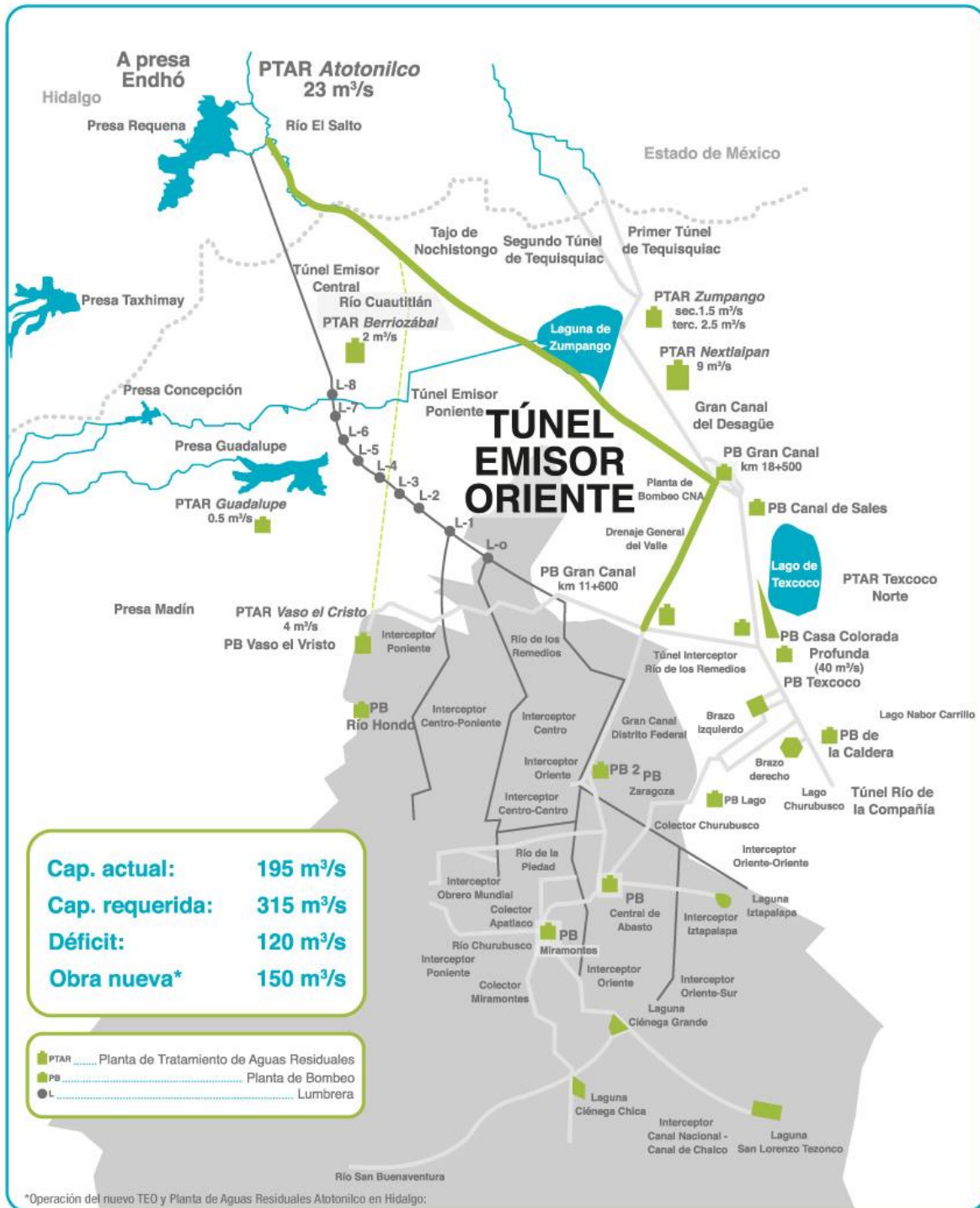


Figura 3. Sistema principal de drenaje de la Ciudad de México.

I.3 Problemática actual.

La infraestructura desarrollada para el desalojo de agua residual y agua pluvial, en la actualidad es insuficiente, la modernización y ampliación de esta representa el reto de recuperar el equilibrio hidrológico de la Cuenca y contribuir, de manera decisiva, a la viabilidad de la Zona Metropolitana en el mediano y largo plazo, ya que ante condiciones de precipitaciones extraordinarias y mantenimiento, el riesgo de inundaciones severas en el Valle de México es inminente, una catástrofe de grandes magnitudes resultaría inevitable si no se llevan a cabo acciones oportunas y las obras necesarias para mitigar ese riesgo.

Actualmente, el Emisor Central es prácticamente el único conducto por el que pueden salir las aguas del Valle de México, ya que el histórico Gran Canal del Desagüe, anteriormente responsable de tal tarea, ha perdido pendiente hidráulica por causa del hundimiento regional que aqueja a la Ciudad de México y con ello buena parte de su capacidad de desalojo.

La gran concentración de población en el Valle de México ha ido aparejada al progreso y al desarrollo del país, alcanzando una magnitud difícilmente previsible en épocas pasadas. Así, cuando se proyectaron y construyeron las obras de desagüe y de abastecimiento de agua potable para la ciudad, a fines del siglo pasado y a principios del presente, no se imaginaba el enorme crecimiento poblacional que posteriormente iba a manifestarse en la región. De estas obras, que se proyectaron para una población de quinientos mil habitantes, actualmente subsisten en uso algunas de las más importantes, que sirven a más de diez millones, población que se duplicará en los años próximos.

Debido a la extracción de agua del subsuelo y a los hundimientos consiguientes, que han disminuido sin llegar a desaparecer, fue necesario efectuar obras constantes de rectificación, de reconstrucción de atarjeas y colectores, y de mantenimiento de los cárcamos de las plantas de bombeo al Gran Canal. La capacidad con se construyó este fue de 5.0 metros cúbicos por segundo en los primeros 20 kilómetros y de 17.5 metros cúbicos por segundo en los restantes para el control del lago; como a últimas fechas estuvo trabajando con gastos máximos hasta de 150 metros cúbicos por segundo, ha sido necesario efectuar numerosas y costosas obras provisionales, que no podrían considerarse como definitivas para la seguridad de la ciudad, debido a la naturaleza del terreno y del crecimiento urbano. La construcción del Túnel Emisor Oriente como drenaje alternativo al Emisor Central, además de ampliar la capacidad de desagüe del Valle de México, será una obra que ayudará a realizar trabajos de mantenimiento necesarios en el actual drenaje profundo.

II. PROYECTO EJECUTIVO TÚNEL EMISOR ORIENTE

II.1 Localización.

El Túnel Emisor Oriente inicia en la intersección de las Avenidas Gran Canal y Río de los Remedios de la Delegación Gustavo A. Madero en la Ciudad de México; corre paralelo a la margen izquierda del Gran Canal con dirección Norte-Oriente aproximadamente unos 10 kilómetros; cambia su dirección hacia el Norte-Poniente, por la margen derecha del Gran Canal, y cruza los municipios de Ecatepec, Coacalco, Tonanitla, Nextlalpan y Tultepec, a lo largo de aproximadamente otros 20 kilómetros. 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 kilómetros más; después sigue por la margen derecha del Tajo de Nochistongo, atraviesa el municipio de Tepeji del Río de Ocampo, y finaliza en el Portal de Salida en el Ejido de Conejos, en el Estado de Hidalgo, como así lo indica la **Figura 4**.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO



Figura 4. Localización del Túnel Emisor Oriente.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

II.2 Trazo.

En su primer tramo, el trazo del Túnel Emisor Oriente corresponde al trazo del Gran Canal del Desagüe, siendo el punto de inicio la lumbrera L2 de Túnel Interceptor Río de Los Remedios la cual fue denominada lumbrera L0 del Túnel Emisor Oriente.

El trazo del túnel se mantiene paralelo y dentro del derecho de vía del Gran Canal del Desagüe, en una longitud aproximada de 31 kilómetros, hasta las proximidades con la laguna de Zumpango. Posteriormente, el trazo continúa hacia el norte-poniente en la laguna de Zumpango, para posteriormente avanzar hacia el norte y descargar en la misma zona en donde desemboca el Emisor Central como se observa en la **Figura 5**.

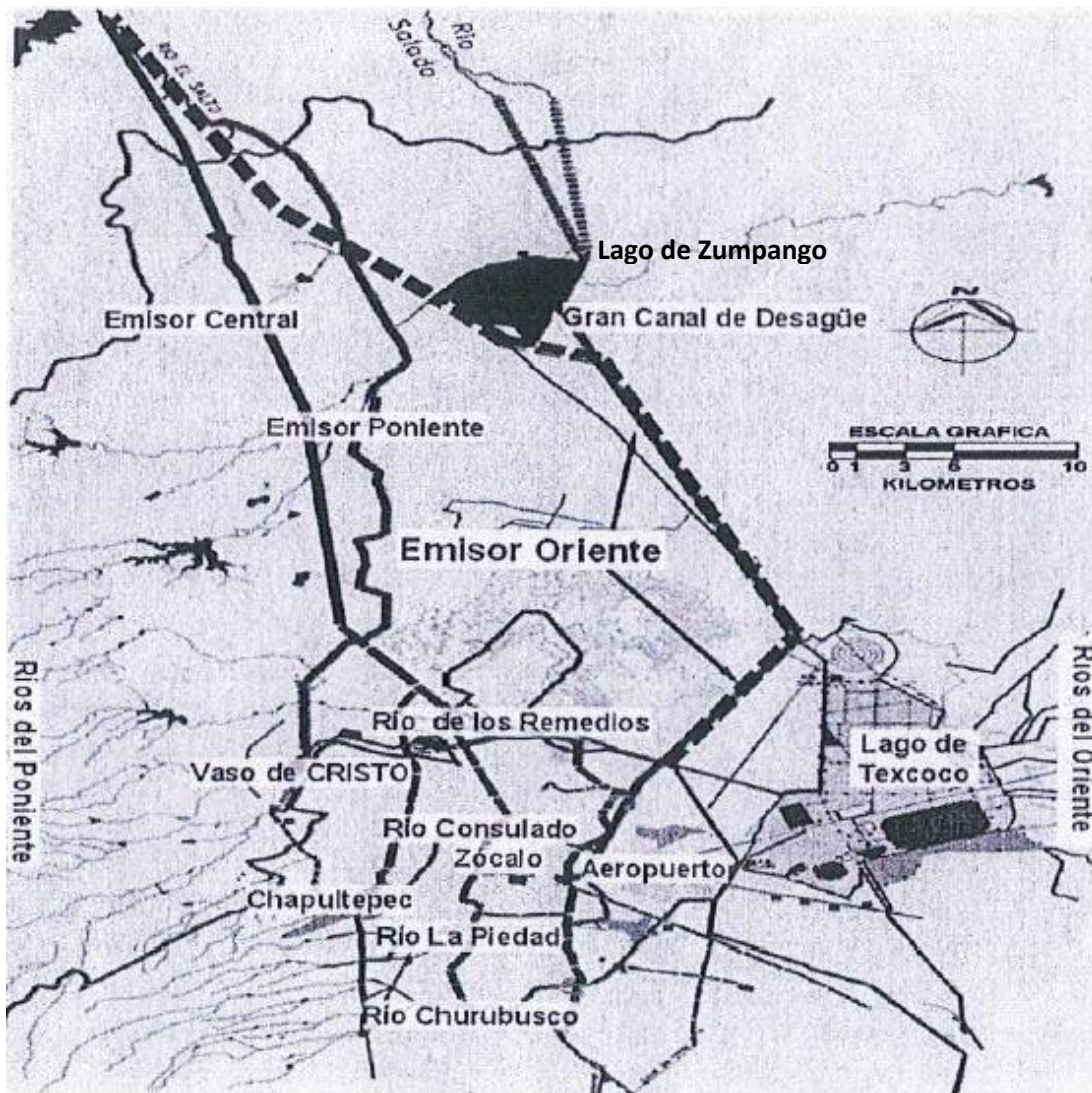


Figura 5. Trazo del Túnel Emisor Oriente.

II.3 Tramos.

Para la construcción de los 62 kilómetros que comprende el Túnel Emisor Oriente, se dividió el proyecto en 6 tramos como se observa en la **Figura 6**, los cuales tienen una longitud en promedio de 10 kilómetros cada uno, además de la adquisición de seis tuneladoras o escudos excavadores; máquinas que tienen la capacidad de excavar un túnel de forma continua, una para cada tramo, propiedad de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Tres máquinas excavadoras fueron fabricadas por la empresa alemana Herrenknecht, y el resto por la compañía norteamericana Robbins, todas diseñadas de acuerdo al perfil geológico mostrado en la **Figura 7**.

El diámetro de excavación de las tuneladoras alemanas es de 8.7 metros, mientras que la de los equipos norteamericanos miden 8.93 metros; estas máquinas excavadoras, tienen un peso total de 600 toneladas y una longitud máxima de 92 metros.

Tramo 1. Inicia justo en donde se encuentra la lumbrera dos del túnel interceptor Río de los Remedios, a la cual se le denominó lumbrera L0 del TEO y finaliza en la lumbrera L5, se localiza en Avenida Periférico y Gran Canal de la Delegación Gustavo A. Madero en el Ciudad de México, esta lumbrera es de 16 metros de diámetro y a través de ella se bajó y ensambló el primer equipo excavador de balance de presiones EPB de la marca HK (HERRENKNECHT), equipo que fue asignado para excavación en suelo blando (principalmente arcillas); este tramo tiene una longitud aproximada de 10.1 kilómetros y cuenta con 4 lumbreras de paso, la lumbrera L1, L2, L3 y L4; de un diámetro de 12 metros y la lumbrera de montaje L0 de 16 metros.

Tramo 2. Inicia en la lumbrera L5 del TEO y finaliza en la lumbrera L10, se localiza en la intersección del Gran Canal, Dren General del Valle y Av. Carlos Hank González, en el municipio de Ecatepec de Morelos, el equipo utilizado para este tramo es del tipo EPB de la marca HK; equipo que fue asignado para excavación en suelo blando (arcillas y arenas), tiene una longitud aproximada de 11.517 kilómetros y cuenta con 5 lumbreras, las lumbreras de paso L6, L7, L8 y L9; de un diámetro de 12 metros y la lumbrera de montaje L5 de 16 metros.

Tramo 3. Inicia en la lumbrera L10 y finaliza en la lumbrera L13 del TEO, se localiza a un costado del Gran Canal de desagüe, en el municipio de Santa María Tonanitla cerca de la caseta Tultepec del circuito exterior Mexiquense, el equipo asignado para este tramo es del tipo EPB de la marca Robbins; tomando en consideración un suelo del tipo mixto (roca, arcillas y arenas), cuenta con una longitud aproximada de 8.949 kilómetros y 4 lumbreras, las lumbreras de paso L11 y L12; de un diámetro de 12 metros y las lumbreras de montaje L10 y L13 de 16 metros.

Tramo 4. Inicia desde la lumbrera L13 del TEO hasta la lumbrera L17, se localiza a un costado del lago de Zumpango, en el municipio de Teoloyucan, el equipo

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

utilizado este este tramo es del tipo EPB de la marca Robbins, tomando en consideración un suelo del tipo mixto (roca, arcillas y arenas) cuenta con una longitud aproximada de 10.348 kilómetros y 4 lumbreras, las lumbreras de paso L16, L15 y L14; de un diámetro de 12 metros y la lumbrera de montaje L17 de 16 metros.

Tramo 5. Inicia en la lumbrera L17 del TEO hacia la lumbrera L20, se localiza en el municipio de Huehuetoca, el equipo utilizado este este tramo es del tipo EPB de la marca Robbins, tomando en consideración un suelo del tipo mixto (roca, arcillas y arenas), cuenta con una longitud aproximada de 8.458 kilómetros y 4 lumbreras, las lumbreras de paso L19 y L18; de un diámetro de 12 metros y la lumbrera de montaje L20 de 16 metros.

Tramo 6. Inicia en la lumbrera L20 hasta el portal de salida, se localiza en el municipio de Atotonilco de Tula, el equipo utilizado para este tramo es del tipo EPB de la marca HK, cuenta con una longitud aproximada de 12.338 kilómetros y 4 lumbreras, las lumbreras de paso L24, L23, L22 y L21; con un diámetro de 12 metros.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

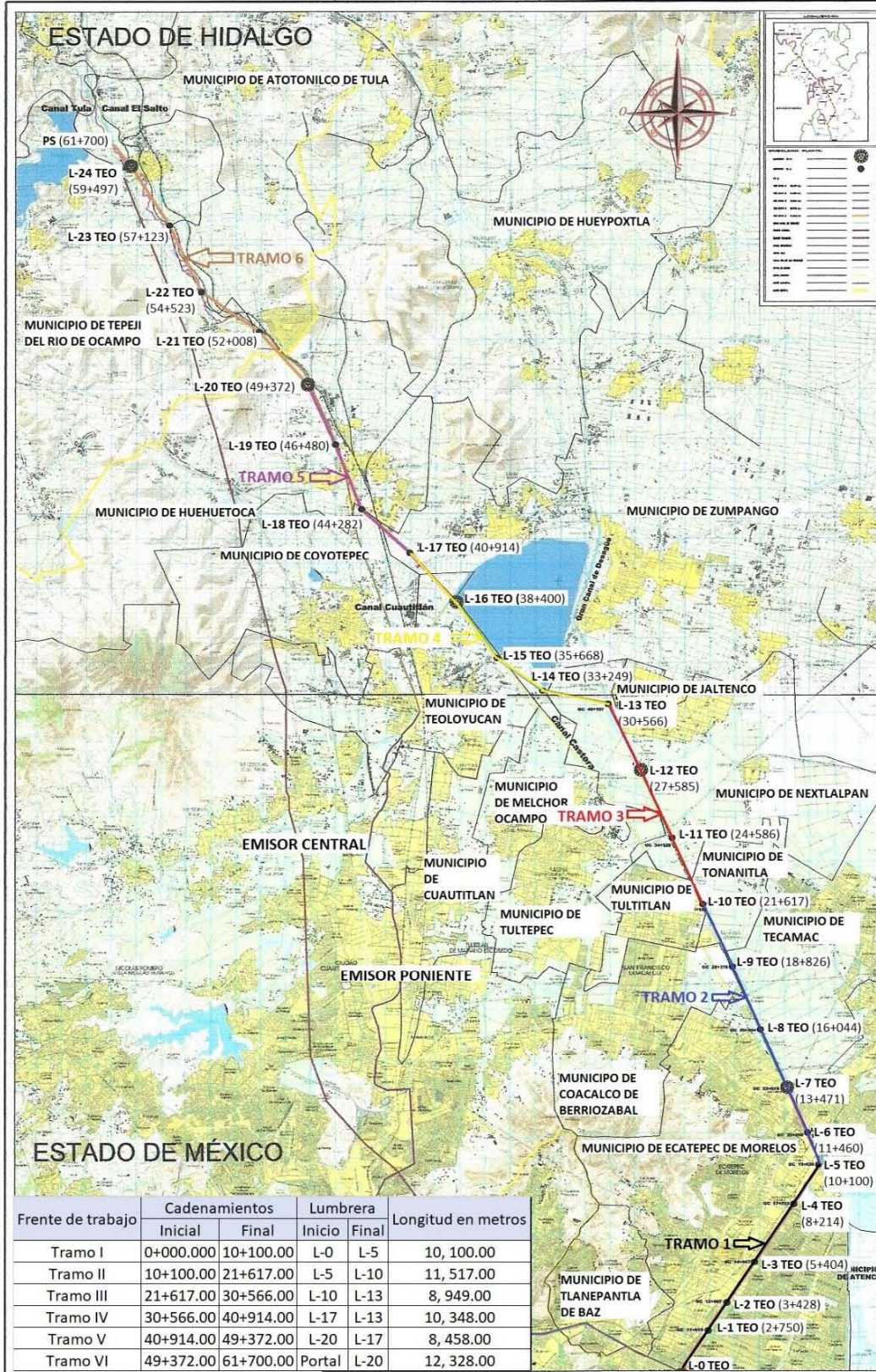


Figura 6. Tramos del TEO.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

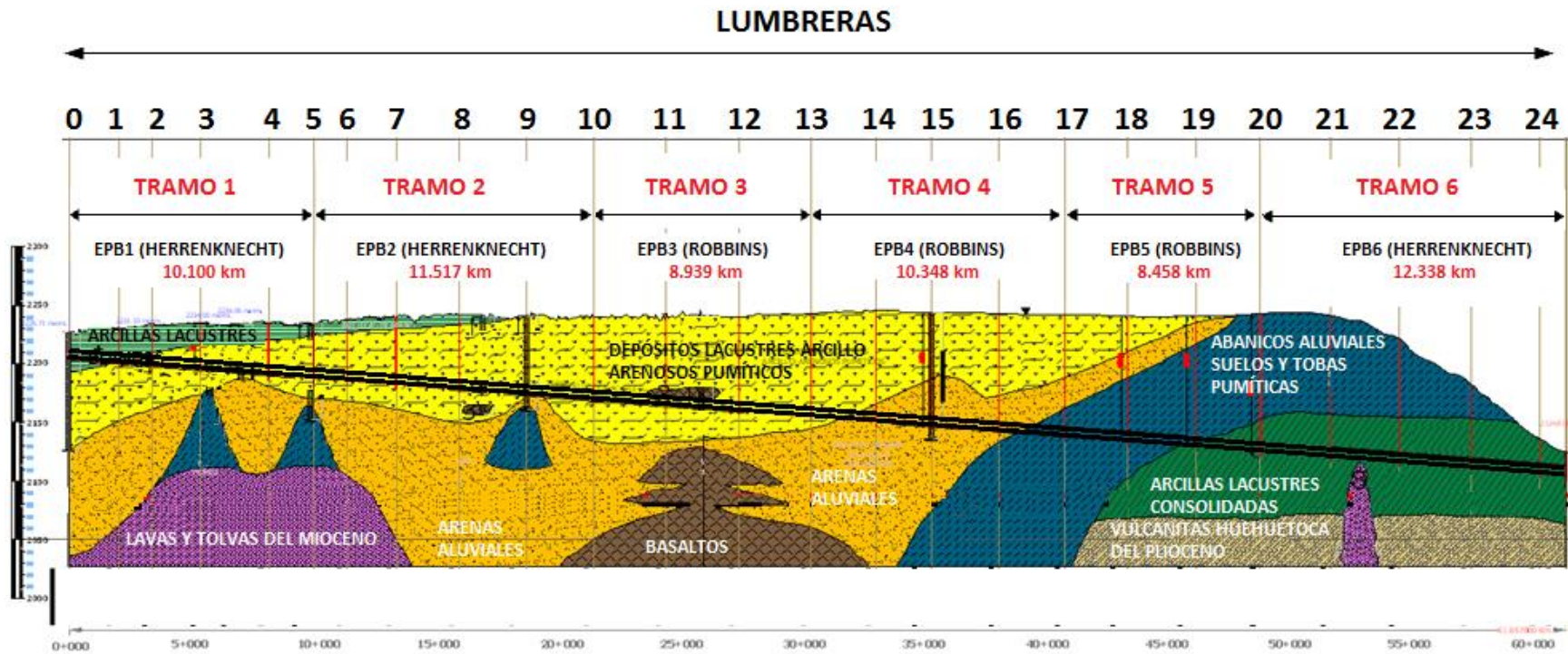


Figura 7. Perfil geológico utilizado para el diseño de las tuneladoras.

II.4 Proyecto.

El proyecto Túnel Emisor Oriente, dividido en 6 tramos, fue asignado al consorcio constructor COMISSA integrado por las empresas; Carso Infraestructura y Construcción S.A.B de C.V. (CICSA), Ingenieros Civiles Asociados S.A.B de C.V. (ICA), Construcciones y trituraciones S.A. de C.V. (COTRISA), Constructora Estrella S.A. de C.V. y Lombardo Construcciones S.A. de C.V.

Todo el proyecto se realiza bajo el esquema de obra pública mixta, es decir:

- La elaboración del proyecto ejecutivo tiene como modalidad el contrato de obra a precio alzado, en donde se estipula un precio fijado.
- La construcción del Túnel Emisor Oriente, cuya modalidad es el contrato de obra a precios unitarios, en donde se estipula el pago a base de estimaciones por el trabajo realizado en periodos determinados.

El alcance del proyecto comprende la construcción total del túnel y sus obras auxiliares, como son la construcción de 23 lumbreras; 18 llamadas “lumbreras de paso” con un diámetro de 12 metros y 5 “lumbreras de montaje” de un diámetro de 18 metros, incluye la fabricación de 41 600 anillos de dovelas para el revestimiento primario los 62 kilómetros del túnel, cuya excavación se realiza con máquinas tuneladoras propiedad de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), además de incluir la construcción del revestimiento definitivo a base concreto armado de un espesor de 0.35 centímetros, garantizando un diámetro de 7.0 metros de túnel terminado.

El proyecto considero iniciar su construcción en al año 2008 y finalizar en el año 2012; siguiendo el programa de obra que se observa en la **Figura 8**, con una inversión total de \$12,643,000,000.00 M.N., este programa contempla desde la elaboración de estudios previos, la fabricación de los equipos excavadores (TBM), la construcción de todas las lumbreras, la excavación del túnel y el revestimiento definitivo.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

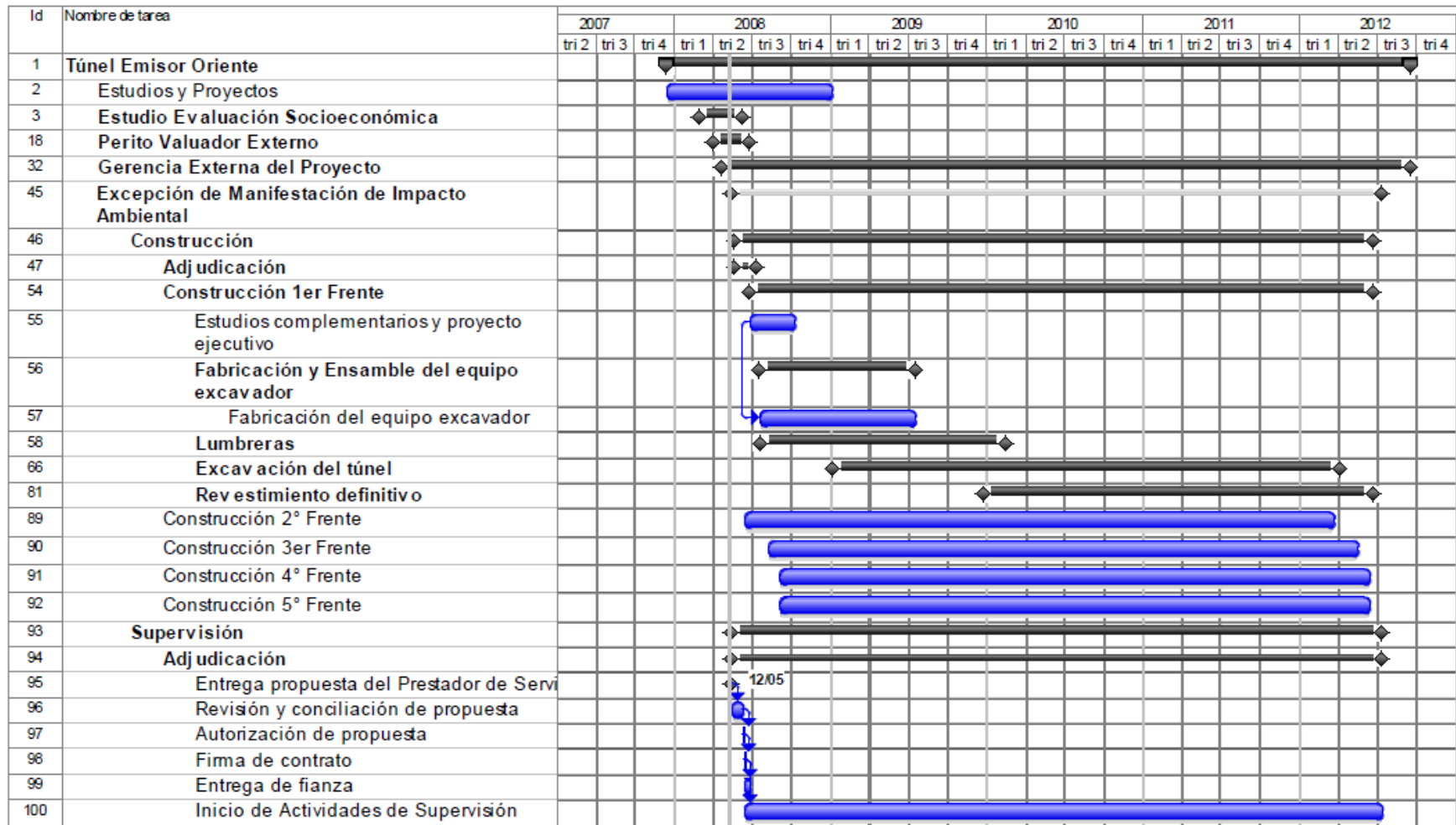


Figura 8. Programa de obra general del TEO

II.4.1 Construcción de lumbreras.

Una de las obras auxiliares necesarias para la construcción del túnel son las lumbreras, que básicamente son aberturas de forma cilíndrica, elaboradas mediante la excavación del suelo a una profundidad determinada, cuyo objetivo es la instalación del equipo excavador; como “lumbrera de montaje” y/o como ventilación y mantenimiento como “lumbrera de paso”, éstas están distribuidas a una distancia promedio entre sí de 2.5 kilómetros y con profundidades que van de los 32 metros a los 150 metros.

Para la construcción de las lumbreras se tomaron en consideración la calidad y clasificación de los suelos basados en estudios exploratorios, los cuales dieron la pauta para definir el procedimiento constructivo, descritos a continuación:

Método in situ (Muro Milán).

- Este método contempla la construcción de la lumbrera con Muro Milán en su totalidad y fue utilizado para construir la lumbrera L1A, L3, L4 y L21.
- Inicialmente se realiza la construcción de un brocal, cuya función es el sostenimiento del terreno superficial; trazo y referencia de la posterior excavación del Muro Millán.
- Para la excavación del Muro Milán se utiliza una máquina denominada hidrofresadora como la que se muestra en la **Figura 9**, la cual tiene la capacidad de perforar la profundidad total de la lumbrera, auxiliada por una planta de inyección de lodo bentónico; cuyo objetivo principal es estabilizar el suelo para evitar derrumbes y filtraciones al interior de la excavación.
- Una de las principales características de este método es la excavación del muro por secciones denominadas paneles o tableros.
- Se realiza el habilitado y la colocación del acero de refuerzo en el tablero ya excavado.
- Se continúa con la colocación del concreto siguiendo el proceso de excavación por secciones.
- Una vez finalizada la construcción del muro en su totalidad, se realiza la excavación y extracción de material del núcleo.
- Finalizando con la construcción de una losa de fondo.



Figura 9. Hidrofresadora para excavación del muro Milán.

Método convencional.

- Utilizado para la construcción de la lumbrera L16, L17 y L22.
- A diferencia del método in situ, se realiza la excavación del núcleo total de la lumbrera, estabilizando el muro por medio de la colocación de marcos metálicos o como es en el caso de la lumbrera L17 por medio de concreto lanzado y anclas, obteniendo así un revestimiento primario como se observa en la **Figura 10**.
- Posteriormente se realiza el habilitado del acero de refuerzo en todo el muro de la lumbrera para el revestimiento definitivo.
- Se realiza la construcción e instalación de una cimbra deslizante; cuya dimensión es igual al diámetro final de la lumbrera.
- Se realiza el colado del revestimiento definitivo.
- Al igual que en el método anterior se finaliza con la construcción de la losa de fondo.
- En la **Figura 11** se aprecia las características de construcción de la lumbrera L16; construida por el método convencional.



Figura 10. Excavación de núcleo y colocación de marcos metálicos para construcción de la lumbrera.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

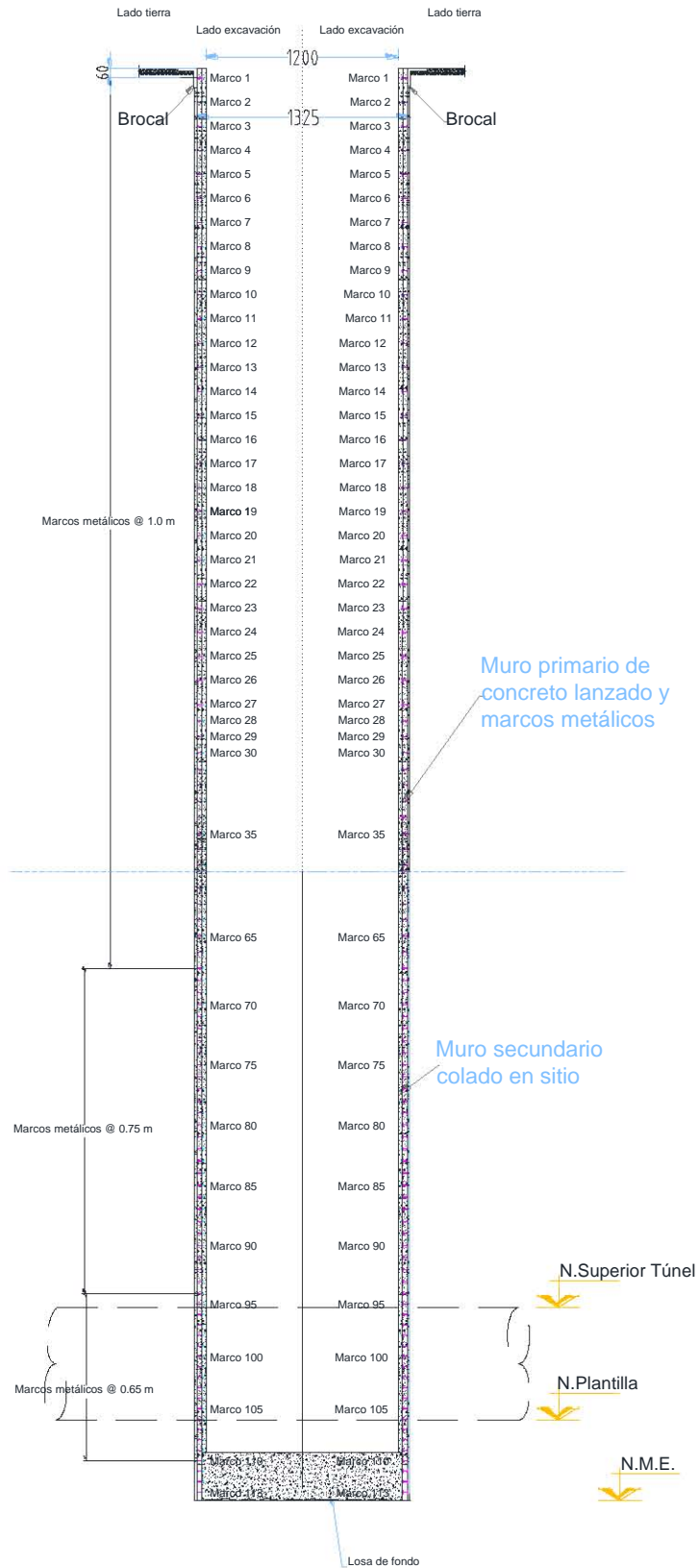


Figura 11. Características de construcción de la lumbrera L16 por el método convencional.

Método mixto.

- Utilizado para construir las lumbreras L5, L7, L8, L9, L10, L11, L12, L13, L14, L15, L18, L19 y L20.
- Es una combinación de los dos métodos anteriores.
- Se construye la lumbrera en su primera etapa por el método in situ, aproximadamente a una determinada profundidad, concluyendo la última etapa con el método convencional y un revestimiento definitivo a base de acero y colado in situ como se muestra en la **Figura 12**.
- Para la transición de un método a otro (in situ – convencional), se realiza la construcción de una trabe de liga, asegurando su correcta funcionalidad.
- Finalizando con la construcción de la losa de fondo.
- En la **Figura 13** se aprecian las características de construcción de la lumbrera L10 por este método.

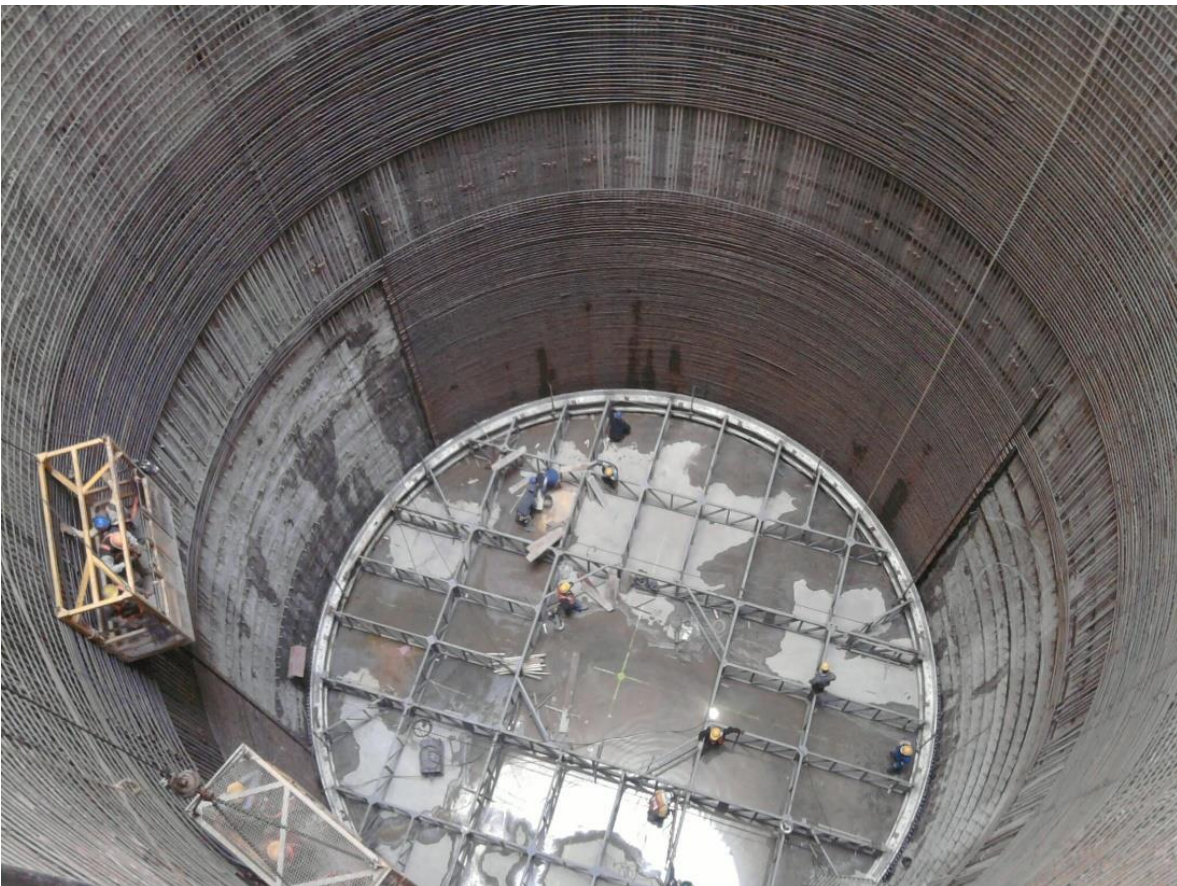


Figura 12. Habilitado de acero para el revestimiento definitivo de lumbrera.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

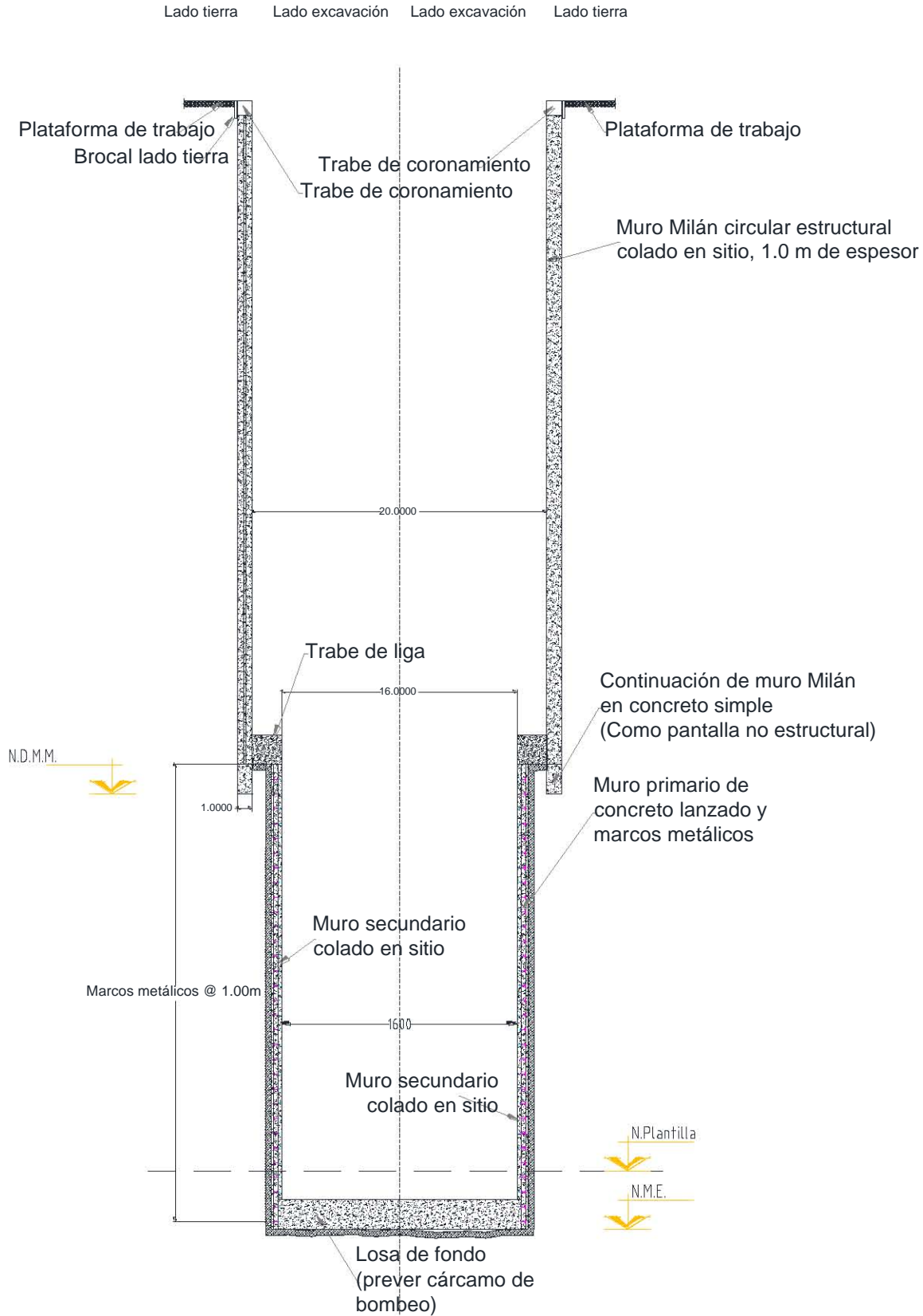


Figura 13. Esquema de construcción de una lumbrera por el método mixto.

II.4.2 Construcción del Túnel.

El diseño constructivo permitirá el escurrimiento del agua dentro del túnel por gravedad; de la lumbrera L0 a la lumbrera L6 la pendiente del túnel será de 0.19%, y de la lumbrera L6 al Portal de salida la pendiente será de 0.16%.

La excavación y construcción del túnel y lumbreras son en distintas condiciones geotécnicas-geológicas, y así también bajo distintas condiciones hidrostáticas.

La sección geométrica del túnel considera la construcción de dos revestimientos; el primer revestimiento está formado por segmentos de concreto reforzado (dovelas) las cuales tienen un espesor de 35 centímetros, en los primeros 22 kilómetros (L0 a L10) y de 40 centímetros del kilómetro 22 al portal de salida; estos segmentos son prefabricados y son colocados por la misma máquina excavadora (TBM), el segundo revestimiento se conforma de concreto armado colado "in situ" y su espesor será redundante según lo descrito; para su construcción se utiliza un cimbra metálica, logrando una sección operativa de 7.0 metros como se muestra en la **Figura 14 y 15**.

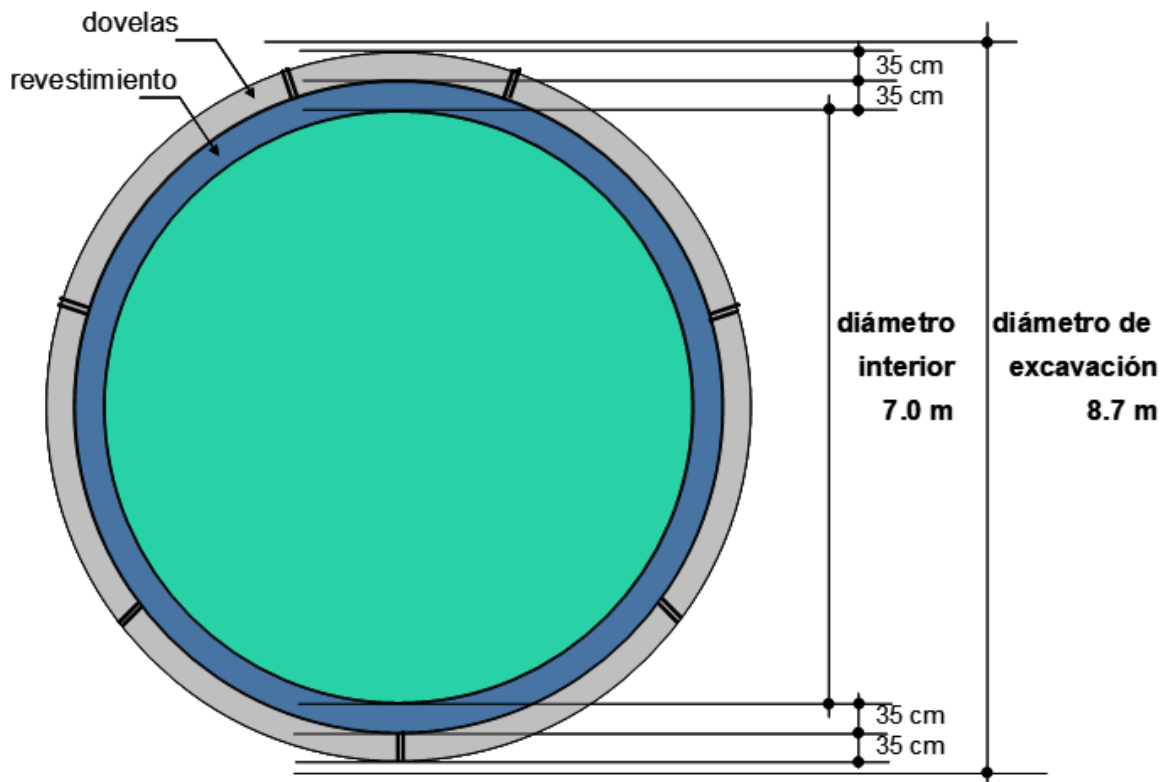


Figura 14. Esquema del revestimiento primario y secundario de los primeros 22 kilómetros de túnel.

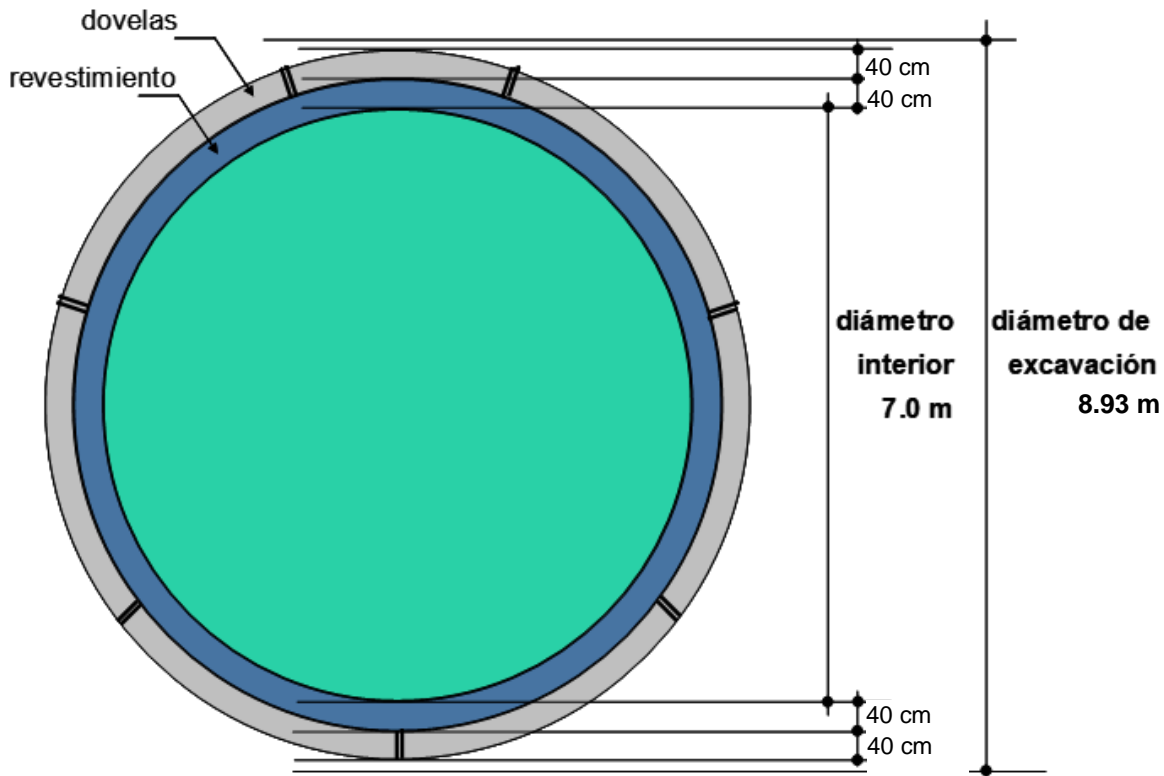


Figura 15. Esquema del revestimiento primario y secundario del kilómetro 22 al portal de salida.

II.4.3 Máquina excavadora (TBM).

Una máquina excavadora o tuneladora TBM (por sus siglas en inglés Tunnel Boring Machine) es un equipo que tiene la capacidad de realizar la excavación de un túnel de modo continuo; además de colocar un revestimiento primario (dovelas) como sostenimiento, dotada fundamentalmente de una cabeza de corte o rueda de corte, un tornillo sin fin para extracción de rezaga y un sistema de gatos perimetrales que empujan contra la pared del túnel para su desplazamiento.

El equipo arrastra tras él una serie de plataformas llamadas Gantrys o back up en donde se sitúan los sistemas eléctricos, mecánicos e hidráulicos que permiten el funcionamiento de la máquina, además de equipos secundarios como son la ventilación, el sistema de evacuación de rezaga, contenedores de mortero, entre otros.

Estas máquinas se dividen principalmente en dos grandes grupos que dependen del tipo de suelo a excavar, por un lado, se tienen los llamados “Topos” cuyo diseño principalmente es para excavar en rocas duras y medias, y por otro lado las EPB (Earth Pressur Balance, por sus siglas en inglés) o denominadas Escudos, diseñadas para la excavación en rocas blandas y suelos frecuentemente inestables y en ocasiones por debajo del nivel de aguas freáticas.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

Para el caso del Túnel Emisor Oriente y siguiendo el perfil estratigráfico en donde se observa que el tipo de suelo es principalmente arcilla y arena; además de que por la profundidad del túnel la excavación se realiza por debajo del nivel de aguas freáticas, se realizó el diseño de las tuneladoras del tipo EPB como la que se muestra en la **Figura 16**.

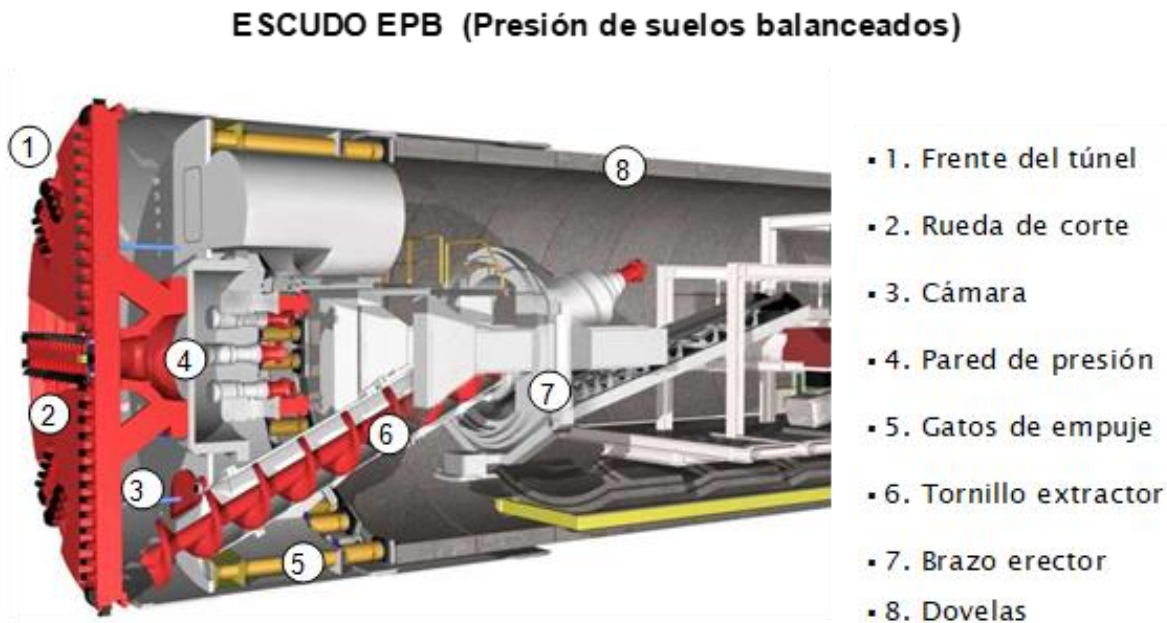


Figura 16. Esquema básico de una máquina tuneladora tipo EPB.

II.4.4 Revestimiento primario del túnel.

Como anteriormente se menciona, el diseño del túnel emisor oriente considera dos revestimientos; el primero denominado “Revestimiento primario”, consiste en la colocación de anillos de dovelas, que son instalados por la máquina tuneladora conforme avanza la excavación y su principal objetivo es dar un soporte inicial al túnel.

Para los tramos 1 y 2 (L0 a L10) el anillo está dividido en seis dovelas de 35 centímetros de espesor más una dovela de cierre, denominadas A1, A2, A3, A4, B, C y K, siendo esta última de menor dimensión con el objetivo de garantizar el cierre del anillo colocado; en los tramos 3, 4, 5 y 6 el anillo está dividido en siete dovelas de 40 centímetros de espesor, más una dovela de cierre, en ambos casos el ancho del anillo formado es de 1.5 metros como se aprecia en la **Figura 17**.

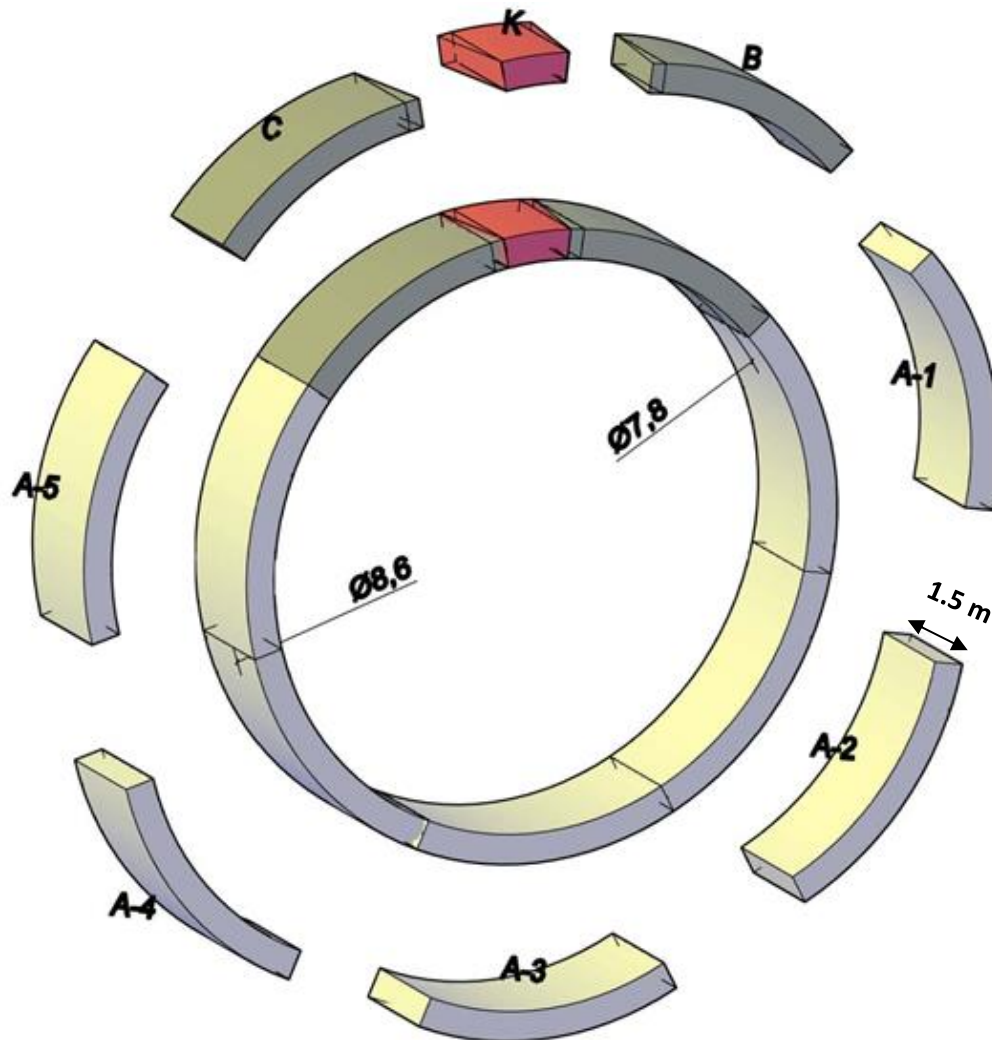


Figura 17. Anillo formado por 8 dovelas de concreto.

Las dovelas son elementos de concreto prefabricado con una resistencia a la compresión de $f'c = 350 \text{ kg/cm}^2$, elaborado con Cemento CPO-30 y/o 40-RS (Cemento Portland Ordinario, resistente a los sulfatos), prefabricadas de forma geométrica que en conjunto forman un anillo circular troncocónico; capaz de garantizar la geometría y trazo del túnel, aun en donde su trazo sea curvado.

Para la producción de los 41 600 anillos de concreto que serán instalados en los 62 kilómetros que conforma el TEO, se construyeron un total de tres plantas para su fabricación, con un rendimiento de 28 anillos completos por día en cada planta, que equivale a la capacidad de avance de las máquinas tuneladoras operando en conjunto.

De manera general el proceso de fabricación de las dovelas se inicia con la limpieza de los moldes y aplicación de desmoldante para evitar la adherencia del concreto, posteriormente, con ayuda de una grúa viajera se coloca la armadura del

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

acero de refuerzo y los insertos y se procede con la verificación y control del molde para efectuar el colado del concreto y el vibrado hasta lograr el acomodo del concreto en el molde. Después del colado se procede al afine de la superficie fresca de concreto, y de esta forma se ingresa la dovela al proceso de curado. Una vez que ha concluido el periodo de curado y se ha obtenido la resistencia mínima para el desmolde, se procede al retiro y extracción de las dovelas del molde, y con ayuda de una grúa viajera se envía a la zona de marcación y su posterior almacenamiento, este proceso se muestra de manera esquemática en la **Figura 18**. Las dovelas se fabrican en moldes móviles, con vibradores integrados en su estructura, los cuales son desplazados sobre rieles de manera cíclica por la planta. La resistencia que deben alcanzar las dovelas a edad temprana con ayuda del curado a vapor, debe ser suficiente para soportar con seguridad los esfuerzos derivados de su desmolde, manejo y almacenamiento.

Se debe de contar con un laboratorio de control de calidad acreditado ante la EMA, en el sitio de los trabajos, el cual asume toda la responsabilidad de la obra en cuanto al control de calidad de la producción de dovelas.

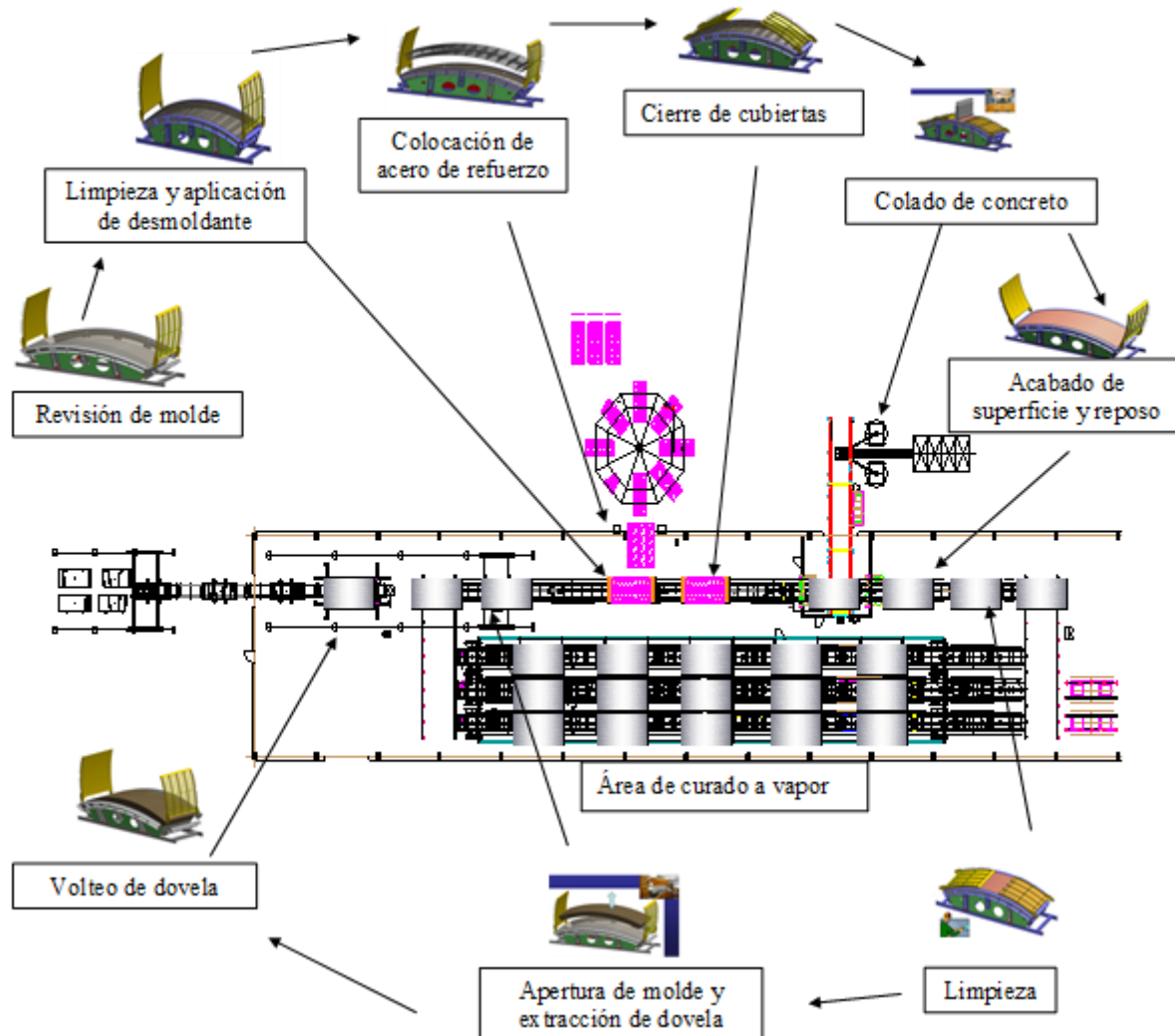


Figura 18. Proceso de fabricación de dovelas.

II.4.5 Revestimiento definitivo del túnel.

El segundo revestimiento del túnel emisor oriente denominado “Revestimiento definitivo” está formado por concreto reforzado colado “in situ”. Con un espesor mínimo de 35 centímetros, con una resistencia de $f'c = 350 \text{ kg/cm}^2$, con cemento CPO30 y/o 40RS resistente a los sulfatos.

De manera general el procedimiento se inicia con el estudio topográfico del revestimiento primario con el objetivo de realizar el correcto habilitado del acero de refuerzo, previamente se realiza el retiro de estructuras y material producto de la excavación.

La colocación del acero de refuerzo se realiza mediante la utilización de una estructura metálica, así como silletas de acero, las cuales aseguran el correcto armado durante todo el proceso de colado y fraguado del concreto, una manera de representar el habilitado del acero de refuerzo se muestra en la **Figura 19**.

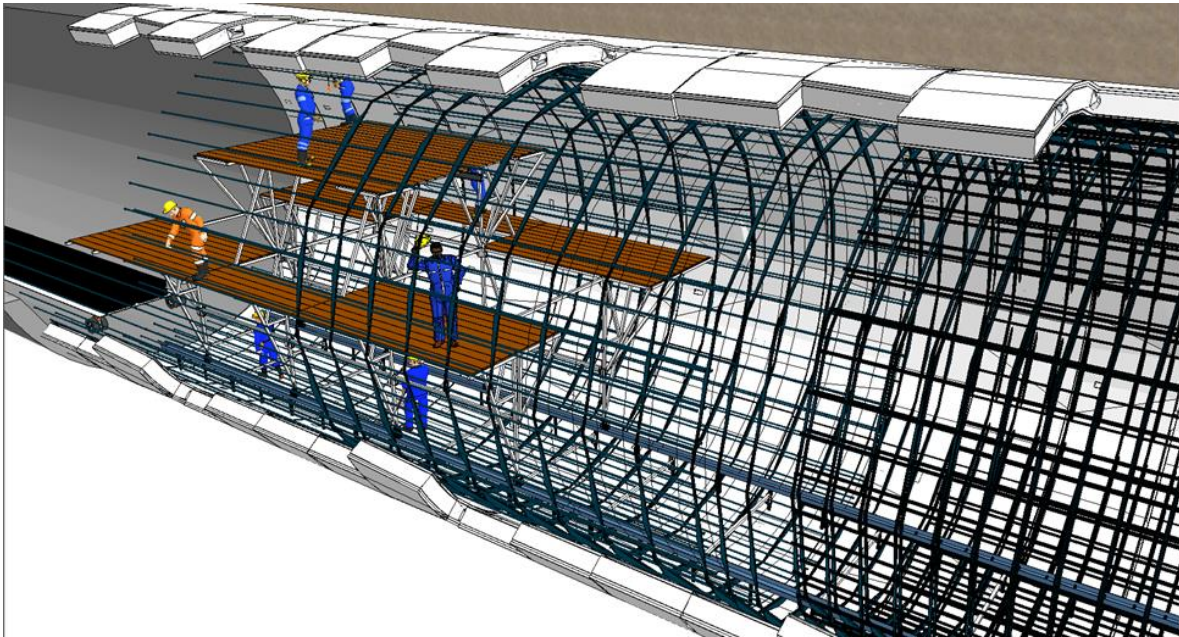


Figura 19. Habilitado de acero de refuerzo para el revestimiento definitivo.

Para el colado del revestimiento se utilizan cimbras metálicas modulares de acabado aparente de 7.0 metros de diámetro terminado

La cimbra se compone por un conjunto de estructuras metálicas llamadas módulos, que ensamblados forman un anillo metálico y tienen la rigidez, resistencia y estabilidad suficiente para soportar la presión originada por el concreto, el vibrador y las sobre cargas que puedan presentarse durante la construcción como la mostrada en la **Figura 20**.



Figura 20. Cimbra metálica.

Durante las maniobras de colocación, nivelación y sujeción de la cimbra, la brigada de topografía revisa su alineación correcta y recubrimiento adecuado del acero de refuerzo.

La fabricación del concreto se realiza en superficie mediante una planta dosificadora convencional con la capacidad adecuada a los volúmenes requeridos por los ciclos de trabajo.

La transportación del concreto hasta la cimbra se realiza mediante carros tipo moran mostrados en la **Figura 21** y locomotoras con la capacidad requerida, una vez transportado el concreto, se utiliza un equipo distribuidor que lo bombea y coloca por medio de puertos de inyección o boquillas ubicadas en los módulos, la

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

colocación se apoya con la utilización de vibradores neumáticos de pared y se verifica de manera constante por medio de ventanas distribuidas en la cimbra.



Figura 21. Carros Moran para transporte de concreto.

Se utiliza un agente desencofrante para evitar que el concreto se adhiera a las paredes de la cimbra y de tal manera, facilitar el descimbrado.

En el sitio de los trabajos se debe de contar con un laboratorio de control de calidad para verificar y llevar el control de calidad del concreto.

III. PROCESO CONSTRUCTIVO DEL TRAMO 3.

III.1 Lumbreras.

El tramo 3 del TEO constituye aproximadamente 8.949 kilómetros, es decir un 15% de los 62 kilómetros del túnel, conformado con un total de 4 lumbreras, las lumbreras L10 y L13 de montaje o extracción para el equipo excavador TBM; con un diámetro interior terminado de 16 metros y las lumbreras de paso L11 y L12; con un diámetro interior terminado de 12 metros.

Se realizaron estudios exploratorios para la construcción de las lumbreras mediante sondeos continuos con equipo mecánico utilizando la prueba de Penetración Estándar (SPT; por sus siglas en inglés) como el mostrado en la **Figura 22** y tubo shelby.



Figura 22. Sondeo exploratorio mediante la Prueba de Penetración Estándar (SPT).

Esta prueba permite estimar la resistencia al esfuerzo cortante del suelo, mediante el número de golpes necesario para hincar un penetrómetro de 45 centímetros o

tubo muestreador con una masa de 64 kilogramos como el mostrado en la **Figura 23**.

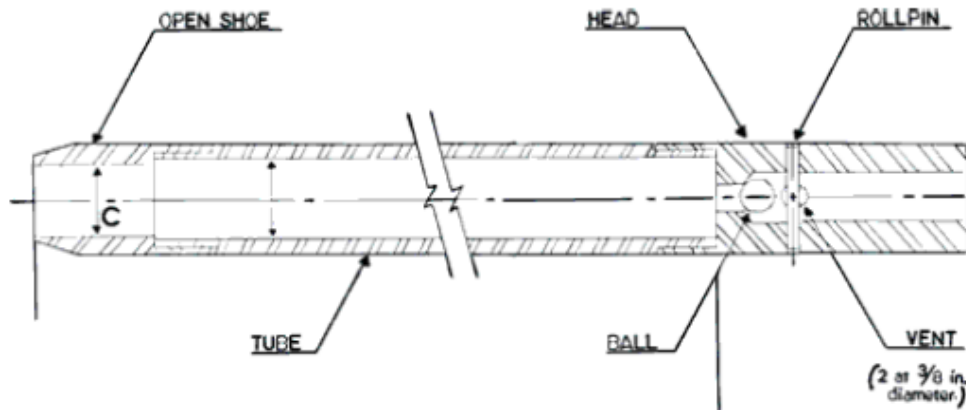


Figura 23. Tubo muestreador para SPT.

Este método de sondeo permite obtener muestras alteradas-representativas para identificar los suelos del sitio, además de conocer las condiciones estratigráficas, aprovechando las muestras alteradas para determinar las propiedades índices; usualmente el contenido natural de agua, densidad de sólidos y los límites de consistencia, así como un estimado de la resistencia al corte, mediante correlaciones empíricas con el número de golpes.

El tubo Shelby o también llamado tubo de pared delgada; que es un tubo fabricado de acero sin costuras y su objetivo es la toma de muestras de suelo "in situ", de muestras inalteradas de suelos como las que se observan en la **Figura 22**, que permiten conservar las propiedades en su estado natural, evitando hacer mínimos los cambios de las condiciones de la muestra.



Figura 24. Muestras inalteradas mediante la utilización del tubo shelby.

Para la clasificación del tipo de suelo y elaboración del esquema estratigráfico se utilizó el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos SUCS, mostrado en la

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

Figura 26, propuesto por Arturo Casagrande, así como pruebas de laboratorio para la obtención de las propiedades geotécnicas.

La clasificación SUCS divide los suelos en:

- Suelos de grano grueso.
- Suelos de grano fino.
- Suelos orgánicos.

Para la obtención de esta clasificaron se utilizan tamices como los mostrados en la **Figura 25**.

- **Suelos gruesos.** Se dividen en gravas y arena, y se separan con el tamiz No. 4, de manera que un suelo pertenece al grupo de grava si más del 50% retiene el tamiz No. 4 y pertenecerá al grupo arena en caso contrario.
- **Suelos finos.** Se considera que un suelo es fino si más del 50% de sus partículas son menores que la abertura del tamiz No. 200 como se muestra en la **Figura 25**, el sistema unificado considera los suelos finos divididos entre grupos: limos inorgánicos, arcillas inorgánicas y limos y arcillas orgánicas.

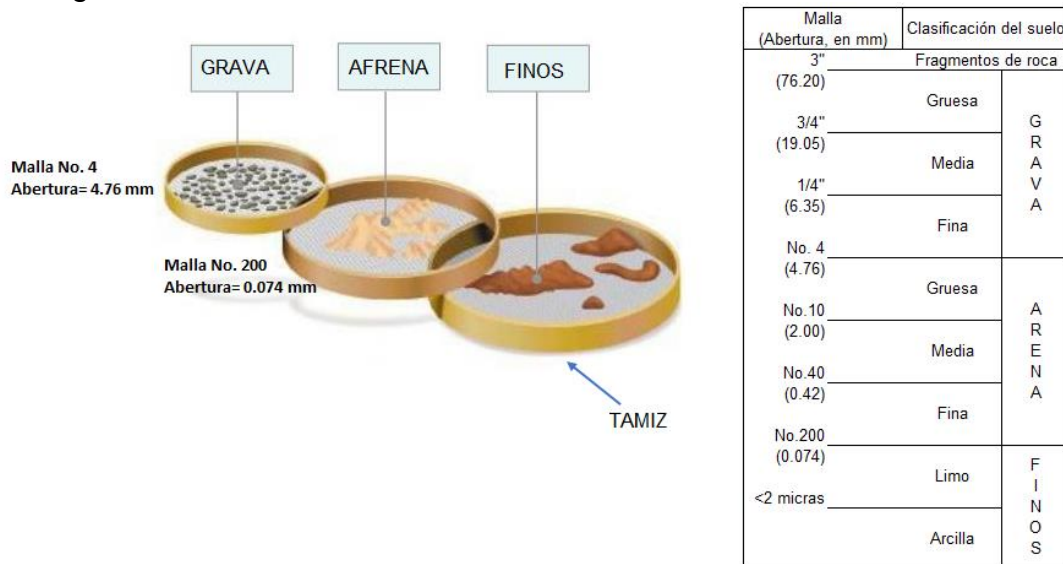


Figura 25. División de los suelos finos y suelos gruesos.

Los suelos se designan por símbolos de grupo, el símbolo de cada grupo consta de un prefijo y un sufijo. Los prefijos son las iniciales de los nombres en ingles de los seis principales tipos de suelos los cuales son Grava (G), Arena (S), Limo (M), Arcilla (C), Suelos orgánicos de grano fino (O) y turbas (Pt), mientras que los sufijos indican subdivisiones en dichos grupos.

Los suelos gruesos (Grava y arena) se subdividen a su vez en Bien graduado (W) y Mal graduado (P).

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

Así mismo se los suelos finos se subdividen a su vez según su límite líquido, en dos grupos cuya frontera es LI = 50%. Si el límite líquido del suelo es menor de 50 se añade al símbolo general la letra L (low compressibility, baja compresibilidad). Si es mayor de 50 se añade la letra H (high compressibility, alta compresibilidad). Obteniéndose de este modo los siguientes tipos de suelos:

- ML: Limos Inorgánicos de baja compresibilidad.
- OL: Limos y arcillas orgánicas.
- CL: Arcillas inorgánicas de baja compresibilidad.
- CH: Arcillas inorgánicas de alta compresibilidad.
- MH: Limos inorgánicos de alta compresibilidad.
- OH: arcillas y limos orgánicas de alta compresibilidad.

DIVISIÓN MAYOR		NOMBRES TÍPICOS	CRITERIO DE CLASIFICACIÓN EN EL LABORATORIO		
SUELOS DE PARTÍCULAS GRUESAS Más de la mitad del material es retenido en la malla número 200 @	GRAVAS Más de la mitad de la fracción gruesa es retenida por la malla No. 4 PARA CLASIFICACIÓN VISUAL PUEDE USARSE 1/2 cm. COMO EQUIVALENTE A LA ABERTURA DE LA MALLA No. 4	GW	Gravas bien graduadas mezclas de grava y arena con poco o nada de finos		
		GP	Gravas mal graduadas, mezclas de grava y arena con poco o nada de finos.		
		GM	Gravas limosas, mezclas de grava, arena y limo		
		GC	Gravas arcillosas, mezclas de gravas, arena y arcilla		
		ARENAS Más de la mitad de la fracción gruesa pasa por la malla No. 4 PARA CLASIFICACIÓN VISUAL PUEDE USARSE 1/2 cm. COMO EQUIVALENTE A LA ABERTURA DE LA MALLA No. 4	SW	Arenas bien graduadas, arena con gravas, con poca o nada de finos.	
			SP	Arenas mal graduadas, arena con gravas, con poca o nada de finos.	
	SM		Arenas limosas, mezclas de arena y limo.		
	SC		Arenas arcillosas, mezclas de arena y arcilla.		
	SUELOS DE PARTÍCULAS FINAS Más de la mitad del material pasa por la malla número 200 @ Las partículas de 0.075 mm de diámetro (la malla No. 200) son, aproximadamente, las más pequeñas visibles a simple vista.		LIMOS Y ARCILLAS Límite Líquido menor de 50	ML	Limos inorgánicos, polvo de roca, limos arcillosos o arcillosos ligeramente plásticos.
				CL	Arcillas inorgánicas de baja o media plasticidad, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas limosas, arcillas pobres.
	LIMOS Y ARCILLAS Límite Líquido Mayor de 50	LIMOS Y ARCILLAS Límite Líquido Mayor de 50	OL	Limos orgánicos y arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad.	
			MH	Limos inorgánicos, limos micáceos o diastrómicos, más elásticos.	
CH			Arcillas inorgánicas de alta plasticidad, arcillas finas.		
SUELOS ALTAMENTE ORGÁNICOS	SUELOS ALTAMENTE ORGÁNICOS	OH	Arcillas orgánicas de media o alta plasticidad, limos orgánicos de media plasticidad.		
		P	Turbas y otros suelos altamente orgánicos.		

DETERMINAR LOS PORCENTAJES DE GRAVA Y ARENA DE LA CURVA GRANULOMÉTRICA. UTILIZAR LOS PORCENTAJES DE FINOS QUE PASA POR LA MALLA No. 200 Y LOS SUELOS QUE PASAN POR LA MALLA No. 200. PARA CLASIFICACIÓN VISUAL PUEDE USARSE 1/2 cm. COMO EQUIVALENTE A LA ABERTURA DE LA MALLA No. 4. ENTRE 5% Y 12% CASOS DE FRONTERA QUE REQUIERAN UNO DE LOS SÍMBOLOS DOBLES **

G - Grava, **S** - Arena, **O** - Suelo Orgánico, **P** - Turba, **M** - Limo
C - Arcilla, **W** - Bien Graduada, **P** - Mal Graduada, **L** - Baja Compresibilidad, **H** - Alta Compresibilidad

CARTA DE PLASTICIDAD (S.U.C.S.)

** CLASIFICACIÓN DE FRONTERA - LOS SUELOS QUE POSEAN LAS CARACTERÍSTICAS DE DOS GRUPOS SE DESIGNAN CON LA COMBINACIÓN DE LOS DOS SÍMBOLOS; POR EJEMPLO GW-GC MEZCLA DE ARENA Y GRAVA BIEN GRADUADAS CON CEMENTANTE A ARCILLOSOS.
 @ TODOS LOS TAMAÑOS DE LAS MALLAS EN ESTA CARTA SON LOS U.S. STANDARD.
 * LA DIVISIÓN DE LOS GRUPOS GM Y SM EN SUBDIVISIONES d y u SON PARA CAMINOS Y AEROPUERTOS ÚNICAMENTE, LA SUB-DIVISIÓN ESTA BASADA EN LOS LÍMITES DE ATTERBERG EL SUFLO d SE USA CUANDO EL LL ES DE 28 O MENOS Y EL IP ES DE 6 O MENOS. EL SUFLO u ES USADO CUANDO EL LL ES MAYOR QUE

Figura 26. Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).

III.1.1 Lumbreira L10.

La lumbreira L10 se localiza en el cadenamamiento 21+617 de lo que será el Túnel Emisor Oriente (TEO), tiene un diámetro terminado de 16 metros, con una profundidad de 72.518 metros al nivel de la rasante hidráulica del túnel. En la **Figura 27** se muestra una vista aérea de su ubicación.



Figura 27. Vista aérea de la ubicación de lumbreira L10.

Su secuencia estratigráfica se muestra de manera esquemática en la **Figura 28**:

- A) **Arcilla blanda.** De 0.00 a 4.80 metros; se encuentran arcillas de alta plasticidad, de símbolo CH de acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), de consistencia blanda, en la que la prueba de penetración estándar toma un valor promedio de NSPT igual a 2 golpes, con un contenido natural de agua promedio de 250 %.
- B) **Limos y limos arenosos.** De 4.80 a 13.15 metros; son limos de baja plasticidad, en algunos casos con poca arena, de símbolo ML de acuerdo con el SUCS, de consistencia blanda a muy dura, con valores de NSPT entre 5 y 50 golpes, y un contenido natural de agua en promedio de 50 %.
- C) **Limos.** De 13.15 a 21.55 metros; se encuentran limos de alta plasticidad, MH de acuerdo con el SUCS, de consistencia blanda a dura, con NSPT de 5 a 25 golpes y contenido natural de agua entre 50 y 100 %.
- D) **Arenas limosas.** De 21.55 a 25.70 metros; de símbolo SM de acuerdo con el SUCS, muy densas, con NSPT de 50 golpes para 15 centímetros en

**PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE
(TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO**

promedio de hincado del penetrómetro y contenido natural de agua promedio de 25 %.

- E) **Arcillas y limos.** De 25.70 a 34.50 metros; existen intercalaciones de arcillas y limos de baja plasticidad, consistencia blanda a dura, CL y ML de acuerdo con el SUCS, en donde el valor de NSPT fue entre 5 y 14 golpes y el contenido natural de agua entre 50 y 100 %.
- F) **Interestratificaciones de limos y arenas.** De 34.50 a 38.80 metros; se trata de arenas limosas y limos arenosos de compacidad densa a muy densa, de símbolos SM y ML de acuerdo con el SUCS, con valores de NSPT entre 27 y 79 golpes y el contenido natural de agua entre 10 y 50 %.
- G) **Arenas limosas y arcillosas.** De 38.80 metros hasta el final de la profundidad explorada, a 83.10 metros existen arenas limosas y arcillosas y limos arenosos, en general de compacidad densa, en las que se pueden identificar los siguientes substratos:
- G1) **Limo arenoso.** Estrato de 6.6 metros de espesor, desde 38.80 hasta 45.40 metros de profundidad, de limo de baja plasticidad, ML, de consistencia muy dura, con NSPT de 50 golpes para 10 centímetros en promedio de hincado del penetrómetro y contenido natural de agua alrededor de 30 % en promedio.
- G2) **Arena limosa.** De 45.40 a 55.20 metros de profundidad; es una arena limosa de compacidad media a densa donde el valor de NSPT varía de 21 a 42 golpes y el contenido de agua de 10 a 60 % (Estrato de 9.8 metros).
- G3) **Arena limosa con gravas.** Estrato de 9.0 metros de espesor, de 55.20 a 68.00 metros de profundidad, de arena limosa con gravas interestratificadas, de compacidad muy densa, con NSPT siempre arriba de 50 golpes y en muchas muestras con menos de 8 centímetros de hincado del penetrómetro; su contenido natural de agua varía entre 10 y 25 %.
- G4) **Arena limosa.** Con 4.3 metros de espesor, de 68.00 a 72.30 metros de profundidad; es una arena limosa de compacidad media a muy densa donde el valor de NSPT varía de 11 golpes hasta más de 50 para sólo 10 centímetros de hincado del penetrómetro, en tanto que el contenido de agua es en promedio de 25 %.
- G5) **Arena arcillosa y arcilla arenosa.** Estrato de 10.80 metros de espesor, desde 72.30 hasta 83.1 metros de profundidad, de arena arcillosa y en ocasiones arcilla arenosa, de símbolos SC y CL, de compacidad media a muy densa, con NSPT desde 24 golpes hasta más de 50 para 2 centímetros en promedio de hincado del penetrómetro y contenido natural de agua alrededor de 30 % en promedio.
- H) **El nivel de aguas freáticas se encuentra a una profundidad de 8.00 metros** medido a nivel de brocal de lumbrera.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

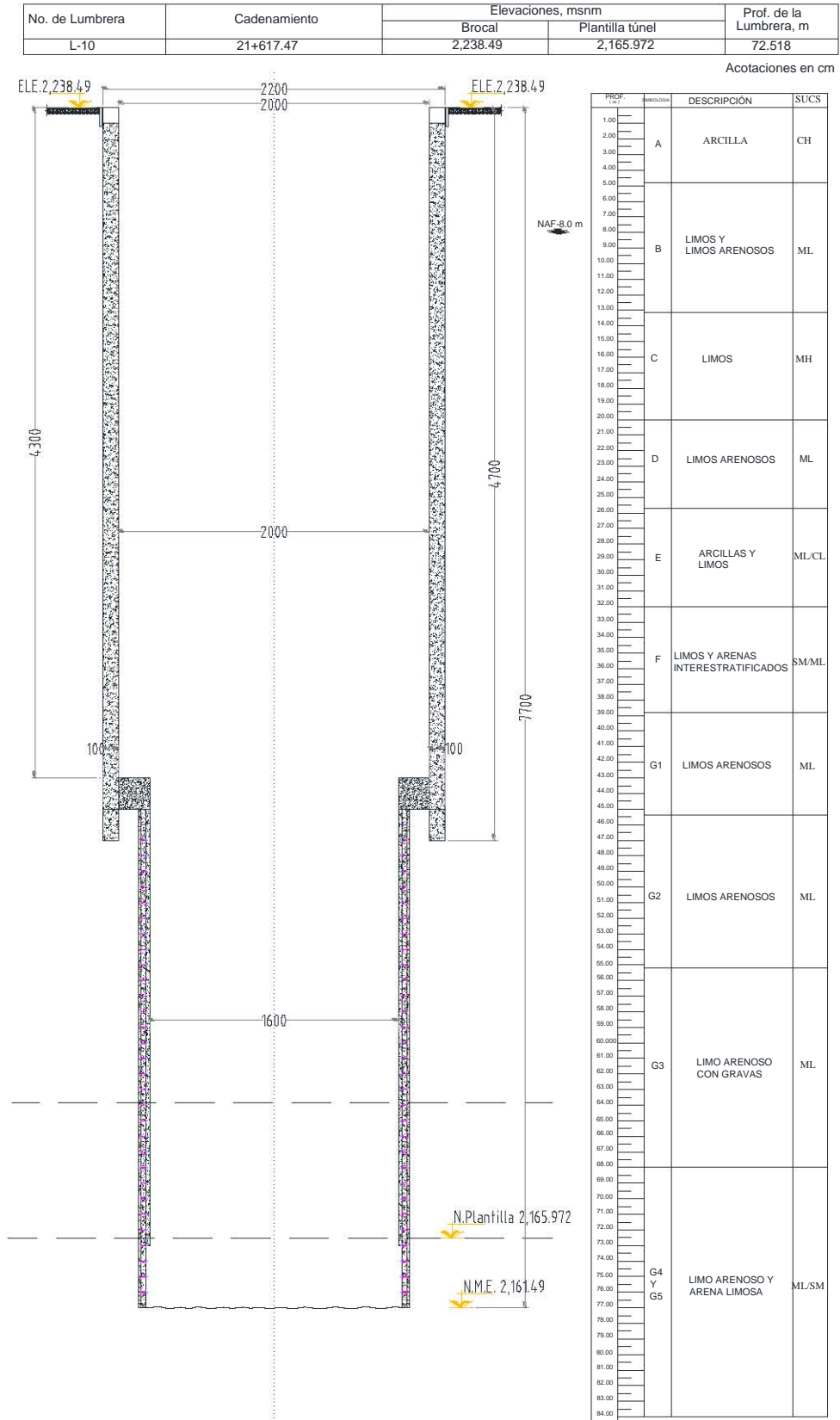


Figura 28. Esquema estratigráfico de la lumbreira L10.

III.1.2 Lumbreira L11.

La lumbreira L11 se localiza en el cadenamamiento 24+586.06 de lo que será el Túnel Emisor Oriente (TEO), tiene un diámetro terminado de 12 metros, con una profundidad de 79.419 metros al nivel de la rasante hidráulica del túnel. En la **Figura 29** se muestra una vista aérea de su ubicación.

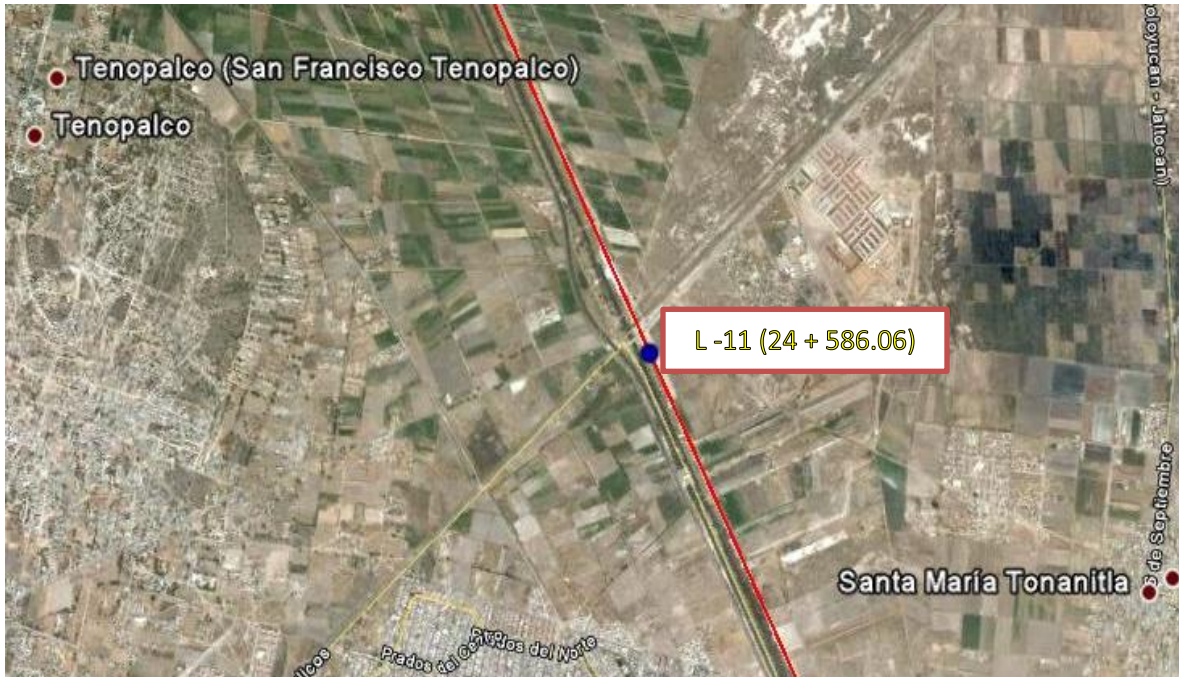


Figura 29. Vista aérea de la ubicación de lumbreira L11.

Su secuencia estratigráfica se muestra de manera esquemática en la **Figura 30**.

- A) **Limo arcilloso con arena.** De 0.00 a 3.50 metros, se encuentra una costra superficial formada por limo arcilloso con arena y basura, de consistencia media a firme, en donde la prueba de penetración estándar toma un valor promedio de NSPT igual a 15 golpes, con un contenido natural de agua promedio de 30%.
- B) **Arena limosa con lente de arcilla y ceniza.** De 3.50 metros a 5.50 metros, se encuentra un estrato de arena fina limosa de compacidad media a compacta, con lente de arcilla y ceniza volcánica, de símbolo CL de acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), con valor promedio de NSPT igual a 35 golpes y contenido de agua promedio de 40%.
- C) **Limo arcilloso.** De 5.50 a 7.50 metros existe limo arcilloso de consistencia blanda a media, de símbolo MH de acuerdo con el SUCS, con valor promedio de NSPT igual a 3 golpes y contenido de agua promedio de 90%.
- D) **Arcillas limosas y arenas limosas.** Entre 7.50 y 10.80 metros se encuentra un estrato formado por intercalaciones de arcillas limosas de consistencia media y arenas finas limosas de compacidad media, el

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

símbolo para este tipo de suelo es CL y SM respectivamente, con un valor promedio de NSPT igual a 25 golpes y contenido de agua promedio de 30%.

- E) **Limo arenoso.** De 10.80 a 12.50 metros existe limo arenoso de consistencia media a firme, con símbolo ML, un valor promedio de NSPT igual a 40 golpes y contenido de agua promedio de 25%.
- F) **Limo arcilloso.** Entre 12.50 metros y 15.5 metros se encuentra una capa de limo arcilloso de consistencia dura, con símbolo MH, con un valor promedio de NSPT igual a 20 golpes y contenido de agua promedio de 40%.
- G) **Arcilla de alta plasticidad.** De 15.50 a 17.50 metros se localiza un estrato de arcilla de alta plasticidad de consistencia blanda a media, con símbolo CH, con un valor promedio de NSPT igual a 5 golpes y contenido de agua promedio de 110%.
- H) **Limos arenosos y Limos arcillosos.** Entre 17.50 y 35.50 metros, se localiza un estrato formado por intercalaciones de limos arcillosos y limos arenosos de consistencia media a muy dura, el símbolo para este tipo de suelo es MH y ML respectivamente, con un valor promedio de NSPT igual a 25 golpes y contenido de agua promedio de 60%.
- I) **Limo arcilloso.** De 35.50 a 39.50 metros existe una capa de limo arcilloso de consistencia dura, con símbolo MH, con un valor promedio de NSPT igual a 30 golpes y contenido de agua promedio de 30%.
- J) **Limo arcilloso.** Entre 39.50 y 42.00 metros se encuentra una capa de arcilla limosa de consistencia media a firme, con símbolo MH, con un valor promedio de NSPT igual a 18 golpes y contenido de agua promedio de 60%.
- K) **Limo arenoso.** Entre 42.00 y 61.00 metros existe una capa de limo arenoso de consistencia muy dura, con símbolo ML, con un valor promedio de NSPT igual a 50 golpes y contenido de agua promedio de 50%.
- L) **Basalto masivo.** De 61.00 a 77.00 metros se encuentra un estrato de basalto vesicular.
- M) **Limo arcilloso.** Entre 77.00 y 82.00 metros de profundidad se localiza un estrato de limo arcilloso con arena de consistencia muy dura, con símbolo ML, con un valor promedio de NSPT igual a 50 golpes y contenido de agua promedio de 30%.
- N) **Limo arcilloso.** De 82.00 a 88.00 metros de profundidad existe un estrato de limo arcilloso con poca arena de consistencia dura a muy dura, con símbolo MH con un valor promedio de NSPT igual a 45 golpes y contenido de agua promedio de 80%.
- O) **Limo de alta plasticidad.** A partir de los 88.00 metros se encontró limo de consistencia firme a muy dura, con símbolo SM con un valor promedio de NSPT igual a 50 golpes y contenido de agua promedio de 40%.
- P) **El nivel de aguas freáticas se encuentra a una profundidad de 16.00 metros** medido a nivel de brocal de lumbrera.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

No. de Lumbreira	Cadenamiento	Elevaciones, msnm		Prof. hasta plantilla de la Lumbreira, m
		Brocal	Plantilla túnel	
L-11	24+586.06	2,241.476	2,161.222	79.419

Aotaciones en cm

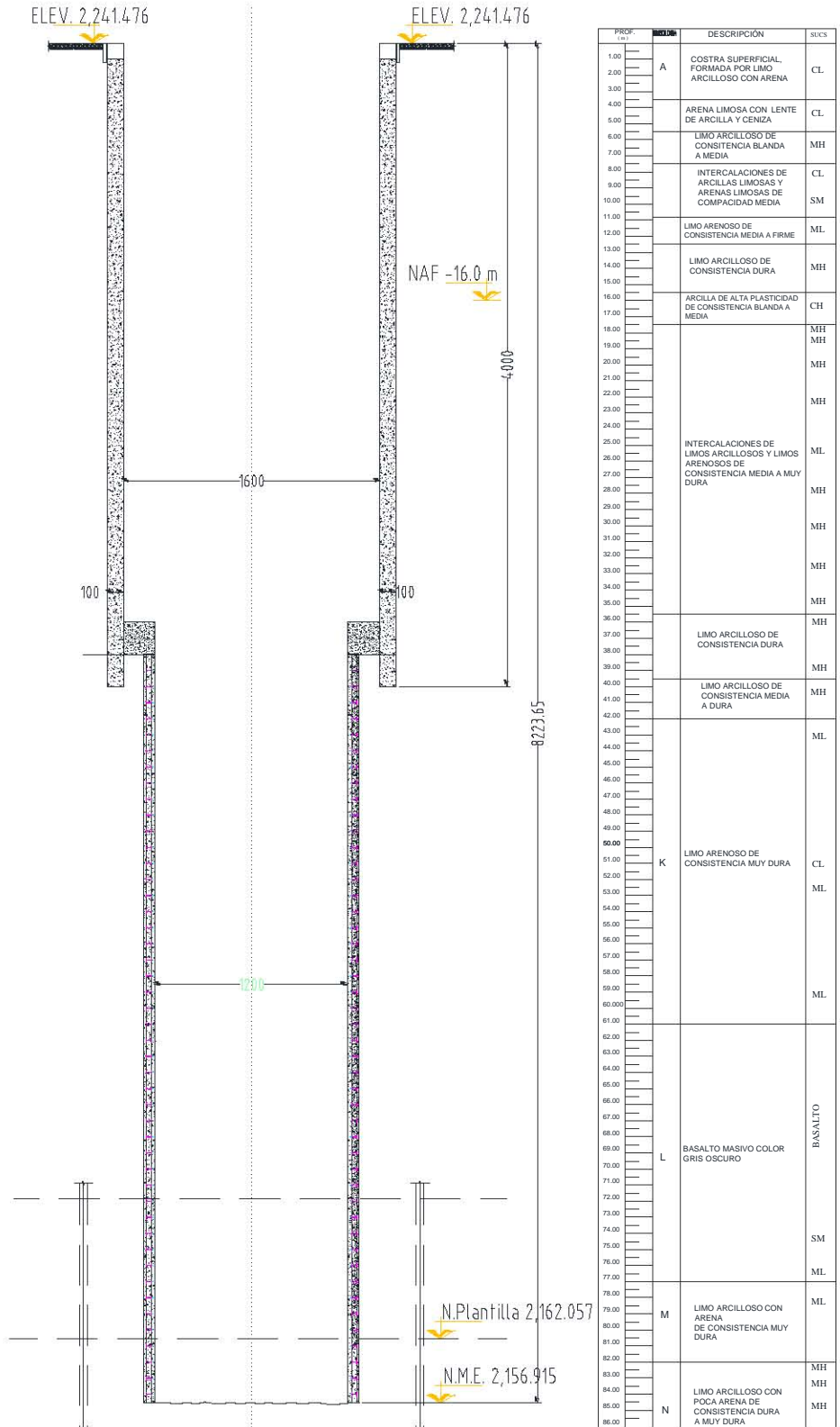


Figura 30. Esquema estratigráfico de la lumbreira L11.

III.1.3 Lumbreira L12.

La lumbreira L12 se localiza en el cadenamamiento 27+603.115 de lo que será el Túnel Emisor Oriente (TEO), tiene un diámetro terminado de 12 metros, con una profundidad de 79.012 metros al nivel de la rasante hidráulica del túnel. En la **Figura 31** se muestra una vista aérea de su ubicación.



Figura 31. Vista aérea de la ubicación de lumbreira L12.

Su secuencia estratigráfica se muestra de manera esquemática en la **Figura 32**.

- A) **Limo arenoso.** Se encuentra una Costra superficial formada por limo arenoso de consistencia dura desde la superficie y hasta los 2.00 metros de profundidad, en donde la prueba de penetración estándar toma un valor promedio de NSPT igual a 15 golpes, con un contenido natural de agua promedio de 40%.
- B) **Limo arcilloso.** Entre 2.00 y 6.20 metros de profundidad se encuentra una capa de limo arcilloso de alta y baja plasticidad de consistencia blanda, con símbolo MH de acuerdo al SUCS, con un valor promedio de NSPT igual a 5 golpes y contenido de agua promedio de 110%.
- C) **Limo arenoso.** De 6.20 a 11.20 metros se encuentra un estrato de limo arenoso de baja y alta plasticidad de consistencia dura a muy dura, con símbolo ML de acuerdo al SUCS, con un valor promedio de NSPT igual a 50 golpes y contenido de agua promedio de 50%.
- D) **Arcilla con arena.** De 11.20 a 13.50 metros existe un estrato de arcilla de alta plasticidad con arena, de consistencia blanda a media, con símbolo CH de acuerdo al SUCS, con un valor promedio de NSPT igual a 20 golpes y contenido de agua promedio de 40%.
- E) **Limos y limos arenosos.** Entre 13.50 y 23.20 metros existe un estrato formado por intercalaciones de limos y limos arenosos de consistencia dura

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

a muy dura, con símbolo MH, ML, CH y CL de acuerdo al SUCS, con un valor promedio de NSPT igual a 50 golpes y contenido de agua promedio de 40%.

- F) **Limos y arcillas.** De 23.20 a 31.50 metros existe una capa de limos y arcillas de alta plasticidad de consistencia media a dura, con símbolo CH, SM y MH de acuerdo al SUCS, con un valor promedio de NSPT igual a 20 golpes y contenido de agua promedio de 80%.
- G) **Limos y arcillas.** Entre 31.50 y 41.80 metros se encuentra una capa de limos y arcillas de alta plasticidad de consistencia media a dura, con símbolo MH, CH y CL de acuerdo al SUCS, con un valor promedio de NSPT igual a 25 golpes y contenido de agua promedio de 60%.
- H) **Limo arenoso y arena limosa.** Entre 41.80 y 59.00 metros de profundidad se encuentra un estrato formado por intercalaciones de limo arenoso y arena limosa de consistencia dura a muy dura, con símbolo ML, SM, CL y SC de acuerdo al SUCS, con un valor promedio de NSPT igual a 50 golpes y contenido de agua promedio de 30%.
- I) **Limo y limo arenoso.** De 59.00 a 84.70 metros se encuentra un estrato formado por intercalaciones de limos y limos arenosos de consistencia dura a muy dura, con símbolo CL, MH, ML y SM de acuerdo al SUCS, con un valor promedio de NSPT igual a 50 golpes y contenido de agua promedio de 30%.
- J) **Limo.** Entre 84.70 y 87.20 metros, existe un estrato de limo de alta plasticidad de consistencia media a dura, con símbolo MH de acuerdo al SUCS, con un valor promedio de NSPT igual a 20 golpes y contenido de agua promedio de 80%.
- K) **Limo arenoso y arena limosa.** Entre 87.20 y 92.00 metros de profundidad, existe un estrato formado por intercalaciones de limo arenoso y arena limosa de consistencia dura a muy dura, con símbolo CH y SM de acuerdo al SUCS, con un valor promedio de NSPT igual a 50 golpes y contenido de agua promedio de 40%.
- L) **El nivel de aguas freáticas se encuentra a una profundidad de 12.20 metros** medido a nivel de brocal de lumbrera.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

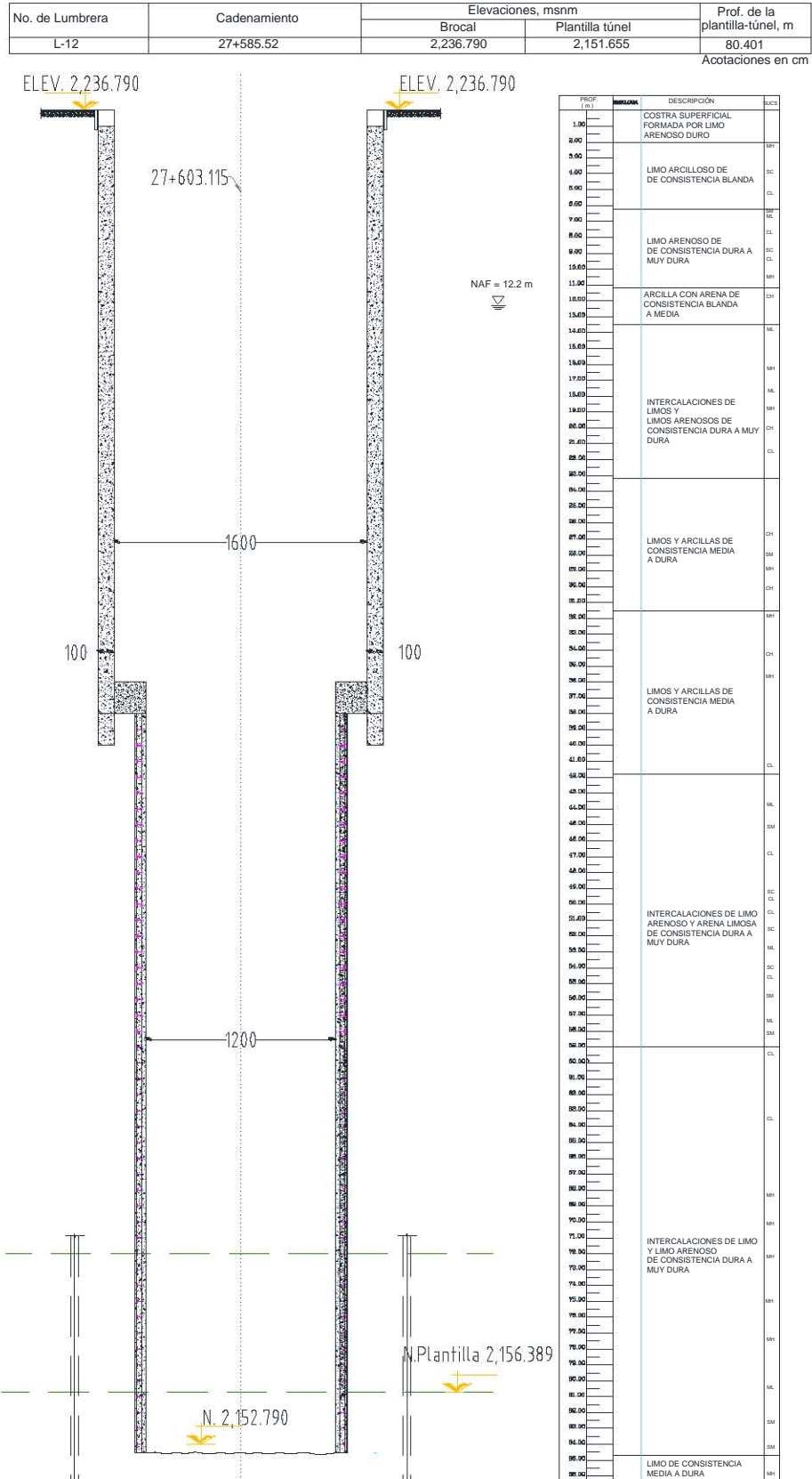


Figura 32. Esquema estratigráfico de la lumbreira L12.

III.1.4 Lumbrera L13.

La lumbrera L13 se localiza en el Cadenamiento. 30+793.443 de lo que será el Túnel Emisor Oriente (TEO), tiene un diámetro terminado de 16 metros. La **Figura 33** muestra una vista aérea de la ubicación de lumbrera.



Figura 33. Vista aérea de la ubicación de lumbrera L13

Su secuencia estratigráfica se muestra de manera esquemática en la **Figura 34**.

- A) **Arcillas superficiales.** De 0.00 a 4.60 metros; se trata de arcillas de alta plasticidad y arcillas arenosas de mediana plasticidad, de símbolos CH y CL respectivamente de acuerdo con el SUCS, de consistencia blanda a media, en la que la prueba de penetración estándar toma valores promedio de NSPT entre 5 y 22 golpes, con un contenido natural de agua entre 30 y 150 %.
- B) **Intercalaciones de limos y arenas limosas.** De 4.60 a 16.35 metros; son limos de alta plasticidad, en algunos casos con poca arena, de símbolo MH intercalados con arenas limosas de símbolo SM de acuerdo con el SUCS, en conjunto de compacidad media a muy compactos, con valores de NSPT entre 15 y 50 golpes para 15 centímetros en promedio de hincado del penetrómetro y un contenido natural de agua en promedio de 30%.
- C) **Limo arenoso.** De 16.35 a 22.10 metros; se encuentran limos de alta plasticidad, MH de acuerdo con el SUCS, de consistencia dura a muy dura, con NSPT de 15 a 43 golpes y contenido natural de agua promedio de 45 %.

- D) **Limos interestratificados con arenas limosas.** De 22.10 a 31.30 metros; limos de alta plasticidad de símbolo MH de acuerdo con el SUCS, de consistencia dura a muy dura, interestratificados con arenas limosas, en conjunto registran NSPT de 15 a 50 golpes y contenido natural de agua promedio de 50 %.
- E) **Limos.** De 31.30 a 37.55 metros; son limos de alta plasticidad, consistencia dura a muy a dura, MH de acuerdo con el SUCS, en donde el valor de NSPT fue entre 15 y 32 golpes y el contenido natural de agua en promedio de 50 %.
- F) **Intercalaciones de limos arenosos y arenas limosas y arcillosas.** De 37.55 metros hasta el final de la profundidad explorada, a 99.75 metros existen limos arenosos y arenas limosas y arcillosas, en general de consistencia muy dura y compacidad densa:
- F1) **Limo arenoso.** Estrato de 6.55 metros de espesor, desde 37.55 hasta 44.10 metros de profundidad, de limo de baja plasticidad, ML, con intercalaciones de arenas limosas y limos, de consistencia muy dura, con NSPT de 40 hasta 50 golpes para 14.00 centímetros en promedio de hincado del penetrómetro y contenido natural de agua alrededor de 30 % en promedio.
- F2) **Arcillas arenosas interestratificadas con arenas arcillosas.** Con 8.20 metros de espesor, de 44.10 a 52.30 metros de profundidad; es una arcilla arenosa de consistencia muy dura y en ocasiones arena arcillosa de compacidad media a densa donde el valor de NSPT varía de 21 a 50 golpes para 11 centímetros en promedio de hincado del penetrómetro y contenido de agua promedio de 30%.
- F3) **Limos y arcillas interestratificados con arenas.** Estrato de 10.85 metros de espesor, de 52.30 a 63.15 metros de profundidad, de limos y arcillas interestratificadas con arena, de símbolos ML y CL, de consistencia muy dura, con NSPT de 27 a 77 golpes y en muchas muestras con menos de 30.00 centímetros de hincado del penetrómetro; su contenido natural de agua se ubica en promedio en 35 %.
- F4) **Arena limosa.** Con 6.35 metros de espesor, de 63.15 a 69.50 metros de profundidad; es una arena limosa, SM, de compacidad media a muy densa donde el valor de NSPT varía de 34 golpes hasta más de 50 para sólo 10.00 centímetros de hincado del penetrómetro, en tanto que el contenido de agua es en promedio de 40 %.
- F5) **Limos arenosos interestratificados con arena.** Estrato de 11.7 metros de espesor, desde 69.50 hasta 81.20 metros de profundidad, de limo arenoso interestratificado con arena, de símbolo ML, de compacidad media a muy densa, con NSPT desde 50 golpes hasta más de 50 para sólo 5 centímetros en promedio de hincado del penetrómetro y contenido natural de agua alrededor de 50 % en promedio.
- F6) **Limos y arcillas orgánicos.** Estrato de 10.85 metros de espesor, de 81.20 a 92.90 metros de profundidad, de limos y arcillas de alta plasticidad, con contenido moderado de materia orgánica, de símbolos MH y CH, de

consistencia muy dura, con NSPT de 40 a 71 golpes; su contenido natural de agua varía entre 50 y 200 %.

F7) **Arenas limosas interestratificadas con limos.** De 92.90 a 99.75 metros; arenas limosas muy compactas de símbolo SM, interestratificadas con limos de baja plasticidad de símbolo ML de acuerdo con el SUCS, de consistencia dura a muy dura, en conjunto registran NSPT de 52 a 78 golpes y contenido natural de agua promedio de 30%.

G) **El nivel de aguas freáticas se encuentra a una profundidad de 18.80 metros** medido a nivel de brocal de lumbrera.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

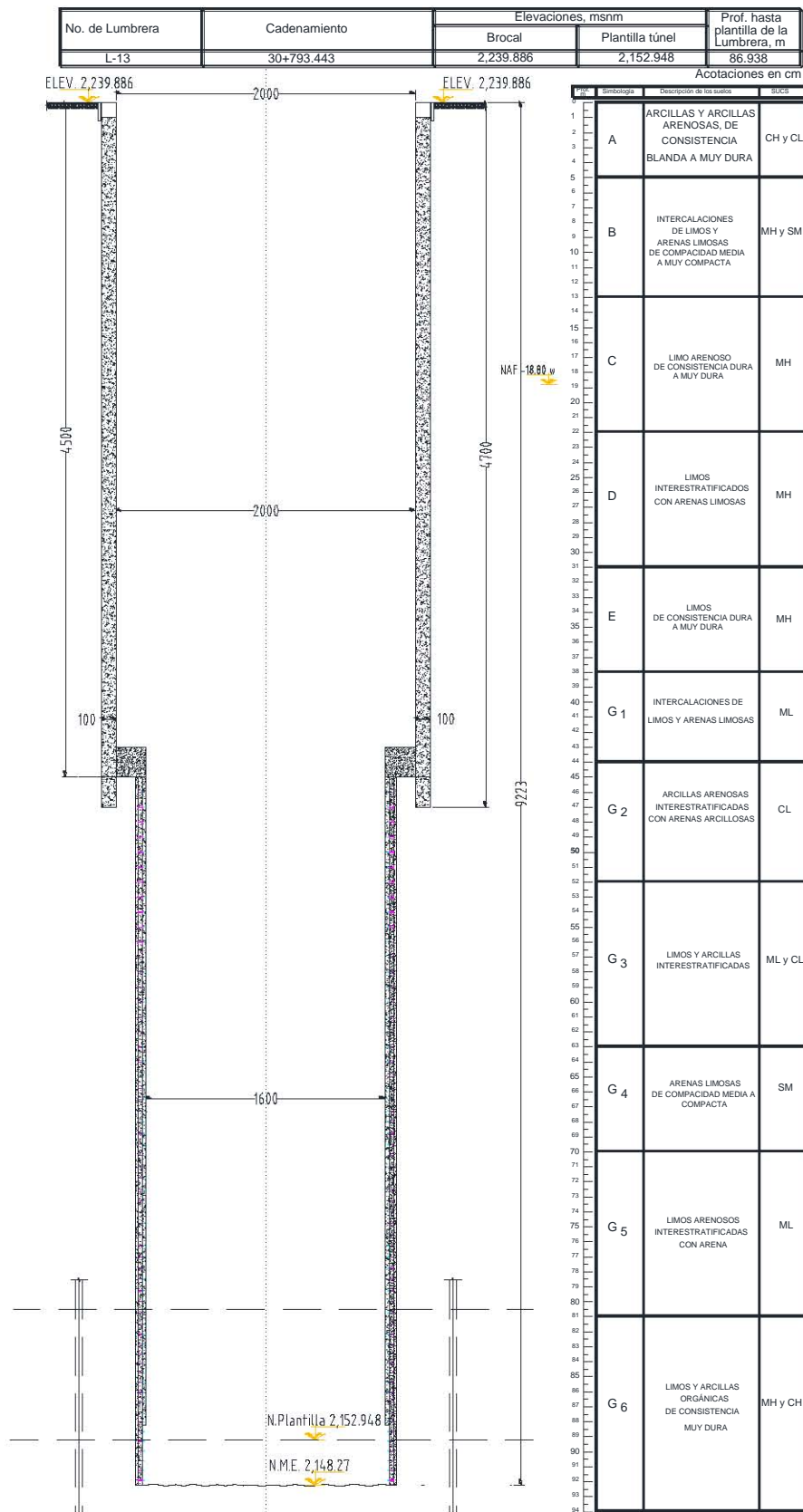


Figura 34. Esquema estratigráfico de la lumbreira L13.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

III.1.5 Procedimiento constructivo de las lumbreras.

Las cuatro lumbreras que constituyen el Tramo 3 del TEO, se construyeron mediante la combinación de dos métodos; el método del Muro Milán como primera etapa y el método convencional como segunda etapa, dando como resultado un método mixto.

Como se observa en la **Figura 35**, la primera etapa de construcción se realizó a base de Muro Milán de 1.0 metro de espesor y 47 metros de profundidad (Para el caso particular de la lumbrera L10). Para la segunda etapa se realizó la construcción de muro primario de concreto lanzado estructural con marcos metálicos horizontales de 45 centímetros de espesor y un muro secundario colado en sitio de 25 centímetros, llegando hasta la profundidad de 77 metros.

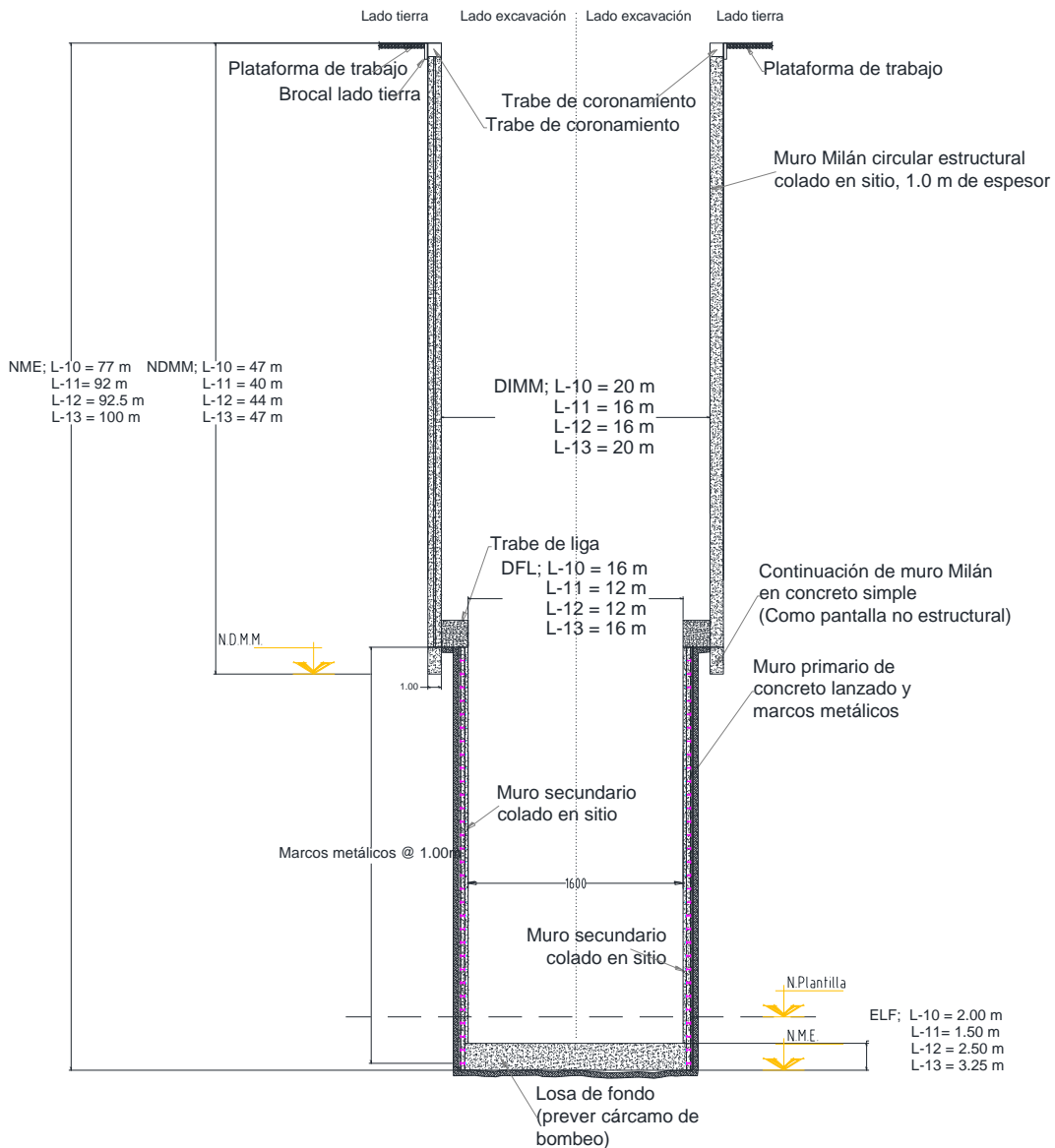


Figura 35. Profundidades del muro Milán, muro primario y muro secundario de lumbreras del tramo 3.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

El proceso constructivo de la primera etapa se conforma por:

Construcción de brocales. El objetivo de los brocales es referenciar la posterior construcción del muro Milán y se definen como muros de concreto reforzado de una excavación en zanja. Para el caso de las lumbreras del tramo 3; su espesor fue de aproximadamente 20 centímetros. La excavación se realiza con un equipo retroexcavadora con la capacidad de realizar una zanja de 12 centímetros de ancho por 120 centímetros de profundidad y a lo largo del perímetro de toda la lumbrera, se realiza el habilitado del acero de refuerzo mediante la colocación de varilla corrugada de $f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$ y siguiendo la secuencia de armado como lo indica el proyecto, se realiza la colocación de la cimbra respetando las tolerancias en vertical de 0.2% para finalmente realizar la colocación de concreto de un $f'c = 250 \text{ kg/cm}^2$. Sus características se observan de manera esquemática en la **Figura 36** y el plano mostrado en la **Figura 37** es un ejemplo de los brocales realizados en la lumbrera L10.

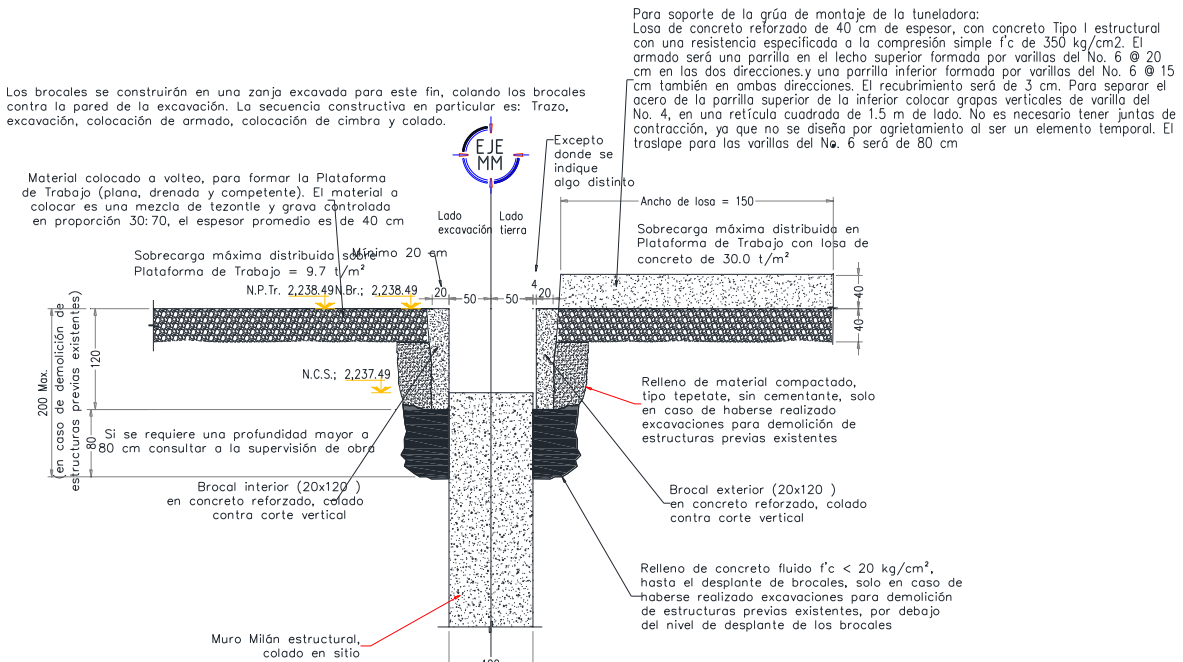


Figura 36. Características de los brocales realizados en la lumbrera L10.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

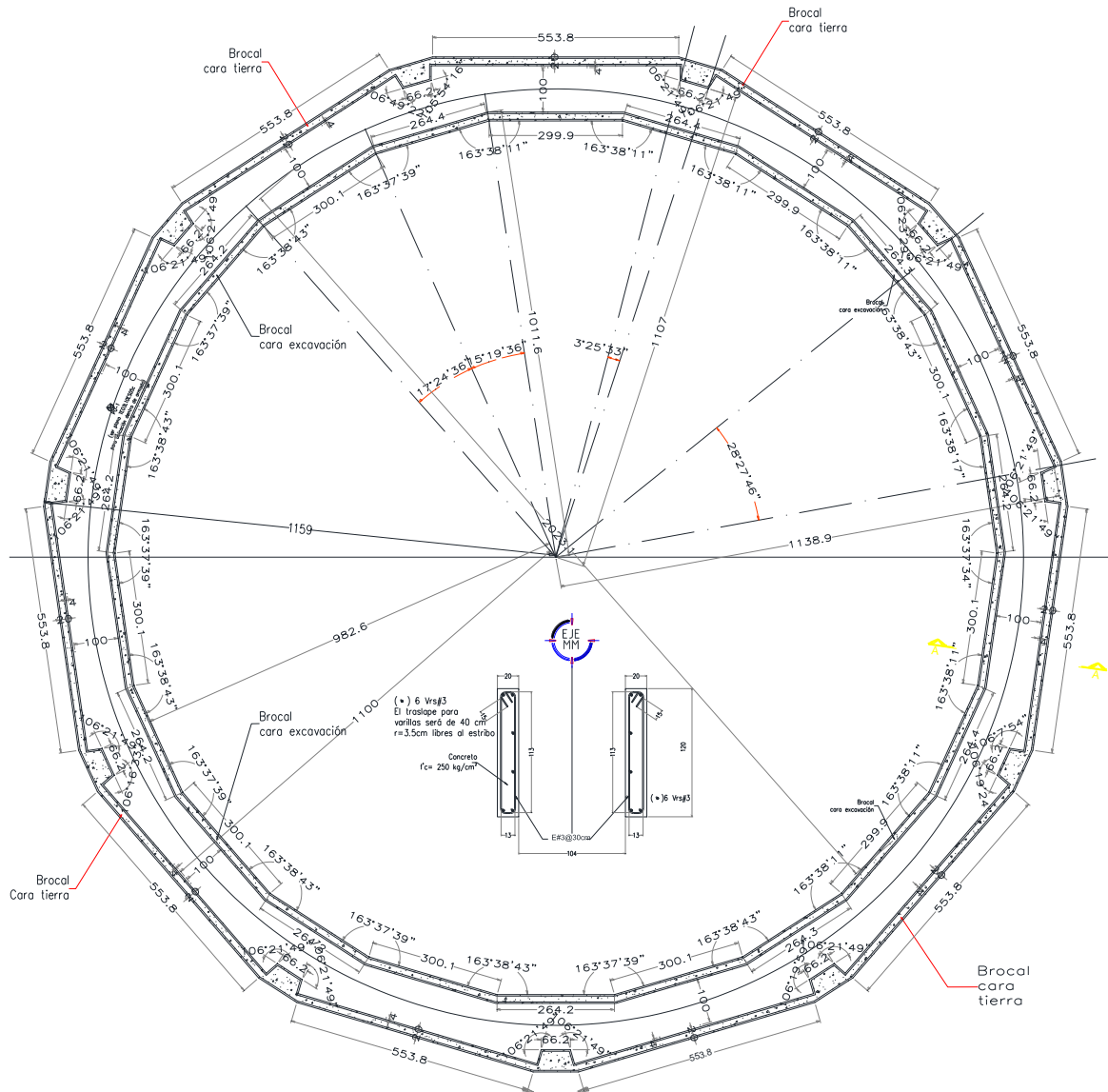


Figura 37. Geometría de brocales realizados en la lumbrera L10.

Construcción de muro Milán El objetivo del muro Milán de las lumbreras del tramo 3; es servir como soporte definitivo en su primera etapa de construcción, por lo cual debía de ser del tipo estructural. El espesor del muro Milán es un metro y se desplanta a una profundidad promedio de 45 metros, teniendo una desviación máxima con la vertical del 0.5%. La excavación se realiza mediante secciones denominados “paneles” referenciados y divididos como se muestran en la **Figura 38**. Existen tres tipos de paneles según la secuencia de trabajo: Primario (panel aislado e inicio de secuencia); Secundario (panel realizado entre dos paneles primarios) y Mixto (panel con una sola extremidad adyacente a otro panel). La perforación de cada panel se lleva a cabo mediante un equipo hidráulico de tipo Baya que presenta la particularidad de tener una almeja guiada por medio de un Kelly sobre los primeros metros de perforación, luego de trabajar en forma de péndulo siendo suspendida con cables, este equipo se apoya con una planta de

inyección de lodo bentónico como el mostrado en la **Figura 39**. La secuencia de perforación se realiza dejando un merlón; esta secuencia permite garantizar la verticalidad del muro pues las dos primeras pilas se realizan en terreno natural lo que permite bajar sin mayor desviación, por lo que cuando se perfora el merlón la almeja se encuentra guiada por las dos perforaciones iniciales. El lodo bentónico utilizado sirve para mantener estables las paredes de la excavación hasta terminar el colado del concreto, se fabrica en la obra a base de agua y bentonita, una parte del lodo se recupera y se recicla en obra, el sobrante se lleva a tiraderos por medio de camión cisternas y su dosificación se considera de 30 a 70 kg/m^3 , con el fin de llegar a una viscosidad Marsh de 33 a 40 segundos, el rendimiento promedio de la excavación varía dependiendo del equipo y el operador. El producto de la excavación es cargado en camiones para ser enviado al tiro previamente autorizado. El desarenado y limpieza de los paneles consiste en un primer tiempo en limpiar con el equipo de perforación el fondo de un panel con el propósito de prepararlo para el colado. Después de la limpieza y antes del colado, se realiza la colocación de juntas planas; que son elementos metálicos rígidos que sirven de cimbra de extremidad en las caras de paneles colados en terreno natural (primarios o mixtos), y que permiten asegurar la estanqueidad entre dos paneles. Un ejemplo de este tipo de junta es la junta plástica Water-Stop que se coloca de forma manual, insertando la mitad de la misma en la ranura dispuesta para tal fin en la junta plana. La junta se coloca en una sola parte en las extremidades del panel inmediatamente después de la operación de desarenación, se baja por medio de una grúa y se mantiene suspendida en los brocales. Su posición está definida con tolerancia de ± 5.0 centímetros por la marca de extremidad de panel sobre el brocal. El acero de refuerzo es habilitado en obra según las especificaciones de los planos de construcción, un ejemplo del acero habilitado se muestra en la **Figura 40** y **41**. Se habilita mediante armaduras que se bajan en dos o tres partes y se quedan suspendidas en los brocales. La resistencia del concreto utilizado es de $f'c = 350 kg/cm^2$, autocompactable, con un revenimiento de 18 a 20 centímetros y elaborado con cemento CPC 40RS. Para su colocación se utilizan dos tubos Tremie que bajan hasta el fondo de la excavación, por cada panel de longitud superior a 4.0 metros. El tubo Tremie está constituido de elementos de 1.0 a 12 metros que permiten cortarlo cuando el concreto sube en la perforación. La secuencia de colado se realiza siguiendo la excavación de los paneles. Dentro del muro Milán, se dejan tubos de reservación para la realización de pruebas de integridad tipo sónico, 6 tubos en tres paneles diferentes así mismo dejan reservaciones para la posterior instalación de 4 inclinómetros con el objetivo de medir las deformaciones del suelo.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

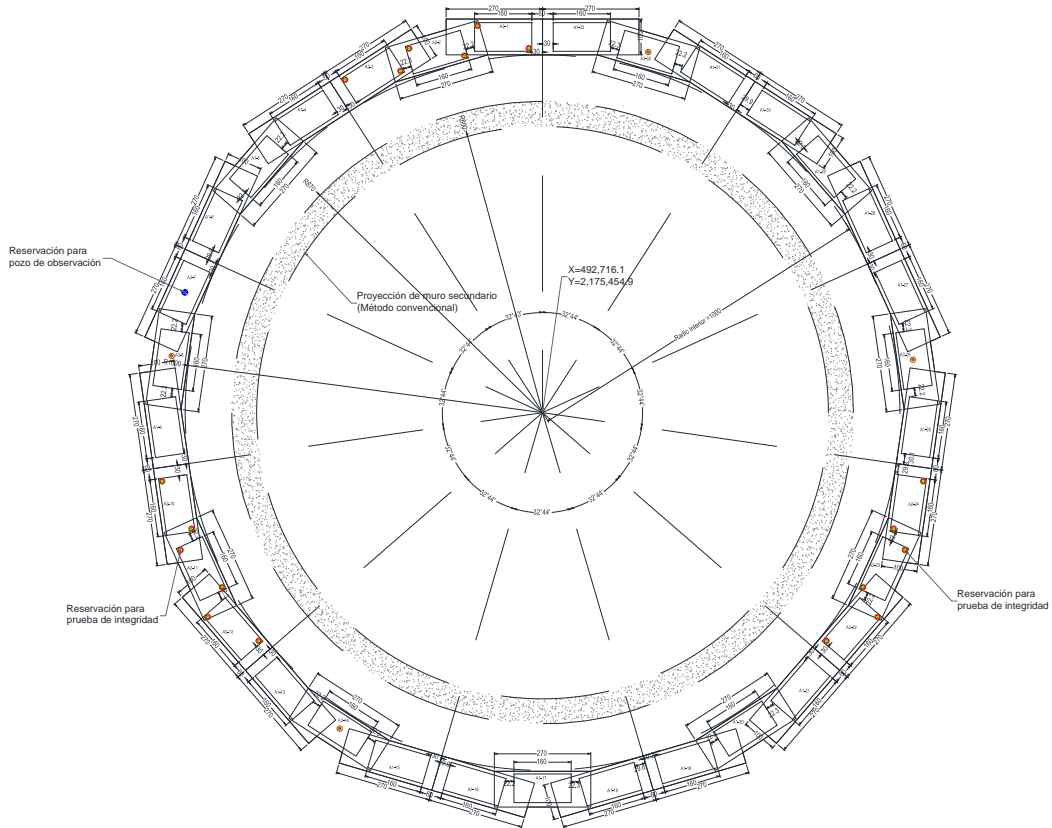


Figura 38. Paneles del muro Milán.



Figura 39. Excavación de muro Milán y acarreo de material.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

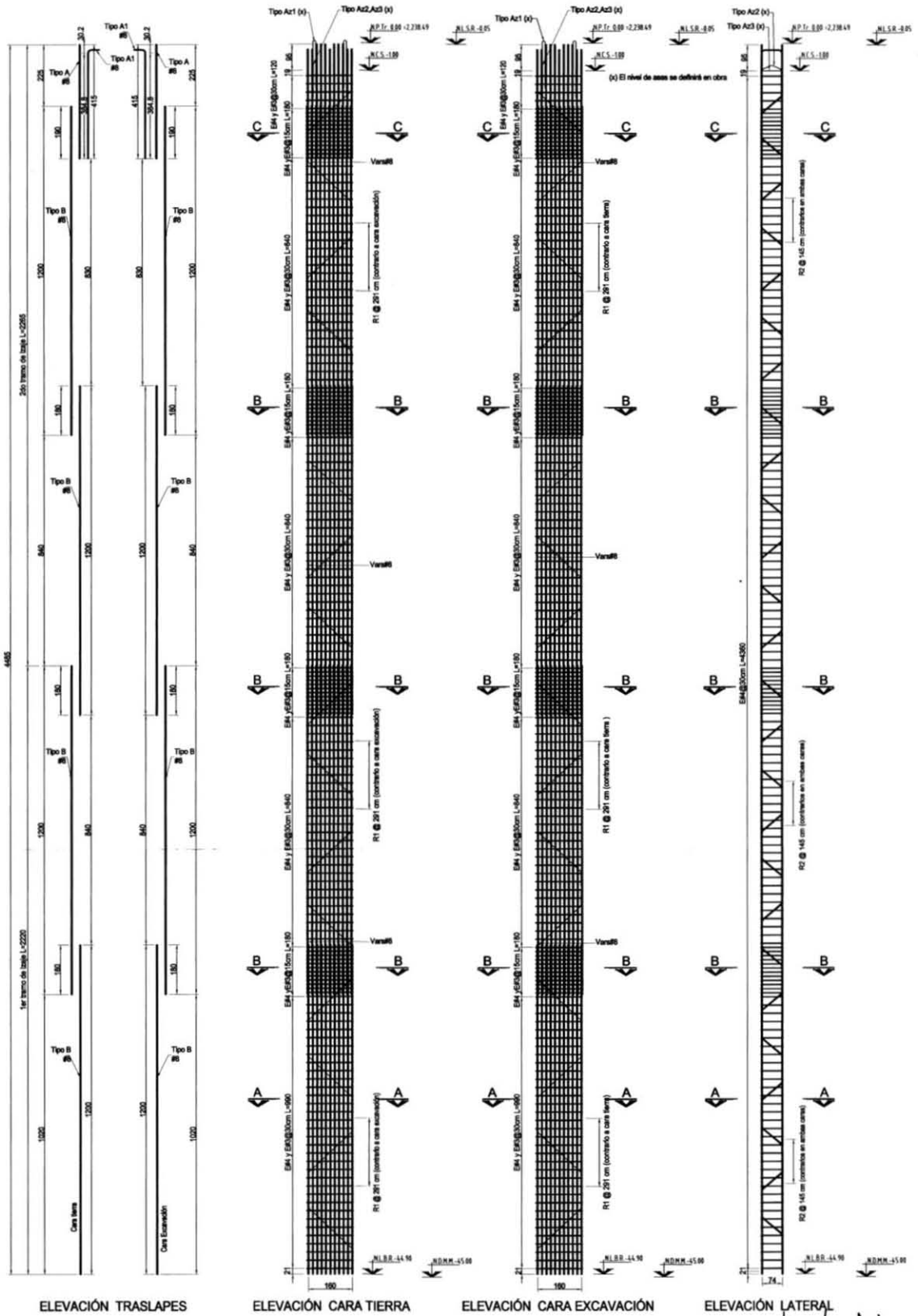


Figura 40. Acero de refuerzo utilizado para los paneles del muro Millán.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

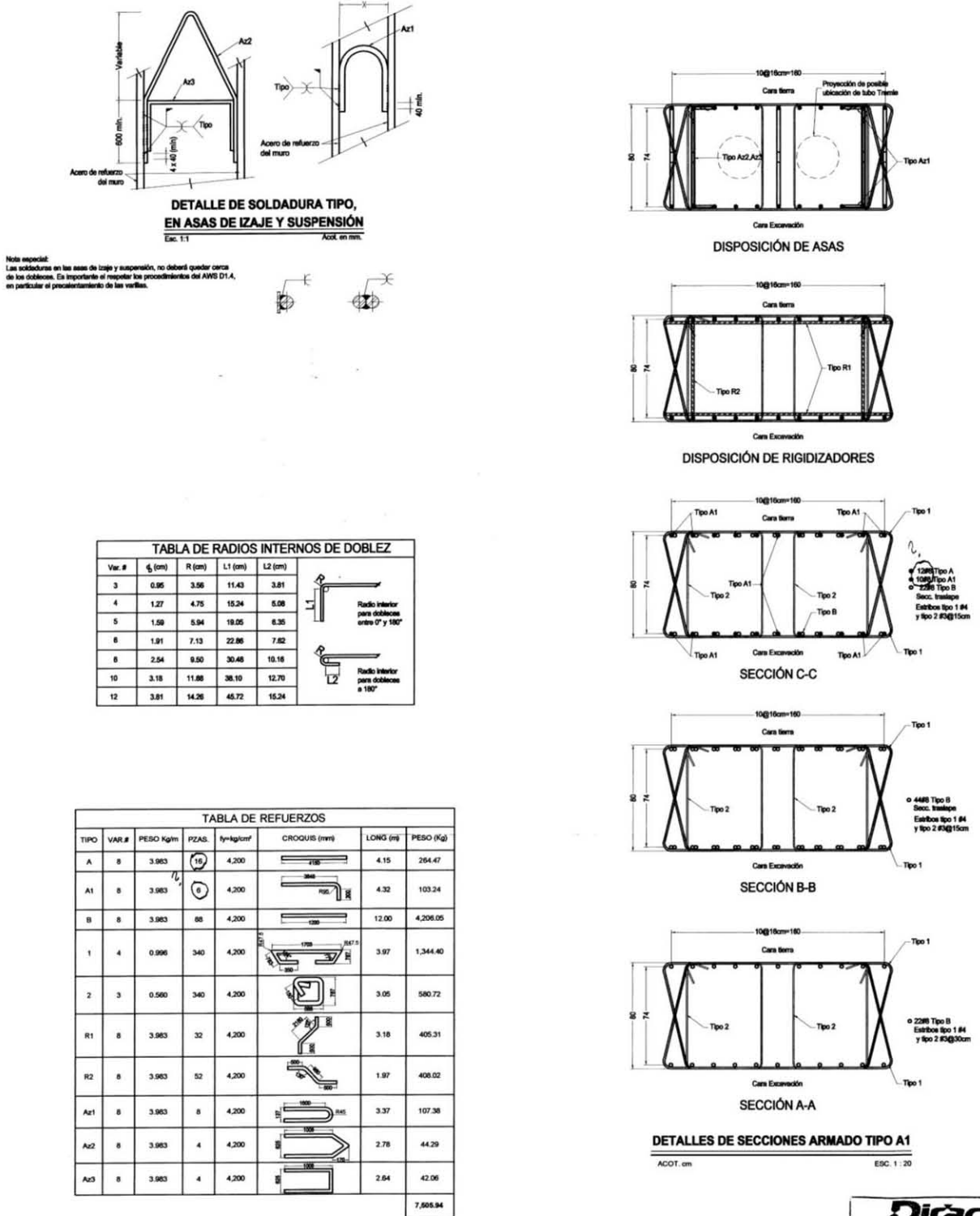


Figura 41. Acero de refuerzo utilizado para los paneles del muro Millán.

Construcción del sistema de bombeo. Teniendo en cuenta que es necesario liberar la presión de agua en los materiales permeables y reducir las filtraciones de agua al interior de la perforación de los paneles del muro Millán, es necesario

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

construir un sistema de bombeo formado por pozos profundos tipo zanja controlado de forma automatizada con electro niveles. Los pozos consisten en zanjas de 2.7 x 0.6 metros, hasta una profundidad mayor de la excavación de la lumbrera, equipados con tubo metálico ranurado, rodeado por grava, como material de filtro, los pozos fueron cementados con relleno fluido. El bombeo profundo se complementa con bombeo de achique en el interior de la excavación. Cabe mencionar que para dar seguimiento al abatimiento del agua en el interior es necesario la construcción de un pozo de observación. Una manera esquemática de representar el sistema de bombeo para la construcción de la lumbrera L10 se observa en la **Figura 42 y 43**.

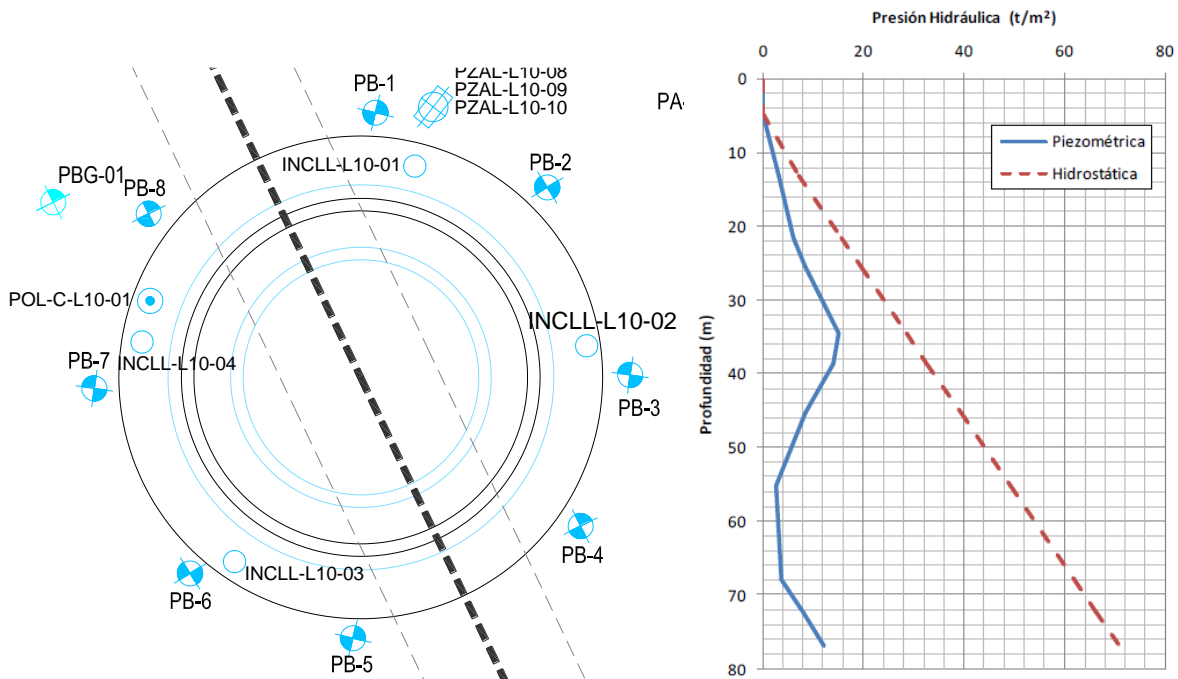


Figura 42. Sistema de bombeo utilizado para la construcción de la lumbrera L10.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

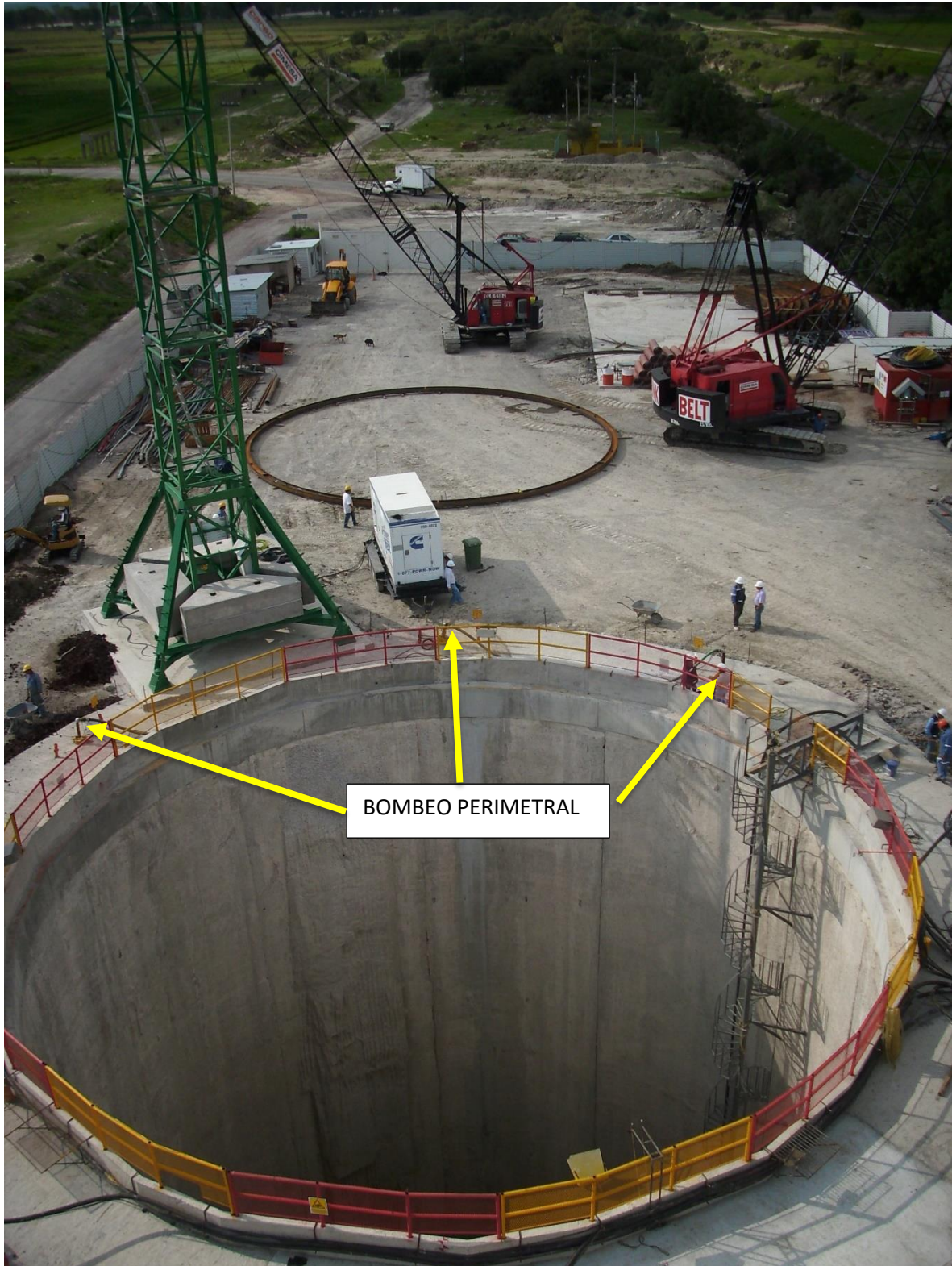


Figura 43. Sistema de bombeo perimetral de una lumbrera.

Construcción de trabe de coronamiento. El objetivo de la trabe de coronamiento es ligar estructuralmente los paneles de muro Milán, y es construida

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

a base de concreto reforzado de $f'c = 350 \text{ kg/cm}^2$ elaborado con cemento CPC40RS y acero estructural de $f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$, de manera general se muestra un ejemplo a detalle de construcción de la trabe de coronamiento de una lumbrera en la **Figura 44**.

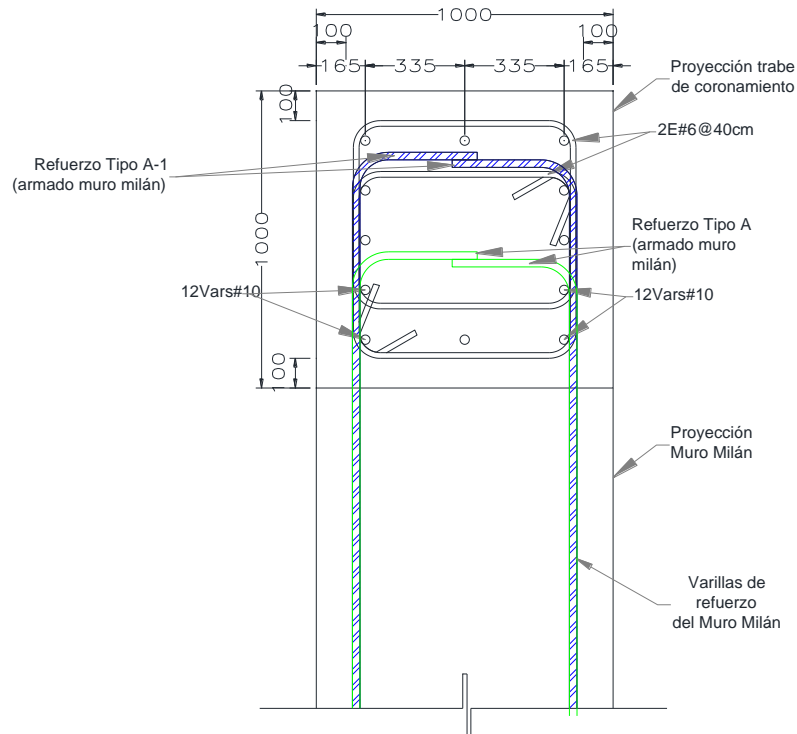


Figura 44. Detalle de construcción de la trabe de coronamiento.

Excavación de núcleo central a cielo abierto. Una vez finalizada la construcción de la trabe de coronamiento, es necesario realizar la excavación del núcleo a cielo abierto, hasta la profundidad de desplante del muro Milán estructural. La excavación del núcleo central se realiza mediante una Excavadora tipo CAT 312 o equivalente y rezagando el material excavado con Grúas tipo Linkbelt 318 o equivalente, equipadas con almeja de al menos 1.5 m^3 de capacidad, como se observa en la **Figura 45, 46 y 47**. El material producto de la excavación es dispuesto en una zona previamente autorizada, mediante el acarreo con camiones de carga.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

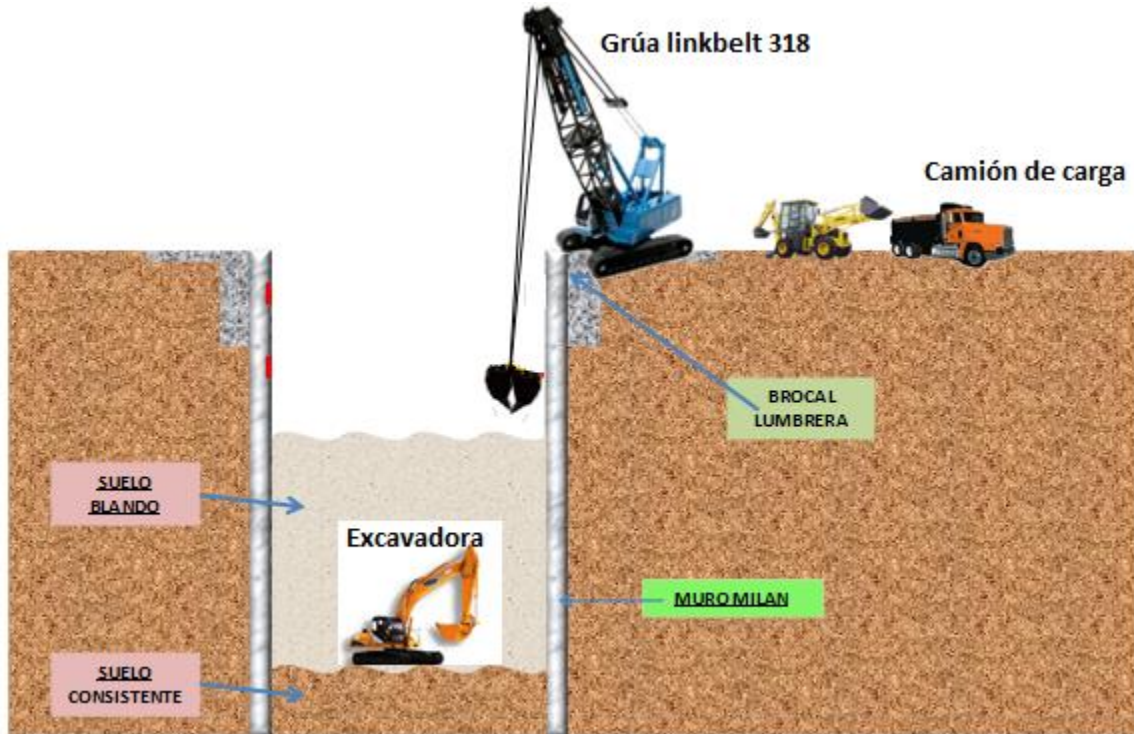


Figura 45. Esquema de excavación de núcleo de muro Millán.



Figura 46. Excavación de núcleo central del muro Millán.



Figura 47. Acarreo de material producto de la excavación de núcleo de muro Millán con camión de carga.

El proceso constructivo de la segunda etapa se conforma por:

Construcción de muro primario. Al llegar a la excavación del núcleo central al nivel de desplante del muro Millán realizada en la primera etapa, se inicia la construcción del muro primario por el método convencional. La excavación se realiza por frentes de hasta 2.0 metros de altura, mediante una Excavadora tipo CAT 312 o equivalente y rezagando el material excavado con Grúas tipo Linkbelt 318 o equivalente, equipadas con almeja de al menos 1.5 m³ de capacidad, este proceso se muestra esquemáticamente en la **Figura 48** y **Figura 49**. Se realiza la colocación de concreto lanzado (aproximadamente de 15 centímetros), reforzado con fibras metálicas tipo Dramix ZP305 (40 kg/m³ y 70 kg/m³), para proteger de inmediato la cara del corte y preparar la superficie para asentar los marcos metálicos horizontales. Se realiza la colocación y fijación de marcos metálicos horizontales a cada 1.0 metros de separación vertical hasta el nivel máximo de excavación como se observa en la **Figura 50**. El patín cara excavación de los marcos debe tener colocados antes de su instalación conectores de cortante (pernos Nelson), ya que este muro de concreto lanzado-marcos metálicos se integra al muro secundario para tener un trabajo estructural conjunto en etapa de servicio, un ejemplo de los marcos colocados se muestra en la **Figura 51**. Un marco metálico nuevo que se coloca se debe suspender a través de varillas verticales soldadas al marco colocado en la etapa anterior. Después de la colocación de los marcos, nuevamente se lanza concreto entre las almas de los perfiles como se observa en **Figura 52**. El concreto será reforzado con fibras

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

metálicas tipo Dramix ZP305. El cemento utilizado es de resistencia rápida. Cada 2.0 metros de excavación vertical, se excava mediante una retroexcavadora una “zanja piloto” de al menos 2.0 metros de profundidad, 4.0 metros de longitud y 0.5 metros de ancho, ubicada preferentemente en el perímetro de la excavación, con el fin de realizar una evaluación del tipo de material que se presenta respecto al que se espera y así poder confirmar las condiciones del suelo.

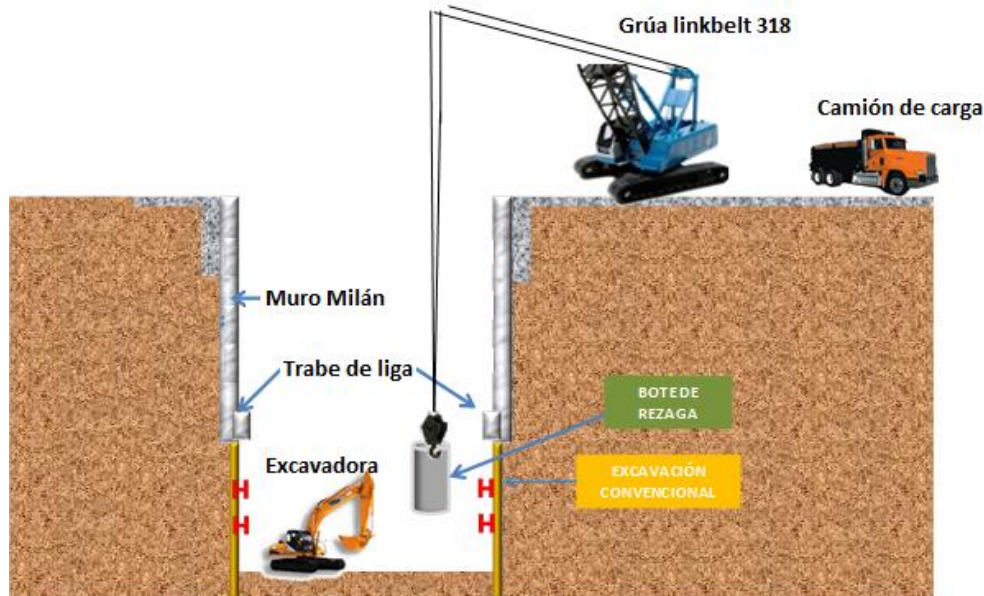


Figura 48. Esquema de excavación de núcleo central en su segunda etapa.



Figura 49. Excavación de núcleo central en su segunda etapa.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO



Figura 50. Colocación de marcos metálicos.

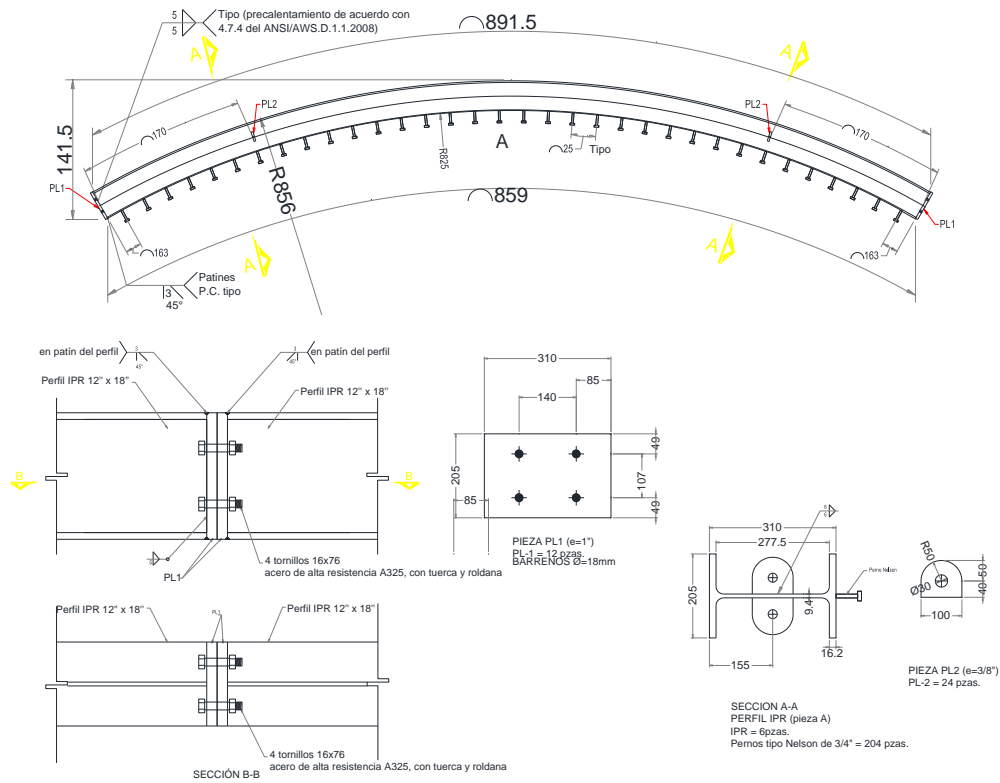


Figura 51. Detalle de marcos metálicos.



Figura 52. Concreto lanzado entre marcos metálicos.

Construcción de trabe de liga. Antes o paralelo a la ejecución de los trabajos de construcción del muro primario por el método convencional (aproximadamente a 1.0 metro de altura), se construye una trabe denominada “trabe de liga” cuyo objetivo es unir los dos tipos de muro “Milán-convencional”, dejando en esta las reservaciones necesarias para integrarla al muro secundario cuando este se construya. Y dejando también en ella las reservaciones para el tratamiento complementario de suelos. Así mismo, se debe dejar embebidas en la trabe de liga, las preparaciones a base de varillas para suspender el primer marco metálico, a base de concreto reforzado de $f'c=350 \text{ kg/cm}^2$ elaborado con cemento CPC40RS y acero estructural de $f_y=4200 \text{ kg/cm}^2$, un ejemplo de detalle de construcción de la trabe de liga se muestra en la **Figura 53**.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

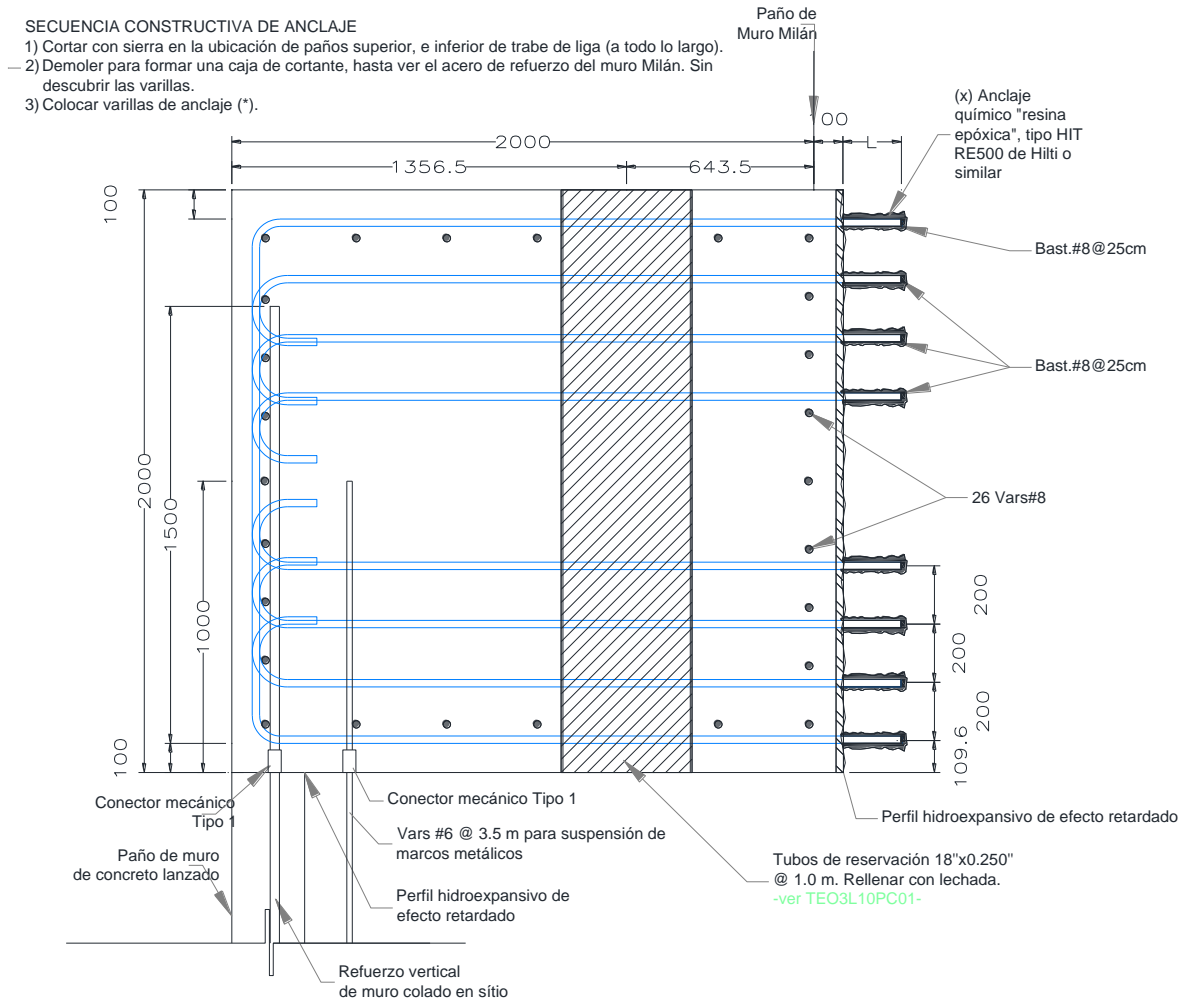


Figura 53. Detalle de construcción de trabe de liga.

Construcción del muro secundario. Llegado al nivel máximo de excavación (NME), se construye el muro secundario de concreto reforzado, el cual se integra al muro de concreto lanzado y marcos metálicos o muro primario, a través de los conectores de cortante (Pernos Nelson) como se muestra en la **Figura 54**. Se debe preverse el ajuste al acero de refuerzo del cuerpo de la lumbrera en la zona de conexión con el túnel, así como la construcción del anillo de emportalamiento como el mostrado en la **Figura 55**; que son elementos nombrados "portal de salida y portal de entrada" para paso de la tuneladora, en el caso de la lumbrera L11, L12 y L13, para el caso de la lumbrera L10, como es una "lumbrera de montaje", se construye una galería. La construcción del muro secundario es con cimbra deslizante. El proceso de construcción de muro secundario consiste en una secuencia de etapas de habilitado de acero de refuerzo de $f_y=4200 \text{ kg/cm}^2$ como se aprecia en la **Figura 56**, colocación de cimbra apreciada en la **Figura 57** y colado con concreto de $f'c=350 \text{ kg/cm}^2$, en forma ascendente desde el fondo de la lumbrera y hasta alcanzar el nivel de la trabe de liga.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

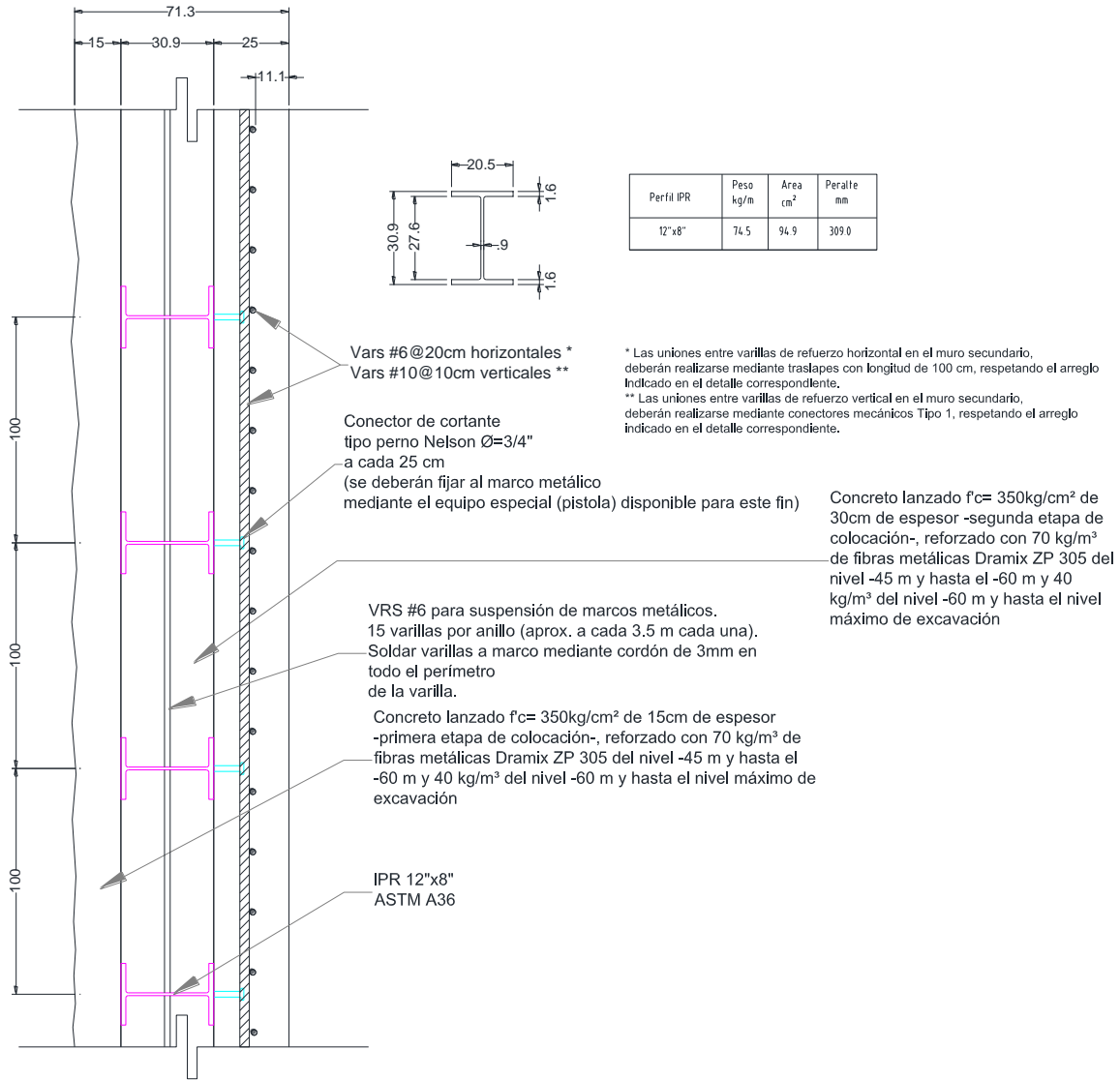


Figura 54. Detalle de armado de muro secundario en lumbrera L10.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

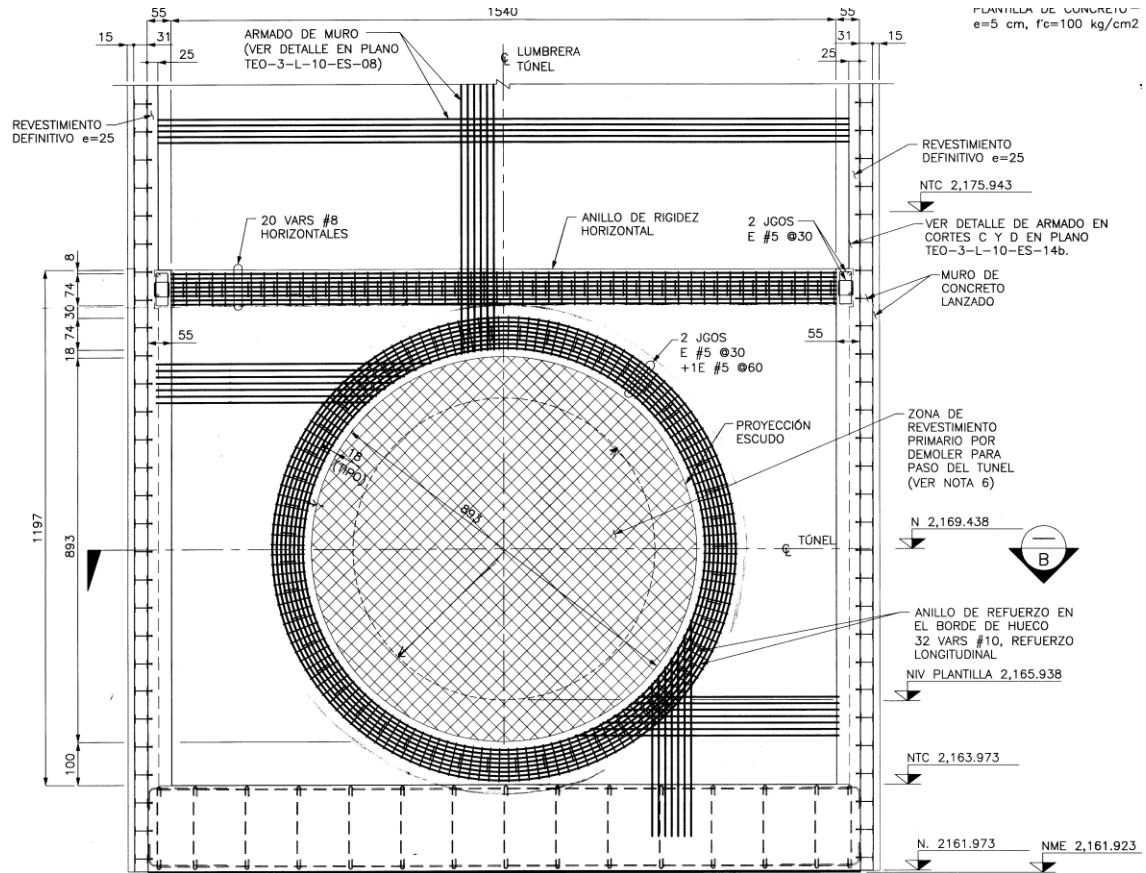


Figura 55. Detalle de empotramiento en lumbrera L10.



Figura 56. Habilitado de acero en muro y portales de la lumbrera.



Figura 57. Cimbra deslizante para colado de muro secundario.

Construcción de losa de fondo. Finalizado el muro secundario se realiza la construcción de la losa de fondo en una sola etapa. El acero de refuerzo se habilita directamente en la ubicación de la losa, empleando varillas verticales (tantas como sean necesarias) para suspender las parrillas superiores en su posición, se debe de seguir el detalle de armado del acero, un ejemplo se muestra en la **Figura 58**. El acero de refuerzo es de $f_y=4200 \text{ kg/cm}^2$ y el concreto de $f'_c=350 \text{ kg/cm}^2$ el cual se coloca en situ con un bacha asignada para esta actividad observada en la **Figura 59**.



Figura 58. Bacha utilizada para colado de losa de fondo.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

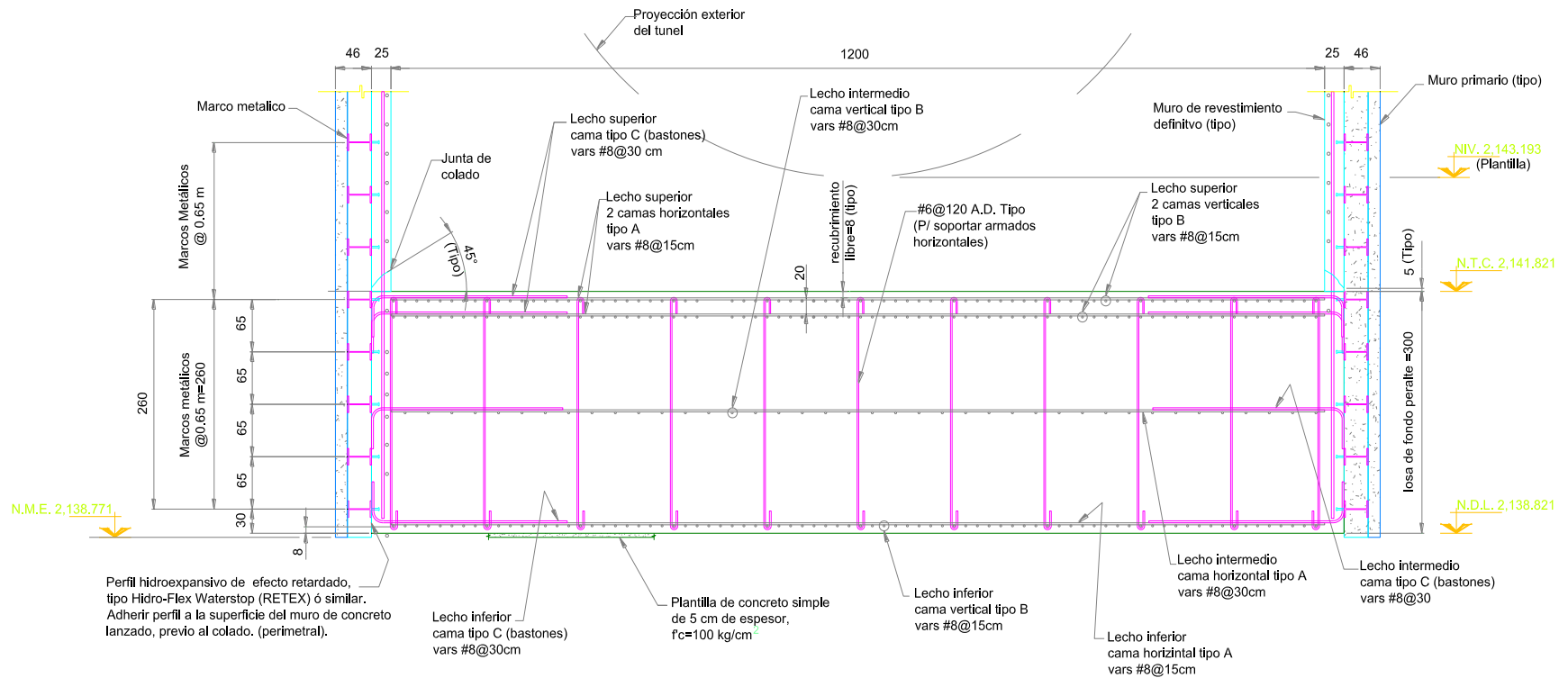


Figura 59. Armado de losa de fondo.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

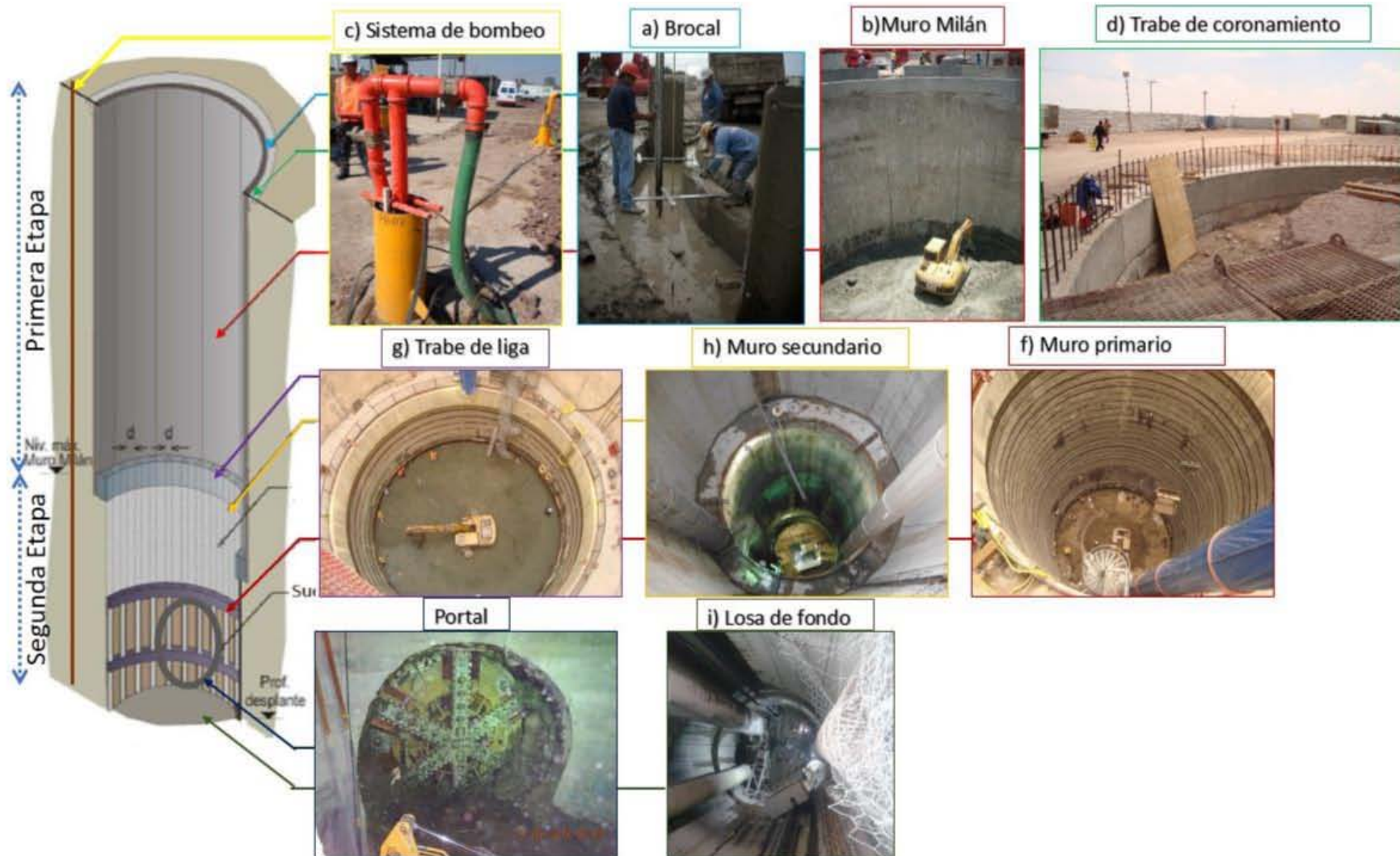


Figura 60. Características constructivas de las lumbreras del tramo 3.

III.2 Galerías de montaje.

Debido a las características de la máquina utilizada (TBM) para la excavación del tramo 3, fue necesaria la construcción de una Galería en la lumbrera L10 (lumbrera de montaje), con el fin de generar el espacio mínimo necesario para instalar el tren completo necesario para que la tuneladora inicie con la excavación, siendo este el escudo y su puente principal en donde se alojan los principales sistemas de operación (Sistema de alimentación eléctrica, hidráulica, de aire, etc.) como se aprecia en la **Figura 61**, así mismo considerando que la instalación de un sistema umbilical complejo es de alto riesgo.

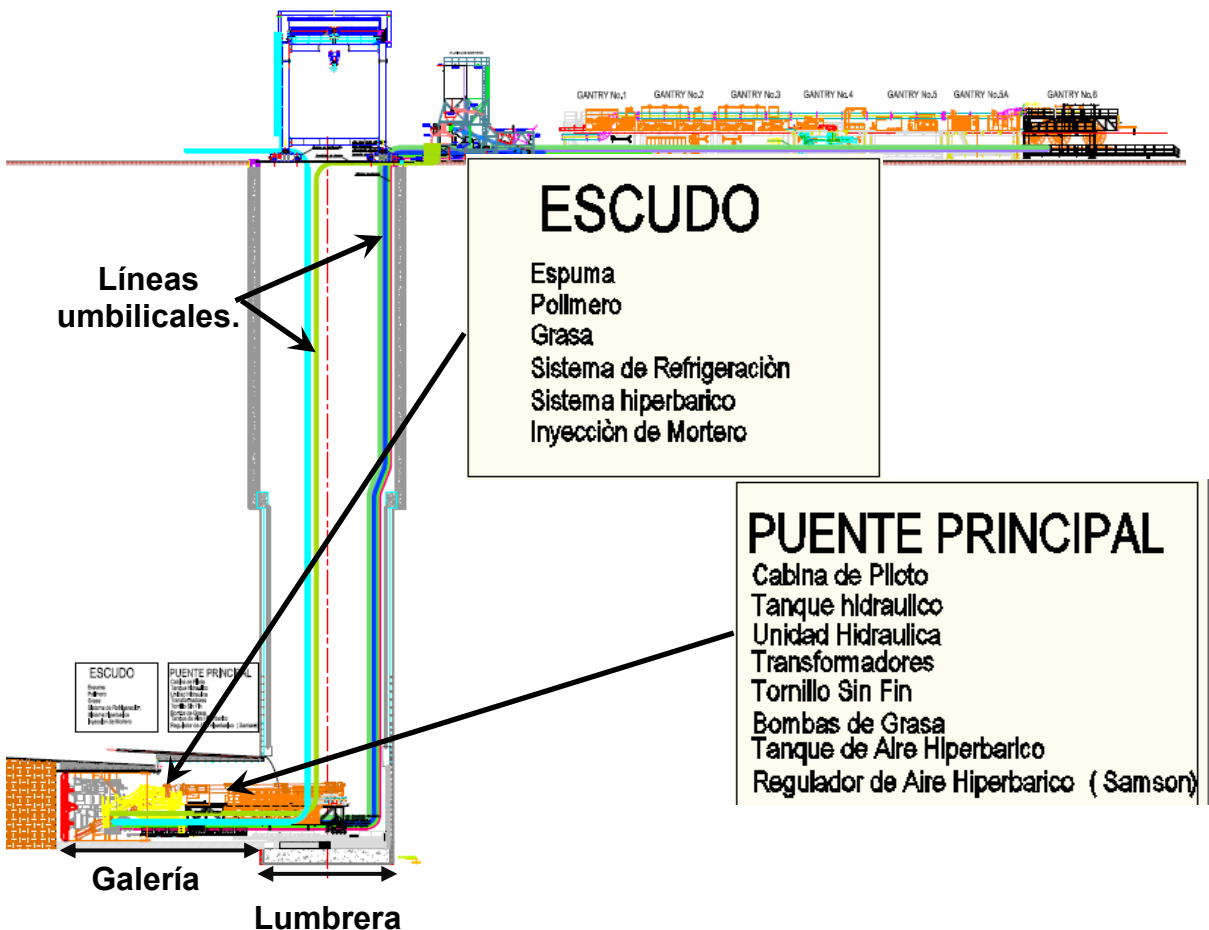


Figura 61. Esquema del sistema umbilical de la TBM.

La construcción de la galería se basó en el método convencional, auxiliado de dos conceptos, el primero un confinamiento previo a la abertura del muro de la lumbrera, con el fin de limitar las deformaciones horizontales del suelo y, por lo tanto, mantener el equilibrio en el mismo, usando un arreglo uniforme de anclas pasivas de fibra de vidrio ubicadas en la zona de las aberturas y el segundo una bóveda paraguas para estabilizar la clave.

III.2.1 Geometría de la Galería

La galería se realizó del tipo herradura y se conformó por dos secciones generales de excavación mostradas en la **Figura 62**, la primera de 14.5 metros de longitud y una altura de 11.25 metros la cual tuvo la función de posicionar en su interior a la tuneladora propiamente y la segunda de 12.5 metros de longitud y una altura de 10.14 metros cuyo objetivo es instalar en su interior la estructura de reacción (estructura con la cual se apoya la TBM para iniciar la excavación) como se observa en la **Figura 63**.

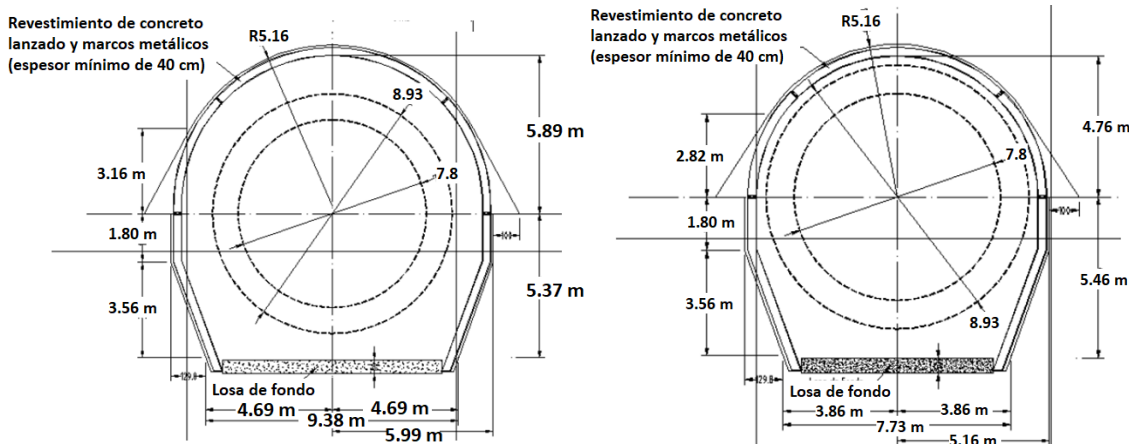


Figura 62. Geometría de la Sección y Sección 2 de la galería respectivamente.

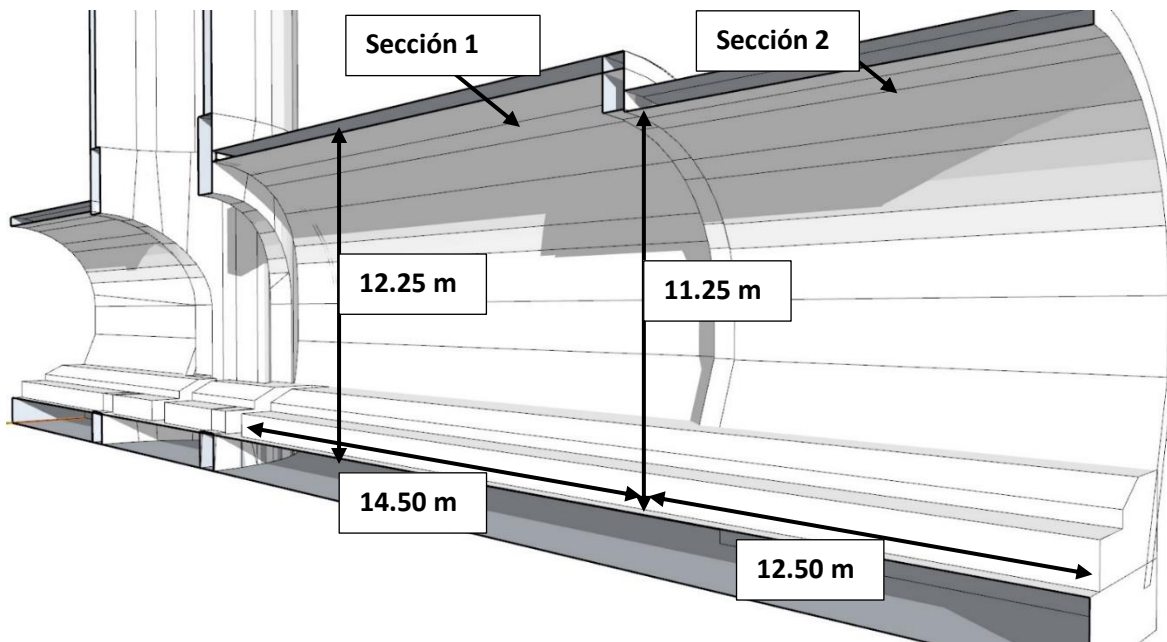


Figura 63. Secciones de la galería.

III.2.2 procedimiento de construcción.

El procedimiento utilizado para la construcción de la galería se subdivide en tres conjuntos de actividades descritas a continuación:

Preconfinamiento. Para iniciar la excavación de la galería de montaje, el muro primario de la lumbrera debió ser demolido, en este caso se retiraron los marcos metálicos como se observa en la **Figura 64**, lo cual genera en la masa de suelo un alivio de esfuerzos por la eliminación del soporte. El suelo expuesto se conoce como frente de excavación. Para garantizar la estabilidad del frente de excavación y reducir los desplazamientos horizontales hacia el interior, previo a la demolición del muro, se instaló un sistema de anclas pasivas en el frente de excavación mostradas en la **Figura 65**. El objetivo de este tipo de mejoramiento de suelo es que, antes de la demolición del muro, se haga un preconfinamiento del frente de excavación y así limitar las deformaciones horizontales y mantener el equilibrio del mismo, garantizando su estabilidad. Este preconfinamiento se basa en darle al suelo un refuerzo interno basado en anclas pasivas cuyo trabajo es a fricción, de la misma magnitud que el esfuerzo horizontal en la masa de suelo generado por la demolición del muro “empuje activo”. De acuerdo con lo anterior, el mejoramiento a base de anclas pasivas debe definirse en función de la capacidad a tensión de las anclas y el arreglo numérico de las mismas, el mejoramiento a base de anclas pasivas beneficiará la estabilidad local del suelo, reduciendo la posibilidad de desprendimientos o fallas locales. Las anclas que se colocaron fueron de fibra de vidrio, colocadas en una perforación llena de lechada, con el fin de no generar una oposición al proceso normal de excavación. El procedimiento constructivo de las anclas consistió, de forma general en barrenación, equipamiento del ancla con la estructura de la misa e inyección de lechada. Con el fin de incrementar la seguridad en la clave del túnel, evitando caídos locales, fue necesario instalar elementos estructurales que existieran antes de iniciar la excavación. Se realizó una bóveda de elementos estructurales, formada por perforaciones longitudinales al trazo del túnel, a todo lo largo de este, perimetrales al diámetro de la sección superior de excavación de la galería, de 15 centímetros de diámetro, separadas entre sí 45 centímetros (centro a centro), equipadas con tubos metálicos de 4” de diámetro, de cédula 40 (acero grado A36), inyectadas con lechada cemento:agua, cuya relación fue 2:1 y un $f'c=100 \text{ kg/cm}^2$ cuidando que las perforaciones tuvieran una inclinación ascendente de 4° con respecto a la horizontal. La perforación se realizó con barras de perforación y brocas perdidas. La secuencia constructiva general fue: perforación, equipamiento e inyección de lechada como se muestra en la **Figura 66**.



Figura 64. Retiro de marcos metálicos del revestimiento primario de la lumbrera para la construcción de la galería.



Figura 65. Anclas pasivas en el frente de excavación.



Figura 66. Bóveda de elementos estructurales a base tubos metálicos de 4”.

Excavación y revestimiento. Siguiendo el perfil estratigráfico de la lumbreira L10 y observando un frente de excavación principalmente formado por limos y arenas, fue necesario resolver la problemática de soportar el techo, los hastiales y el frente de ataque en el periodo de tiempo comprendido entre las operaciones de excavación y las de revestimiento, por lo cual durante la etapa de excavación, se optó por realizarla en dos secciones (Superior e inferior mostradas en la **Figura 67 y 68**), además de que el revestimiento estuviera formado por al menos 40 centímetros de concreto lanzado y con un resistencia de $f'c=350 \text{ kg/cm}^2$, reforzado con 40 kilogramos de fibras metálicas tipo Dramix ZP 305 por metro cúbico, marcos metálicos y rastras de sección IPR de 12"x8" de 74.4 kg/m , acero ASTM Grado 50, separados entre sí a ejes 100 centímetros, ahogados en el concreto lanzado.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

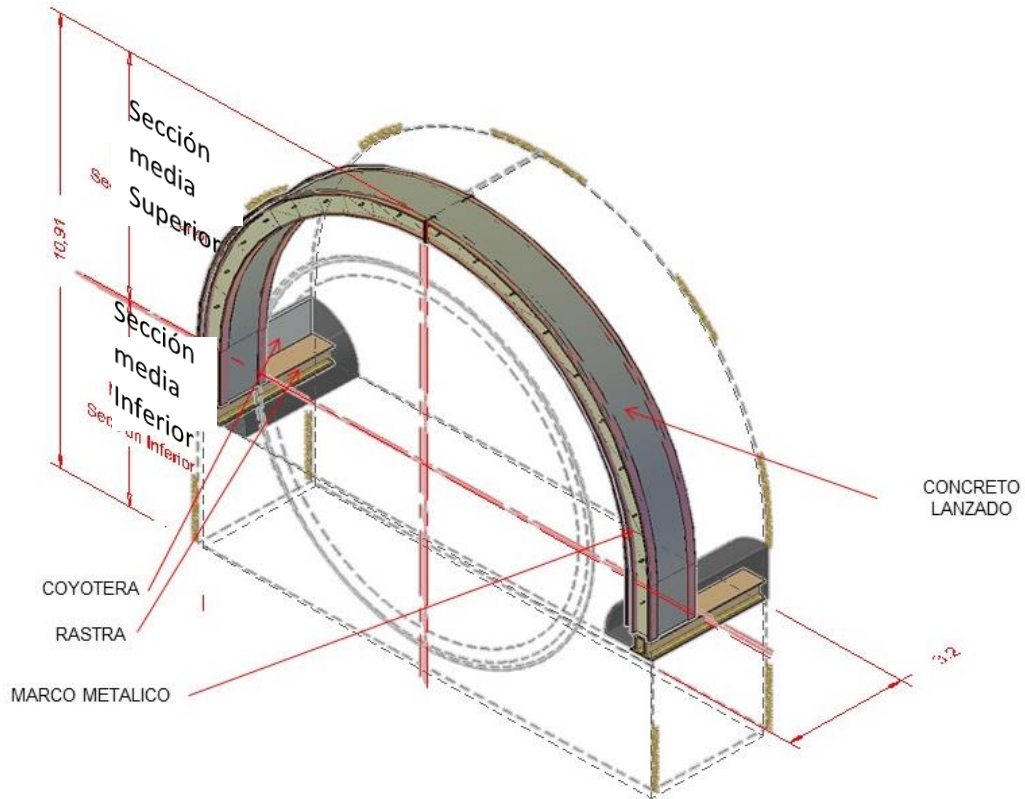


Figura 67. Esquema de la sección media superior de la galería.

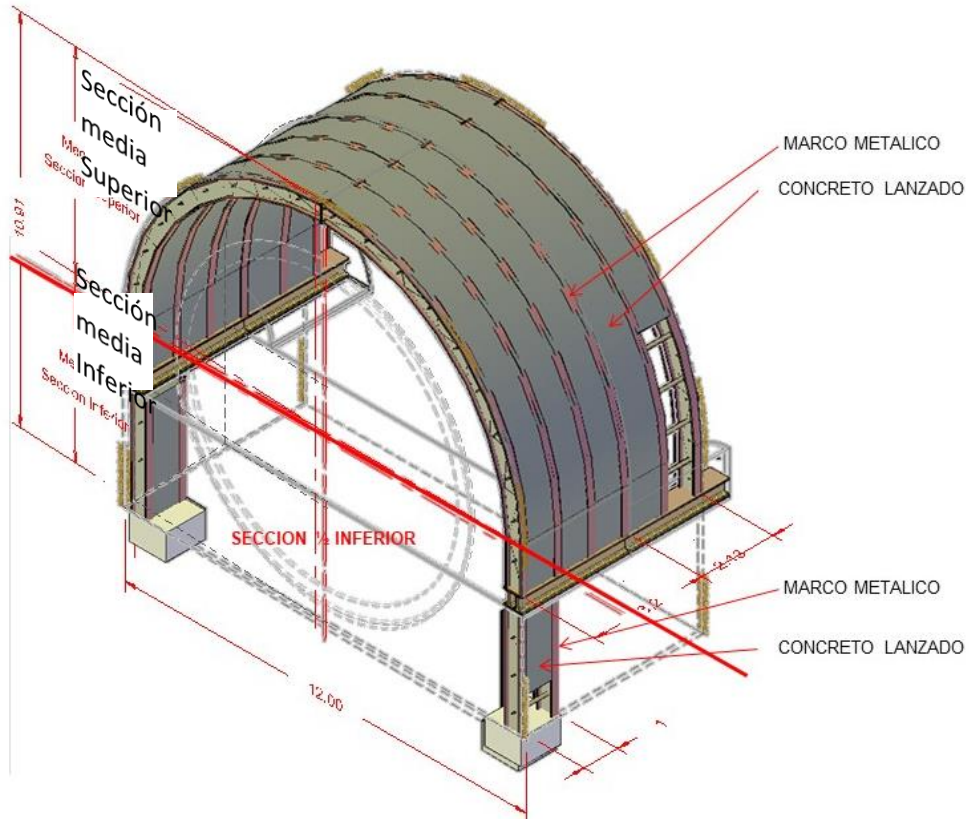


Figura 68. Esquema de la sección media inferior de la galería.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

Secuencia de excavación. Para la Sección Superior se colocaron los primeros marcos metálicos fijándolos a la masa de suelo con varillas cortas hincadas con marro, mostrados en la **Figura 70**, para garantizar la adecuada posición y asegurar la estabilidad de los primeros metros de excavación, así mismo se colocaron marcos metálicos “guía” en el interior de la lumbrera. Una vez colocados los marcos guía, se realizó la excavación por el método Ingles, excavando de forma consecutiva como se muestra en la **Figura 69**, con una excavadora CAT330, fresadora, vaca y grúa. Después de la colocación de los marcos, se realizó la colocación de concreto lanzado hasta alcanzar el espesor final del revestimiento, esta actividad se puede apreciar en la **Figura 71**.



Figura 69. Secuencia de excavación de la galería.



Figura 70. Colocación de los primeros marcos de la galería.



Figura 71. Colocación de concreto lanzado entre los marcos metálicos.

Para la sección inferior el concreto que conforma el revestimiento se colocó mediante lanzado mostrado en la **Figura 72**. Finalmente, conforme avanzó la excavación de la Sección Inferior de la Galería y los marcos metálicos se fueron completando, se colocaron elementos de rigidez horizontal, ligando ambos extremos del revestimiento como el mostrado en la **Figura 73**, se realizó el colado parcial de una losa de 50 centímetros de espesor, en franjas de 1.5 metros a cada 3.0 metros de separación, con concreto simple de $f'c=350 \text{ kg/cm}^2$, adicionado con 40 kg/cm^3 de fibras metálicas tipo Dramix ZP-305 (por seguridad, para evitar agrietamiento). La construcción de dichos tramos de losa se realizó mediante la excavación de zanjas, en las cuales, previo a la colocación del concreto, se colocó una capa de aproximadamente de 10 a 20 centímetros de grava, con el fin de evitar la contaminación del concreto, debido a posibles escurrimientos de agua.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO



Figura 72. Excavación de la sección media inferior de la galería.



Figura 73. Elemento de rigidez colocado para ligar ambos extremos de la galería.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

Con el fin de asegurar la estabilidad de la sección superior del revestimiento durante la excavación de la sección inferior de la galería, se construyó una zapata corrida longitudinal en ambos lados de dicha sección superior. Para transmitir la carga de los marcos metálicos hacia las zapatas longitudinales, se colocaron pernos tipo Nelson en los extremos inferiores de la sección superior de los marcos metálicos, se colocó el concreto a tiro directo en cimbra y se compactó con vibradores como se muestra en el esquema de la **Figura 74**.

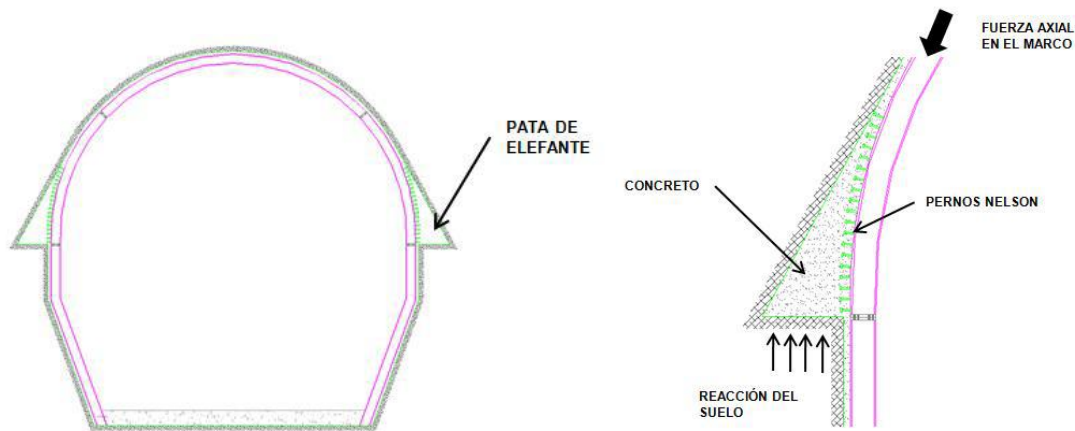


Figura 74. Apoyos para la sección superior del revestimiento "patas de elefante".



Figura 75. Galería concluida.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

Sistema de bombeo. Con el fin de abatir los niveles de presión y reducir el flujo de agua hacia el interior de la excavación, se construyó un sistema de bombeo profundo (mostrado en la **Figura 76**), a todo lo largo de la galería, basado en la construcción de 8 pozos a 85 metros de profundidad, equipados con bombas sumergibles de 135 H.P. y operadas con electroniveles como la que se observa en el esquema de la **Figura 77**, además de ser complementado mediante bombeo de achique en el interior de la excavación.

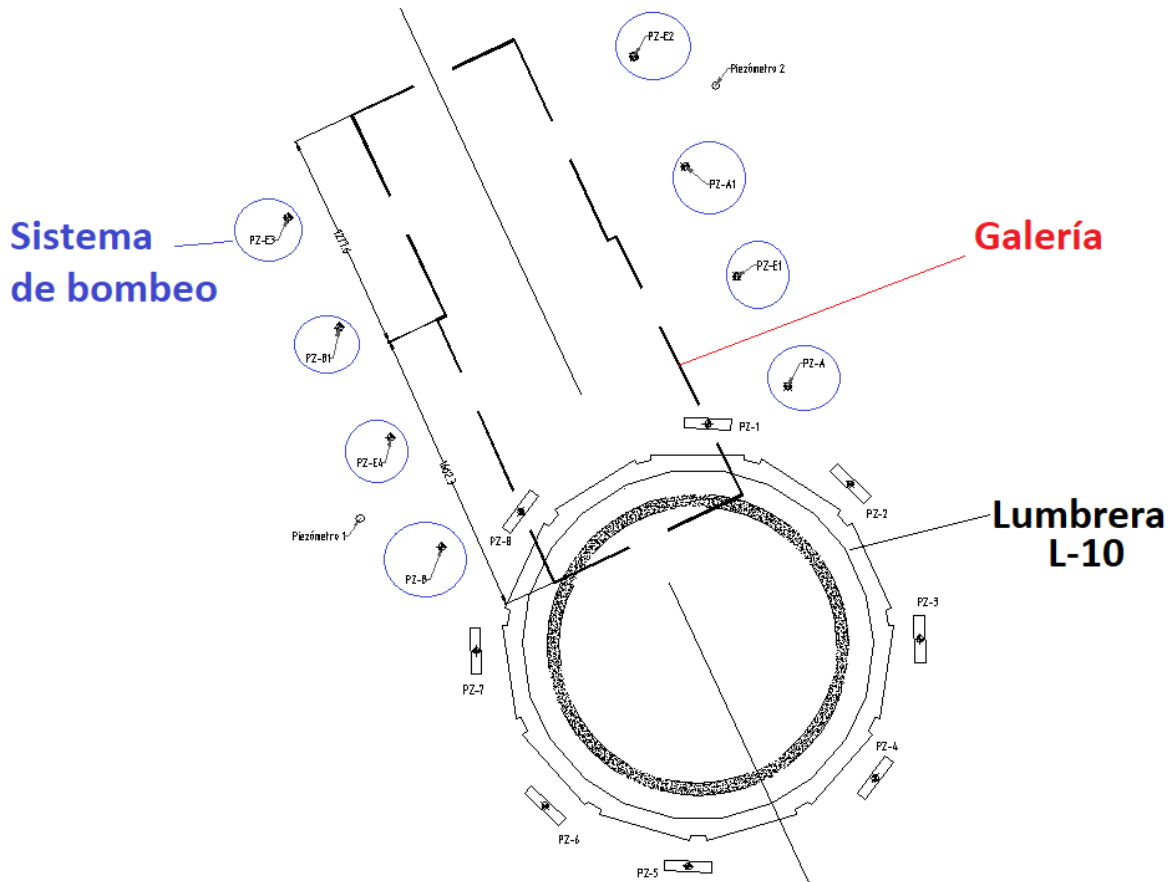


Figura 76. Sistema de bombeo en galería de la lumbrera L10.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

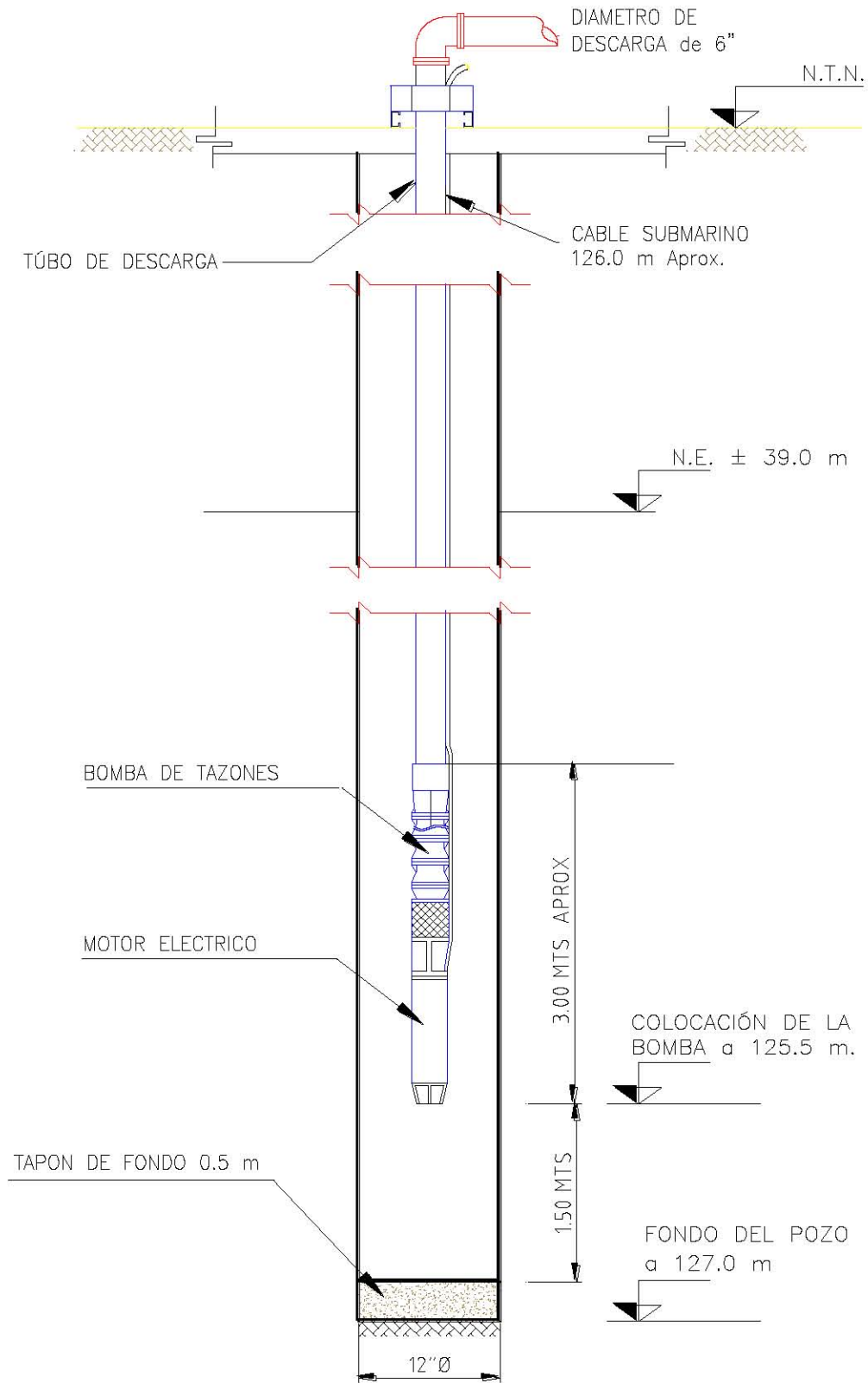


Figura 77. Esquema de los pozos de bombeo en galería de la lumbrera L10.

III.3 Ensamble de Máquina tuneladora.

La tuneladora utilizada para la excavación del tramo 3 propiedad de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y que fue denominada “Hidalgo”, tuvo un costo aproximado de \$1,750,000,000.00 M.N., fabricada por la empresa estadounidense “Robbins”, del tipo EPB (Earth Pressure Balance).

Para explicar el proceso de ensamble de la máquina tuneladora, es necesario dividirla en 3 secciones principales, de las cuales la primera sección se conforma por el “**ESCUDO**”, la segunda por el “**PUENTE PRINCIPAL**”, y la tercera por el “**BACK UP**”, que en conjunto suman un total de 106 metros y un peso aproximado de 1600 toneladas, en la **Figura 78** se observa de manera esquemática las secciones mencionadas.

Así mismo es necesario tomar en consideración varios aspectos; como es el “armado” previo en superficie de los componentes que posteriormente son descendidos y ensamblados en el fondo de lumbrera, como es el caso de la rueda de corte, debido a que, por lo grande de sus dimensiones, es trasladada desde su lugar de fabricación en piezas de menor tamaño, lo cual implica un “pre-ensamble” o “armado” previo en superficie.

El ensamble y armado previo de la máquina debe ser tal y como lo marcan las especificaciones del fabricante, para lo cual se debe de tomar en consideración el peso y volumen de todos los componentes.

Antes de iniciar con el procedimiento de montaje en fondo de lumbrera, se debe de realizar todas las adecuaciones de la losa de fondo de lumbrera y la galería previamente construida para recibir el equipo, además de contar con toda la maquinaria y herramienta necesaria para realizar las actividades.

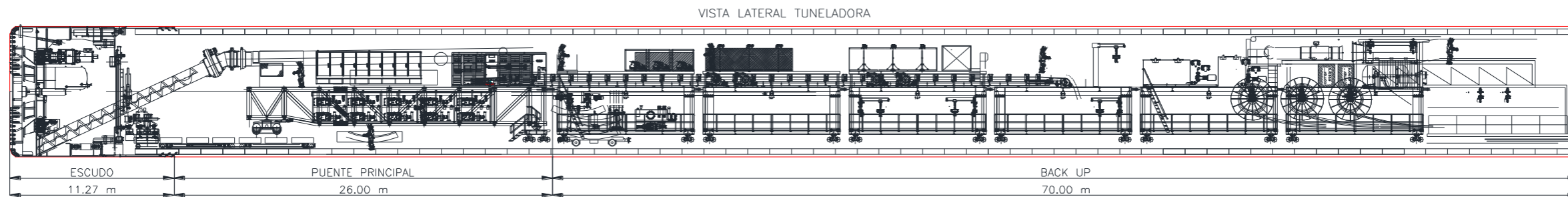


Figura 78. Secciones de la tuneladora “Hidalgo” de tramo 3.

III.3.1 Adecuaciones previas en fondo de lumbrera.

Tomando en consideración la construcción previa de la galería de montaje y la forma circular de la tuneladora, se deben realizar las adecuaciones pertinentes en el fondo de la lumbrera y a lo largo de toda la galería para recibir el equipo excavador, para ello se realiza la construcción de elementos de concreto con una altura aproximada de 0.88 metros formando una “cuna de arrastre”, que cumple la función de servir como soportes laterales del escudo, sobre los cuales se deben de dejar ahogadas placas metálicas para soldar rieles tipo A100 que posteriormente recibirán y sobre de ellos se desplazara el escudo.

Así mismo se debe realizar el “relleno” de la segunda sección de la galería a base de concreto lanzado hasta obtener la forma geométrica del escudo (circular) como se aprecia en la **Figura 79**, a efecto de disminuir el espacio entre la galería y el equipo excavador (TBM), quedando un espacio final entre el revestimiento de concreto lanzado y el equipo excavador de 0.05 metros. Lo anterior para poder contar con una guía y un diámetro adecuado en el momento que inicie la operación de la TBM, de esta manera se busca contrarrestar la tendencia de giro de la máquina.

Posteriormente se debe realizar la construcción de estructuras de concreto reforzado (muertos) sobre el piso de la primera sección de la galería. Dichas estructuras de concreto deben de tener la forma trapezoidal que servirán de apoyo para los contraventeos de la estructura de reacción (estructura necesaria para lograr los primeros empujes del equipo excavador).

Finalmente se debe construir en el fondo de la lumbrera, en el lado contrario a la galería de montaje, un muro de apoyo para la colocación de dovelas de empuje, mismas que auxilian las maniobras de desplazamiento de la TBM en su fase de arranque, todas las características mencionas de observan en la **Figura 80 y 81**.

Para absorber la diferencia entre el espacio vacío de montaje (0.04 + el espesor del faldón = 0.1, es decir; un espesor total de 0.14 metros), se colocan cuñas de madera a los lados y durmientes en la parte inferior de la misma, lo cual permite facilitar el empuje y posicionamiento del equipo excavador en el arranque, permitiendo contar con un apoyo uniforme para el desempeño del sistema de los gatos de empuje.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO



Figura 79. Segunda sección de la galería “rellenada” con concreto lanzado.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

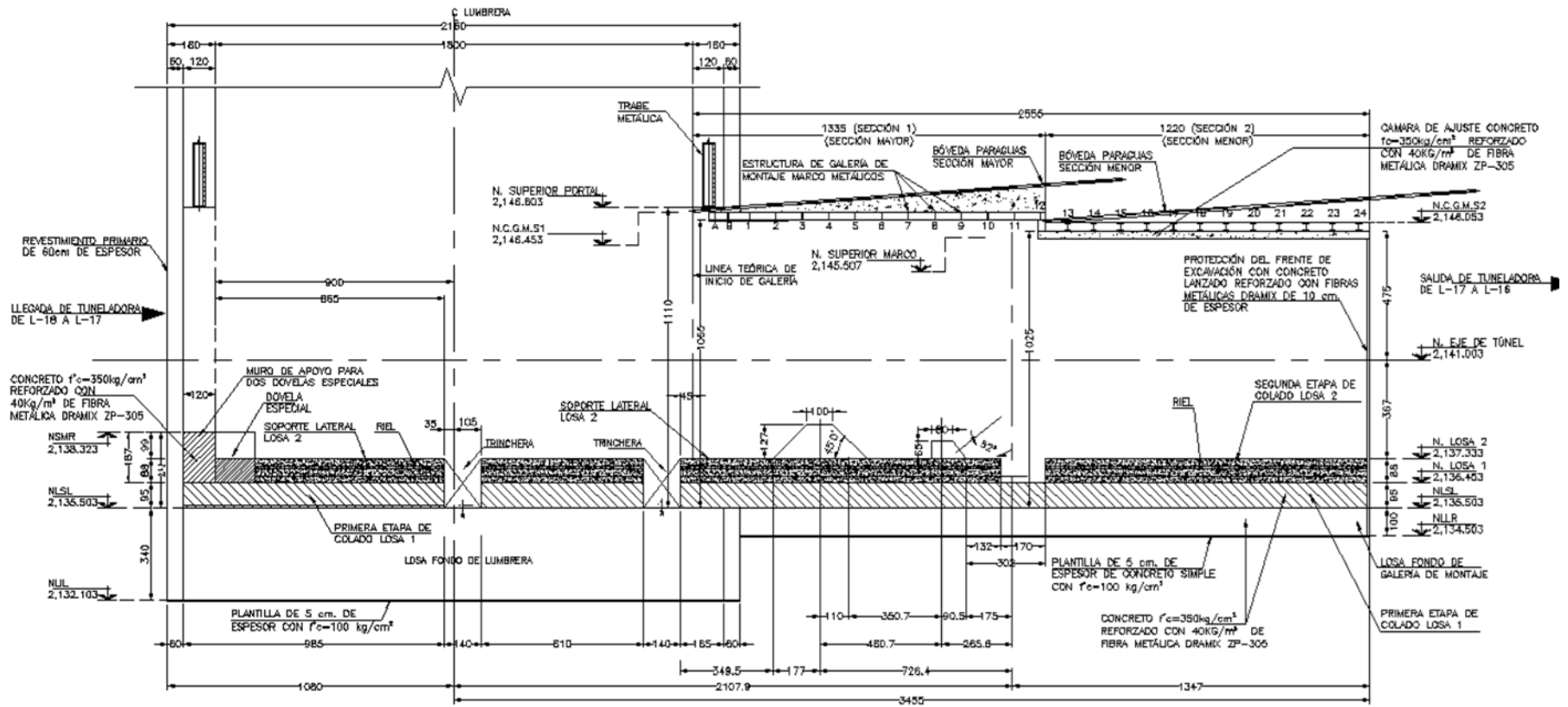


Figura 80. Vista de perfil de adecuaciones en galería y fondo de lumbra.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

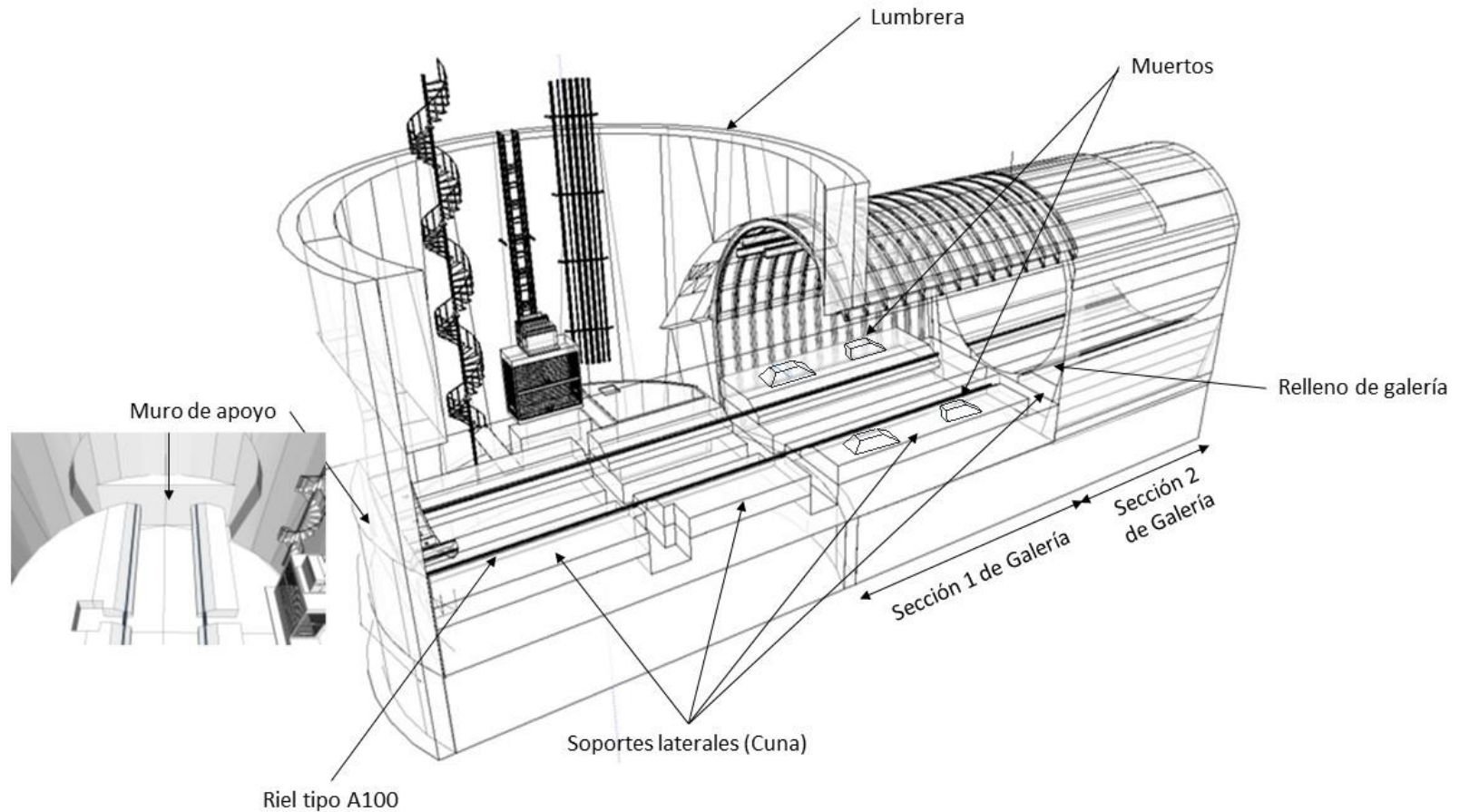


Figura 81. Adecuaciones en galería y fondo de lumbrera.

III.3.2 Ensamble de el “ESCUDO”.

Una de las principales secciones que conforman la tuneladora “Hidalgo” es el “Escudo”, que como su nombre lo indica, su función es servir como un protector; equilibrando la presión de tierra que se ejerce en el frente durante el proceso de excavación del túnel, conservando la estabilidad del terreno vecino y permitiendo colocar el soporte inicial formado por dovelas prefabricadas de concreto.

Como anteriormente se mencionó, antes de iniciar con el proceso de montaje de la TBM en el fondo de lumbreira, es necesario realizar el “armado” previo en superficie de las piezas principales que componen el escudo, así mismo para el descenso y proceso de ensamble se debe de contar con una grúa con la capacidad de carga mínima de 200 toneladas. Debido a la magnitud de los elementos de la TBM “Hidalgo” se utilizó una grúa tipo pórtico bipuente mostrada en la **Figura 82**, con una capacidad de 200 toneladas. Este tipo de grúa eleva la carga mediante un montacargas instalado sobre una viga, que a su vez es rígidamente sostenida mediante dos apoyos que se desplazan a lo largo del patio de maniobras donde previamente se almacena los elementos de la TBM. De igual forma se puede utilizar para el abastecimiento de los insumos necesarios para el ciclo de excavación.



Figura 82. Grúa pórtico de 200 toneladas.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

En las **Figuras 83 y 84**, se muestra un despiece del escudo, en donde se indican las principales piezas que son descendidas por la gura pórtico y posteriormente ensambladas en el fondo de lumbrera.

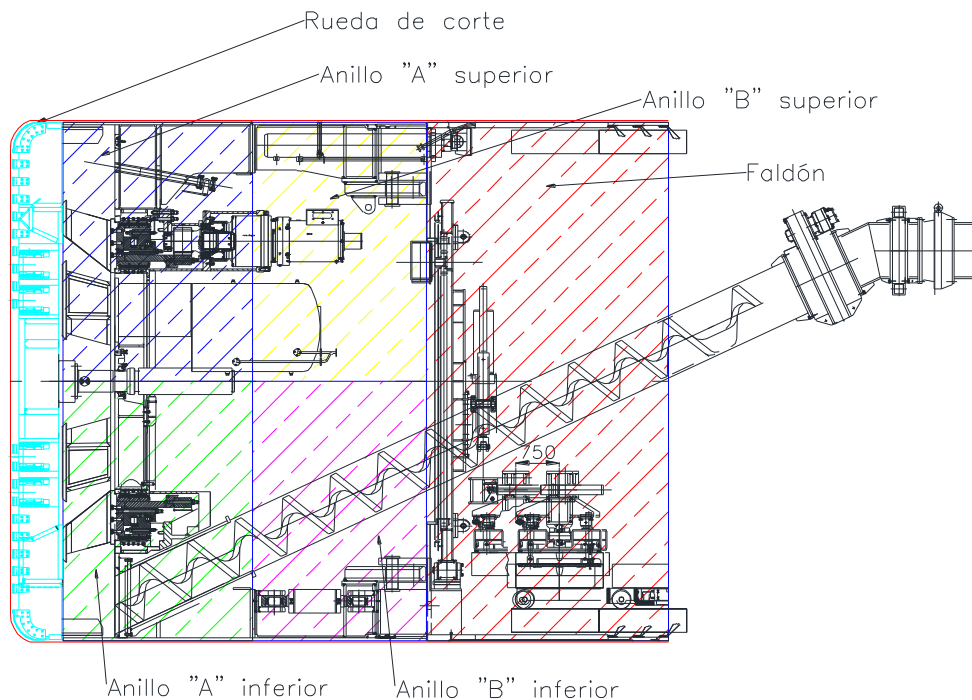


Figura 83. Vista de perfil de la TBM "Hidalgo".

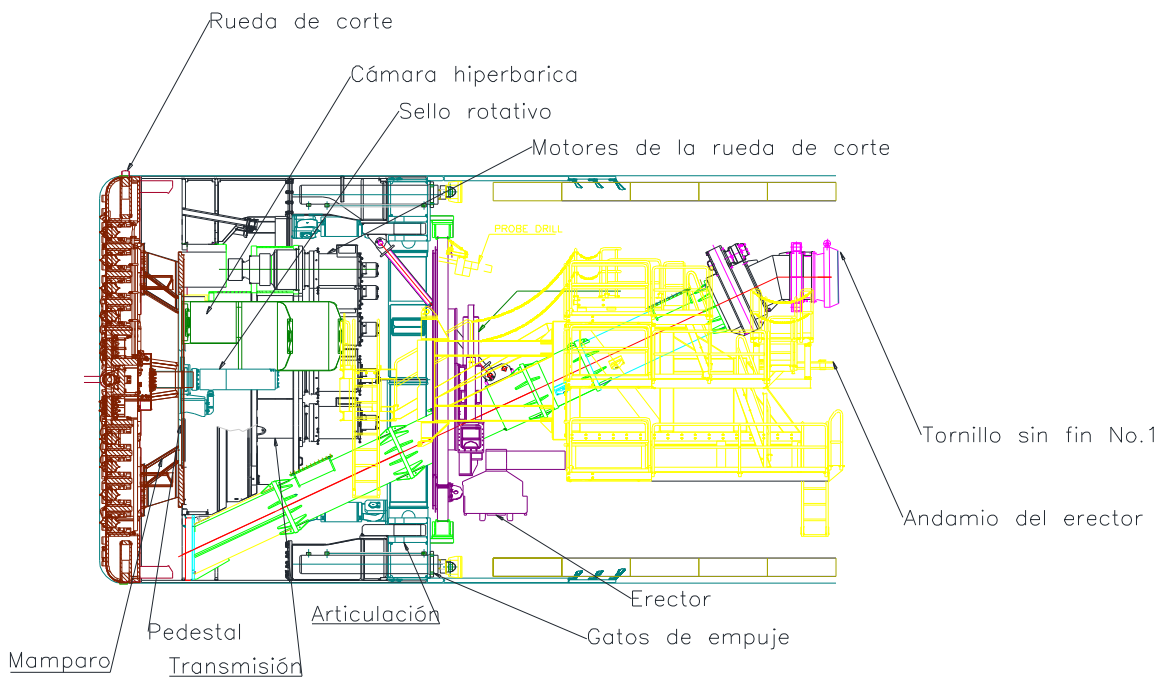


Figura 84. Principales elementos de la máquina tuneladora.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

Una vez identificados los elementos principales de la TBM y siguiendo las indicaciones del fabricante, el proceso de descenso y ensamble en fondo de lumbrera se realiza de la siguiente manera:

- Se realizan las maniobras de descenso de las primeras piezas de la TBM, es decir el descenso del anillo "A" y "B" inferiores y parte delantera del tornillo No.1 previamente ensamblados en superficie que en conjunto pesan aproximadamente 95 Toneladas, auxiliado por la grúa pórtico de 200 toneladas de capacidad, los anillos "A" y "B" tienen la función de proteger los motores de la rueda de corte, la articulación y todos elementos mecánicos mostrados en la **Figura 84**.
- Posteriormente se procede con la bajada y ensamble del soporte de la cabeza de corte (Transmisión), colocando y apretando los pernos correspondientes, esta parte de la máquina tuneladora tiene un peso aproximado de 105 Toneladas y es principalmente la motorización de la rueda de corte.
- Como tercer paso se procede con las maniobras de bajada y ensamble de la parte superior del anillo A, con un peso aproximado de 50 toneladas, colocando los pernos entre este y la parte inferior y apretando al 100%, así mismo se debe de aplicar la soldadura correspondiente entre los elementos superior e inferior.
- Posteriormente se realiza el ensamble del pedestal (con un paso en forma de brida para colocación la cámara hiperbárica), el peso aproximado del pedestal es 19.75 toneladas y su función es sellar la cámara de excavación y servir como acceso por medio de las cámaras hiperbáricas.
- Se realiza la bajada y colocación de los motores inferiores de la rueda de corte (5 en total con un peso aproximado de 2.5 toneladas cada uno), la parte media del tornillo sin fin No.1; con un peso aproximado de 6 toneladas y el sello rotativo; con un peso de 4.5 toneladas.
- Se realiza la colocación de las cámaras de medio hiperbárico (cámara de compresión y descompresión) de un peso aproximado de 5 toneladas cada una.
- Se realiza el descenso y colocación del total de los motores de la rueda de corte.
- Posteriormente se lleva a cabo la maniobra para la colocación de la cabeza de corte de un peso total de 100 toneladas.
- Se realiza la bajada de la parte superior del anillo B de un peso aproximado de 27 toneladas, ajustando y apretando los tornillos en primera instancia al 50% y posteriormente al 100% para pasar con la unión mediante la soldadura correspondiente entre la parte inferior, superior del mismo y con el anillo A.
- Se realizan las maniobras de bajada y ensamble de la articulación de 163 toneladas aproximadamente; es uno de los elementos más pesados de la TBM, posteriormente se acopla con el faldón.
- Se procede a bajar el segmento erector de un peso aproximado de 35 toneladas, elemento utilizado para la colocación de las dovelas, se

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

conectan los 8 gatos de empuje inferiores, y con la ayuda de estos se deberá desplazar la TBM, hacia el interior de la Galería de montaje, hasta que la parte trasera del escudo “B” se ubique al centro de la segunda trinchera, para lo cual se necesita que las dovelas A3 y A4 sean colocadas en cuna. Una vez que la TBM se halla desplazado hasta la segunda trinchera, se acoplaran los gatos de empuje faltantes.

- Se procede a retirar las dovelas de empuje, procediendo con las maniobras de bajada y ensamble de la parte trasera del tornillo No. 1, auxiliándose para tal efecto de un soporte para el tornillo en fondo de lumbrera.
- Se continua con las maniobras de bajada y ensamble de la parte trasera del andamio del erector de un peso aproximado de 21 toneladas.
- Acto seguido, se procede con la bajada del faldón de un peso aproximado de 69 toneladas, una vez en fondo de lumbrera, se deberá desplazar el faldón y ensamblar a la TBM.
- Una vez ensamblado y soldado el faldón a la TBM, se procede al deslizado de la máquina hasta su posición de arranque, para lo cual se necesita la colocación nuevamente de dovelas A3 y A4, así como de grasa en los puntos de apoyo de la máquina. La distancia del frente de la TBM al portal de salida debe ser propuesta de acuerdo a las medidas finales de la Galería.

Todo el proceso de ensamble se ilustra en la **Figura 85 y 86**. El peso total estimado del escudo se resume de la siguiente manera:

Peso del escudo		
Segmento	Peso (kg)	Peso (ton)
Anillo A	100684.10	100.68
Anillo B	55058.90	55.06
Transmisión	105443.90	105.44
Mamparo	19752.10	19.75
Motores de la rueda	25618.00	25.62
Sello rotativo	4264.20	4.26
Cámaras hiperbáricas	10000.00	10.00
Rueda de corte	128024.20	128.02
Articulación	163833.80	163.83
Erector	35084.00	35.08
Andamio del erector	22275.00	22.28
Tornillo sin fin	77332.90	77.33
TOTAL	747371.10 kg	747.37 ton

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

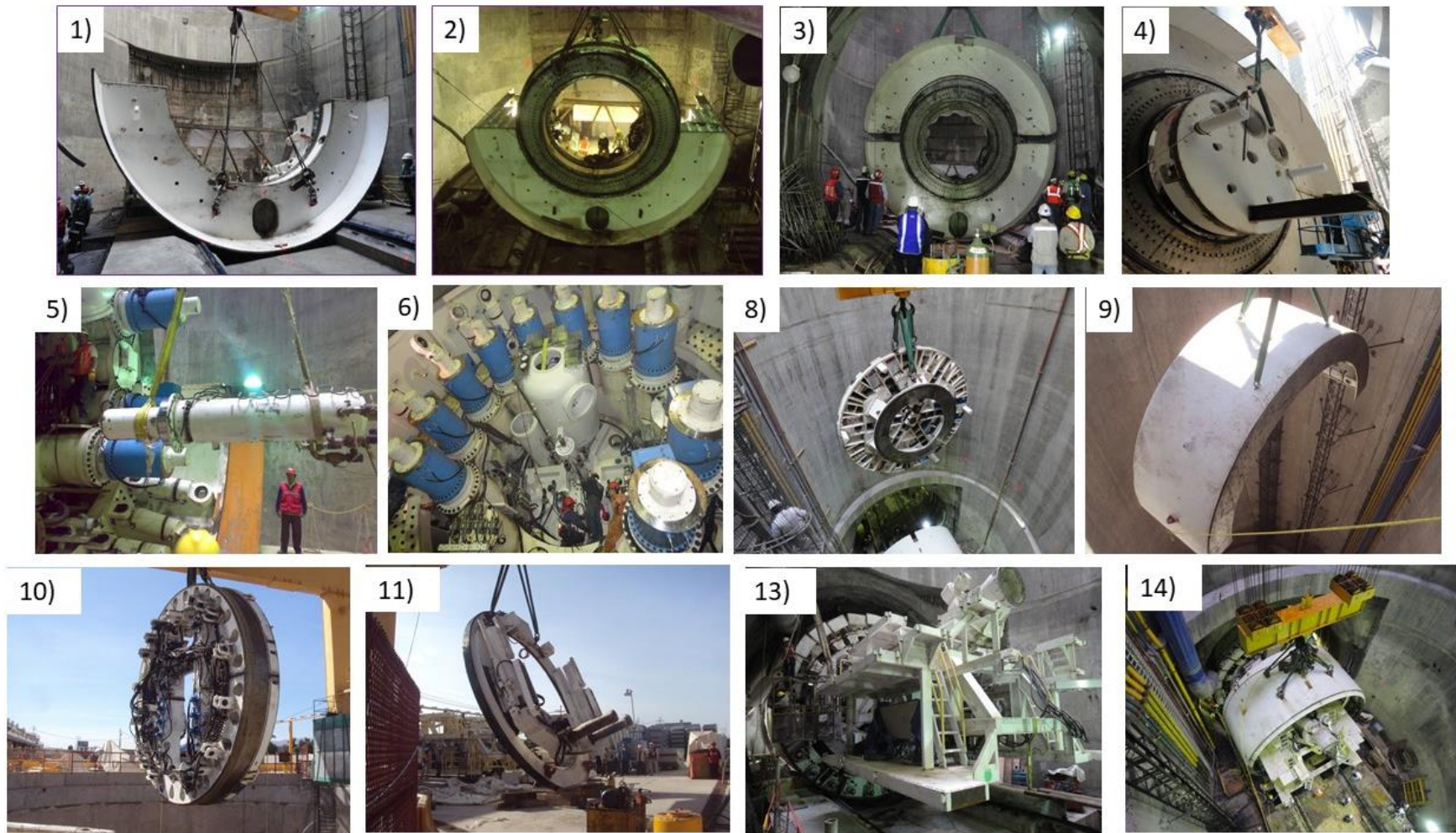


Figura 85. Proceso de ensamble del "Escudo".

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

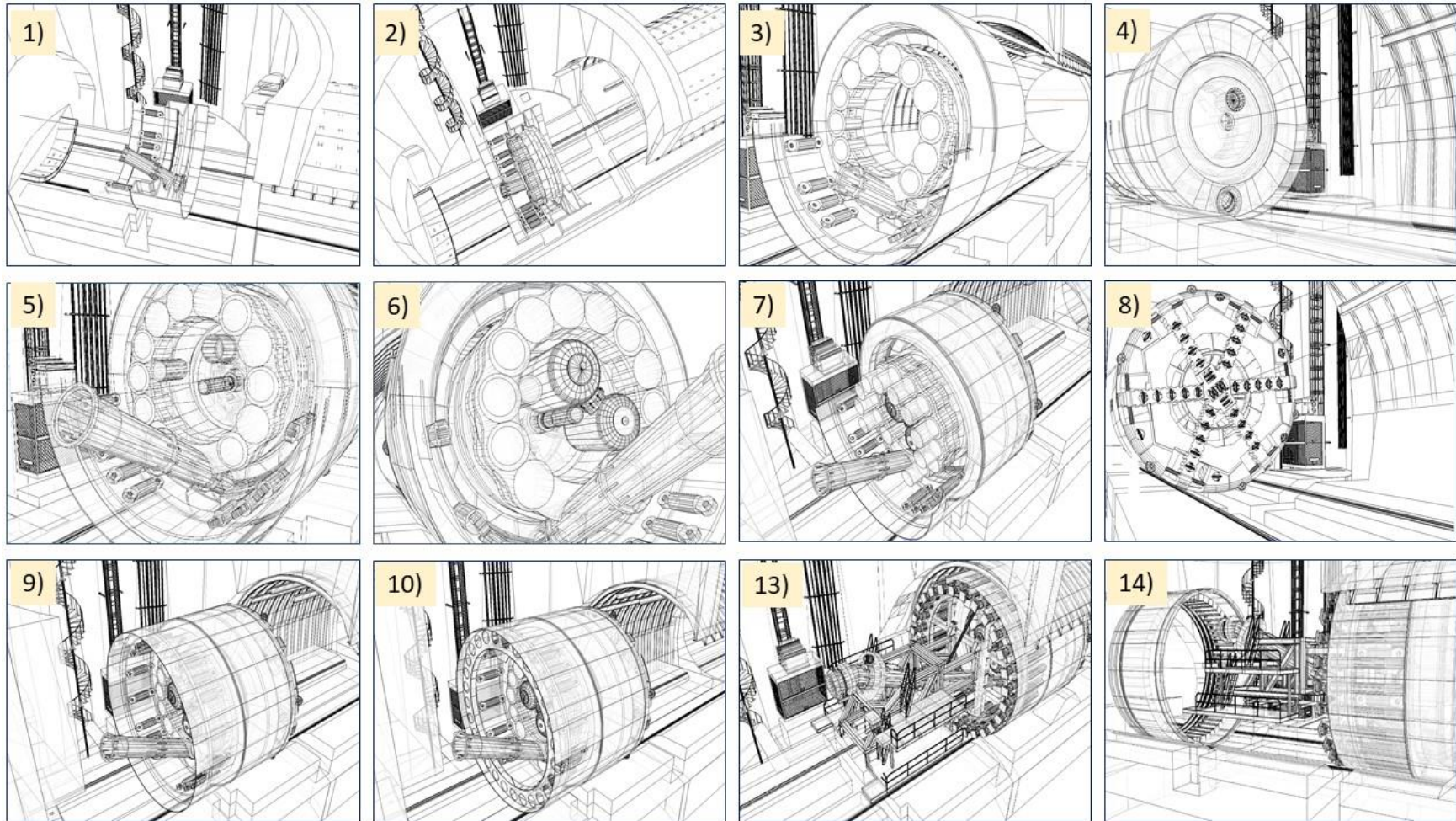


Figura 86. Proceso esquemático de ensamble del "Escudo".

III.3.3 Ensamble del “Puente principal”.

Previo a iniciar el proceso de excavación, es necesario de tener ensamblado aparte del Escudo, el puente principal o “gantry principal”; en donde se alojan los principales componentes de alimentación para el funcionamiento de la TBM, como son la cabina de operación, los transformadores eléctricos, los variadores de frecuencia, la potencia hidráulica, la mesa de alimentación de dovelas, el sistema de lubricación; que en conjunto suman un peso aproximado de 66 toneladas, en la **figura 87 y 88** se observa de manera esquemática, y su ensamble se realiza en superficie para después ser descendido a fondo de lumbrera y realizar las conexiones necesarias con el escudo, cabe mencionar que solo el tornillo sin fin No. 2 es descendido y ensamblado de forma independiente.

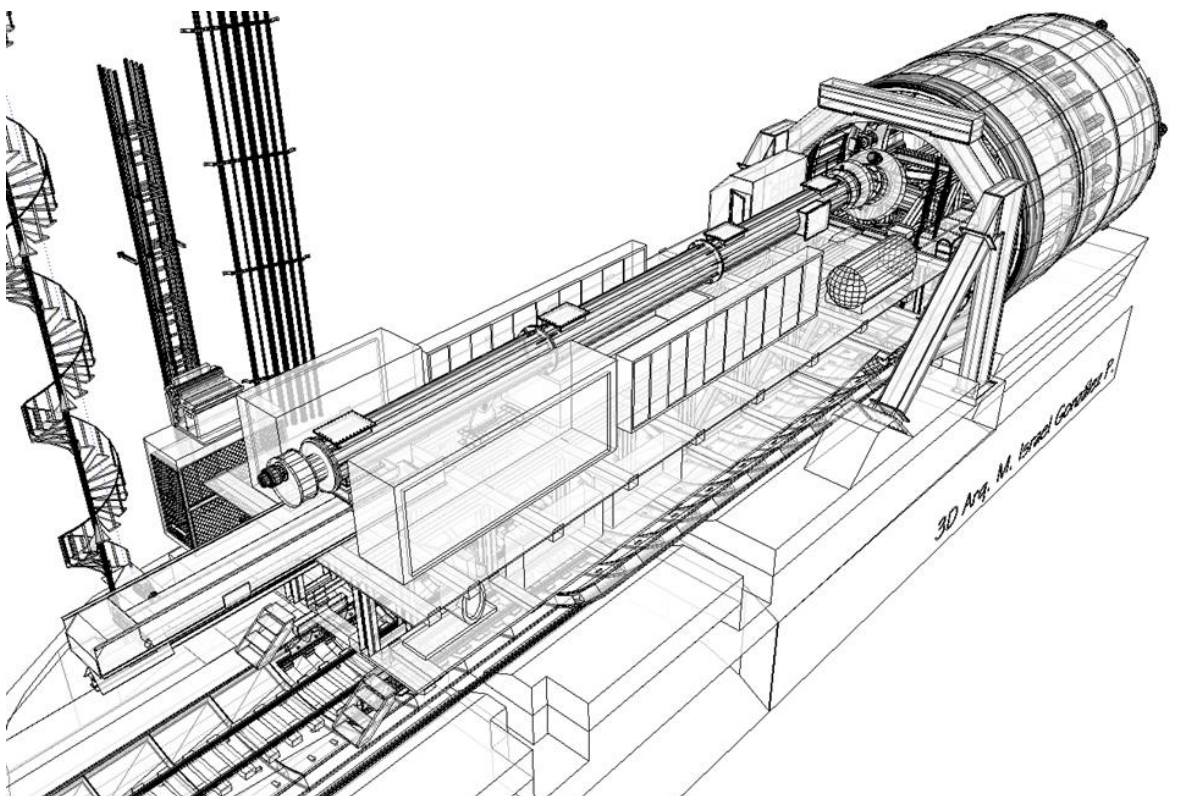


Figura 87. Vista en 3d del puente principal ensamblado con el escudo.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

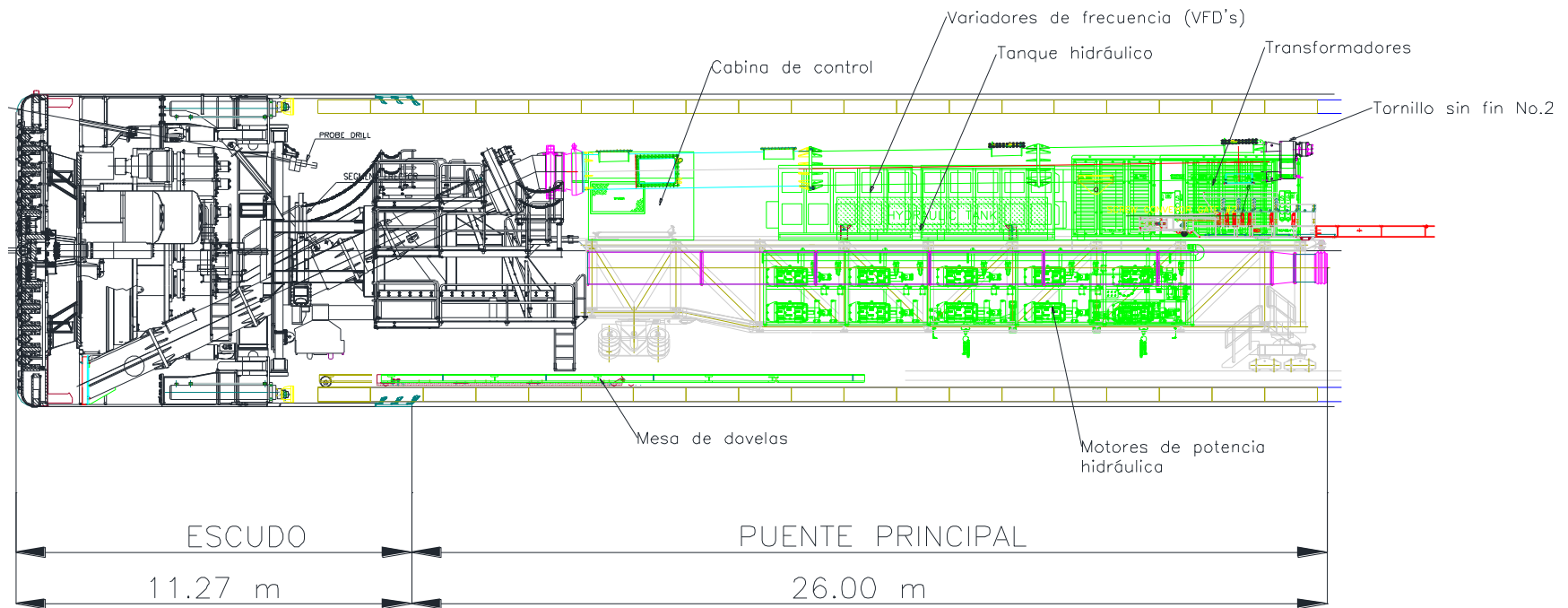


Figura 88. Vista lateral y principales características del puente principal ensamblado con el escudo.

III.4 Preliminares al proceso de excavación.

Finalizada la instalación de los componentes del escudo y el puente principal, la tuneladora esta lista para entrar en la fase inicial del proceso de excavación. La fase inicial contempla la instalación de estructuras provisionales que sirven de apoyo a la máquina, como son; una estructura de reacción, un anillo metálico y bachas para desalajo de rezaga, conforme la tuneladora avanza hacia su destino se realiza simultáneamente la instalación de sus Gantry's. La fase definitiva de excavación inicia cuando se ha logrado instalar todos los componentes de la TBM.

III.4.1 Estructura de reacción y anillo metálico.

Durante la fase inicial de excavación la tuneladora se encuentra dentro de la galería de montaje, aunado a esto, la máquina es propulsada por un sistema hidráulico de empuje diseñado para actuar sobre las dovelas colocadas, es necesario fabricar y diseñar una estructura provisional que soporte el empuje de la TBM durante su fase inicial de excavación, así mismo es necesario la fabricación e instalación de 1 anillo metálico provisional cuyo objetivo es guiar la posterior colocación de dovelas.

Estas estructuras son fabricadas a base de placa A36 de un $f_y=2530 \text{ kg/cm}^2$, su montaje y fabricación se realiza a base de piezas prefabricadas en talleres externos, las **Figuras 89, 90 y 91** muestran las principales características de dichas estructuras.

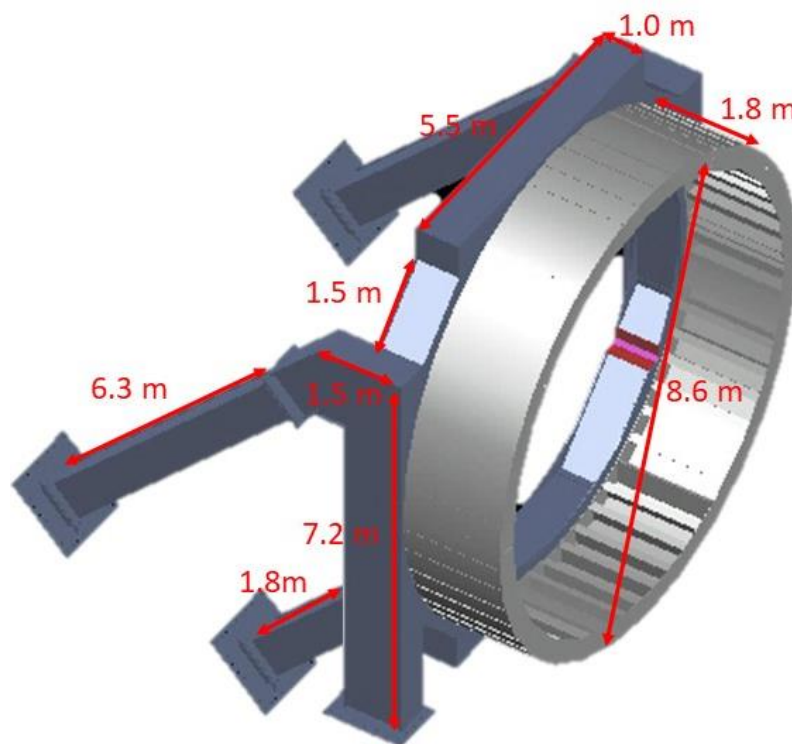


Figura 89. Vista en 3d de la estructura de reacción y el anillo metálico.

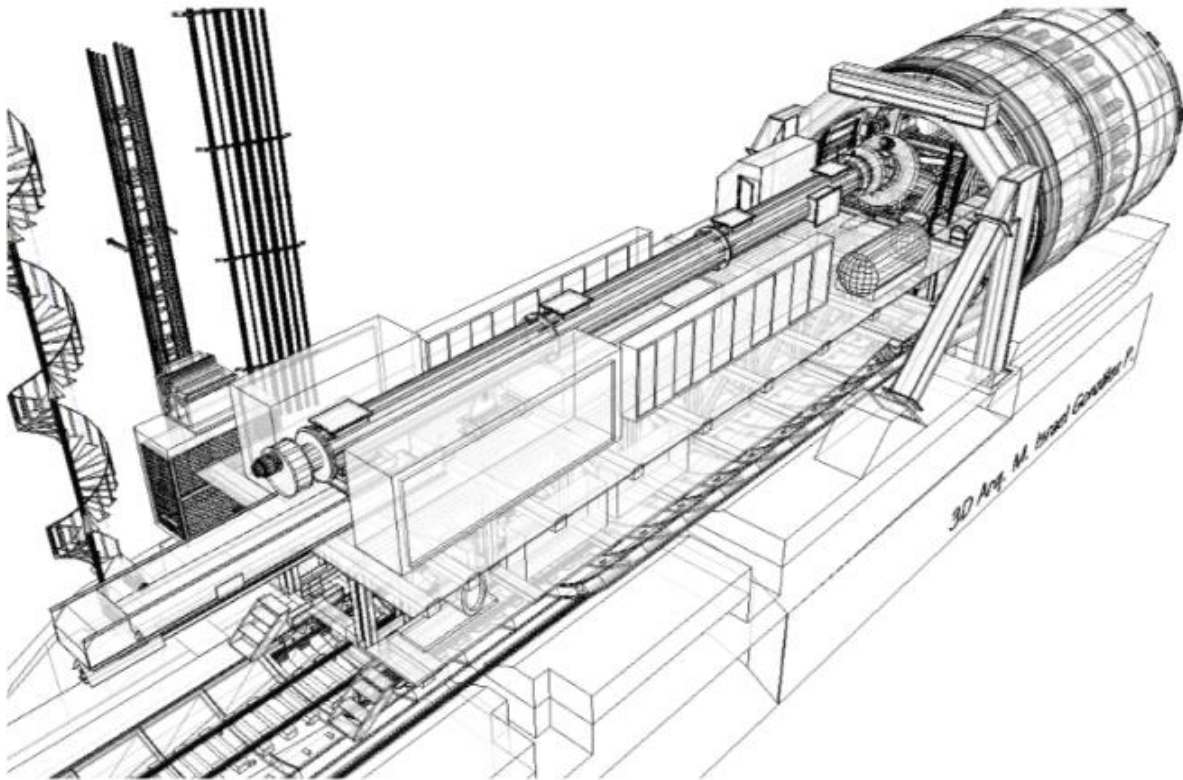


Figura 90. Ubicación de la estructura de reacción y el anillo metálico.



Figura 91. Instalación de la estructura de reacción y el anillo metálico.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

III.4.2 Bachas para extracción de rezaga.

La extracción de rezaga que se extrae durante la fase inicial del proceso de excavación se efectúa con la ayuda de botes metálicos o bachas que son ubicadas en la parte posterior del puente principal (a la salida del tornillo No.2).

La capacidad de las bachas es de aproximadamente $17 m^3$, el volumen de material equivalente a un anillo excavado es de $89 m^3$, por lo que se debe de realizar la excavación de forma momentánea para lograr desalojar correctamente la rezaga generada y evitar incidencias mayores.

Para la extracción del bote de rezaga se utiliza la grúa pórtico de 200 ton y su disposición se define en superficie, cabe mencionar que este sistema de extracción es provisional debido a que la máquina tuneladora es acompañada por un sistema de bandas, diseñada y utilizada para este fin, sin embargo, su instalación es realizada una vez que toda la máquina con sus gantry's se encuentren a mínimo 50 metros del fondo de lumbrera, en las **Figuras 92 y 93** se indica la localización del bote utilizado para el fin mencionado.

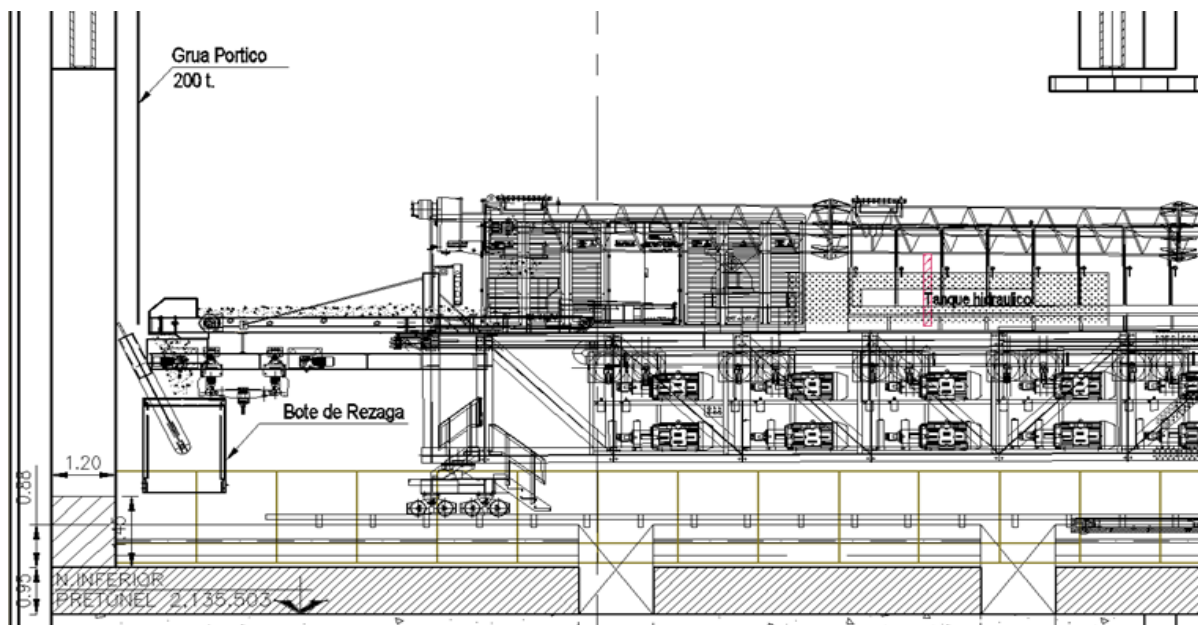


Figura 92. Ubicación del bote de rezaga para extracción de material excavado.



Figura 93. Bote de rezaga para extracción de material excavado.

III.4.3 *Instalación de Gantry's o back up.*

Una vez realizado los primeros empujes de la máquina tuneladora, es necesario realizar la instalación del back up compuesto por 7 Gantry's mostrados en la **Figura 94**, que son básicamente estructuras con ruedas sobre rieles con dimensiones de 10.30 metros de largo, 6.30 metros de ancho y 3.90 metros de alto, destinados para el alojamiento de los equipos e insumos que son utilizados para la operación del equipo excavador en su fase definitiva. Estos Gantry's son instalados conforme la tuneladora avanza y siguiendo la secuencia descrita.

Gantry 1. Este gantry tiene la función de alojar el sistema de inyección de espumas para el acondicionamiento del material excavado; sistema compuesto por tanques de almacenamiento de la solución de espuma y bombas para su inyección, así mismo, aloja el sistema de inyección de grasas e inyección de lodo bentónico para lubricación de la máquina.

Gantry 2. Este gantry tiene la función de alojar un sistema de inyección de polímero para el acondicionamiento del material excavado; sistema compuesto por tanques de almacenamiento y bombas para su inyección, aloja un sistema de inyección de grasas para lubricación de la máquina.

Gantry 3. Este gantry tiene la función de alojar el tanque de almacenamiento de mortero.

Gantry 4. Este gantry tiene la función de alojar el sistema de inyección del mortero y los generadores de energía eléctrica.

Gantry 5. Este gantry tiene la función de alojar todo el sistema de enfriamiento, compuesto por tanques de almacenamiento de agua fría y agua residual.

Gantry 5A. Gantry adicional cuya función es alojar compresores y una subestación eléctrica.

Gantry 6. Este gantry aloja los enrolladores de manguera para la colocación de la tubería del suministro de agua y el sistema de ventilación.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

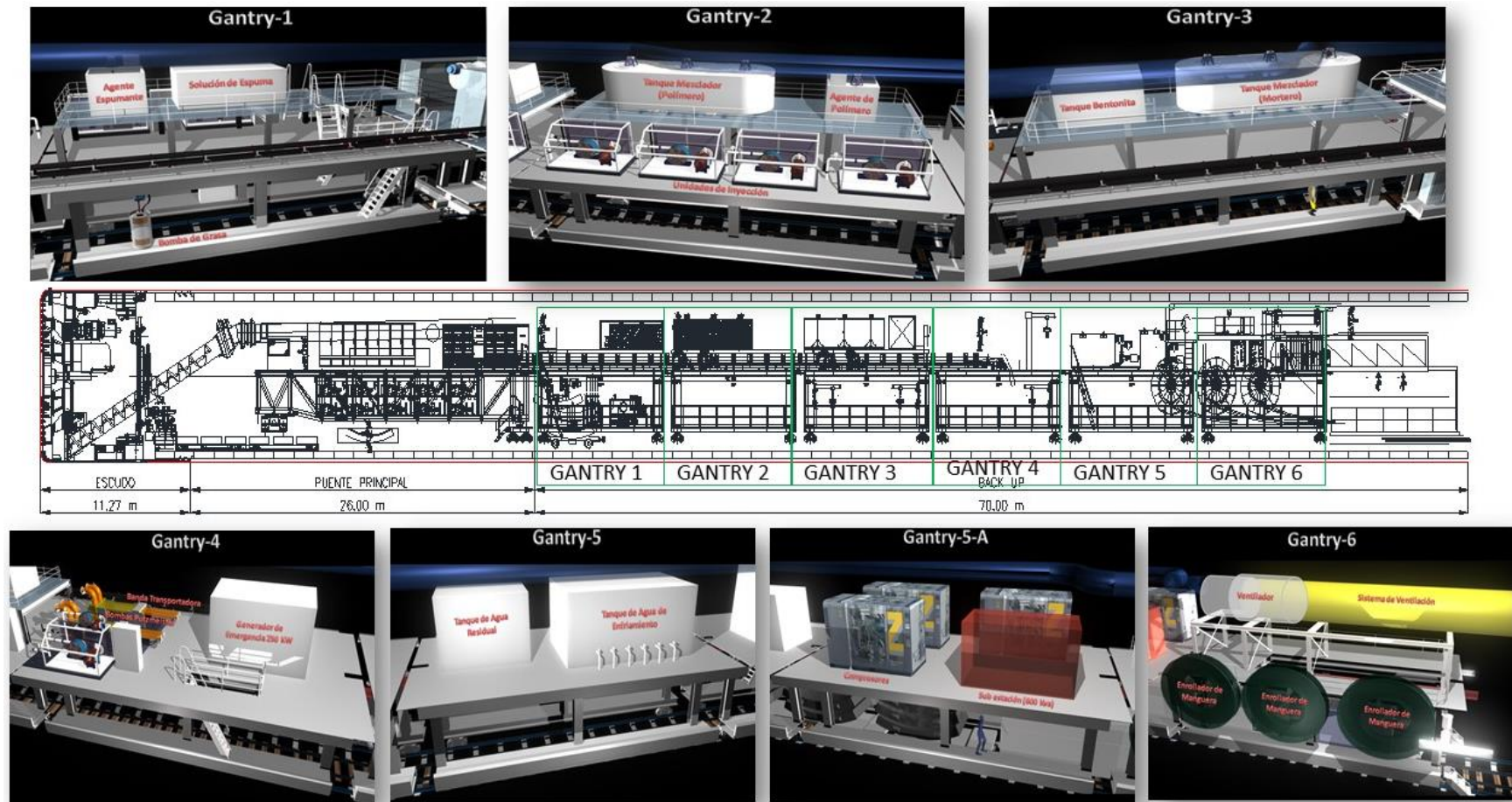


Figura 94. Back up.

III.5 Proceso de excavación.

III.5.1 Funcionamiento del EPB.

Como anteriormente se mencionó, la tuneladora utilizada para la excavación en el Tramo 3 del TEO, denominada “Hidalgo”, fue diseñada del tipo EPB (Earth Pressure Balance o balance de presión de tierras) debido a que la geología que se esperaba encontrar en este tramo es principalmente arcillas y arenas, además de tener un nivel de aguas freáticas por encima del eje del túnel, lo cual da origen a una presión hidráulica en el frente de excavación.

Tomando en consideración estos aspectos, la tuneladora tiene la capacidad de establecer un equilibrio con la presión que ejerce el agua en el frente de excavación (presión hidráulica) y la presión ejercida por el suelo (presión de tierra), equilibrio que se logra con el material excavado y alojado en la cámara de excavación.

La presión máxima que soporta la tuneladora en modo estático es 10 bares y en proceso de excavación es de 5 bares, tiene la capacidad de sellar su interior evitando la entrada de material o agua por el mamparo y el faldón, de ahí su nombre de “Escudo”, la presión del frente se regula a través de un tornillo sin fin y sus valores son medidos mediante sensores ubicados en distintos puntos, como se observa en la **Figura 95**.

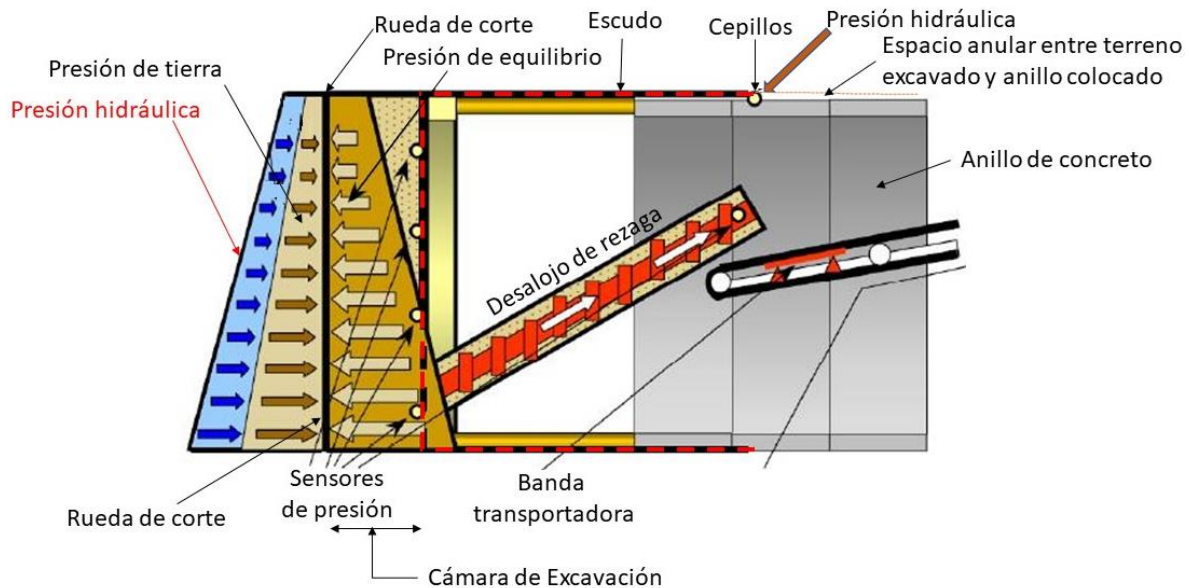


Figura 95. Funcionamiento de la TBM.

Para calcular las presiones frontales de la cámara del escudo, se empleó el modelo basado en el mecanismo de falla simplificado del Dr. Tamez observado en la **Figura 96**, en donde se considera un estado de esfuerzos y deformaciones en la masa de suelo que rodea al frente y a la periferia de la cavidad, es decir; si el

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

suelo no es capaz de soportar estos nuevos esfuerzos se produce el colapso del frente.

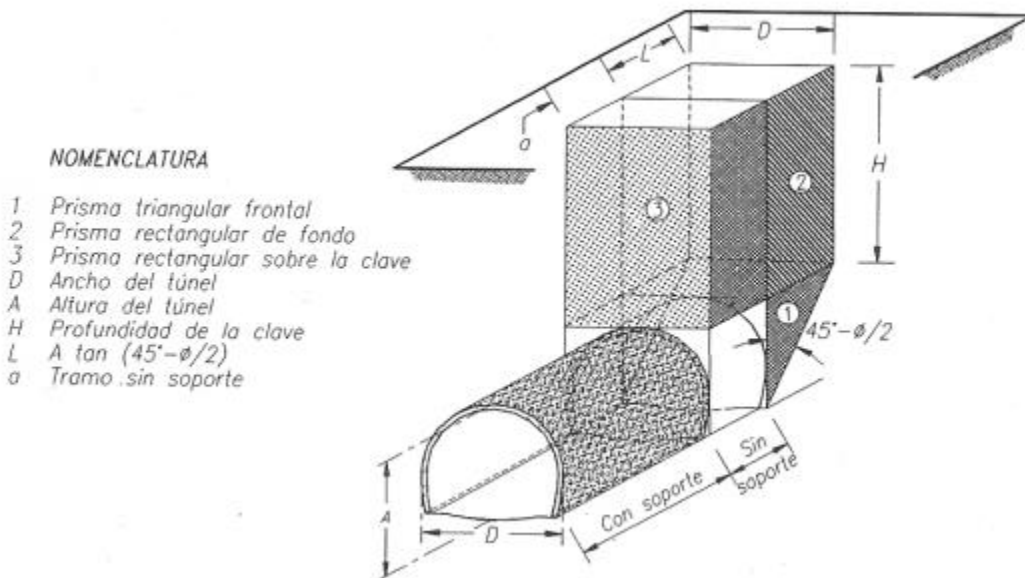


Figura 96. Equilibrio del mecanismo de falla simplificado del frente.

La presencia de suelos cohesivos-friccionantes (limos-arenosos y arcillas-limos), arroja un resultado de presiones de frente de magnitud negativa (tensiones), es decir que durante la construcción no se inducen a la zona inmediata a la clave, cambios significativos en su estado inicial de esfuerzos, obteniendo un frente estable sin necesidad de aplicar una presión frontal.

Establecido el principio de trabajo, la tuneladora tiene, adicionalmente, características y funciones que permiten realizar todo el proceso de excavación como son:

III.5.2 Rueda de corte.

Siendo uno de los principales componentes de la tuneladora, su fabricación es completamente de acero, con un diámetro de 8.87 metros y un peso aproximado de 128 toneladas, su función es rasgar el terreno con apoyo de un total de 12 motores eléctricos que logran girarla en sentido de las manecillas del reloj o en sentido contrario, su velocidad se controla desde la cabina de operación, con valores que van de 0.2 rpm a 5.0 rpm, está equipada con piezas metálicas más pequeñas denominadas "herramientas de corte" que son diseñadas para distintos tipos de terreno ubicadas en distintos puntos de la rueda, como se observa en la **Figura 97**. Cabe mencionar que todas las herramientas son reemplazables en caso de desgaste o daños mediante una intervención atmosférica o intervención hiperbárica; actividad en donde se realiza la inspección de la rueda en el interior de la cámara de excavación.

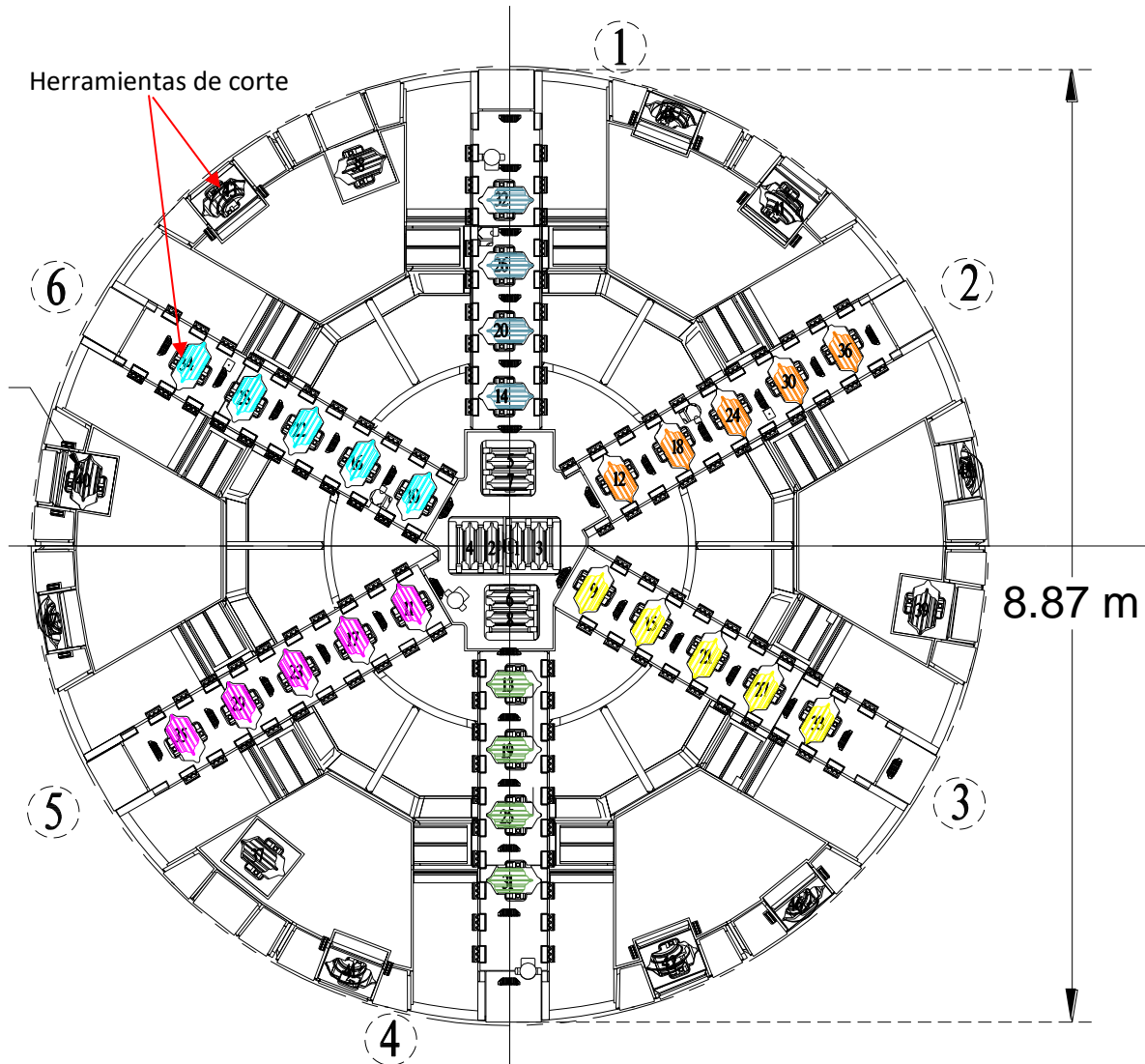


Figura 97. Rueda de corte.

III.5.3 Sistema de guiado y articulación.

La tuneladora cuenta con un sistema de guiado que muestra al operador de la máquina la posición y dirección de la rueda de corte del escudo. Consta de diferentes componentes de hardware que intercambian información y datos de mediciones con un programa denominado TBM3 (software).

El cálculo se basa en los datos de tres componentes principales:

- Medición permanente de la posición de dos prismas motorizados mediante una estación total motorizada (teodolito).
- Medición de la inclinación y el giro mediante un inclinómetro de dos ejes instalado en la máquina.
- Valores de las carreras o extensión de los cilindros de empuje y cilindros de la articulación.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

Con estos datos y parámetros predefinidos (datos iniciales o de proyecto) el programa realiza los cálculos y los visualiza numérica y gráficamente en la pantalla de un ordenador ubicado en la cabina de operación. Los prismas deben ser claramente visibles dentro de una ventana topográfica, dispuesta en la dirección de excavación, de sección mínima de 300 por 300 milímetros durante una longitud mínima de 50 metros. La instalación se lleva a cabo en estrecha colaboración entre el fabricante de la máquina y el fabricante del Sistema automatizado de guiado. El ordenador industrial, el multiplexer y un radio modem se instalan en la cabina del operador, un teodolito motorizado que incluye una fuente de alimentación y un radio se colocan en un soporte adecuado que se fija al hastial o al revestimiento del túnel, así como también el prisma de referencia, este sistema se observa de manera esquemática en la **Figura 98**.

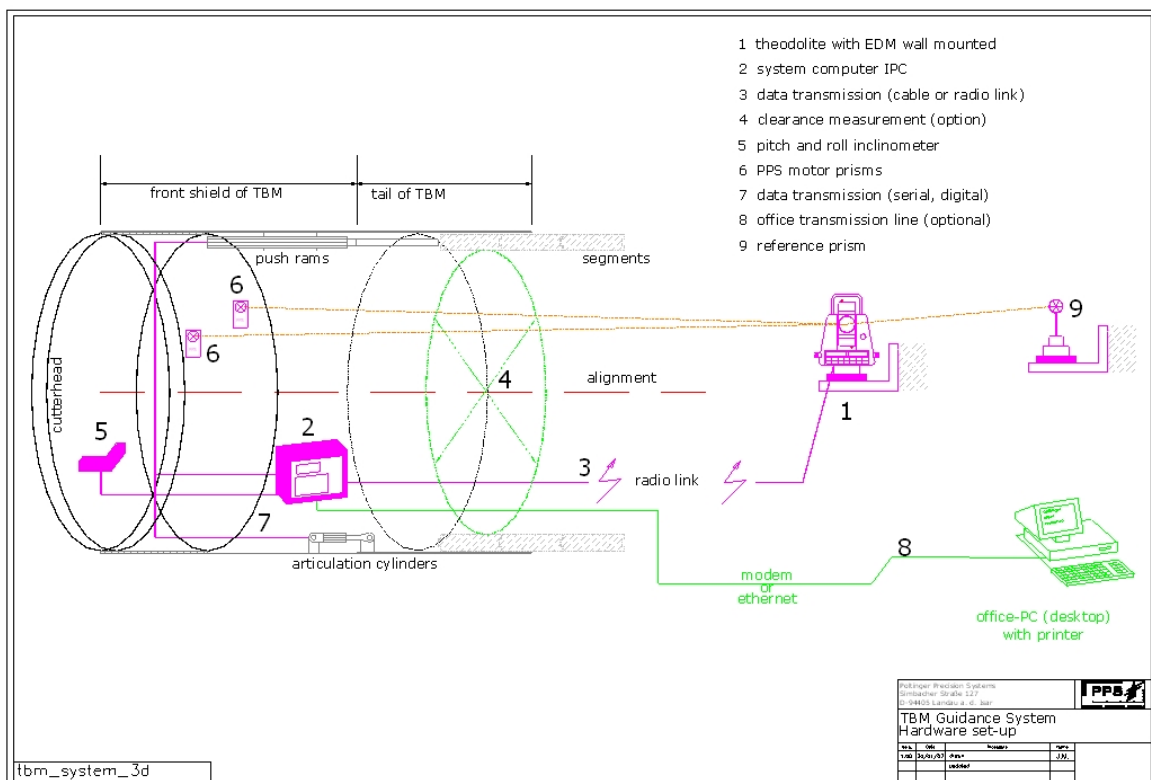


Figura 98. Representación gráfica del sistema automatizado de guiado en la tuneladora (Prismas, Estación total, Inclinómetro y pantalla del ordenador).

El diseño del eje del túnel, las coordenadas del teodolito y del prisma de referencia se calculan mediante procedimientos topográficos que se proporcionan por la topografía de la obra. Antes de introducir la máquina en el túnel y que la tuneladora comience con la excavación, se hacen mediciones parciales de la máquina para definir la relación entre el eje de la máquina y las coordenadas de los prismas motorizados del sistema automatizado (Coordenadas locales). El origen del sistema de coordenadas utilizado se fija en la mayoría de los casos en el centro de la rueda de corte.

En la dirección de excavación se pueden definir tres ejes mostrados en la **Figura 99**:

- Horizontal: derecha (+) e izquierda (-).
- Longitudinal: Puntos por detrás de la rueda de corte (-).
- Vertical: Por encima del eje de la TBM (+) y por debajo del eje de la TBM (-)

Estos valores son necesarios para el prisma #1 (el más próximo a la rueda de corte) y #2 y no deben modificarse mientras la posición de los prismas permanezca invariable.

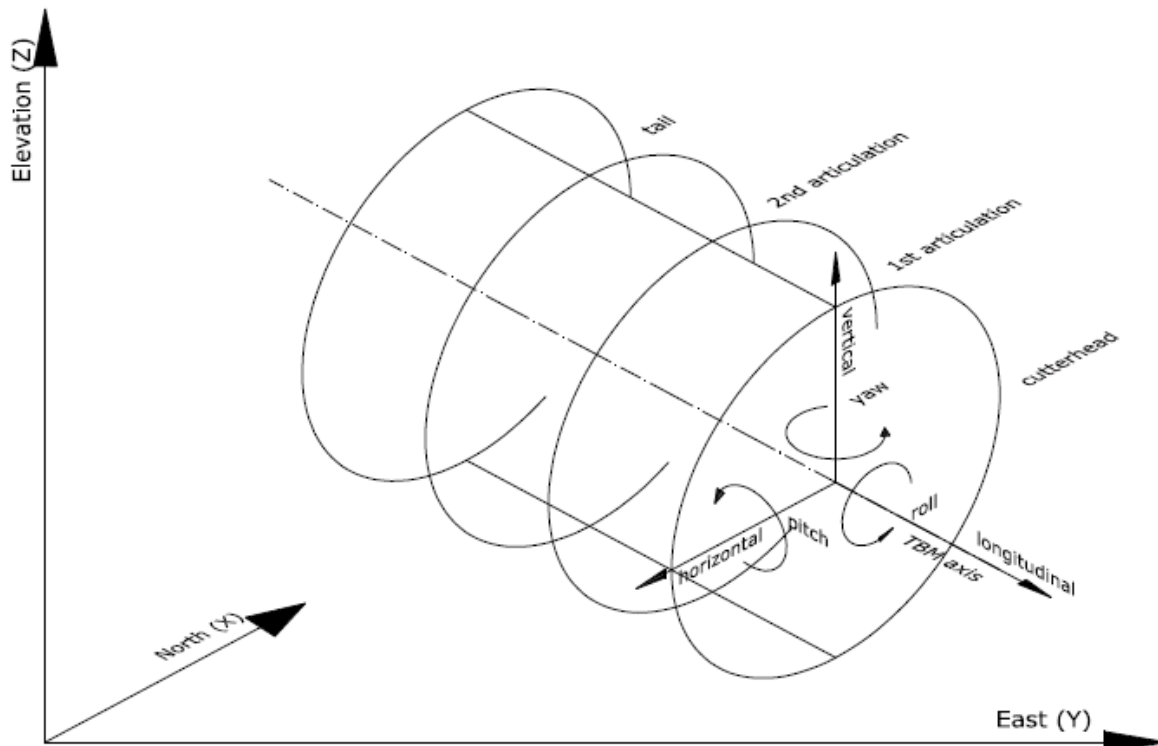


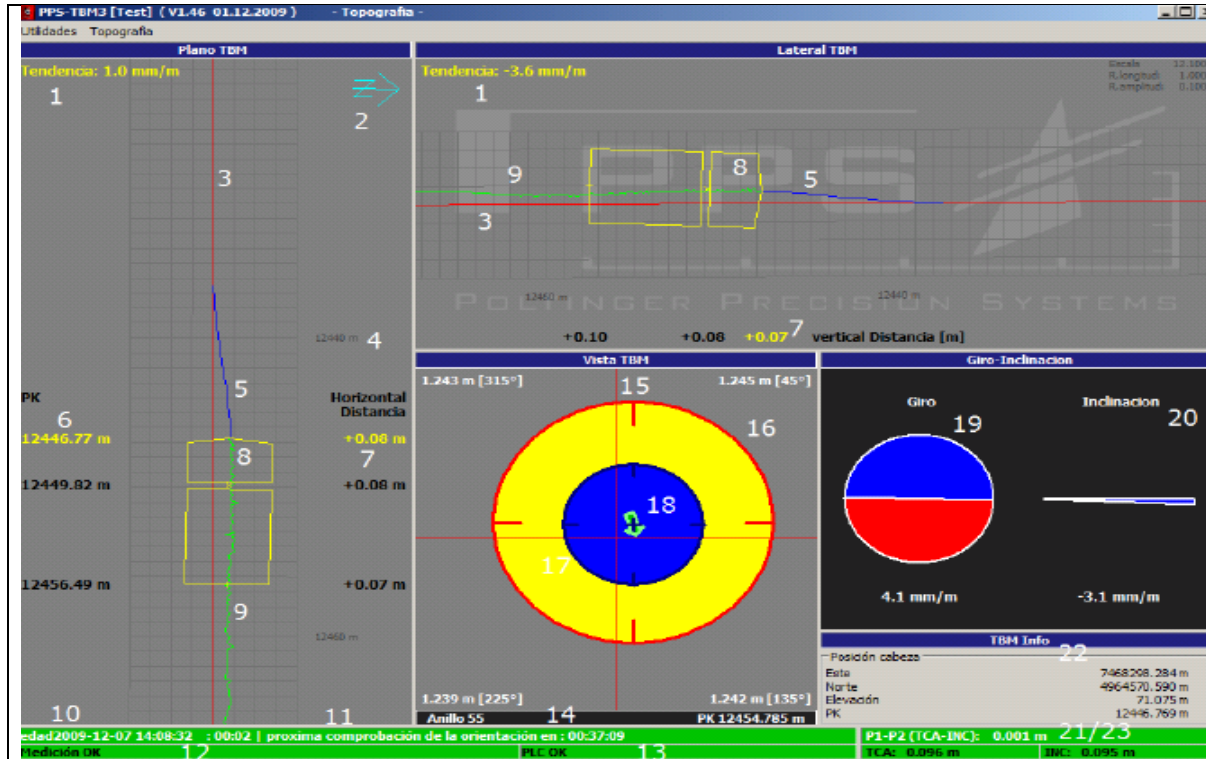
Figura 99. Ejes de dirección.

Con la medición permanente de los prismas y de los valores del inclinómetro estas coordenadas locales se utilizan para calcular la posición de la tuneladora en un sistema de coordenadas globales antes de volverlas a transformar respecto al eje del túnel. Los valores de los gatos de empuje y de los cilindros de la articulación se pueden añadir opcionalmente para obtener información acerca de la posición del faldón y de los anillos de revestimiento erigidos.

Todos los resultados se adquieren durante el funcionamiento del programa y se visualizan en la pantalla del ordenador industrial (IPC) en la cabina la captura de pantalla que se observa en la **Figura 100**.

Si el operador mantiene los números amarillos (1 y 7) y el giro tan próximo a cero como sea posible, la traza de la Tuneladora será la mejor posible.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO



- 1) *Tendencia horizontal (izquierda) y vertical (derecha).*
- 2) *Indicación de la dirección del Norte*
- 3) *Línea roja = Eje geométrico = Eje del túnel.*
- 4) *Cuadrícula de "Distancia al origen (PK)".*
- 5) *Línea azul – Predicción de la trayectoria.*
- 6) *La distancia al origen del frente de la Tuneladora (TBM).*
- 7) *Desviación horizontal y vertical.*
- 8) *El marco amarillo simboliza la Tuneladora.*
- 9) *Historia – Traza, muestra en verde la trayectoria ya excavada.*
- 10) *La ventana de tiempos estará de color rojo en tanto no haya una posición valida disponible durante los tres últimos minutos.*

Figura 100. Visualización en pantalla del sistema de guiado de la tuneladora.

Además del sistema utilizado para el guiado, la tuneladora “Hidalgo” se compone de una articulación cuya función es direccionar la máquina en donde el trazo del proyecto considere un eje curvo, sin embargo, el operador la puede utilizar para corregir el guiado de la máquina en casos en donde su desviación del trazo original sea considerable. Se controla desde la cabina de operación y sus características son las siguientes:

- Angulo de desviación: 2° (Izquierda y derecha) y 0.5° superior.
- Radio mínimo: 200 m.
- Cilindros independientes: 16 piezas de 3000 kN cada uno.

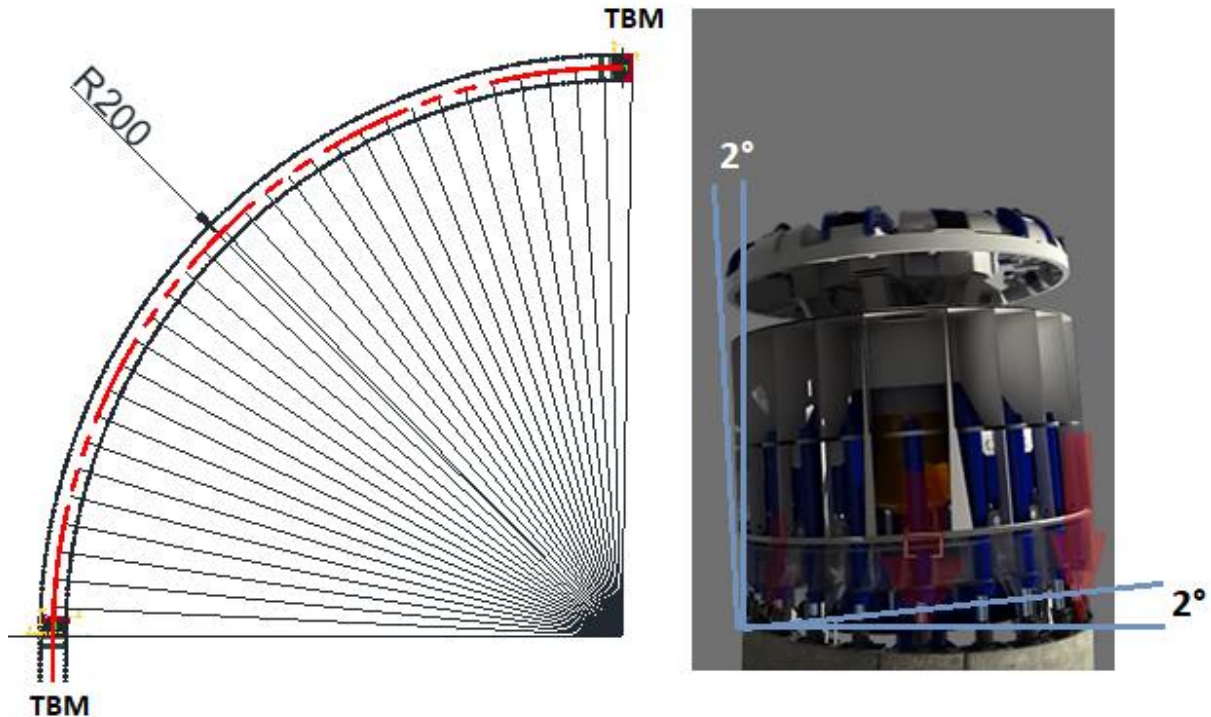


Figura 101. Características de la articulación de la tuneladora “Hidalgo”.

III.5.4 Erector.

Como anteriormente se mencionó, otra de las características de la tuneladora es tener la capacidad de colocar un revestimiento primario como sostenimiento del túnel conforme avanza la excavación, que para el proyecto TEO, se conforma de anillos de dovelas prefabricadas de concreto reforzado. Para lograr este objetivo la máquina cuenta con un componente denominado erector, el cual tiene la función de armar los anillos dovela por dovela, mediante un dispositivo de succión (vacío) que se auxilia de orificios ubicados en la cara interior de la dovela (previstos desde el diseño), estos orificios sirven como guía para que el erector se posicione de una forma más fácil y rápida al momento de generar el vacío e izar las dovelas, para evitar que la dovela se mueva de su posición, una vez colocada, se utilizan los gatos de empuje, los cuales cuando se alcanza la excavación del anillo (1.5 metros) se extienden hasta 2.2 metros aproximadamente, estos se pueden retraer de forma manual y dejar el espacio para el montaje del anillo. Cabe mencionar que para la colocación de 1 dovela sólo es preciso retraer 4 cilindros o gatos de empuje.

III.5.5 Faldón.

Otro de los principales componentes de la tuneladora es el faldón, definido como un anillo metálico adherido a la parte posterior de tuneladora de 10 centímetros de espesor y 3.76 metros de largo, siendo así denominado la cola del escudo, una de sus funciones es alojar el espacio necesario para la extensión de los gatos de empuje con el objetivo de poder montar el anillo, así mismo funciona como

protección entre el terreno excavado y el ultimo anillo colocado, para lo cual se auxilia de un sistema de inyección de grasa y mortero.

III.6 Revestimiento definitivo.

El revestimiento definitivo de Túnel Emisor Oriente se conforma por concreto reforzado colado “in situ”, de un espesor aproximado de 35 centímetros, el espesor del concreto depende principalmente de la geometría que realiza la excavación debido a las desviaciones que se presentan durante el proceso de guiado de la tuneladora.

El revestimiento definitivo en el tramo 3 del TEO se puede definir por la función que realizan los principales componentes que intervienen durante el proceso, como son:

- Cimbra metálica
- Acero de refuerzo
- Concreto
- Actividades complementarias.

Estos componentes a su vez se dividen en diferentes actividades como son; colocación, habilitado, armado, transporte, etc., actividades que desempeñan un papel fundamental para el correcto proceso de construcción del revestimiento.

III.6.1 Cimbra metálica.

La cimbra se integra por un conjunto de estructuras metálicas llamadas módulos, que ensamblados forman un anillo metálico, tienen la rigidez, resistencia y estabilidad suficiente para soportar la presión originada por el concreto, los vibradores y cargas que se presentan durante la construcción.

La cimbra telescópica utilizada en el tramo 3 del TEO, observada en la **Figura 102** y **103**, fue fabricada por la empresa Euroform filiar de Herrenknecht, adquirida con un costo aproximado de \$18,180,000.00 M.N. Está compuesta por un total de 8 secciones (módulos) cada uno de 7.5 metros de largo más 1 elemento invertido adicional, conformando una longitud total de cimbra de 60 metros. Se compone adicionalmente por un carro transportador y dos estructuras auxiliares ubicadas a cada costado de la cimbra. El sistema está diseñado para utilizar un distribuidor de concreto alimentado a través de una tubería abatible (con sistema de tijera) y un brazo abatible, permitiendo la compatibilidad de espacio entre el distribuidor de concreto y el paso de los segmentos de la cimbra hacia el frente disminuyendo el tiempo en la interrupción de la inyección de concreto a través de las boquillas. Cada segmento de cimbra se compone de un elemento de corona, dos elementos laterales y dos elementos basculantes todos articulados por medio de bisagras y pasadores, estos elementos son móviles una vez finalizado el tiempo de fraguado requerido del concreto; logrando así un rendimiento neto de 300 metros lineales a la semana.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

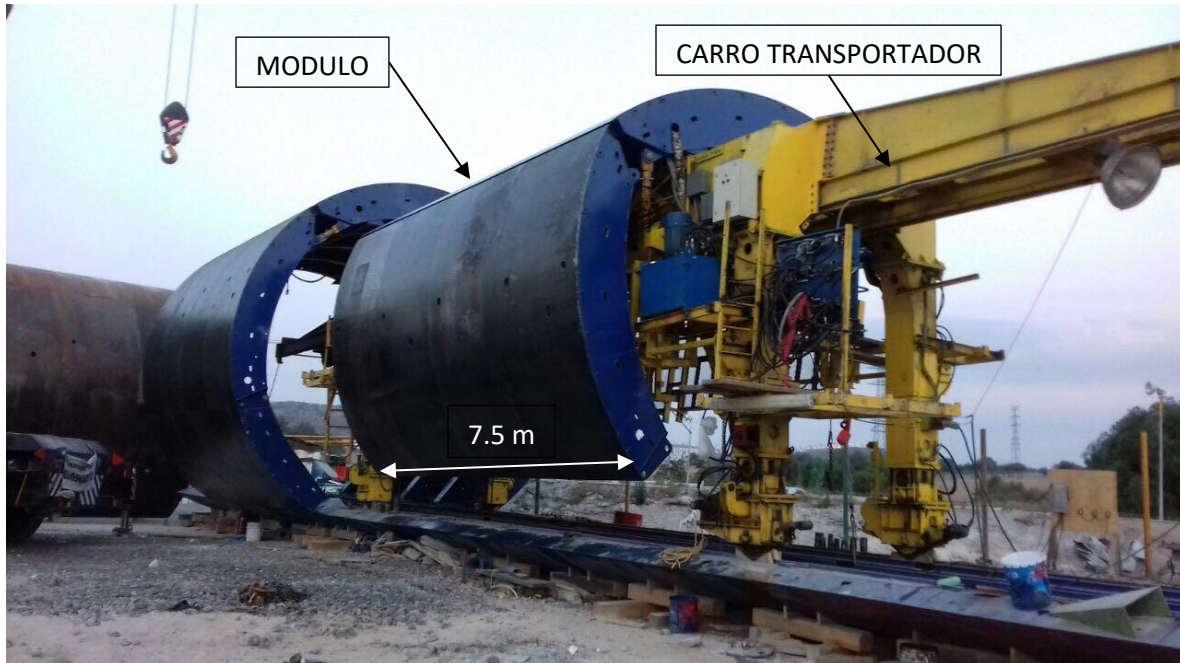


Figura 102. Cimbra metálica.

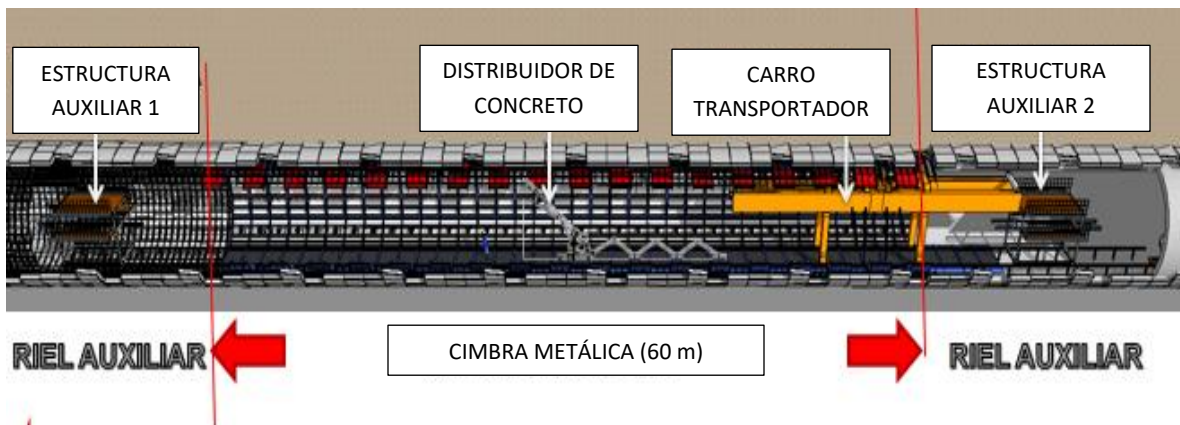


Figura 103. Cimbra metálica (vista lateral).

Antes de iniciar la instalación de la cimbra en túnel, se realizan trabajos complementarios y adecuaciones en el fondo de lumbrera, así como el ensamble preliminar en superficie y el habilitado del acero de refuerzo.

Como anteriormente se mencionó, para el ensamble de la máquina tuneladora en la lumbrera L10, fue necesaria la construcción de una galería de montaje, por lo cual, terminadas las actividades de excavación, se tiene la necesidad de rellenar el espacio anular libre existente entre el paño interior de la galería y la proyección del paño exterior del revestimiento definitivo, así como de realizar el emboquillado de los portales en los pasos de lumbrera como se aprecia en las **Figuras 104 y 105**.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

El relleno de la galería se ejecuta a base de concreto simple de $f'c=100 \text{ kg/cm}^2$, colocando inyecciones de contacto en la zona de la clave y utilizando cimbra convencional. Los emboquillados son construidos con concreto de $f'c=350 \text{ kg/cm}^2$ y debido a que fungen como remate del revestimiento definitivo del túnel dentro de la lumbrera no se colocan ningún tipo de conexiones estructurales lumbrera-túnel.

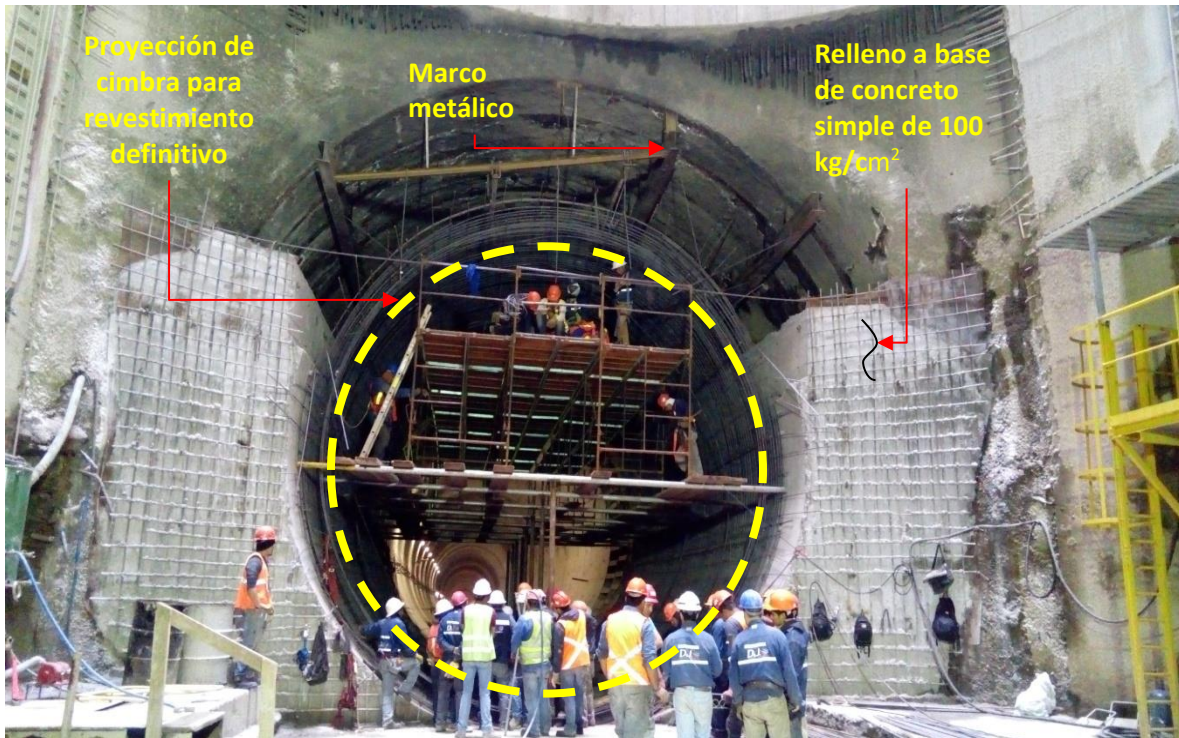


Figura 104. Relleno de galería de montaje.



Figura 105. Emboquillado de portal de entrada a túnel.

Finalizado los trabajos de relleno de galería y emboquillamiento del portal, se realiza el descenso e instalación de la cimbra telescópica mediante una grúa de 200 toneladas de capacidad. Durante las maniobras de colocación, nivelación y sujeción de la cimbra, la brigada de topografía revisa su alineación correcta y recubrimiento adecuado del acero de refuerzo.

III.6.2 Acero de refuerzo.

El acero de refuerzo del revestimiento definitivo del tramo 3 del TEO originalmente contemplaba el diseño observado en la **Figura 106**, en donde se observa un armado doble con varillas del No.4 a cada 300 milímetros en el sentido longitudinal y varillas del No.6 a cada 125 milímetros en sentido transversal además de la colocación de bastones y “z” como refuerzo adicional. El acero colocado se rige mediante las normas ASTM A615-97 o NMX-C-407-ONNCCE-2001 con pruebas realizadas por un laboratorio autorizado.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

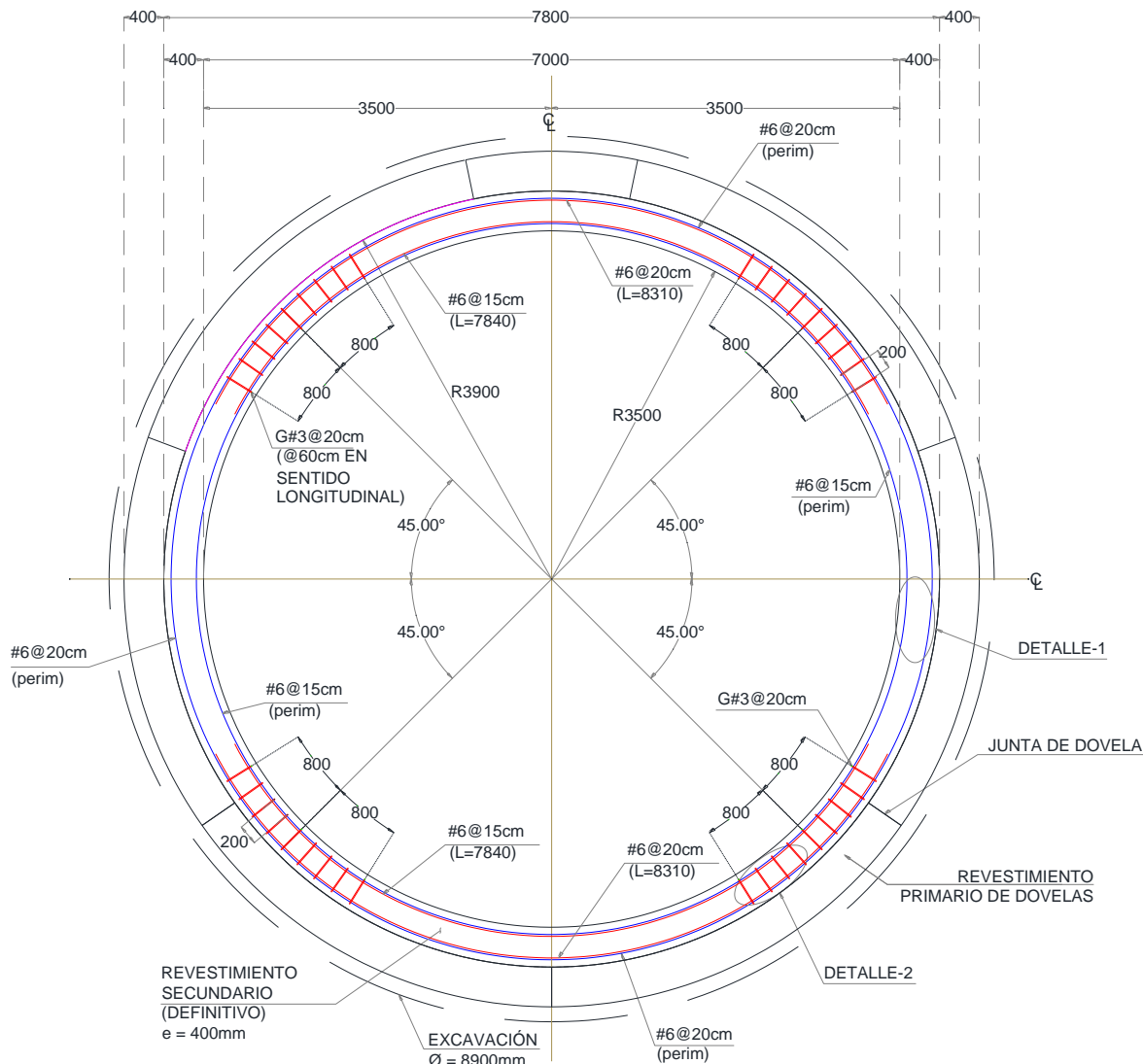


Figura 106. Armado de acero de refuerzo original en el TEO, Tramo 3.

Tomando como referencia el comportamiento del revestimiento primario, el tipo se suelo y consideraciones de diseño estructural, se disminuyó acero de refuerzo en varias zonas del tramo 3, como ejemplo, en zonas en donde el frente encontrado durante el paso de la tuneladora, con un frente mixto se eliminó el refuerzo por cortante “zetas” y se disminuyó la longitud de los bastones con el objetivo de optimizar el acero colocado, así mismo en zonas de frente completamente rocoso se optó por eliminar completamente el acero.

La colocación del acero de refuerzo se realiza mediante la utilización de una estructura metálica o andamios móviles instalados conforme avanza el habilitado y como se aprecia en la **Figura 107**, también se utilizaron silletas de acero, las cuales aseguran el correcto armado durante todo el proceso de colado y fraguado del concreto.



Figura 107. Habilitado de acero de refuerzo para el revestimiento definitivo.

Conforme la excavación avanza se tiene la posibilidad de realizar los trabajos de construcción del revestimiento definitivo de forma paralela. Siguiendo la logística mostrada en el **Figura 108** se observa que si la tuneladora realiza los trabajos de excavación de lumbrera L11 a lumbrera L12, la cimbra tiene la posibilidad de avanzar en la construcción del revestimiento de la lumbrera L10 a la lumbrera L11 sin existir interferencias en ambas actividades, además de poder aprovechar los equipos utilizados en la excavación, como es el caso de la grúa pórtico para el descenso y suministro del acero necesario y locomotoras con plataformas doveleras para el traslado hasta el frente de habilitado.

Antes de descender e instalar la cimbra telescópica, se realiza la limpieza y habilitado de acero de los primeros 300 metros de túnel con el objetivo de que, una vez realizado el primer colado, el suministro de acero se realice desde la siguiente lumbrera como se observa en la **Figura 108**.

La implementación de este sistema de logística permite obtener buenos rendimientos y avances significativos en la construcción del túnel.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

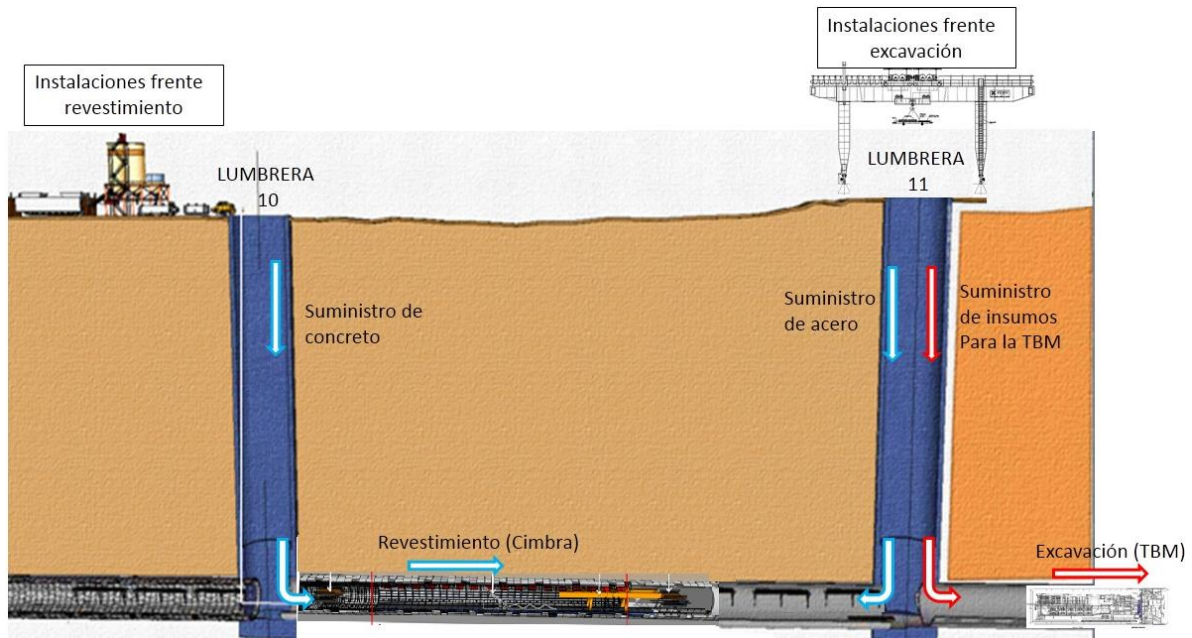


Figura 108. Logística de construcción del revestimiento definitivo del Tramo 3.

III.6.3 Concreto.

El concreto utilizado es de un espesor mínimo de 35 centímetros, con resistencia a la compresión $f'c=350 \text{ kg/cm}^2$, adicionado con 3.0 kilogramos de macrofibras sintéticas de polipropileno (MasterFiber MAC Matrix de BASF) por metro cúbico, fabricado con cemento tipo CPO-40-RS resistente a los sulfatos (RS) que cumplen con la norma NMX-C414-CNNCCE-2004, la relación Agua/Cemento es de 0.45 como máximo, el TMA es de 19 milímetros, los aditivos reductores de agua o fluidificantes son Mastersure Z90 y Master Glenium 3035 de BASF, utilizados para que su colocación sea con un revenimiento medido en bomba de entre 18 ± 4 centímetros. El concreto tiene propiedades de alta fluidez (Autocompactable), con permanencia de fluidez, resistencia a la segregación por caída y por desplazamiento durante el bombeo, consistencia y estabilidad después del bombeo y control de su temperatura.

La dosificación utilizada por m^3 se compone de la siguiente manera:

Descripción	Unidad	Cantidad
Cemento CPO40RS	Ton	0.46350
Grava	m^3	0.63527
Arena	m^3	0.56790
Agua	m^3	0.20806
Aditivo MASTERSURE Z90	Litro	1.85400
Aditivo MASTER GLENIUM 3035	Litro	1.85400
Macrofibra sintética, MASTERFIBER MAC MATRIX	kg	5.15000

Características de sus agregados:

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

Arena	
Pérdida por lavado	3 % máximo
Contenido de pómez, tepetate, etc.	6 % máximo
Módulo de Finura	2.5 y 3.0
Prueba de Colorimetría (Materia Orgánica)	Satisfactoria
Densidad	2.45 g/cm ³

Grava	
Granulometría	No. 67 ASTM C 33 99
Pérdida por lavado	1 % máx
Densidad	2.45 gr/cm ³
Partículas planas y alargadas	18 % máx.

El modo de fabricación del concreto se realiza en superficie mediante una planta de concreto modelo PL5 de la marca ODISA, con una capacidad de producción de 60 m³ por hora, instalada en el área aledaña a la lumbrera para su funcionamiento se utilizan equipos auxiliares como son; un cargador frontal para llenado de tolvas de agregados y contenedores móviles de cemento.



Figura 109. Planta dosificadora utilizada para fabricación de concreto.

Para la primera fase constructiva, es decir para los primeros 300 metros de túnel, el concreto se suministra a través de una línea de bombeo desde superficie hasta

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

fondo de lumbrera. De igual manera a la salida del cono del mezclador de la planta dosificadora, se instala una bomba estacionaria de concreto modelo BSA 14,000 Diésel marca Putzmeister, la bajada del concreto es por gravedad con tubería vertical de 10" anclada a la pared de lumbrera y hacia un tanque amortiguador ubicado en fondo de lumbrera.

Una vez alcanzados los primeros 300 metros de colado se utiliza el procedimiento mixto conformado por equipos fijos (bombeo) y equipos móviles (Carros moran) que permiten la ejecución de las actividades con mayor eficiencia al eliminar la necesidad de ir incrementando tubería a lo largo del túnel, así como la conexión y desconexión de los equipos de bombeo, dando una mayor continuidad al proceso.

Los carros para la transportación de concreto denominados "carros moran" tienen una capacidad de $12 \text{ yds}^3 = 9.0 \text{ m}^3$, mismos que consisten en un tanque en forma de cilindro con un gusano transportador al interior y un sistema motriz para agitación y descarga de la mezcla de concreto transportada. Estos carros transportadores trasladan desde fondo de lumbrera hasta la estación de bombeo el concreto fabricado, una vez ubicados en dicha estación, se realiza la descarga de la mezcla a través de la compuerta del carro diseñada para tal fin. La mezcla a su vez es descargada en una tolva receptora y conducida hacia la bomba por una banda motriz (Auger max), la cual descarga la mezcla hacia de tolva de la bomba de concreto eléctrica considerada para esta etapa (BS 120 E – Putzmeister).



Figura 110. Carro Moran y Auger max.

Los sistemas tradicionales de colado, utilizaban un equipo de inyección denominado "Snorkel", el cual derivado de sus dimensiones y diseño, obligaban a su desconexión, limpieza y traslado hacia fuera de la cimbra para permitir el paso hacia el frente de los módulos de la misma obligando así a la interrupción del proceso en cada movimiento, lo que contribuía a limitar la opción de la utilización de moldes de gran longitud para evitar la interrupción del proceso, llenando una longitud de molde corto desde un pequeño número de ventanas, casi siempre llenando el molde de manera horizontal.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

En la actualidad la innovación tecnológica en el diseño de los equipos de inyección de concreto en la cimbra, permite que el distribuidor de concreto sea completamente retraible, permitiendo el paso a través del mismo de los módulos de la cimbra, lo cual permite una mayor continuidad en las actividades de inyección de concreto en el molde.



Figura 111. Snorkel retraible para inyección de concreto.

El ritmo de colado se realiza iniciando desde el módulo 1, siendo este el más tardado debido a la forma de colocación y cantidad de concreto observado en la **Figura 112**, el volumen de concreto por modulo es de aproximadamente 70 m³ con un rendimiento de colocación de 20 a 25 m³/h.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

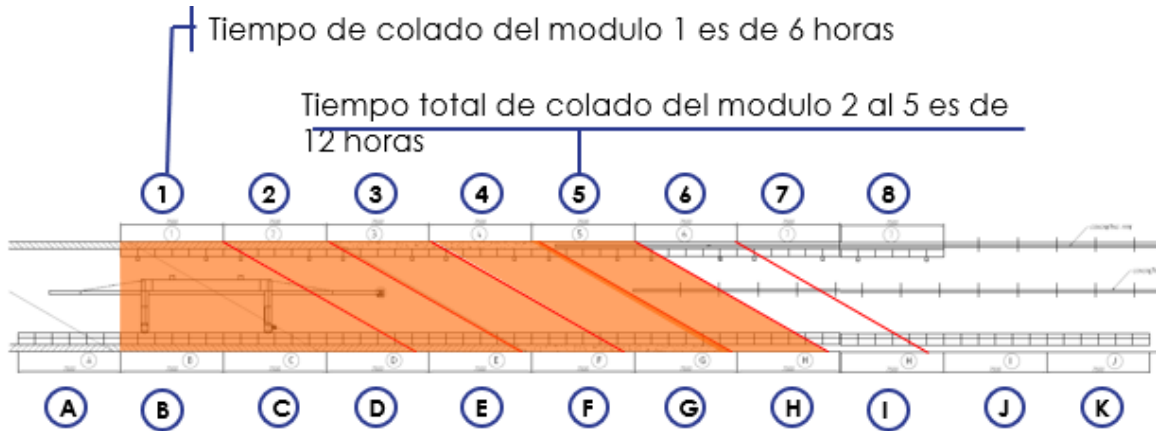


Figura 112. Ritmo de colado.

Para lograr el proceso de movimiento telescópico de la cimbra, se requiere un adecuado control de los siguientes factores:

- Mezcla de concreto (Revenimiento y permanencia).
- Control en la utilización de los vibradores.
- Velocidad de llenado.
- Eficiencia en los movimientos de la cimbra hacia el frente.

La compactación del concreto se realiza utilizando vibradores de pared e inmersión eléctrica o neumática. Así mismo se utiliza un agente desencofrante para evitar que el concreto se adhiera a las paredes de la cimbra y de tal manera, facilitar el descimbrado.

Progresivamente conforme se realiza el avance del revestimiento, se realiza la instalación de vía sobre la longitud revestida para el tránsito de los carros moran. Así mismo finalizado el proceso de colado de todos los módulos instalados se tiene un tiempo aproximado de espera de 12 horas para el descimbrado y 24 horas para la instalación nuevamente de los módulos, por lo que el rendimiento neto es de 3 colados a la semana (180 metros lineales).

III.6.4 Actividades complementarias.

Al concluir el revestimiento del subtramo en cuestión, se realiza la construcción de medias cañas en fondo de lumbrera con el objetivo de dar continuidad al túnel entre los portales de entrada y salida de la lumbrera, esta sección como se observa en la **Figura 113**, alcanza una altura de 6 metros desde la plantilla del túnel, independientemente de la consideración de que, por estanqueidad se prevea una columna de agua alrededor de los 20 metros, por tratarse únicamente de esfuerzos a compresión, el espesor de concreto de la media caña se construye contra cambios volumétricos.

Transversalmente la sección de media caña se compone por muro perimetral en la entrada del túnel relleno con concreto simple de $f'c=100 \text{ kg/cm}^2$, una base sobre

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

la sección de losa de trabajo y cuna de arrastre y losas superiores y laterales construidos con concreto reforzado de $f'c=350 \text{ kg/cm}^2$, el acero se compone de varilla de No.4 a cada 25 centímetros.



Figura 113. Media caña en fondo de lumbrera.

IV. PROCESO DE EXCAVACIÓN DEL TRAMO 3.

IV.1 Descripción de las actividades realizadas durante el proceso de excavación.

El proceso de excavación de un túnel se realiza mediante un conjunto de actividades cíclicas, el rendimiento de excavación alcanzado depende de su buena aplicación y funcionamiento.

A continuación, se realizará una descripción detallada de todas las actividades que intervienen durante el proceso de excavación.

IV.1.1 Ciclo de excavación.

Generación de rezaga. La tuneladora utilizada para la excavación en el Tramo 3 del TEO, denominada “Hidalgo”, además de estar diseñada del tipo EPB (Earth Pressure Balance) está diseñada para la excavación en diferentes tipos de terreno. Como se observa en la Figura 7, con el trazo del túnel en el perfil geológico se determinó que la geología que conforma el frente de excavación del tramo 3 se compone principalmente de arenas y arcillas, material que fue clasificado como Suelo, sin embargo, la presencia de gravas y basaltos dio la pauta para clasificar otros dos tipos de material; Mixto, para un frente compuesto de arcillas, arenas y basaltos y Roca, para un frente compuesto completamente de basalto.

Como toda máquina fabricada para realizar trabajos de construcción, la tuneladora maneja una serie de parámetros de operación recomendados por el fabricante Robbins considerado los tres tipos de terrenos mencionados, parámetros que se basan fundamentalmente en un buen control de presión del sostenimiento del frente.

Desde la cabina de operación se controlan los principales componentes de la máquina, como son la rueda de corte, el tornillo sin fin, la articulación, el sistema de bandas, el sistema de inyección de grasa y el sistema de inyección de espuma. La rueda de corte fue diseñada del tipo Spoke con un 45% de apertura, conformada con 6 brazos y 6 pétalos, equipados con herramientas intercambiables de menor dimensión que, durante el giro de la misma, “rasgan” el terreno del frente de excavación.

La rueda de la tuneladora “Hidalgo” cuenta con un total de 48 housing o alojamientos para herramientas de corte; 8 en la periferia, 32 en la parte frontal y 4 dobles en la parte central, para los primeros 100 metros que componen el tramo 3 del TEO, se utilizaron herramientas denominadas “Rippers” por ser eficientes para un frente del tipo Suelo, compuesto principalmente de arcillas y arenas, sin embargo, debido a la presencia de fragmentos de roca se tomó la decisión de cambiar los rippers a cortadores de disco que consisten en una base de metal duro en forma de disco con un filo (o varios) recambiable de acero endurecido y montado sobre un soporte de rodamientos; eficientes para la excavación en

frentes Mixtos. Así mismo se conforma de 188 piezas de scrapers o limpiadores de metal; de las cuales 60 piezas se ubican en la periferia y el restante en la parte frontal, adicionalmente cuenta con 44 piezas de knife bits o rasgadores, el despiece y ubicación se observa en la **Figura 114**.

Los cortadores de disco se ubican de forma que al girar la rueda describen círculos concéntricos equidistantes como se aprecia en la **Figura 115**. El proceso de corte mecánico se produce inicialmente mediante un proceso de rotura frontal originado por la presión que el cortador ejerce sobre el frente, este proceso se divide en presión inicial, penetración por punzamiento, aparición de fisuras, aumento de fisuración y rotura del frente. A este proceso de rotura puntal que se produce en cada una de las superficies de contacto de los cortadores, se añade el efecto que se produce entre dos discos próximos y que crea un escombro lajoso. El trabajo de corte es desarrollado por las fuerzas de rodadura y las fuerzas actuantes que se ejercen en el disco.

Los radios de acción de cada cortador ubicado en la rueda de corte de la tuneladora "Hidalgo" se observan en la **Figura 116** y su separación entre si es de 10 centímetros aproximadamente.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

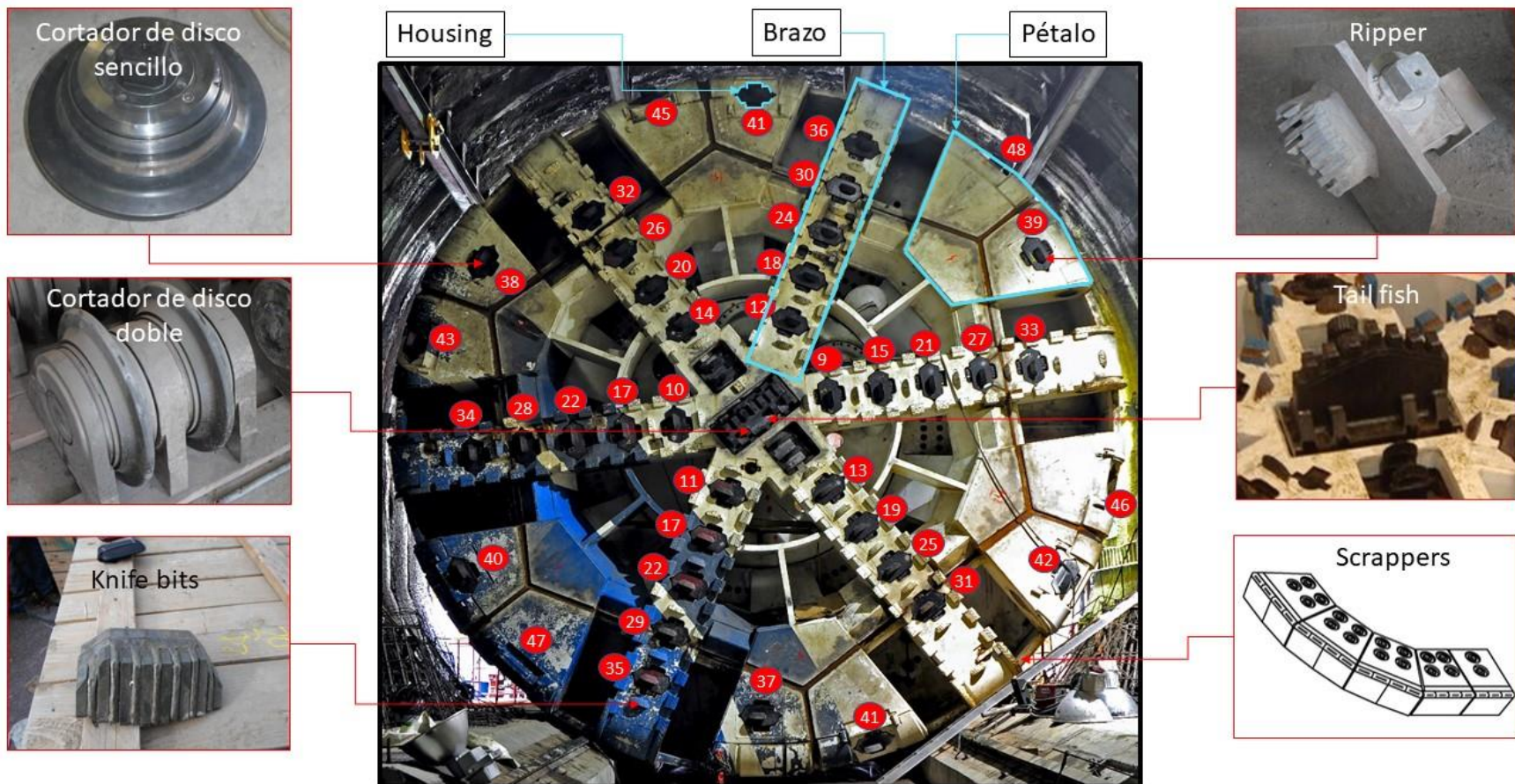


Figura 114. Herramientas de corte.



Figura 115. Radio de acción de los cortadores.

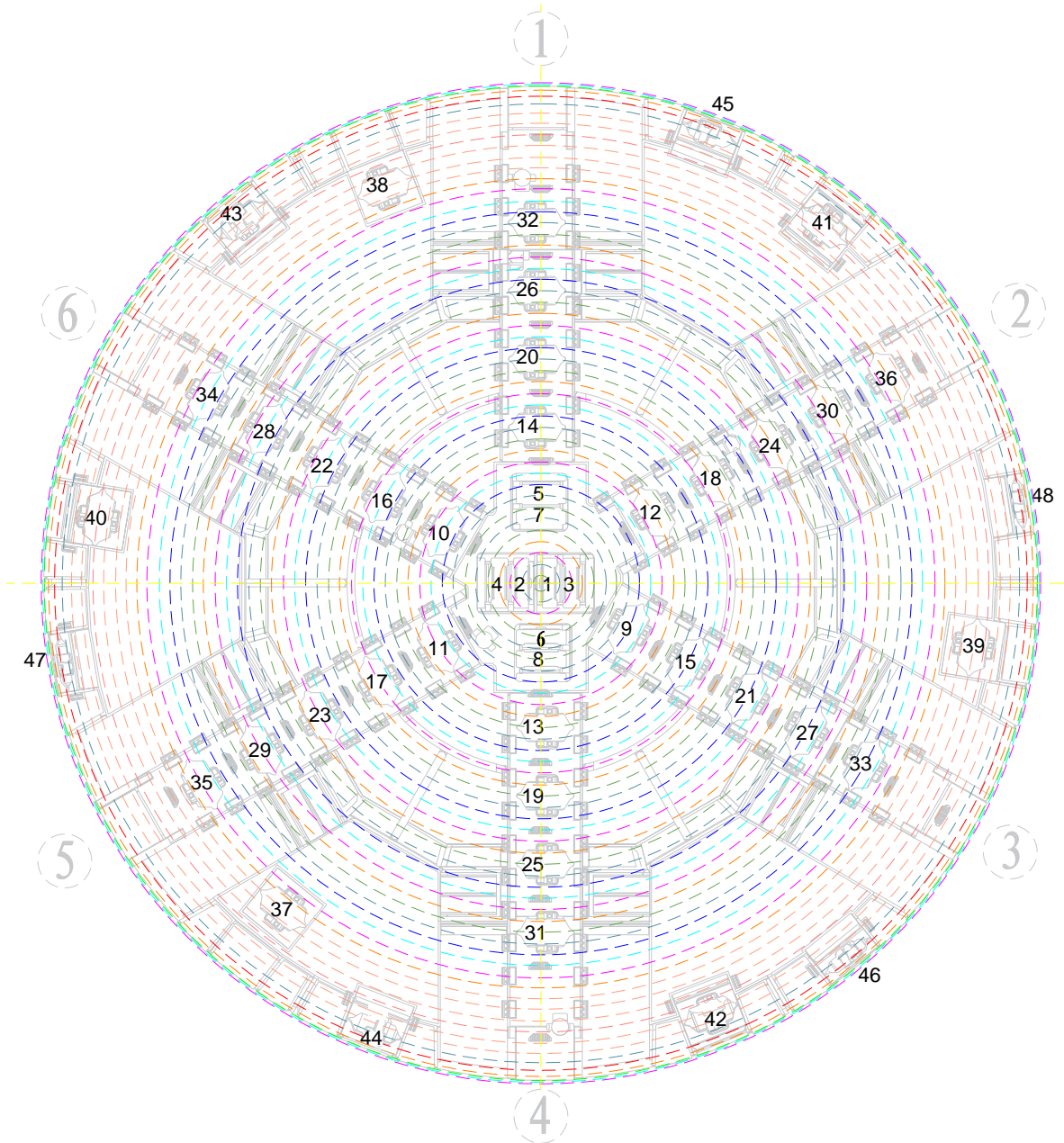


Figura 116. Radio de acción de los cortadores.

Tratamiento de terreno. El terreno encontrado el tramo 3 del TEO no posee propiedades que le permitan ser fácilmente moldeado, es decir necesita ser tratado para su fácil extracción a través del tornillo sin fin de la TBM. Debido a que no tratar correctamente el terreno implica bajos rendimientos de avance por las dificultades de transportarlo en el sistema de bandas, además de que existe la probabilidad de presentarse atascamientos en la rueda de corte (que implican la parada de la tuneladora y operar manualmente dentro de la cámara de amasado,

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

con el elevado riesgo que esto comporta para el personal implicado), elevados costos de mantenimiento, etc.

El tratamiento del terreno se realiza mediante la inyección de un agente espumante combinado con aire y agua al frente de excavación, formando una espuma o una burbuja como el jabón, con buenas características de estabilidad bajo presión a lo largo del tiempo y en donde la rueda de corte es la encargada de mezclar y realizar la óptima consistencia del mismo. Existen diferentes tipos de agentes y su consumo varia, teniendo como condicionante el tipo de terreno.

La inyección de la espuma se realiza mediante un sistema de inyección observado en la **Figura 117**, conformado por contenedores, bombas y puertos que se localizan en la rueda de corte.

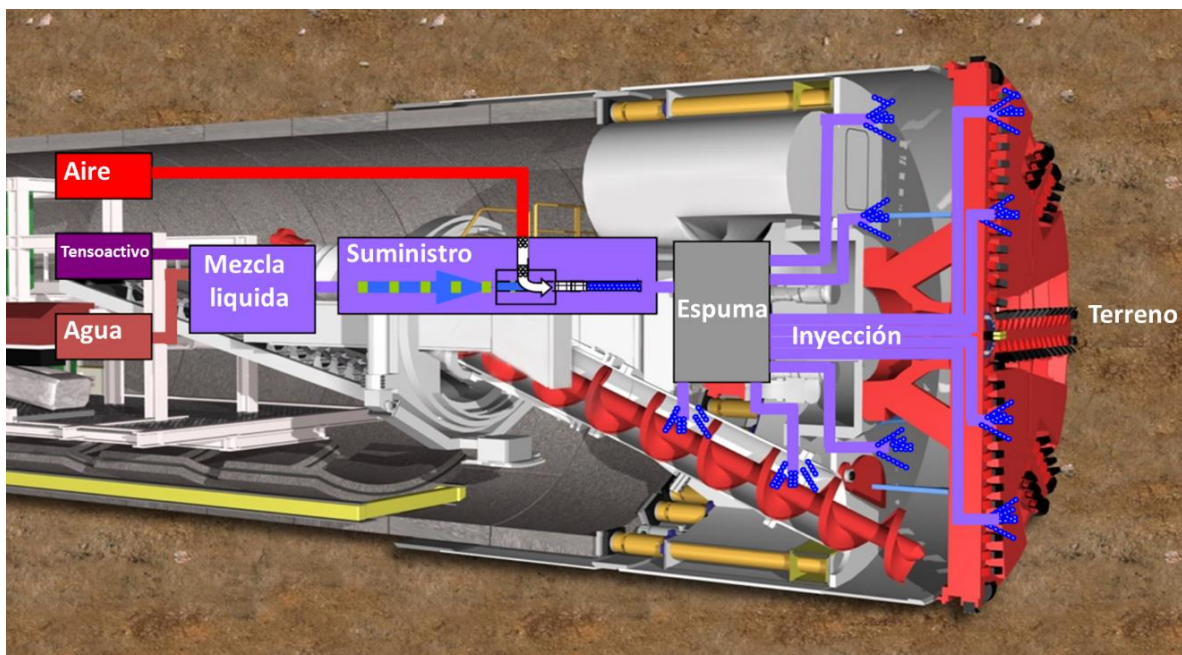


Figura 117. Sistema de inyección de espuma.

Existen diferentes parámetros para generar un acondicionamiento óptimo del material durante la excavación, de los cuales se definen tres principales:

- **Tasa de inyección (FIR):** La tasa de inyección de las espumas es la proporción que existe entre el volumen de espuma respecto al volumen del terreno, suele estar comprendido entre el 10% y el 80%, entre más blando sea el tipo de terreno su valor es menor y entre más rocoso o duro será mayor. Sus valores se obtienen por recomendaciones del proveedor o por estudios previos del tipo de frente, durante la excavación del tramo 3 se utilizó un FIR de 42% para un frente del tipo Suelo y hasta de 190% para un tipo Mixto-Roca, con estos valores se obtuvo el volumen de espuma (V_e) utilizado como así lo muestra la **Figura 118**.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

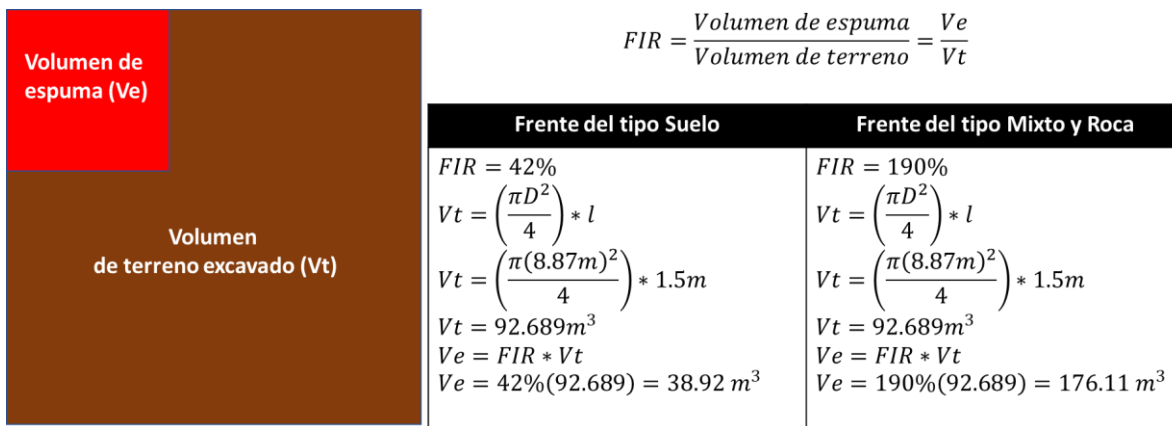


Figura 118. Tasa de inyección FIR.

- Tasa de expansión (FER):** La tasa de expansión de la espuma es el volumen generado de espuma a partir de un volumen de solución, el cual 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, y cuanto más húmedo sea el terreno; la espuma deberá ser muy seca y viceversa, para el caso del Tramo 3 del TEO se estableció un valor de 8 para un frente del tipo SUELO y 9 para un frente del tipo Mixto-Roca obteniendo así un volumen de solución para cada tipo de frente como lo muestra la **Figura 119**.

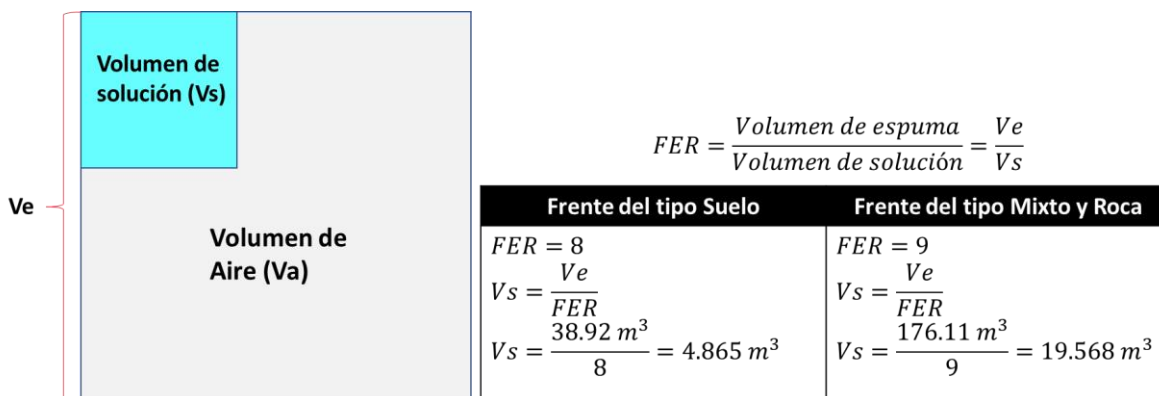


Figura 119. Tasa de expansión FIR.

- Concentración (Cf) y Volumen de tensoactivo (Vten):** La concentración se define como el porcentaje de agente espumante (tensoactivo) con respecto al agua, se encuentra en el rango del 0.5 al 5%, en la mayoría de los casos se utilizó un valor del 3% para el Tramo 3 del TEO. Estas concentraciones dependen fuertemente de la cantidad de agua que se inyecta o la que ya está presente en el terreno, la cantidad de tensoactivo se calcula por recomendación del proveedor y por el tipo de frente. En la **Figura 120** se muestra el cálculo del volumen de tensoactivo por tipo de frente encontrado en el tramo 3 del TEO.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

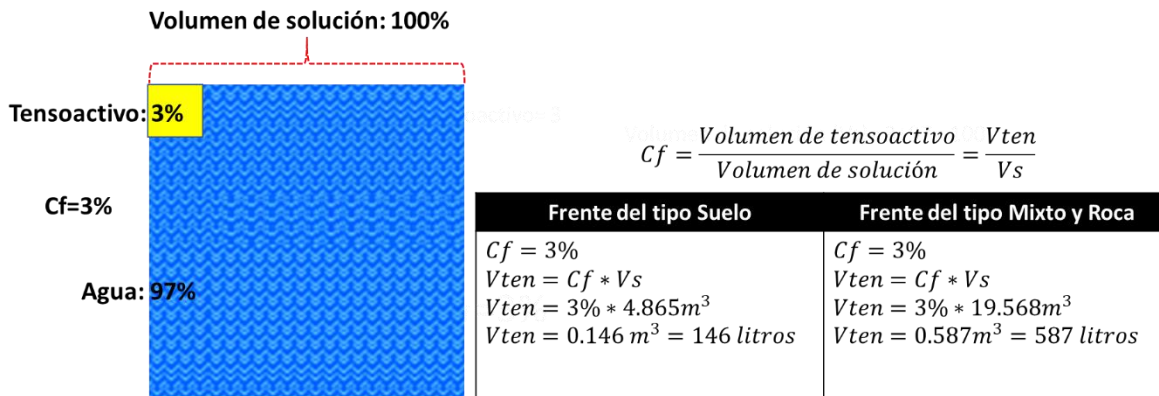


Figura 120. Concentración y volumen de tensoactivo utilizado en el tramo 3 del TEO.

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. Un ejemplo típico podría ser el de en los suelos arenosos saturados y con poca cohesión. La concentración suele estar entre el 0.1 y el 5% en la solución espumante pero también pueden inyectarse directamente en su versión sin diluir.

En algunos casos en donde se tenía aportaciones considerables de agua en el frente, se inyecta un polímero denominado “superabsorbente”, generando así una consistencia de material aceptable.

Desalojo de rezaga. El desalojo del material rezagado por la rueda de corte se realiza mediante un tornillo sin fin o tornillo de Arquímedes del tipo Ribbon desde la parte inferior de la cámara de excavación, por lo cual se genera una presión de salida siendo está regulada por una compuerta al final, todo el tornillo está cubierto por una carcasa metálica en donde se ubican compuertas de observación y mantenimiento.

La operación del tornillo se realiza desde la cabina, en donde el operador tiene la capacidad de regular la presión del frente extrayendo el material rezagado conforme avanza la excavación.

El tornillo que utiliza la tuneladora “Hidalgo” tiene la capacidad de desalojar 500 m³/hora de material a una velocidad de giro de 19.2 rpm con un torque máximo de 117 kNm, se compone de un total de 14 alabes, los cuales reducen la presión en 0.5 bares por cada uno.

El diseño original de la tuneladora “Hidalgo” se caracterizaba por tener 2 tornillos para la extracción de material, un tornillo vertical y un tornillo horizontal (N.1 y N.2 respectivamente) observado en la **Figura 121**, lo cual facilitaba un mejor control de la presión de salida de la rezaga, sin embargo, esta característica tenía sus

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

inconvenientes, debido a que cuando la excavación se realizaba con un frente totalmente de roca, se originaban boleos de hasta 37 centímetros de diámetro medio inferior, ocasionando una obturación o tapón en todo el eje del tornillo.

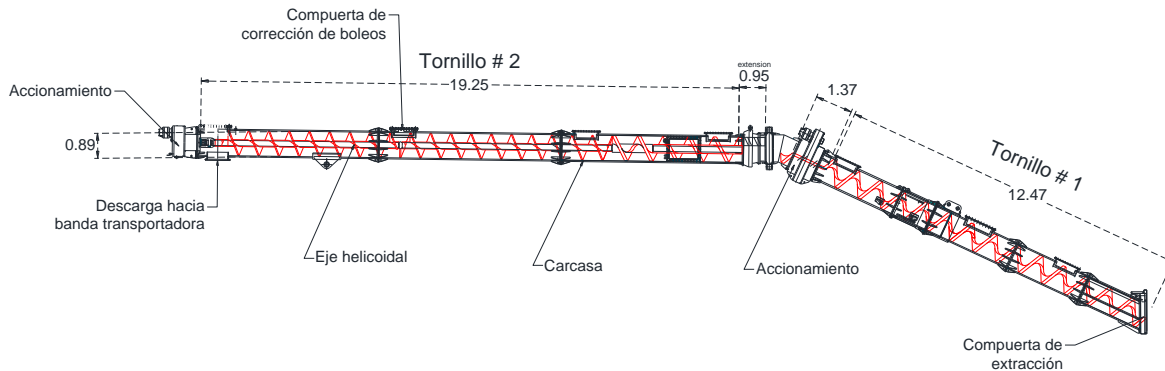


Figura 121. Características geométricas del tornillo sin fin N.1 y N.2.

Una vez extraído el material de forma controlada del frente de excavación por medio del tornillo sin fin, se utiliza un sistema de bandas transportadoras, el cual se extiende desde la máquina hasta la superficie de la lumbrera.

Este sistema de bandas tiene una ventaja enorme en cuanto a que reduce los tiempos de excavación y colocación de anillos, su capacidad de desalojo es de 250 kilogramos de material por segundo, sin embargo, también tiene desventajas por los mantenimientos necesarios, problemas mecánicos y en dado caso el tipo y consistencia del material extraído.

El sistema de bandas se puede definir como un conjunto de estructuras temporales que se instalan en el túnel, en el fondo de lumbrera y en superficie, apoyadas por una cinta transportadora de tela de 762 milímetros de ancho, precortado de 400 metros de longitud y una cinta de cangilones cuyo objetivo es transportar el material rezagado desde la TBM hasta un depósito temporal fuera del túnel, por lo cual se puede dividir en base a su ubicación y componentes como son:

- Sistema integrado:** Conjunto de estructuras con cinta fija que se localizan en la tuneladora, reciben el material a la salida del tornillo sin fin y lo transportan a lo largo del back up para depositarlo en el sistema horizontal.
- Sistema horizontal:** Se compone por conjunto de estructuras que reciben el material proveniente del sistema integrado y lo descargan en el fondo de lumbrera para su traslado a superficie mediante el sistema de Bandas Vertical. Se compone según su ubicación y como se observa en la **Figura 122, 123 y 124:**
 - **Avance de cola (Tail piece).** Estructura localizada en el cuarto gantrie de la TBM, su función es recibir el material rezagado del tornillo sin fin y depositarlo en la cinta transportadora del túnel, cuenta con un sistema hidráulico accionable para ayudar en la alineación de la cinta

transportadora, en esta sección se instala de forma manual la estructura de soporte del túnel.

- **Estructura de soporte de cinta transportadora en túnel** (Belt structure). Marcos de apoyo que se colocan de forma manual a un costado del túnel durante el avance de la excavación y que sirven de soporte para la cinta transportadora.
- **Unidad de refuerzo** (Booster Drive). Estructura acompañada con un motor eléctrico que ayuda a impulsar la banda horizontal cuando la distancia del fondo de lumbrera a la TBM es considerable, su instalación se realiza cuando la TBM dista del fondo de lumbrera aproximadamente 1.5 kilómetros.
- **Estructura de descarga** (Discharge Structure). Estructura que se ubica en fondo de lumbrera y cuya función es depositar el material rezagado en la cinta vertical o banda de cangilones para ser transportado a superficie.
- **Viga de soporte** (Cross Beam). Viga estructural que sirve de apoyo y sostenimiento de la banda vertical, así como de las estructuras de recuperación y descenso, cruza de un lado a otro el perímetro de la lumbrera, apoyándose en los brocales de esta.
- **Estructuras de recuperación y descenso** (Upturn y Downturn). Estructuras que dirigen y guían a la cinta transportadora a superficie, fondo de lumbrera y TBM.
- **Tracción principal** (Main Drive). Motor eléctrico de 160 kW acoplado a una caja de cambios, produciendo una velocidad de cinta de 183 metros por minuto. El accionamiento es controlado por un variador frecuencia (VFD) que reduce la tensión en el arranque y permite un inicio más suave del sistema de bandas.
- **Estructura de almacenamiento** (Storage Cassette). Estructura capaz de almacenar 400 metros de cinta transportadora de tela entre uno carro fijo y un carro móvil, los cuales dan tensión a la cinta mediante un suministro de corriente eléctrica y un torno de cable de alambre que también está controlado por un sistema eléctrico de accionamiento de frecuencia variable (VFD).
- **Soporte de empalme** (Splice Stand). Es una plataforma elevada para la instalación de nuevos carretes de cinta transportadora sustituyendo y empalmado mecánica y permanentemente. La plataforma tiene abrazaderas mecánicas en ambos extremos para sujetar la cinta fija mientras se realiza el proceso de vulcanización. El soporte de empalme tiene dos polipastos de cadena manual de 1.0 tonelada métrica nominal, sobre las vigas que están a un costado de la estructura del carrete, para la maniobra de los componentes a vulcanizar, permitiendo un doble empalme al mismo tiempo.
- **Malacate de enrollamiento** (Winch). Es el motor que permite a través de un cable metálico el correcto enrollamiento y guiado de la banda en el Dual Splice.

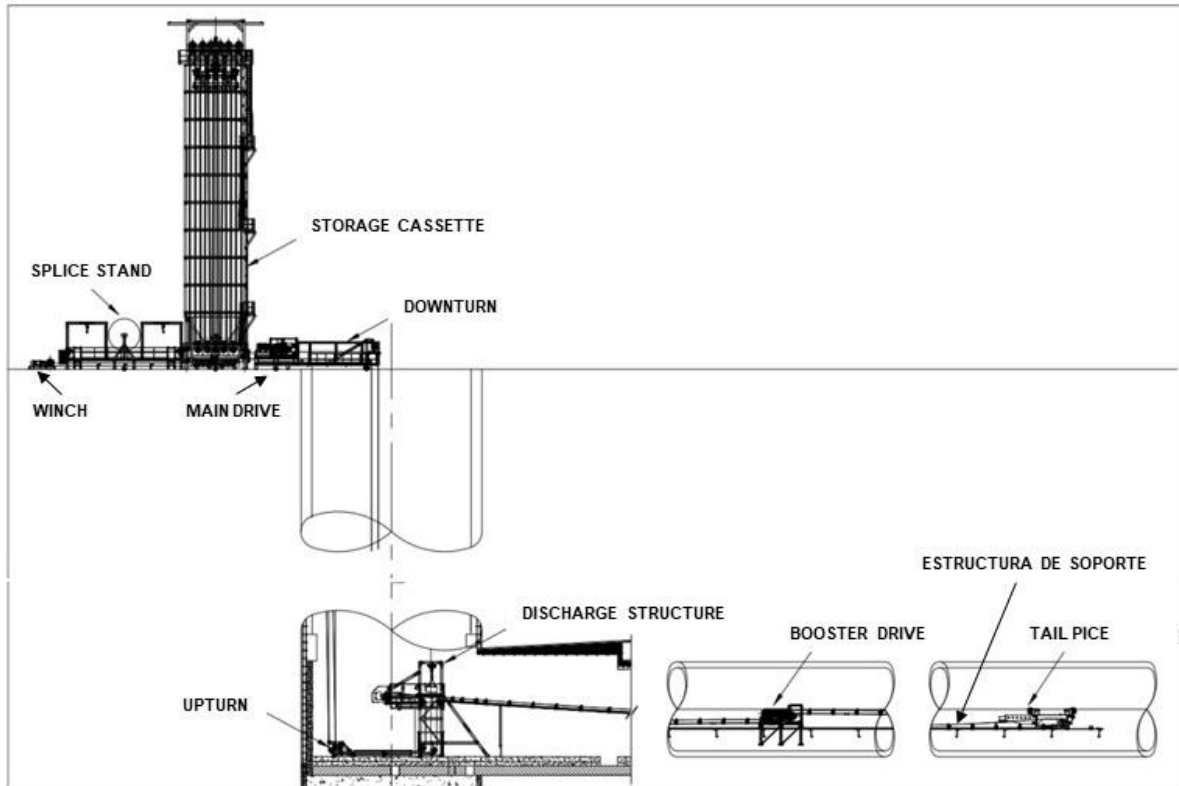


Figura 122. Sistema de bandas horizontal.

- c) **Sistema vertical:** Es el conjunto de estructuras que desalojan la rezaga generada por la TBM y transportada por la banda del túnel, desde el fondo de lumbrera hasta la superficie como se observa en la **Figura 123**, al igual que la banda horizontal se compone según su ubicación de:
- **Sección vertical de cola** (Tail conveyor). Estructura ubicada en fondo de lumbrera y que recibe todo el material rezagado depositándolo a una banda de cangilones.
 - **Cinta de cangilones.** Cinta de tela compuesta de olanes y cangilones, cuya función es extraer al material rezagado del fondo de lumbrera a superficie.
 - **Sección de cabeza vertical** (Conveyor head sección). Estructura ubicada en superficie que deposita el material rezagado a una banda de transferencia. Está compuesta por uno o dos motores eléctricos de 300 kW produciendo una velocidad de cinta vertical de 162 metros por minuto.
 - **Unidad de transferencia** (Transfer conveyor). Unidad transportadora de montaje de energía que transmite la rezaga de la sección de transferencia vertical a la apiladora radial.
 - **Apilador radial** (Radial stacker). Unidad transportadora de montaje de energía que transmite la rezaga de la sección de transferencia vertical descargándola en el dique de rezaga para su carga y transporte a los bancos de tiro predestinados.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

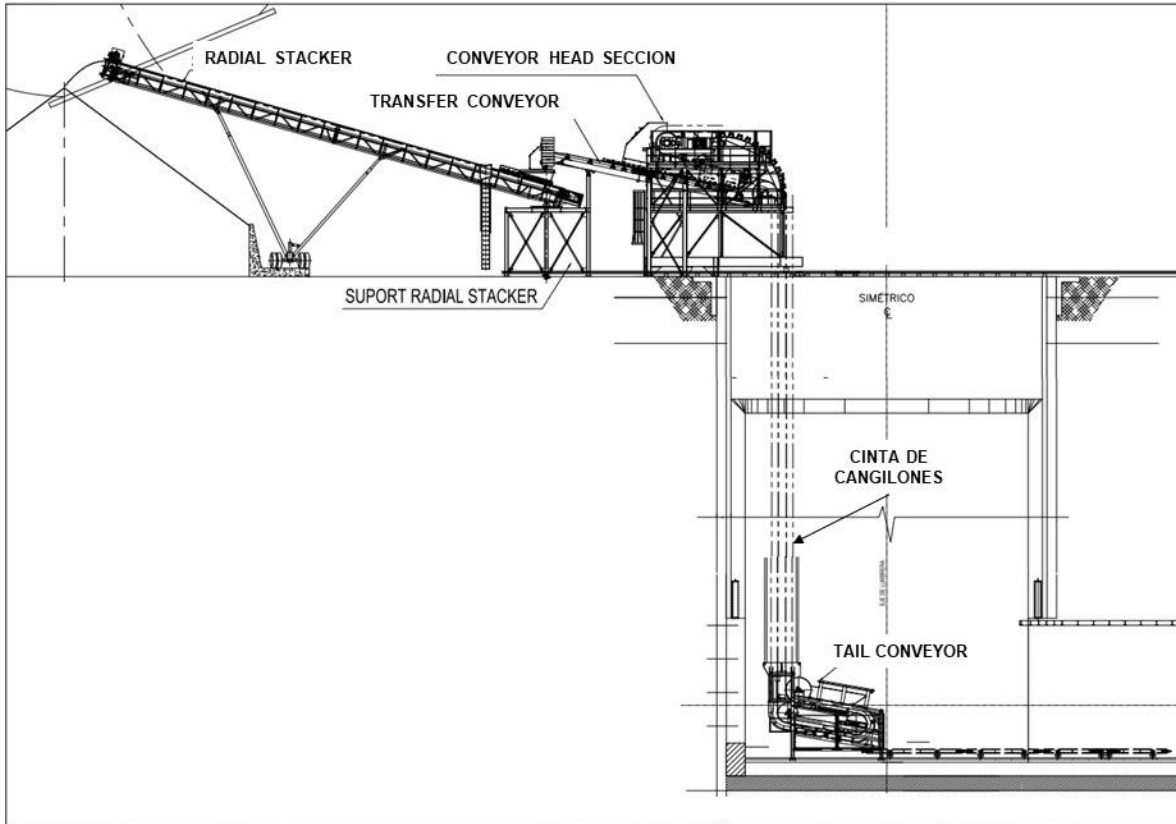


Figura 123. Sistema de bandas vertical.

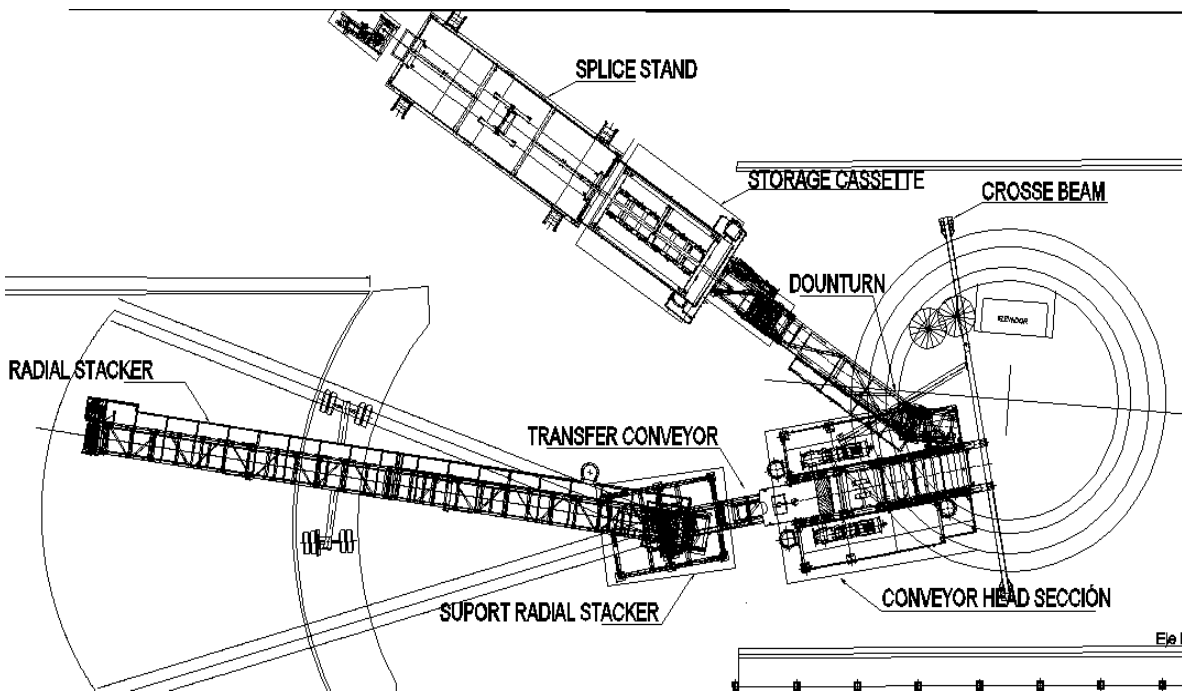


Figura 124. Vista de instalaciones del sistema de bandas en superficie.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

Una vez extraído el material de excavación a través del sistema de bandas, se almacena en un dique de forma temporal como el que se observa en la **Figura 125**. Los diques diseñados para la excavación en el tramo 3 fueron diseñados de una capacidad de 2000 m³, es decir, con la capacidad de almacenar el material de 20 anillos excavados, su construcción se realiza mediante una barda perimetral de concreto reforzado de 1.0 metro de altura continuado con tabloncillos y vigas IPR para la contención del material.



Figura 125. Dique de rezaga.

La cantidad de material extraído en la excavación por anillo se calcula de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \text{Volumen de excavación (Ve)} &= \text{área de excavación (Ae)} * \text{longitud de excavación (Le)} \\ Ve &= \frac{\pi(\text{Diámetro de excavación})^2}{4} * 1.5 \text{ m} = \frac{\pi(8.93)^2}{4} * 1.5 = 93.94 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Es decir que, por cada anillo excavado, se extraen 93.94 m³ de material rezagado, sin embargo, es necesario considerar el volumen de grasa que se inyecta en el rodamiento de la rueda de corte (la cual ingresa al interior de la cámara de excavación), además del volumen de espuma para el acondicionamiento del material; compuesto de agente espumante líquido, agua y aire, por lo cual se estable un valor promedio de 100 m³ de material extraído por excavación.

Si se divide la capacidad del dique de rezaga entre la cantidad de material rezagado por anillo, se obtiene lo siguiente:

$$\text{Capacidad de dique} = \frac{\text{Volumen de dique}}{\text{Volumen de excavación}} = \frac{2000 \text{ m}^3}{100 \text{ m}^3} = 20 \text{ anillos}$$

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

Una vez almacenado el material producto de la excavación en el dique de rezaga, se realiza su acarreo a un banco de tiro autorizado; con camiones de carga de capacidad de 16 m³ y con apoyo de un cargador frontal (Payloader).

Tiempos de excavación. Como se ha mencionado, el tipo de material excavado da la pauta para establecer los parámetros de operación y por consiguiente los rendimientos de excavación, es decir; excavar en un frente del tipo Mixto, es diferente a excavar en un frente del tipo Roca, debido a que los diferentes componentes de la tuneladora trabajan a un ritmo diferente, como es el caso de la fuerza de los gatos de empuje, los consumos de grasa, los sistemas eléctricos, sistemas hidráulicos, etcétera.

El parámetro para la velocidad de avance en el tramo 3, para los diferentes tipos de terreno observados en la **Figura 126**, se establecieron de la siguiente manera:

	Tipo de frente.		
	Suelo	Mixto	Roca
Velocidad máxima de avance (mm/min)	80	20	45
Tiempo de excavación (min)	18.75	75	33.33

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

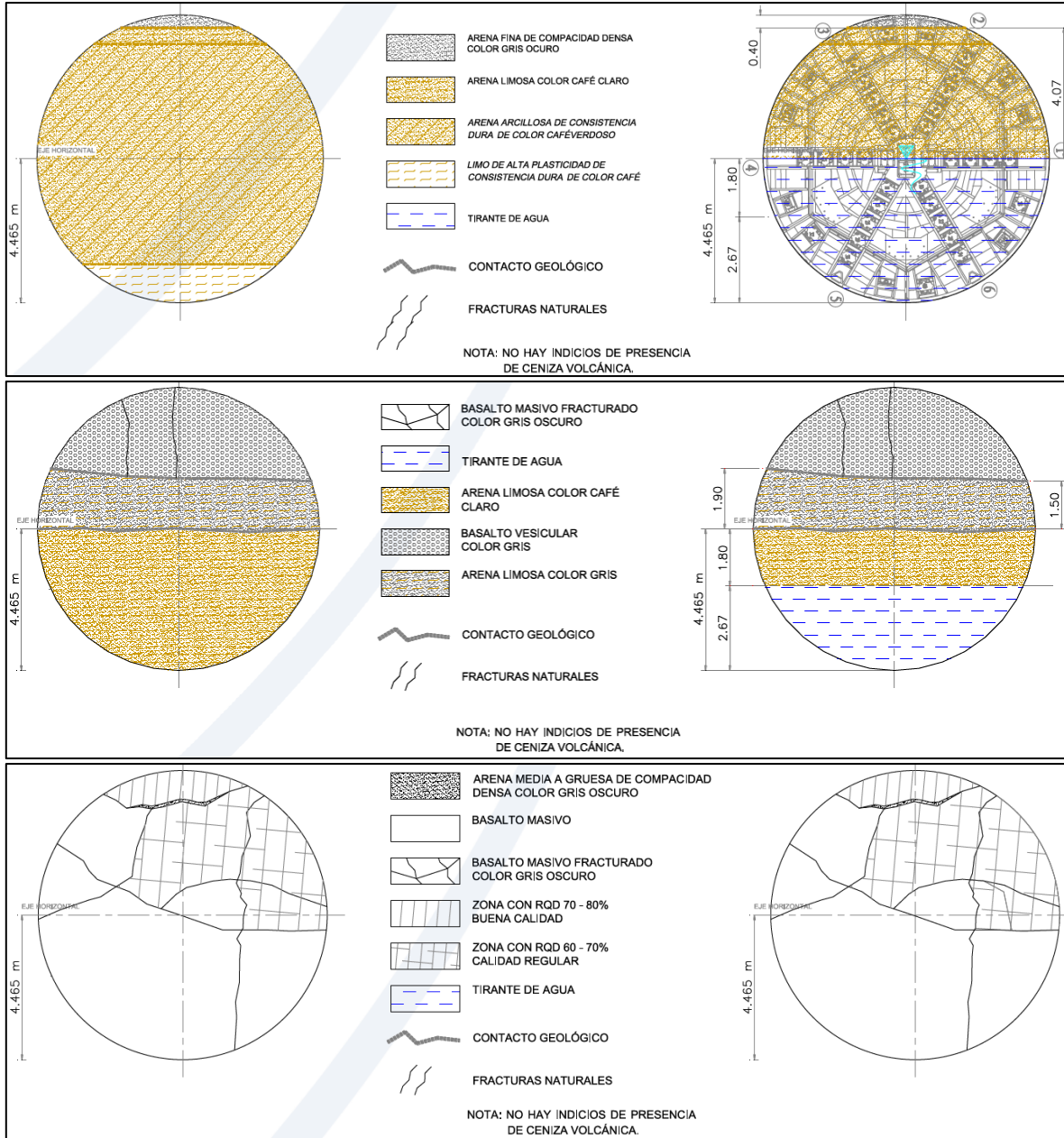


Figura 126. Ejemplos de un frente del tipo Suelo, Mixto y Roca.

Consideraciones. En este caso el sistema de bandas proporciona un eficaz apoyo, debido que el desalajo de la rezaga se realiza de manera continua y al mismo tiempo que la excavación, salvo que se presente algún problema eléctrico-mecánico el tiempo de desalajo es el mismo que el tiempo de excavación, aunado a esto, el dique de rezaga funciona como un almacén temporal, y el tiempo de transporte a los bancos de tiro dependen principalmente de la disposición de los equipos (Maquinaria). En la **Figura 126** se aprecia todo el ciclo de excavación.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

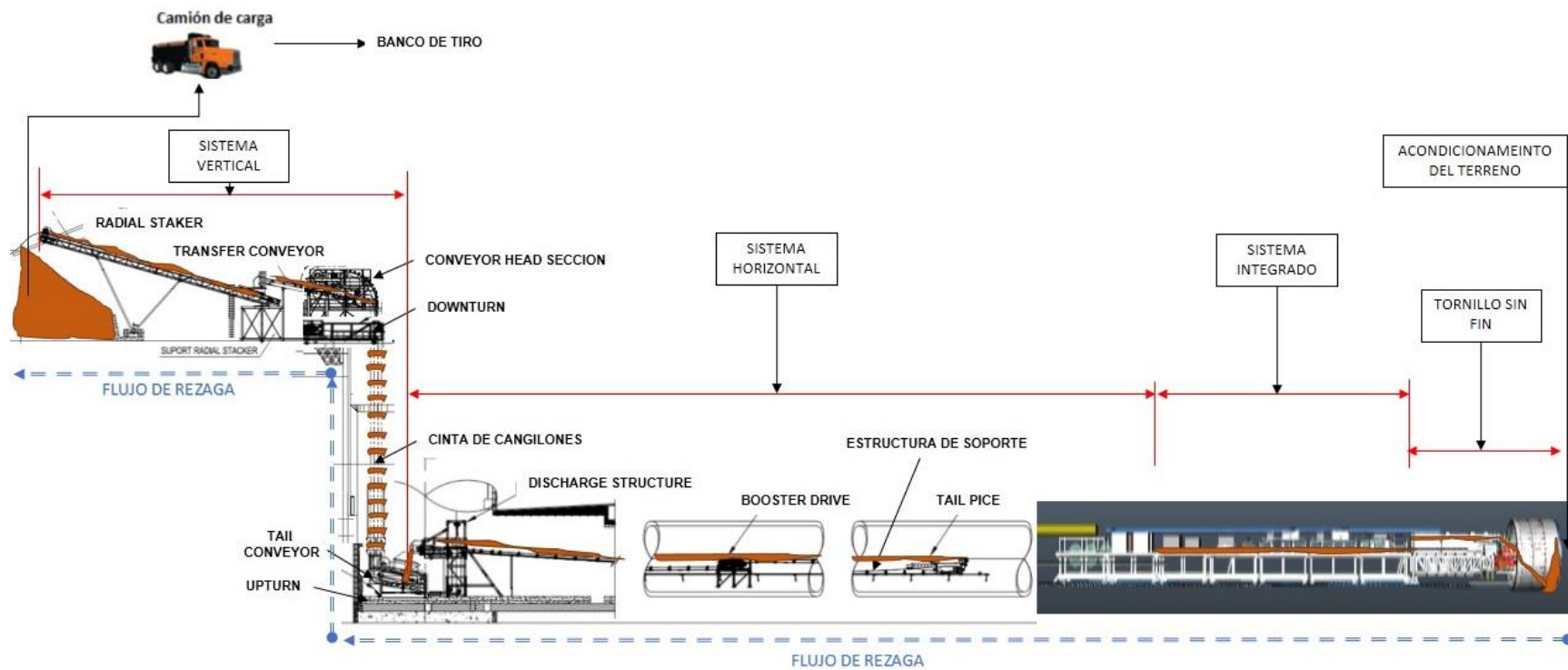


Figura 127. Ciclo de excavación.

IV.1.2 Ciclo de suministro y colocación de anillos.

Otra de las principales actividades que se realizan para al avance del proceso de excavación es la colocación de los anillos de concreto reforzado como sostenimiento primario del túnel y el ciclo para lograr este objetivo se describe a continuación:

Suministro. Una vez finalizada la fabricación de las 8 dovelas que conforman el anillo, es necesario transportarlas desde la planta hasta la lumbrera, en donde se almacenan de forma temporal en un patio de maniobras hasta su colocación en el túnel como se observa en la **Figura 128**.



Figura 128. Patio de maniobras.

Como medio de transporte se utiliza una plataforma sobre tracto-camión con una capacidad de carga de 40 toneladas, si se considera que el peso aproximado del anillo es de 35 toneladas para el caso del Tramo 3 del TEO, es decir las dovelas tipo “A” tienen un peso aproximado de 5 toneladas cada una, la dovela “B” y “C” pesan aproximadamente 4.5 toneladas y la dovela “K” 1 tonelada.

Una vez que la plataforma llega a las instalaciones de la lumbrera se descarga con la grúa pórtico de 200 toneladas como se aprecia en la **Figura 129**, anteriormente

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

utilizada para el montaje de la TBM, utilizando eslingas de una capacidad mínima de 50 toneladas, el tiempo de descarga depende principalmente de la capacidad del operador y el maniobrista, sin embargo, se puede deducir un tiempo aproximado de 15 minutos.



Figura 129. Ejemplo de transporte y descarga de dovelas en lumbrera.

Preparación. Antes de descender el anillo a fondo de lumbrera es necesario “prepararlo”, debido a que además de estar constituido por un sistema de machiembreado en los lados laterales de las dovelas, está diseñado con secciones en donde se adhieren juntas de sellado elastoméricas (Neopreno) y orificios que permiten colocarle tornillos de forma transversal y longitudinal durante su montaje.

El objetivo de las juntas, es garantizar un sellado óptimo en las aberturas que existen entre las dovelas de los anillos ya colocados, evitando que se presenten filtraciones al interior del túnel, para lo cual se utilizan 4 tipos de juntas que son adheridas de forma manual y durante su estancia en el patio de maniobras como se observa en la **Figura 130 y 131**.

- **Junta de estanqueidad.** Banda elastomérica que rodea todo el perfil de las dovelas, se distinguen por ser fabricadas para acoplarse a las dovelas A1-5, B, C y K, siendo en total 8 piezas, su objetivo es impedir la entrada de

agua o material a elevadas presiones debido a la compresión que sufre cuando la dovela se comprime una contra la otra.

- **Junta tok.** Su objetivo es evitar la entrada de material y/o mortero en el hueco de la junta y reducir las pérdidas de grasa del sellado de cola de la tuneladora, tiene la capacidad de expandirse al contacto con el agua y al igual que la junta de estanqueidad rodea todo el perfil de las dovelas, su espesor es de 1.0 centímetro por 1.0 centímetro con un largo total por anillo de 75 metros.
- **Placas de fibra dura.** Estas juntas tienen la función de transmitir de forma controlada las fuerzas de empuje de las zapatas (PADS) de los cilindros de la TBM hacia los anillos ya montados, evitando transmitir sollicitaciones a los bordes y esquinas de las dovelas, se dividen en 4 tipos con un espesor de 3.0 milímetros garantizan una superficie de contacto permanente entre anillos, además de tener un efecto de amortiguamiento entre anillos en sentido longitudinal del túnel.
- **Fieltro bituminoso.** A diferencia de las placas de fibra dura, este tipo de junta tiene como objetivo amortiguar el golpe en el machihembrado de las dovelas durante la colocación del anillo, se coloca siempre en el lado de la hembra.

El objetivo de los tornillos es asegurar de forma provisional la compresión de la banda de estanqueidad durante las fases de montaje del anillo, debido a que, al ir retrayendo secuencialmente los cilindros de empuje, la banda de estanqueidad puede perder parte de su compresión, con el consecuente riesgo de pérdida de estanqueidad.

Cuando la tuneladora está suficientemente alejada, de manera que los efectos de la retracción de los cilindros de empuje ya no son apreciables sobre las dovelas, es posible retirar los tornillos y reutilizarlos. Los tornillos tienen un carácter provisional y no tienen una función de acoplamiento entre anillos. Si se opta por reutilizar los tornillos, pueden ser retirados de la parte extrema del tren de arrastre por facilidad de maniobra. Adicionalmente no se tiene identificada alguna condición específica de los tornillos que obligue a retirarlos o a mantenerlos instalados permanentemente, así que resulta indistinto este aspecto durante la operación de la obra.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

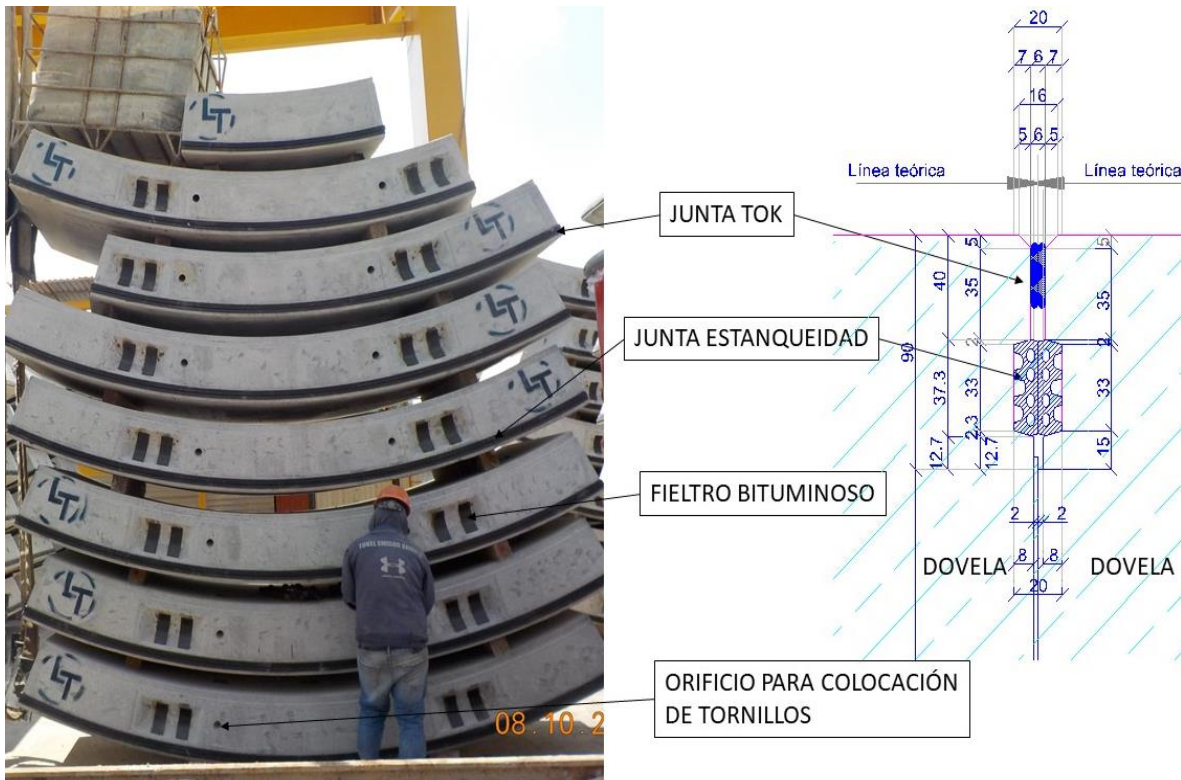


Figura 130. Junta tok, junta estanqueidad y fieltro bituminoso.



Figura 131. Placas de fibra dura.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

Descenso y acomodo en fondo de lumbrera. Después del acomodo y preparación del anillo en superficie, se desciende a fondo de lumbrera utilizando la grúa pórtico de 200 Toneladas, la cual se equipa con una pinza Acimex de 50 toneladas, el tiempo promedio de descenso y ascenso de la travesca de la grúa pórtico es de 10 minutos, por lo cual con el objetivo de acortar el tiempo se puede optar por utilizar eslingas flexibles de igual capacidad, permitiendo descender el anillo con más suministros (grasas, agente espumante y demás consumibles), lo que con la pinza no es posible como se aprecia en la **Figura 132**.



Figura 132. Descenso del anillo con pinza y con eslingas respectivamente.

Cuando las dovelas han sido descendidas por la grúa pórtico, estas deben ser colocadas en plataformas móviles observadas en la **Figura 133**, comúnmente nombrados carros doveleros, cuyo objetivo es trasladar de forma segura el anillo hasta la tuneladora. Por lo cual se sigue el orden de colocación **A3, A2, A4, A1, A5, B, C, K**. Para acomodar las dovelas sobre los carros doveleros se utiliza una grúa pórtico de una capacidad de 15 toneladas con un par de eslingas flexibles, esta operación tiene una duración de 15 minutos (5 minutos por cada grupo de dovelas).



Figura 133. Acomodo de dovelas sobre los carros doveleros.

Suministro a TBM. Cuando la TBM ya se encuentra trabajando en fase definitiva, totalmente armada y trabajando en forma normal, la alimentación de la máquina se realiza con la configuración estándar de los trenes, la cual se conforma de una locomotora de una velocidad máxima de 18 km/h, si se considera que el tramo más largo que recorre es de 3 kilómetros (de lumbrera a lumbrera), el tiempo aproximado que tarda en llevar los suministros es de 20 minutos, contemplando las 3 plataformas doveleras que cargan el anillo.

La locomotora y los carros doveleros transitan sobre vías instaladas desde la TBM y en la base del túnel, compuesto por 2 tramos de riel de 60 libras por 9.1 metros de largo y 12 durmientes de madera que enganchan al riel con placas de sujeción y tornillos tirafondo. Las vías centrales son armadas en superficie y descendidas conforme avanza la excavación.

Cuando la tuneladora sobrepasa más de la mitad del tramo de excavación, es decir más de 1.5 kilómetros, se adquiere un tren de suministro adicional, además de la instalación de 2 mecanismos denominados “cambio california”, uno al inicio y el otro a la mitad del túnel frecuentemente muy cerca del booster, los cuales, además de dar la capacidad de almacenar dos trenes en un mismo sitio como se aprecia en la **Figura 134**, mejoran el flujo de suministros del fondo de lumbrera hacia la tuneladora acortando considerables tiempos de logística.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

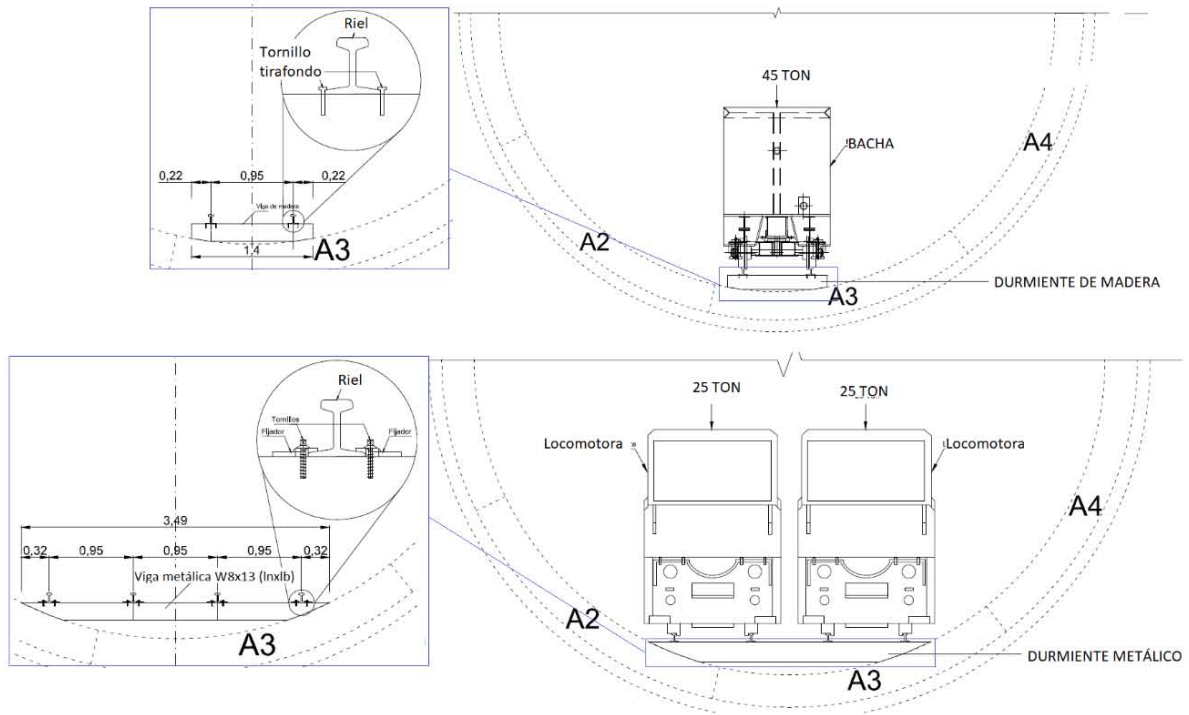


Figura 134. Configuración de vías centrales y cambio California.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

Recepción en TBM y acomodo para montaje. Una vez que llega el tren de suministros dentro del backup como se aprecia en la **Figura 135**, las dovelas y los ministros deben de descargarse para su uso en la tuneladora, para lo cual se utiliza una grúa viajera que realiza maniobras de izaje y colocación de las dovelas en el segment feeder o mesa alimentadora. El funcionamiento de la grúa viajera de Alimentación de Dovelas consiste en el izar la dovela a través de un tornillo que toma la dovela por el taco sofrasar (ombbligo de dovela) y la traslada desde el back up hasta el segment feeder a través de una viga IPR que cruza desde el primero hasta el último gantry, el tiempo aproximado en realizar esta maniobra es de 15 minutos.

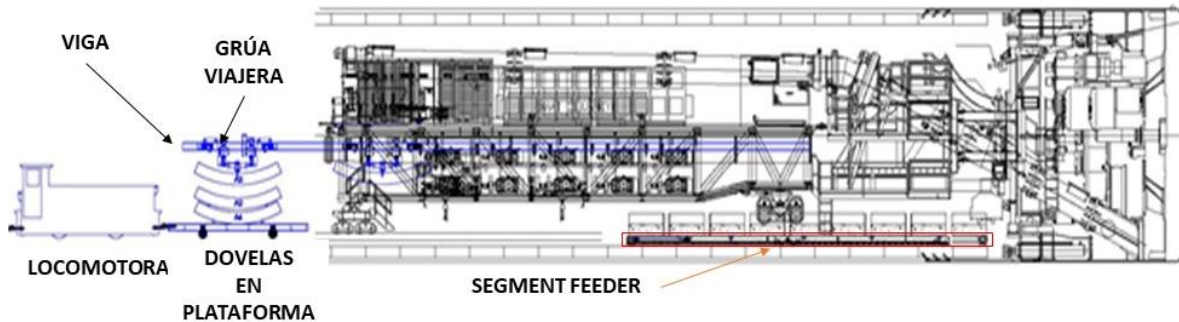


Figura 135. Recepción en plataformas.

Montaje de anillo. Cuando las dovelas ya se han colocado en el Segment Feeder después de haber realizado las maniobras pertinentes y finalizada la excavación, se da inicio a las maniobras de la colocación de las dovelas para formar el anillo de revestimiento primario. El mecanismo utilizado para lograr tal objetivo se denomina “Segment Erector” (Montador de segmentos), utilizando un sistema de succión por vacío y rotación, realiza el izaje de las dovelas y las coloca una por una hasta lograr armar el anillo completo, el tiempo promedio de montaje depende de la capacidad del operador, sin embargo durante la construcción del TEO se establece un promedio de 20 minutos mínimo, solo en el caso de que no se presenten incidencias mayores durante la actividad, como son trabajos de limpieza, fallas mecánicas y eléctricas.

Los anillos utilizados son universales, es decir; todos están conformados por un total de 8 dovelas de igual geometría, diseñados con una conicidad de 50 milímetros que permite describir curvas de radios mínimos de curvatura de hasta 250 metros, sin embargo, es importante resaltar que el Tramo 3 del TEO, desde lumbrera L10 hasta lumbrera L13, es prácticamente una sección recta a excepción de los últimos 300 metros de lumbrera L12 a L13 en donde se describe una curva de radio mínimo.

Basándose en la posición del escudo, los valores de extensión de los gatos de empuje y la holgura en el faldón (denominada GAP), el programa de sistema automatizado de guiado selecciona de entre unos anillos tipo predefinidos aquel que mantiene la alineación de la tuneladora con las menores desviaciones, o la hacen volver hacia el eje del túnel arrojando la posición (número de gato) de la

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

dovela "llave" o dovela K. La secuencia de colocación del anillo es A3, A2, A4, A1, A5, B, C, K, secuencia que debe de tomarse siempre en consideración debido a que el erector solo tiene la capacidad de girar 220° desde su posición inicial entre el gato No. 14 y 15. La dovela A3 siempre es colocada en el lado contrario de la dovela K.

Por ejemplo, si el programa calcula la posición del anillo "U1", se realiza el montaje considerando que la dovela K deberá ir en donde se ubica el gato de empuje No. 1, como se muestra en la **Figura 136**, sin embargo, el ingeniero de turno tiene la posibilidad de cambiar la posición como así le convenga, ya sea por corrección de guiado, incidencias o complicaciones para realizar el montaje en la posición arrojada por el programa automatizado basándose en la tabla que se observa en la **Figura 137**, en donde se generalizan todas las 14 posibles posiciones de los anillos subsecuentes. Las tolerancias máximas permisibles que se pueden tener en la colocación de un anillo son de 1 centímetros sobre la cara interna del anillo y de 5 milímetros en la separación que se puede tener entre dovela y dovela, por lo cual es necesario tener especial cuidado en el armado, con el objetivo de garantizar el cierre y la correcta colocación de la dovela K.

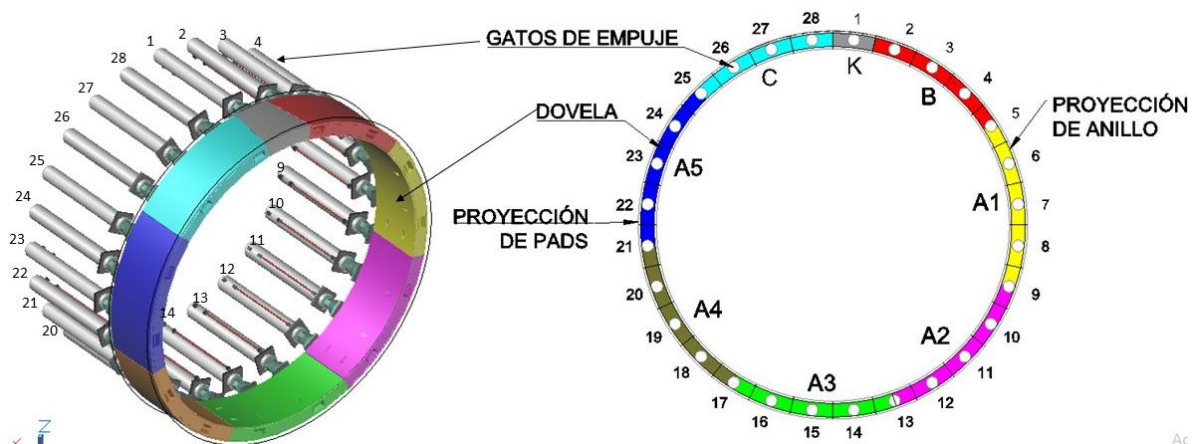


Figura 136. Posición U1 de anillo.

En cualquier posición de la dovela K, no se forman juntas en cruz (juntas longitudinales alineadas) con los anillos vecinos y la posición del punto de aplicación de la fuerza de los cilindros de empuje sobre el anillo es siempre la misma, independientemente de la posición de la dovela K, es decir existe una simetría de cargas en la dovela como se aprecia en la **Figura 138**.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

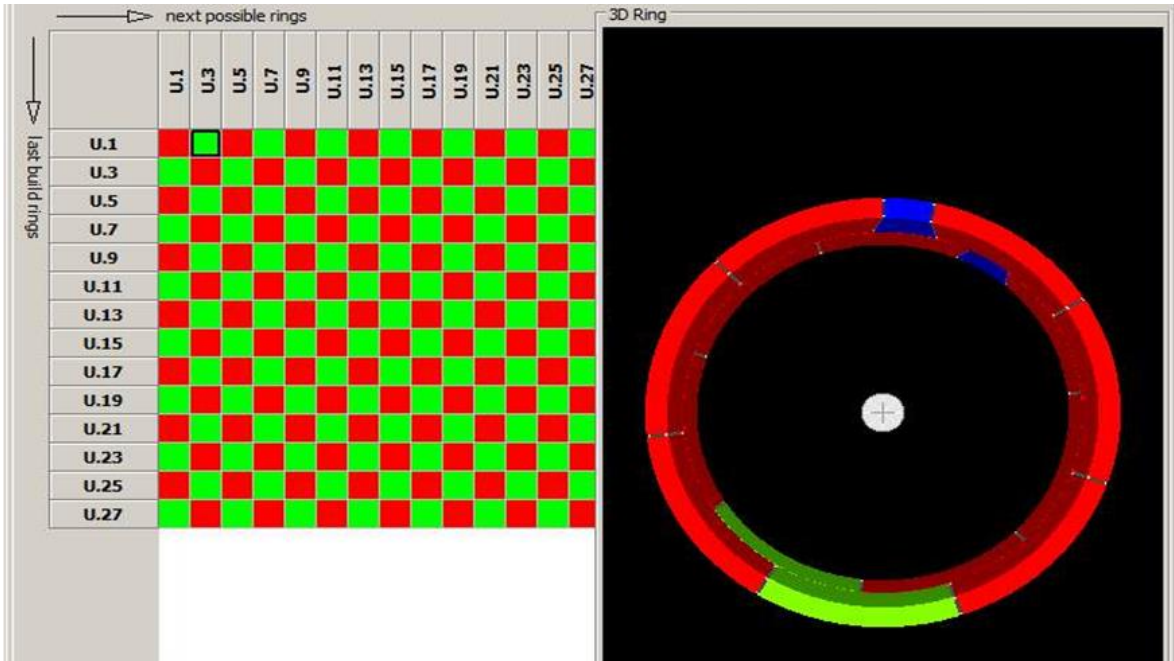


Figura 137. Posibles posiciones posteriores de montaje de anillo.

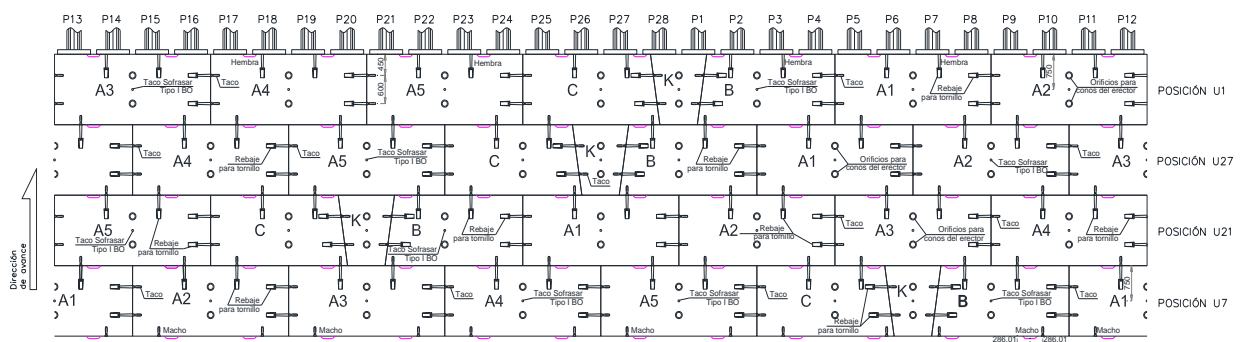


Figura 138. Ejemplo de posiciones de los anillos subsequentes.

Consideraciones. Todo el ciclo de que se realiza para el montaje de un anillo se parecía en la **Figura 139**, en donde se puede calcular un tiempo aproximado de 1 hora con 20 minutos contra los 30 minutos que dura la excavación de un anillo en frente Suelo, sin embargo para evitar el retraso en el ciclo y el recorte de tiempos de suministros, se instalaron complementos como son los cambio california con un tren adicional y que en conjunto con la capacidad del personal al cargo, dan la ventaja de tener una anillo en la mesa de dovelas, un anillo en el túnel y un anillo en el fondo de lumbrera, para lograr que justo en el instante de finalizar la excavación se tenga un anillo para montar.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

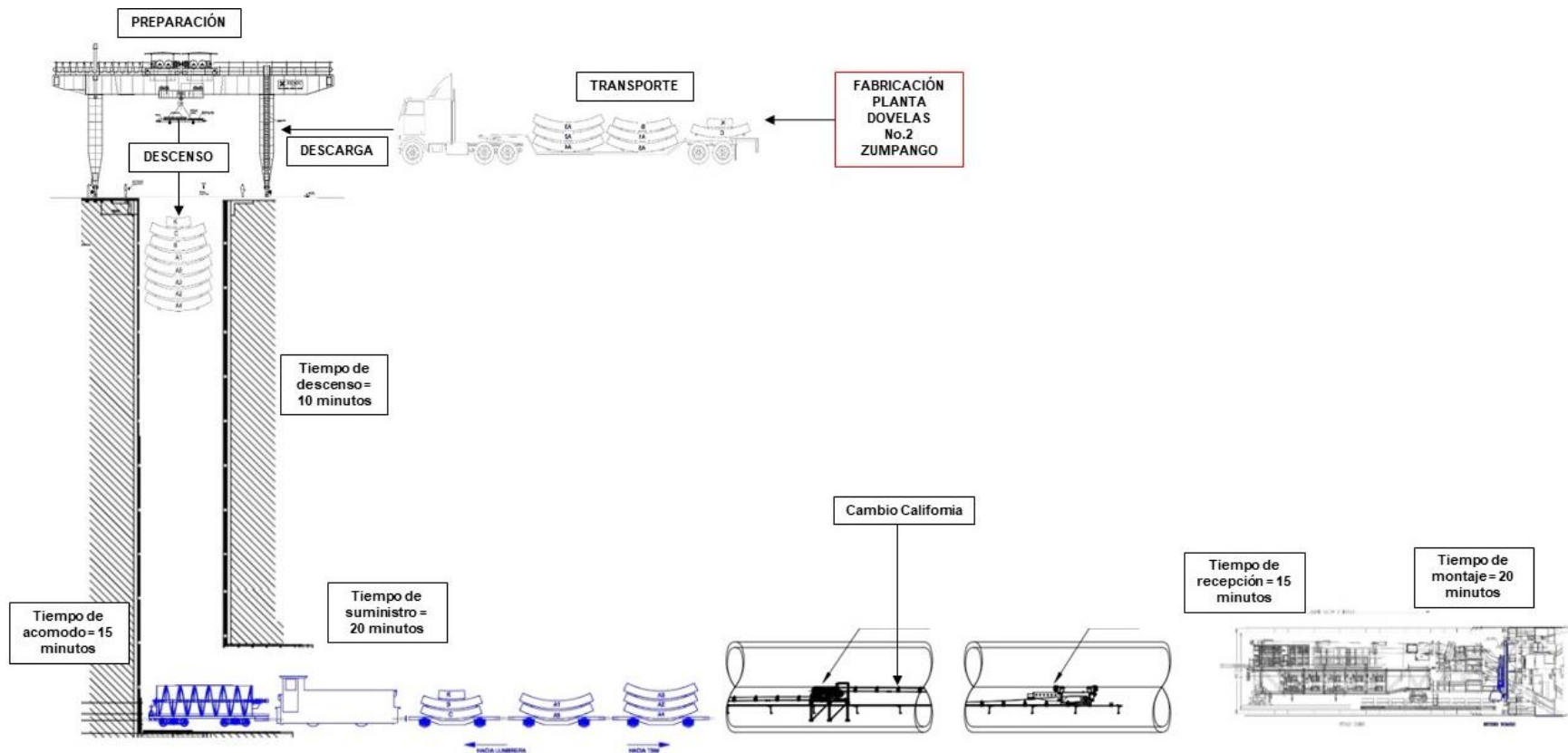


Figura 139. Ciclo de colocación.

IV.1.3 Ciclo de suministro e inyección de mortero.

Fabricación y descenso. El mortero tiene como objetivo llenar el espacio anular o hueco que deja la máquina entre la excavación y el anillo, por lo que su diseño considera:

- El control de los asentamientos superficiales.
- El control de los movimientos del anillo de dovelas en el espacio anular, a corto y mediano plazo (evitar que el anillo flote en el mortero de inyección como se observa en la **Figura 140**).
- Sellar el túnel contra infiltraciones de agua.

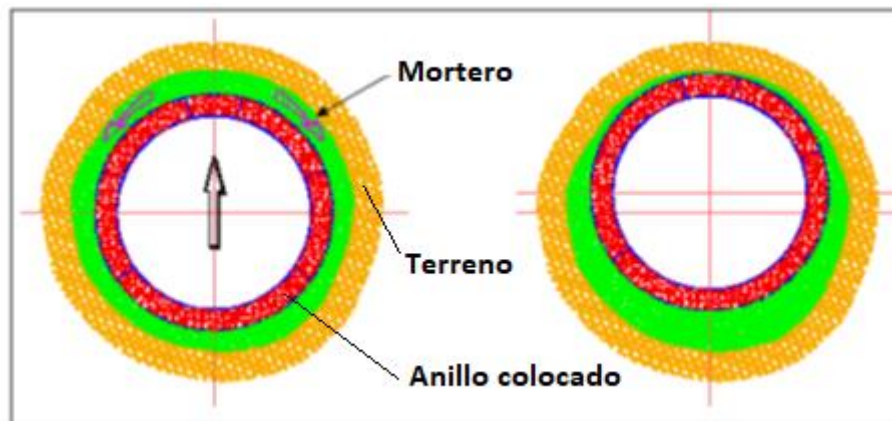


Figura 140. Efecto de flotación del anillo en el mortero de inyección.

Estos tres objetivos se logran mediante un relleno inmediato del espacio anular, por lo cual el sistema de inyección utilizado en la tuneladora “Hidalgo” contempla los siguientes puntos:

- Un diseño correcto del caudal de las bombas en relación con el avance teórico de la tuneladora.
- Repartición homogénea de los orificios de inyección en el perímetro del faldón de la tuneladora.
- Automatización completa de la operación de bombeo para garantizar un relleno completo e inmediato.
- La automatización se gestiona en base a criterios de presión, y no de volumen.
- Uso de sensores de presión fiables y precisos, colocados lo más cerca posible de los orificios de inyección.

La fabricación del mortero se realiza en superficie con una planta dosificadora del tipo ODISA 2000 observada en la **Figura 141**, la cual se compone de dos cilos de almacenamiento para cemento de una capacidad de 35 toneladas cada uno, los cuales son llenados mediante pipas cuando se es necesario, 2 tolvas para agregados; una para arena de río y otra para arena filler que son llenadas con una retroexcavadora, un sistema de preparación e inyección de lodo bentonítico a base

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

a mezcladores, agitadores y bombas centriifugas, un contendor mezclador o mixer para la fabricación del mortero de una capacidad de 4 m³ y un sistema de descenso de mortero a fondo de lumbrera; compuesto a base de una bomba de pistones Putzmeister KOV 1050 DUO y tubería con recubrimiento duro de 4" de diámetro.



Figura 141. Planta dosificadora.



Figura 142. Bomba putzmeister.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

El tiempo de fabricacion del mortero es de 15 minutos y descendido en 15 minutos hacia el fondo de lumbrera. El diseño principal utilizado para la excavación en el tramo 3 y sus propiedades se definen de siguiente manera:

Dosificación por m ³ de mortero		
Descripción	Cantidad	Unidad
Cemento (CPC40RS)	200	Kg
Arena de río	1016.817	Kg
Arena filler	843.75	Kg
Aditivo superabsorbente Sika Foam TBM	0.5	kg
Aditivo Sigunit PC (Acelerante de fraguado)	16.00	Litros
Bentonita Sódica tipo Bentonil CV15	22.33	Kg
Agua potable	127.60	Litros

- Según las disponibilidades locales de los materiales (cemento, arena, cenizas volcánicas) se diseña un mortero inerte o semi-inerte. El mortero inerte se utiliza para evitar que se tapen los ductos de inyección o dañar los cepillos de cola. Este mortero inerte o semi-inerte, con baja cantidad de cemento da seguridad en caso de paradas inesperadas o mala operación del sistema.
- Tiene una resistencia a la compresión ≥ 2 MPa, con baja cantidad de cemento. Esta propiedad permite unificar y fijar los anillos de dovelas entre ellos, gracias a la presencia del mortero. También permite no tener infiltraciones de agua.
- Su diseño evita la segregación entre sus diferentes componentes (arena, cemento, filler, agua, bentonita). Si hay segregación el bloque de mortero no tendría un funcionamiento correcto.
- El mortero es bombeable (usando bentonita) durante su inyección desde el tanque que se ubica sobre el gantry hasta la salida en el faldón, pasando a través de la tubería.

Suministro a TBM. Para el traslado del mortero desde el fondo de lumbrera hasta la tuneladora, se utiliza un contenedor helicoidal móvil comúnmente denominado “vaca de mortero” de una capacidad de 8.5 m³ suficiente para los 6.8 m³ que es necesario inyectar en el espacio anular, este contenedor observado en la **Figura 143**, se acomoda detrás de la locomotora y se acciona mediante un sistema hidráulico el cual hace girar el eje helicoidal con el objetivo de mantener el mortero en movimiento hasta su colocación en TBM.

La descarga del mortero se realiza al mismo tiempo en que se acomoda el anillo en las plataformas doveleras, por lo que no afecta al ciclo de suministros. Una vez finalizada la descarga en la “vaca”, el tren de suministro se arma siguiendo la secuencia anillo, locomotora y vaca, el tiempo de suministro a TBM es igual al de suministro de anillo, es decir, aproximadamente 20 minutos.



Figura 143. Transportador helicoidal de 8.5 m³.

Una vez transportado desde el fondo de lumbrera hasta TBM, se coloca en otro contenedor helicoidal integrado en la tuneladora.

Inyección en TBM. La inyección se inicia al mismo tiempo en que la TBM empieza el ciclo de excavación, uno de los puntos importantes a cuidar durante el ciclo, es la presión de inyección, la cual se calcula de la siguiente forma:

$$P_{\text{inyección}} = P_{\text{del frente}} + P_{\text{perdida en las tuberías}} + 1 \text{ bar.}$$

Inyectar a dicha presión garantiza el adecuado llenado del espacio anular, existente entre el terreno y la dovela, con ello se garantiza que el mortero cumpla su función para la cual es diseñado.

Para la etapa de excavación, existe un tanque del mortero que se localiza en el gantry número 3, del cual es bombeado a la cola del faldón mediante dos bombas de pistones Putzmeister KOV 1050 DUO, cada bomba cuenta con dos líneas de inyección, las cuales pueden inyectar en 4 puertos distribuidos estratégicamente en la periferia del faldón.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

Para la calcular la cantidad de mortero inyectado se considera el diámetro de excavación de la máquina y el diámetro exterior del anillo obteniendo el volumen teórico del gap o lo que es lo mismo, el volumen teórico de mortero.

$$\begin{aligned}
 \text{Volumen de mortero } (Vm) &= \text{área de espacio anular } (Aan) * \text{avance } (D) \\
 Aan &= \text{área exterior del anillo } (Aanillo) - \text{área de excavación } (Aex) \\
 Aanillo &= \frac{(\text{diámetro exterior del anillo})^2}{4} * \pi = \frac{(8.62)^2}{4} * \pi = 58.088 \text{ m}^2 \\
 Aex &= \frac{(\text{diámetro de excavación})^2}{4} * \pi = \frac{(8.93)^2}{4} * \pi = 62.63 \text{ m}^2 \\
 Aan &= 62.63 \text{ m}^2 - 58.088 \text{ m}^2 = 4.54 \text{ m}^2 \\
 Vm &= 4.54 \text{ m}^2 * 1.5 \text{ m} = 6.8 \text{ m}^3
 \end{aligned}$$

Consideraciones. Un correcto diseño del mortero garantiza que cumpla el ciclo observado en la **Figura 144** (transporte, inyección y objetivo), sin embargo, también depende el tipo de material excavado y las condiciones del frente, por ejemplo, el problema de segregación por agua existente en el terreno natural provoca filtraciones en las juntas de los anillos, debido a que no se tiene una correcta estanqueidad, siendo esto ya una incidencia mayor que conlleva a una baja producción. Así mismo, se puede realizar la excavación sin mortero, sin embargo, esto es incorrecto, debido a que no llenar el espacio anular puede provocar ingreso de agua y material nos sopo por las juntas de los anillos si no por el faldón de la TBM, lo cual es un riesgo para el personal que labora en el túnel.

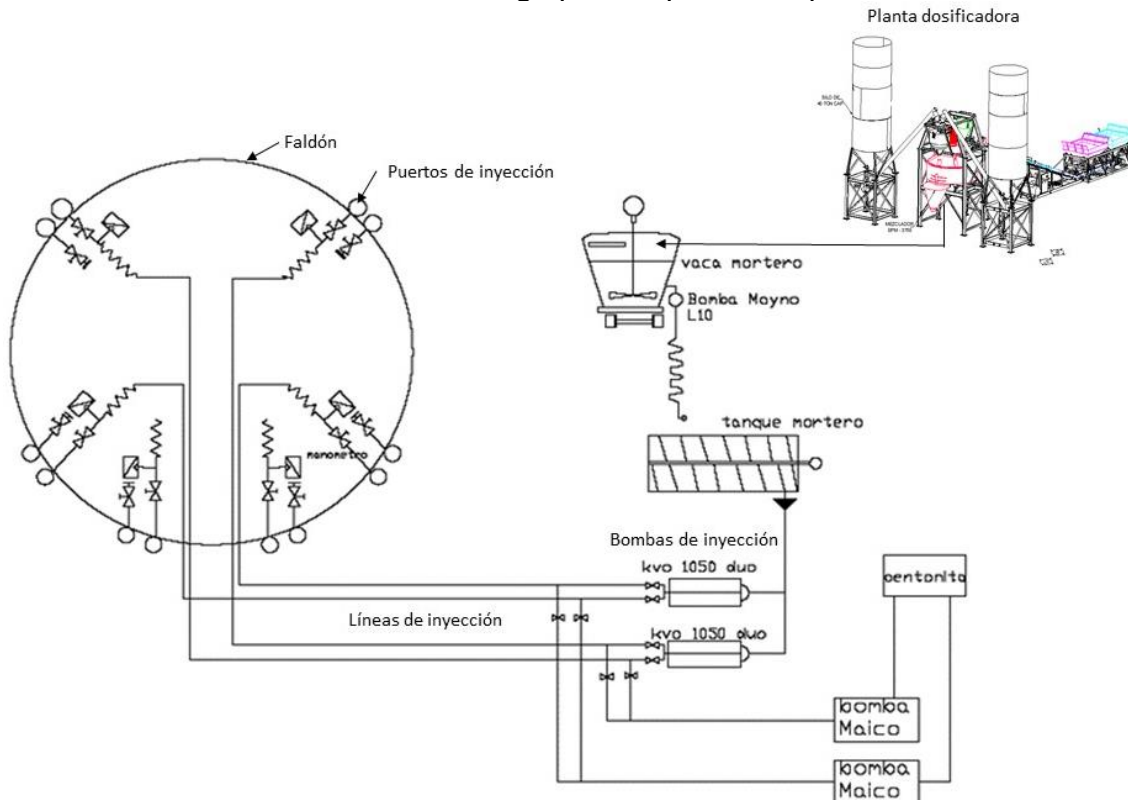


Figura 144. Diagrama del ciclo de suministro e inyección de mortero.

VI.1.4 Inyección de grasa (Cepillos).

Función de cepillos y grasa. Los cepillos son piezas fabricadas con placas y cerdas metálicas que mediante la inyección de grasa a presión realizan la función de barrera, contrarrestando así la presión del mortero que se inyecta a través del faldón para relleno del espacio anular. Estos cepillos están fijados con soldadura en la parte posterior del faldón y en toda su periferia, la tuneladora “Hidalgo” cuenta con un total de 3 líneas de cepillos fabricados por la empresa Robbins, sin embargo es posible realizar su reemplazo cuando ya no cumplen su función, ya sea al interior del túnel o cuando la TBM pase por una lumbrera de mantenimiento, procedimientos similares pero con riesgos diferentes.

Por su ubicación, las líneas de cepillos siempre permanecen ocultas, es decir siempre están en contacto con el último anillo colocado durante la excavación, por lo cual mediante puertos de inyección ubicados dentro del faldón y bombas de aire ubicadas en el back up, se les suministra un tipo de grasa resistente al fuego, al agua y al mortero, en el esquema de la **Figura 145**, se aprecia todo el sistema de inyección de grasa y mortero ubicado en el faldón de la máquina, un ejemplo de este tipo de grasa es la fabricada por la empresa Española CONDAT denominada WR89 de una densidad igual a 1.3 ton/m^3 o la fabricada por la empresa Alemana BASF, TSG6 de una densidad igual a 1.67 t/m^3 , suministradas en presentación de tambos de 250 kilogramos, que además de cumplir con las propiedades mencionadas, tienen una buena consistencia para ser bombeable, compresible y adherente a cualquier superficie. Además, se debe tener en consideración una buena inyección de grasa durante el proceso de excavación, siempre cuidando que los valores de la presión de inyección sean mayores a los del frente.

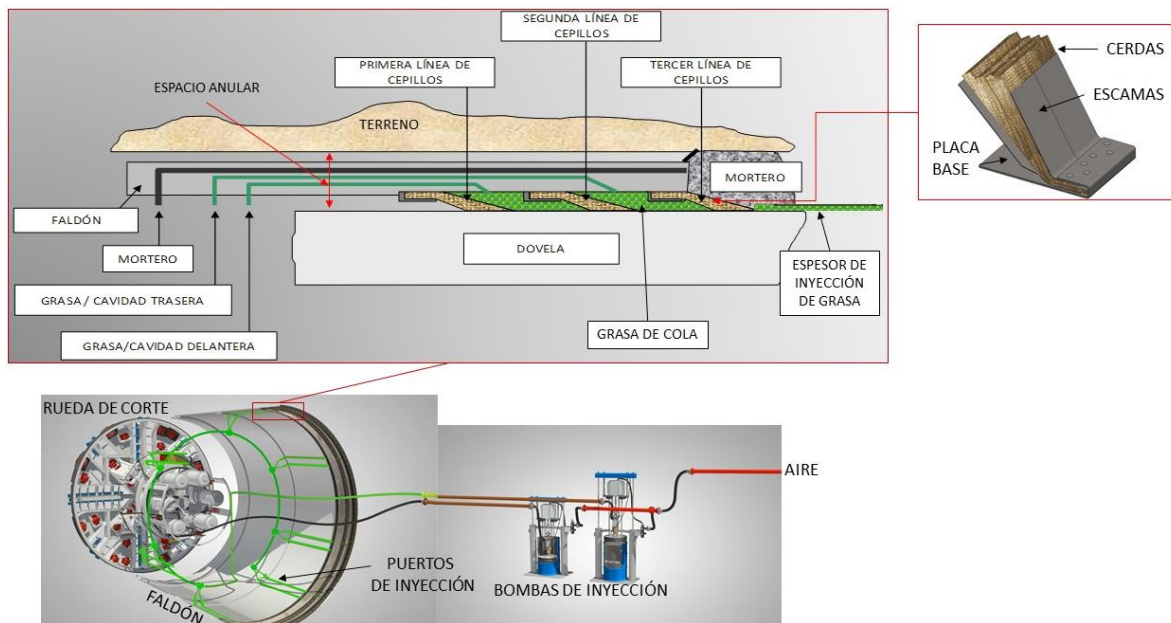


Figura 145. Esquema de inyección de grasa.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

Consumo. Los factores que influyen en el consumo de grasa son; el desgaste de los cepillos, el espacio entre cepillos y dovelas, la curvatura del túnel, la rugosidad del concreto de las dovelas y el espacio generado entre union de dovelas.

Los consumos de grasa por avance, pueden variar en base a los puntos mencionados; sin embargo algunos fabricantes establecen que en base a su experiencia los espesores teoricos de grasa que se coloca ocila entre 1 y 1.5 milímetros que se reflejan en consumos del orden de 1.5 a 2 kg/m² del area de contacto de la dovela por avance.

El consumo teorico de grasa por excavacion de un anillo completo se calcula de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \text{Perímetro de circunferencia externa del anillo} &= \pi D = 3.1416 * 8.6 \text{ m} = 27.02 \text{ m} \\ \text{Área de contacto por avance} &= P * l = 27.02 \text{ m} * 1.5 \text{ m} = 40.53 \text{ m}^2 \\ \text{Volumen de grasa con espesor de 1.0 mm} &= A * e = 40.53 \text{ m}^2 * 0.001 \text{ m} \\ &= 0.04053 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Adicional al volumen anterior, es necesario sumar el volumen de grasa que se coloca en los chaflanes o espacios entre dovelas, cuyas medidas se observan en la **Figura 146**, en este sentido se tienen 8 uniones debido al número de dovelas que conforma el anillo y sus medidas son las siguientes:

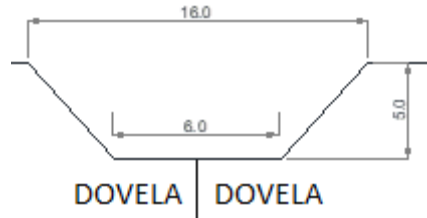


Figura 146. Chaflán formado entre dovelas.

$$\text{Área del chaflan} = \frac{b + B}{2} * h = \frac{0.016 \text{ m} + 0.006 \text{ m}}{2} * 0.005 \text{ m} = 0.000055 \text{ m}^2$$

$$\begin{aligned} \text{Volumen de grasa ocupada por el chaflán} &= A * l = 0.000055 \text{ m}^2 * 1.5 \text{ m} \\ &= 0.0000825 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Volumen de grasa en el anillo} &= V * \text{número de uniones} = 0.0000825 \text{ m}^3 * 8 \\ &= 0.00066 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Por cada avance de 1.5 metros, existe un chaflan idéntico al anterior, pero que se desarrolla en la unión de dos anillos:

$$\text{Volumen de grasa entre anillos} = A * P = 0.000055 \text{ m}^2 * 27.018 \text{ m} = 0.001485 \text{ m}^3$$

Por lo que, el volumen total de por avance para un espesor de 1.0 milímetro es:

$$V_{tot} = V_{anillo} + V_{chaflan} + V_{chaflan} = 0.040525 + 0.00066 + 0.001485 \\ = 0.04267 \text{ m}^3$$

Multiplicado por la densidad de la grasa (1.3 t/m³) equivale a:

$$Grasa = 55.471 \text{ kg por avance}$$

En caso de tener 1.5 milímetros el consumo de grasa es:

$$Grasa = 81.81 \text{ kg por avance}$$

Suministro. Al igual que el mortero, el suministro de la grasa se realiza cuando se suministra el anillo, por lo cual no afecta en el ciclo de excavación y suministro de anillos. Los tambos se colocan en las plataformas doveleras y cuando llegan a la TBM son descendidos mediante un polipasto manual de 1 Tonelada.

Consideraciones. El consumo de grasa también depende del tipo de material excavado y la presión de inyección considerando que debe ser mayor, a razón de 1 bar, respecto a la presión del mortero, lo anterior para garantizar que no exista flujo de agua hacia el interior del túnel, no inyectar grasa en los cepillos conlleva a riegos ya mencionados por no inyectar el mortero.

IV.1.5 Sistema de enfriamiento (Agua fría, caliente y residual)

La tuneladora se compone de un sistema de enfriamiento basado en un ciclo de recirculación de agua suministrada desde el nivel de superficie, para tal efecto se utiliza tubería tipo victaulic de 4" que garantiza un caudal de 1500 lt/min o 90 m³/hr. Esta misma agua es utilizada para las labores de limpieza durante la excavación del túnel, para lo cual se realizan unas derivaciones a lo largo de tubería. El ciclo de recirculación inicia desde superficie, en donde mediante contenedores de una capacidad de 34 m³ se almacena y se suministra primeramente agua fría a la tuneladora, la forma de alimentar estos contenedores a base de pipas o mediante el bombeo de pozos de abatimiento anteriormente realizados para la construcción de la lumbrera.

El agua fría se logra suministrar desde superficie mediante gravedad debido a la profundidad del túnel, un contenedor ubicado en el Grantry No.5 de la TBM la almacena y distribuye hacia el sistema de enfriamiento en los motores, posteriormente el agua producto de esta acción (agua caliente) retorna al contenedor, el cual cuenta con un sistema de sensores que indican cuando la temperatura del agua es alta y se debe de cambiar. Para cambiar el agua del tanque se acciona una bomba centrífuga acoplada a una tubería que va desde la TBM hasta un cárcamo metálico ubicado en fondo de lumbrera, de donde se bombea a una torre de enfriamiento compuesta por un ventilador y celdas

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

metálicas que descienden la temperatura y la recirculan nuevamente, en la **Figura 147** se puede apreciar el ciclo completo mencionado.

Además de la tubería del sistema de enfriamiento se colocan generalmente 3 líneas adicionales en la pared de lumbrera y a lo largo del túnel conforme avanza la excavación, estas líneas tienen la función de conducir el agua de residuo que se genera por los trabajos de limpieza durante el ciclo de excavación del propio túnel y en aquellos casos en los que se requiera bombear eventuales fugas y filtraciones.

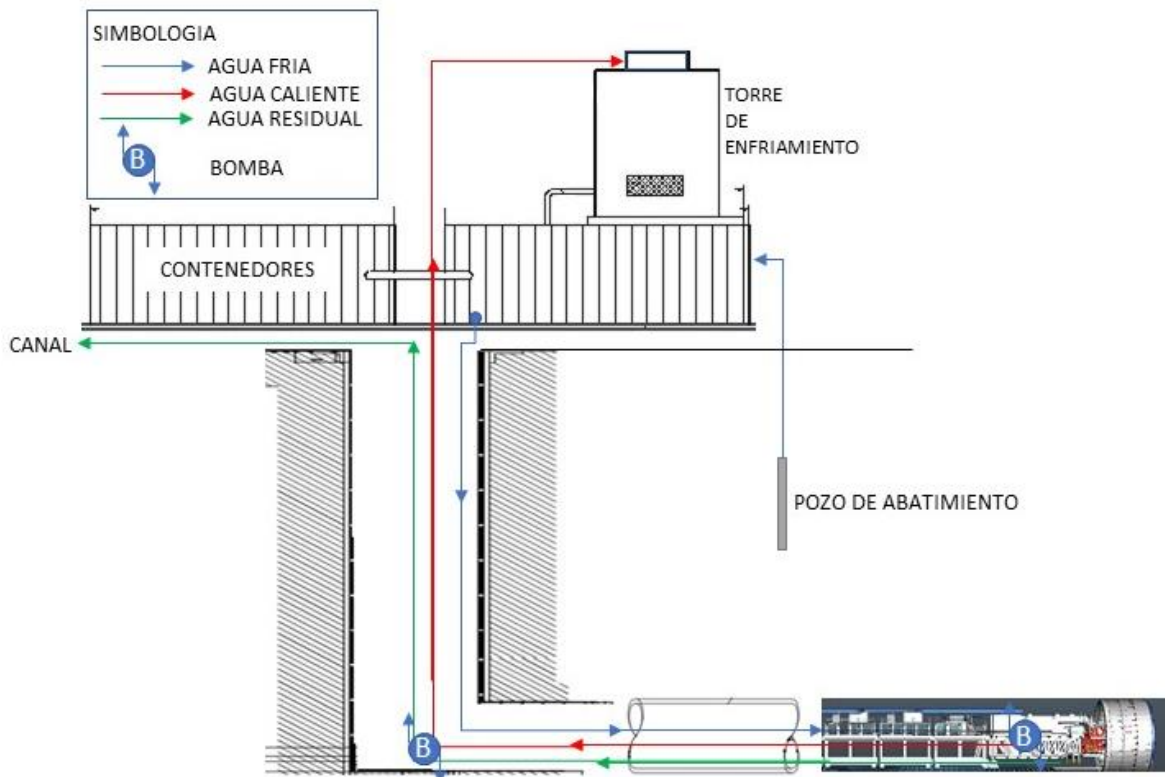


Figura 147. Ciclo de suministro y desalojo de agua.

La tubería que conduce al agua fría y agua caliente es de acero galvanizado tipo victaulic (ranurado) de un diámetro de 4", cédula 40 y largo estándar de 6.3 metros, la que conduce el agua residual es del mismo material, pero de un diámetro de 6".

El proceso de instalación es, primeramente, colocar las líneas de tubería de 4" y 6" a lo largo del muro de la lumbrera, desde el nivel del brocal hasta la losa de fondo con sus respectivas conexiones en los contenedores y la torre de enfriamiento, para la unión de cada tramo de tubería se utilizan coples de acoplamiento rápido y codos de 45° y 90°, para la fijación de la tubería al muro de la lumbrera se utilizan soportes metálicos o "racks" fabricados y diseñados para sostener las 5 líneas, mismos que se anclan al muro mediante espárragos de 3/4" por 7". La **Figura 148** muestra la instalación en el muro de lumbrera.



Figura 148. Instalación de tubería en pared de lumbraera.

Para la extensión, colocación y fijación de las tuberías a lo largo del túnel, se utiliza un sistema de soportes acoplados con los insertos (tornillos) del sistema de fijación de las dovelas para la formación del anillo, al igual que en el muro se utilizan coples rígidos, este sistema de instalación se aprecia en la **Figura 149**. Las líneas del túnel se instalan conforme la excavación avanza, los materiales se descienden a través de la lumbraera mediante la utilización de la grúa pórtico, una vez en el fondo de la lumbraera, se procede a colocar los tramos de tubería sobre plataformas planas, destinados para el suministro de materiales al equipo excavador, las cuales son llevadas hacia el frente de trabajo mediante el apoyo del sistema de locomotoras. Cabe mencionar que estas líneas solo llegan hasta el fondo de lumbraera y descargan en un cárcamo construido para bombear nuevamente el agua a superficie.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

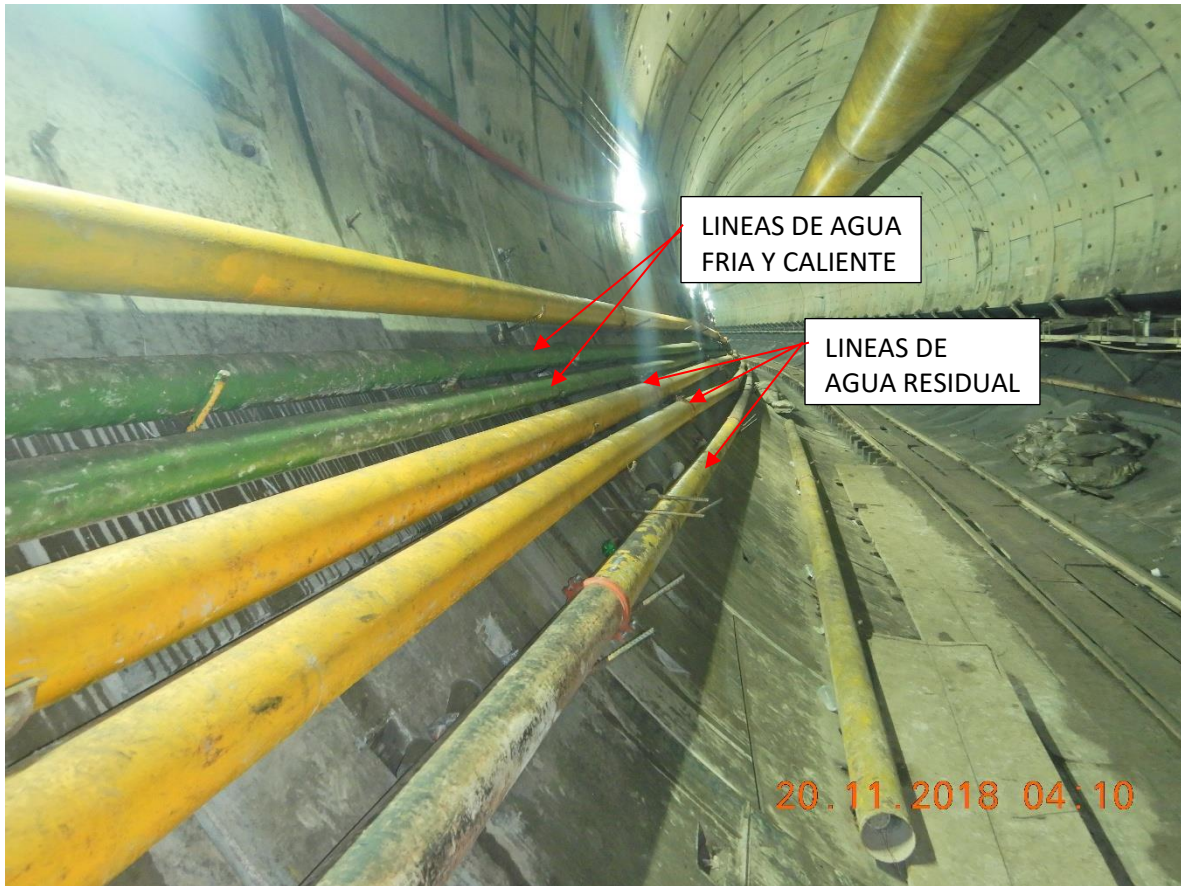


Figura 149. Instalación de tubería en túnel.

Para el retorno del agua caliente desde la TBM hasta el fondo de lumbrera se utiliza una bomba del tipo flygt MT de 58 H.P. capaz de desalojar 50 lps por lo que para desalojar desde el fondo de lumbrera hasta superficie se utiliza una bomba MT flygt de 140 H.P con el mismo gasto, las curvas características de las bombas en mención se muestran en la **Figura 150**.

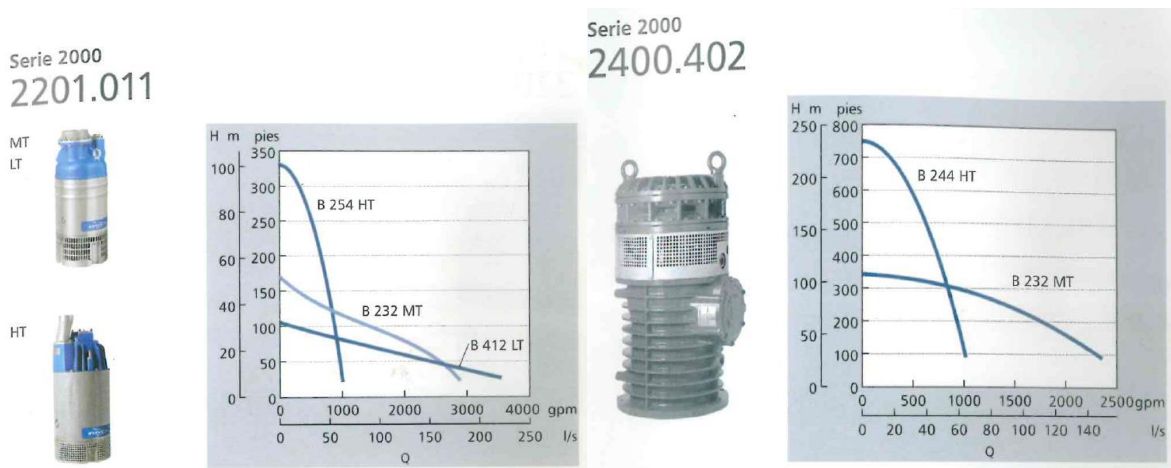


Figura 150. Curvas características de las bombas utilizadas para desalojo de agua residual.

VI.1.6 Sistema de ventilación.

El suministro de aire en la construcción de túneles siempre ha sido de vital importancia debido a que el objetivo de renovar el aire, diluir los gases contaminantes, polvo y controlar el humo en caso de incendios o trabajos con soldadura y oxicorte, es asegurar una condición ambiental para el personal que labora en la tuneladora y el correcto funcionamiento de la misma.

El tipo de ventilación utilizada durante la excavación es denominado “**Soplante**” debido a que se alimenta el frente de trabajo a través de un ducto de impulsión, el aire sucio sale a lo largo del túnel y es expulsado al exterior.

El suministro de aire a la tuneladora se realiza mediante una turbina Zitrón instalada sobre una estructura en superficie y a un costado de la lumbrera como así lo muestra la **Figura 151**, con un caudal de suministro de $31 \text{ m}^3/\text{s}$ (Q_{vent}) y un caudal en el frente (Q) de $26 \text{ m}^3/\text{s}$ a una distancia (L) de 3500 metros.

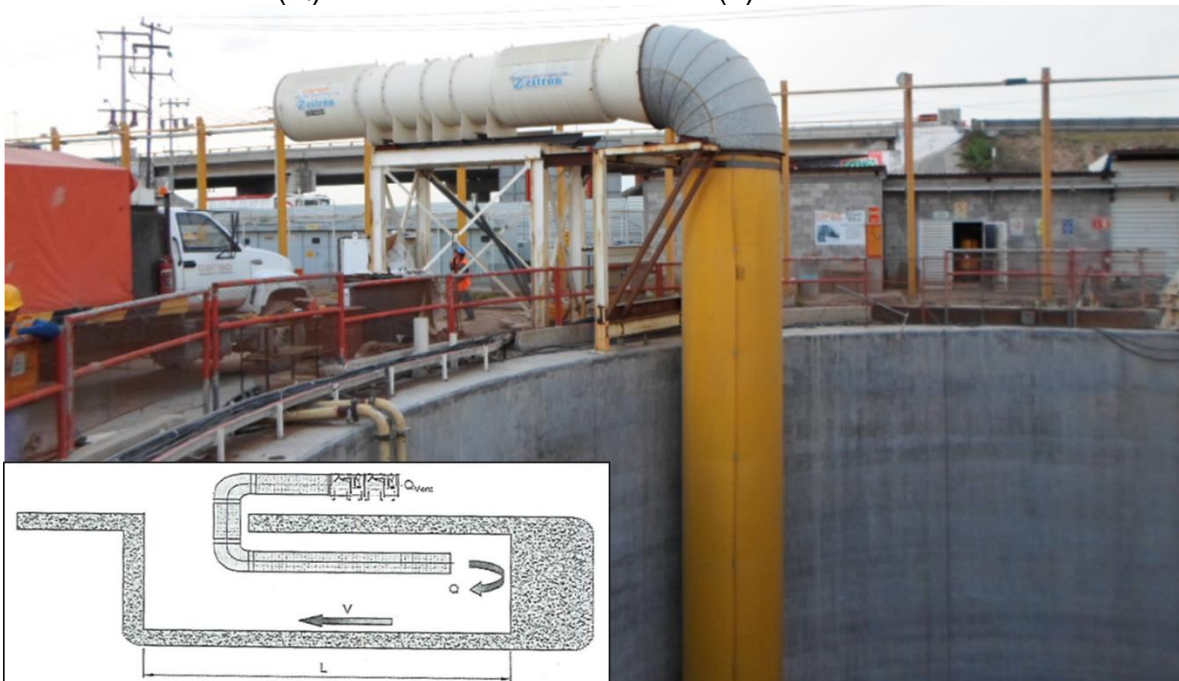


Figura 151. Sistema de ventilación y turbina.

Se incorpora una manga de polietileno de 1.61 metros de diámetro que se extiende desde la turbina hasta la tuneladora. Conforme avanza la excavación se realizan acoples de tramos de manga de una longitud de 100 metros enrollados en una estructura intercambiable denominada “cassette” como la que se aprecia en la **Figura 152**, esta estructura se encuentra en el back up, específicamente en el gantry No.6 de la máquina. Conforme se desenrolla el ducto de ventilación o manga, se fija en la parte superior del túnel mediante los insertos (tornillos) del sistema de fijación de las dovelas para la formación del anillo y placas de sujeción colocadas a cada 2 anillos.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO



Figura 152. Manga y Cassette para sistema de ventilación.

Aunado al cassette, se continúa el suministro de aire a través del back up con ductos metálicos y auxiliándose de una turbina adicional (ventilador) previamente instalada en la TBM con las características mostradas en la **Figura 153**:

Características generales	
Caudal de aire	11.5 m ³ /s
Presión total	3800 Pa.
Características de los motores	
Potencia	30 kW
Voltaje	400 V
Intensidad nominal	54 A
Polos No.	2
Velocidad de rotación	2950 rpm

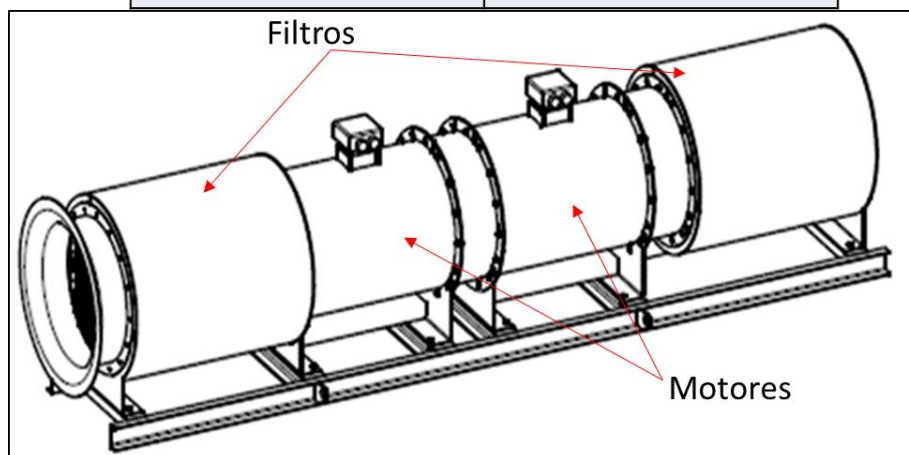


Figura 153. Turbina adicional ubicada en TBM.

IV.1.7 Energía eléctrica.

El suministro de energía eléctrica a TBM y túnel se realiza desde una subestación eléctrica con una acometida de alimentación de 23 kva y transformadores de una capacidad de 1000 y 225 kva. como se muestra en la **Figura 154**.

Primeramente, se tiende desde la subestación hasta el fondo de lumbrera 1 línea de cable 3/0 XLP de 13 200 Volts y 5 líneas de cable 1/0 8AWG para alumbrado del túnel, como soporte en pared de lumbrera se utilizan canaletas metálicas portacables tipo escalerilla. Para la extensión, colocación y fijación de los cables a lo largo del túnel, se utiliza un sistema de soportes, mismos que son fijados utilizando los insertos (tornillos) del sistema de fijación de las dovelas para la formación del anillo.



Figura 154. Subestación eléctrica de y líneas de suministro de energía en túnel.

La tuneladora cuenta con carretes instalados en el back up que almacenan aproximadamente 250 metros de cable de 13 200 volts, estos carretes tienden la línea de alimentación eléctrica a lo largo del túnel conforme avanza la excavación. Una vez que se tiene extendido el cable de la bobina principal (TBM Gantry No. 6), se realiza el empalme de una bobina adicional de 220 metros de cable y se rebobina el cable de la bobina principal. Para empalmar los tramos de cable, se usan cajas de conexión y cajas con sistema de interrupción de energía. Las bobinas adicionales, se descenden a través de la lumbrera, mediante la utilización de la grúa pórtico. Una vez en el fondo de la lumbrera, se procede a colocar sobre los carros planos destinados para el suministro de materiales al equipo excavador, los cuales son llevados hacia el frente de trabajo mediante el apoyo del sistema de locomotoras.

En la **Figura 155**, se aprecian las instalaciones que conforman el túnel durante el proceso de excavación, en donde se observan las líneas de tubería, el cableado, el ducto de ventilación, las vías para el paso de locomotoras y el sistema de bandas.



Figura 155. Instalaciones en túnel durante el proceso de excavación.

IV.2 Rendimiento de excavación en diferentes tipos de suelo.

Inicialmente se desarrolló una metodología para determinar los rendimientos posibles de alcanzar considerando la mayoría de las condiciones que afectan el avance de la excavación del túnel.

Esta metodología consideró entre otros la clasificación del suelo a partir del corte estratigráfico para el estudio del cálculo de presiones de frente contenida en el proyecto ejecutivo. Se identificaron y agruparon los diferentes tipos de material en los que se precisaba excavar el túnel considerando la similitud de sus características geotécnicas, siendo así denominados por tipo de material; "Suelo", "Mixto" y "Roca".

Las propiedades índices y de resistencia del suelo de los diferentes tipos de material agrupados, así como los parámetros de operación de la tuneladora, determinaron la velocidad de avance.

Material	Características	Velocidad de avance
ROCA	Porcentaje mayor o igual al 80% de roca basáltica (andesita) vesicular fracturada, en relación a la superficie total del frente de excavación con índices de roca RQD (<i>Rock Quality Designatio</i>) mayor o igual a 50% (Calidad de masa de regular a muy buena).	18 mm/min
SUELO	Porcentaje mayor o igual al 80% de suelos finos y/o granulares estratificados en relación a la superficie total del frente de excavación y hasta 20% de roca con índice de calidad RQD menor a 50%.	29 mm/min
MIXTO	Casos en donde no se cumpla los estipulado con respecto al material "ROCA" y "SUELO".	14 mm/min

Mediante la conciliación del frente de excavación durante las inspecciones que se realizaron a la rueda de corte (Intervenciones atmosféricas) se obtuvo información más precisa del tipo de material y su clasificación, logrando realizar un análisis más preciso de los rendimientos alcanzados en los tres diferentes tipos de material encontrados en cada subtramo, sin considerar los tiempos muertos por incidencias mayores y actividades complementarias.

IV.2.1 Subtramo L10-L11.

Rendimiento General (Rg). Este subtramo comprende una longitud total de 3.114 kilómetros de túnel, es decir 2072 anillos de concreto colocados, debido a que la longitud por anillo se considera de 1.5031 metros, es decir una longitud adicional de 0.31 milímetros por las juntas adheridas a la dovela (junta tok, junta estanqueidad y placas de fibra dura). La duración total de excavación fue de 1189 días calendario, teniendo como inicio de actividades el día 19/Enero/2012 y concluyendo el día 21/Abril/2015.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

El cálculo del rendimiento general se calcula de la siguiente forma:

$$R_g = \frac{\text{Longitud de excavación}}{\text{Duración}} = \frac{l_e}{t} = \frac{3114 \text{ m}}{1189 \text{ dias}} = 2.69 \left[\frac{\text{m}}{\text{dia}} \right] \cong 1.742 \left[\frac{\text{anillos}}{\text{dia}} \right]$$

Es importante destacar que este rendimiento incluye todos los periodos muertos (días sin excavación), en donde se engloban las intervenciones atmosféricas, intervenciones hiperbáricas o trabajos de alguna reparación mecánica de la tuneladora. La **Figura 156** resume de manera gráfica el rendimiento diario alcanzado de manera más específica, teniendo como variable la cantidad de anillos excavados por día calendario.

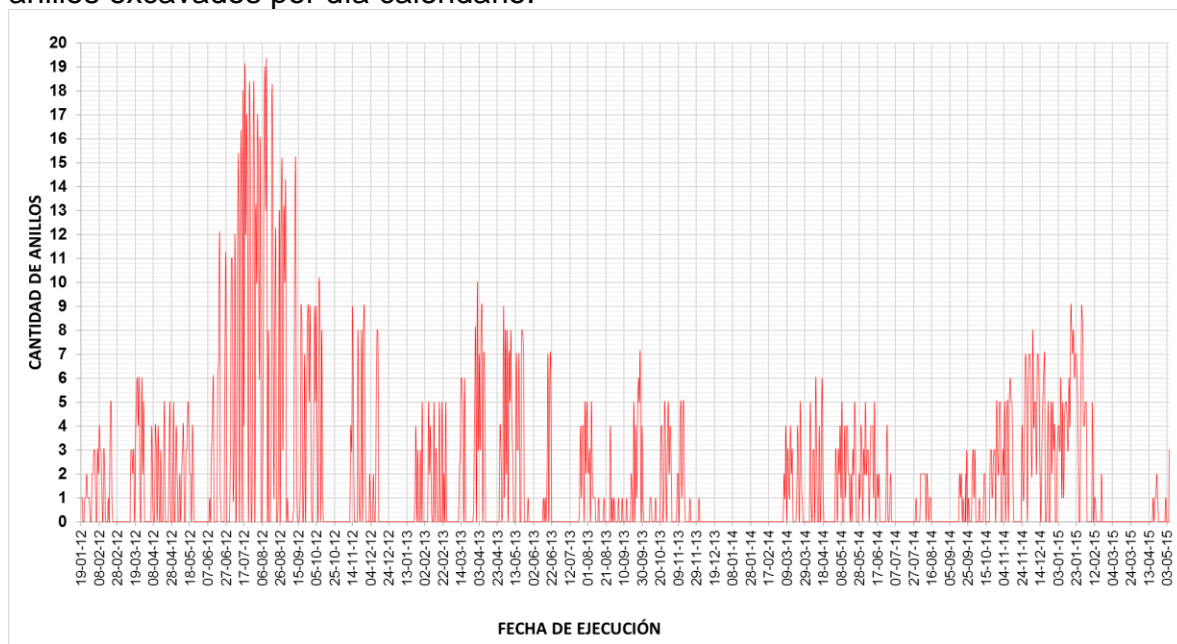


Figura 156. Rendimiento diario de excavación del subtramo L10-L11.

Rendimiento efectivo (Re). Si se eliminan los periodos de tiempo muertos de la gráfica anterior, es decir solo considerando los días efectivos de trabajo se obtiene la gráfica de la **Figura 157**, en donde se aprecia un rendimiento máximo alcanzado de 19 anillos excavados y un mínimo de solo 1 anillo, el total de días efectivos de trabajo es de 464 para la excavación de los 2072 anillos (3.114 kilómetros) que componen el subtramo.

Nuevamente el rendimiento efectivo general se calcula de la siguiente manera:

$$R_e = \frac{\text{Longitud de excavación}}{\text{Duración efectiva}} = \frac{l_e}{t} = \frac{3114 \text{ m}}{464 \text{ dias}} = 6.71 \frac{\text{m}}{\text{dia}} = 4.47 \frac{\text{anillos}}{\text{dia}}$$

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

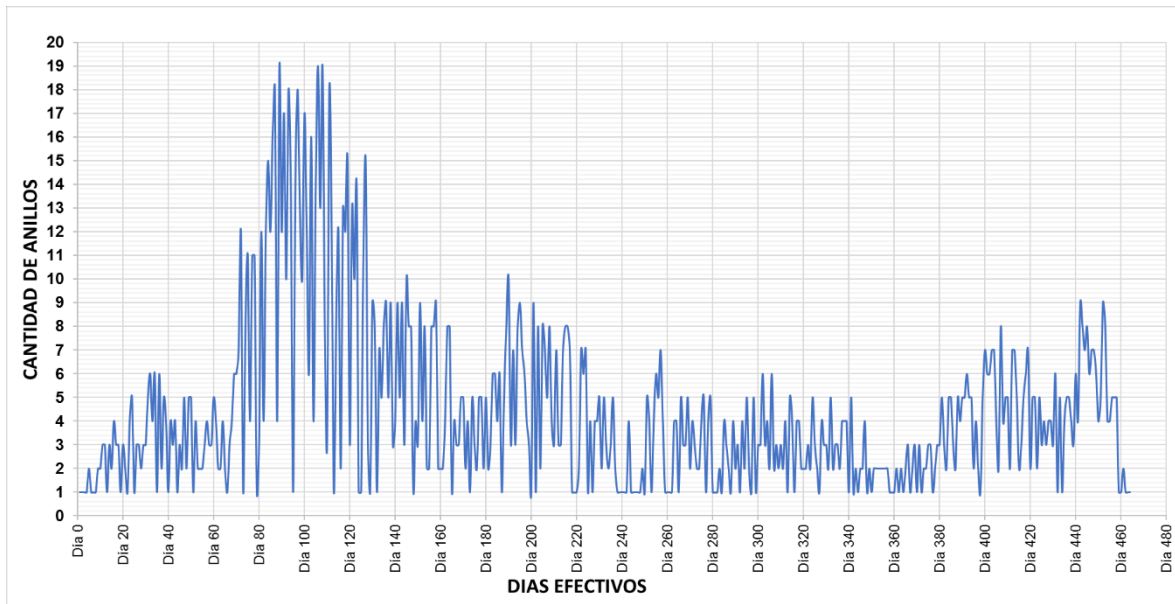


Figura 157. Rendimiento efectivo del subtramo L10-L11.

De forma analítica se observa que es considerable el porcentaje de días en donde se tiene una producción de menos de 5 anillos excavados, que en mayor de los casos depende de los imprevistos que se presentan por trabajos de reparación menores o retrasos en la logística de suministros debido problemas causados directamente por la efectividad de la mano de obra.

Rendimiento por tipo de material (Res, Rem, Rer). Los rendimientos anteriores no consideran el tipo de material excavado, solo dan un panorama general en cuanto a tiempos de ejecución, por lo que para deducir un valor más significativo; es necesario clasificar de manera más precisa el frente encontrado durante el proceso del paso de la tuneladora.

La clasificación del frente de excavación se puede deducir de dos maneras; por la clasificación del perfil estratigráfico general, mostrada en la **Figura 158** obtenida del proyecto ejecutivo o por una clasificación de conciliación directa obtenida durante la revisión de las herramientas de corte de la rueda (intervenciones), siendo la clasificación por conciliación directa del frente la mejor opción debido a que es información obtenida en el sitio. Los trabajos de inspección de las herramientas de corte durante las intervenciones atmosféricas realizadas, presentan un gran apoyo debido a que se puede observar de forma directa las características del tipo de material que se encuentra en el frente de excavación. De la **Figura 159** a la **Figura 172**, se presentan catorce conciliaciones representativas del todo el subtramo, en las cuales se aprecia de forma directa el tipo de material encontrado para posteriormente realizar un análisis más significativo de los rendimientos obtenidos.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

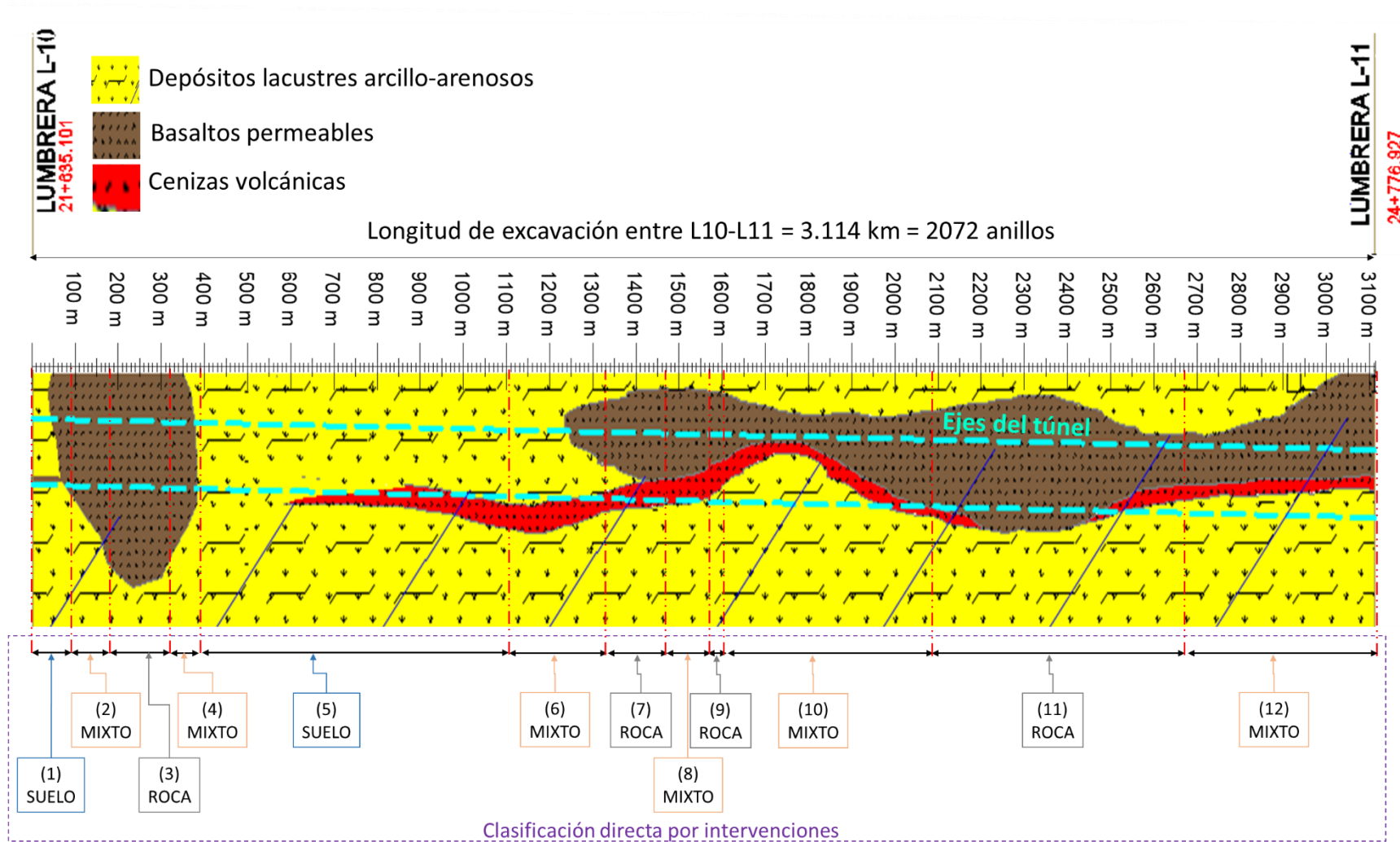


Figura 158. Perfil estratigráfico del subtramo L10-L11.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

Conciliación 1. Inspección y conciliación del frente de excavación durante la intervención atmosférica No. 2 (Anillo A66). Se observa un 60% de material limo arenoso de consistencia media, en la sección interior derecha se observa arena limosa en un área del 20% y basalto masivo en el 20 % restante, considerado un frente con material del tipo "MIXTO".

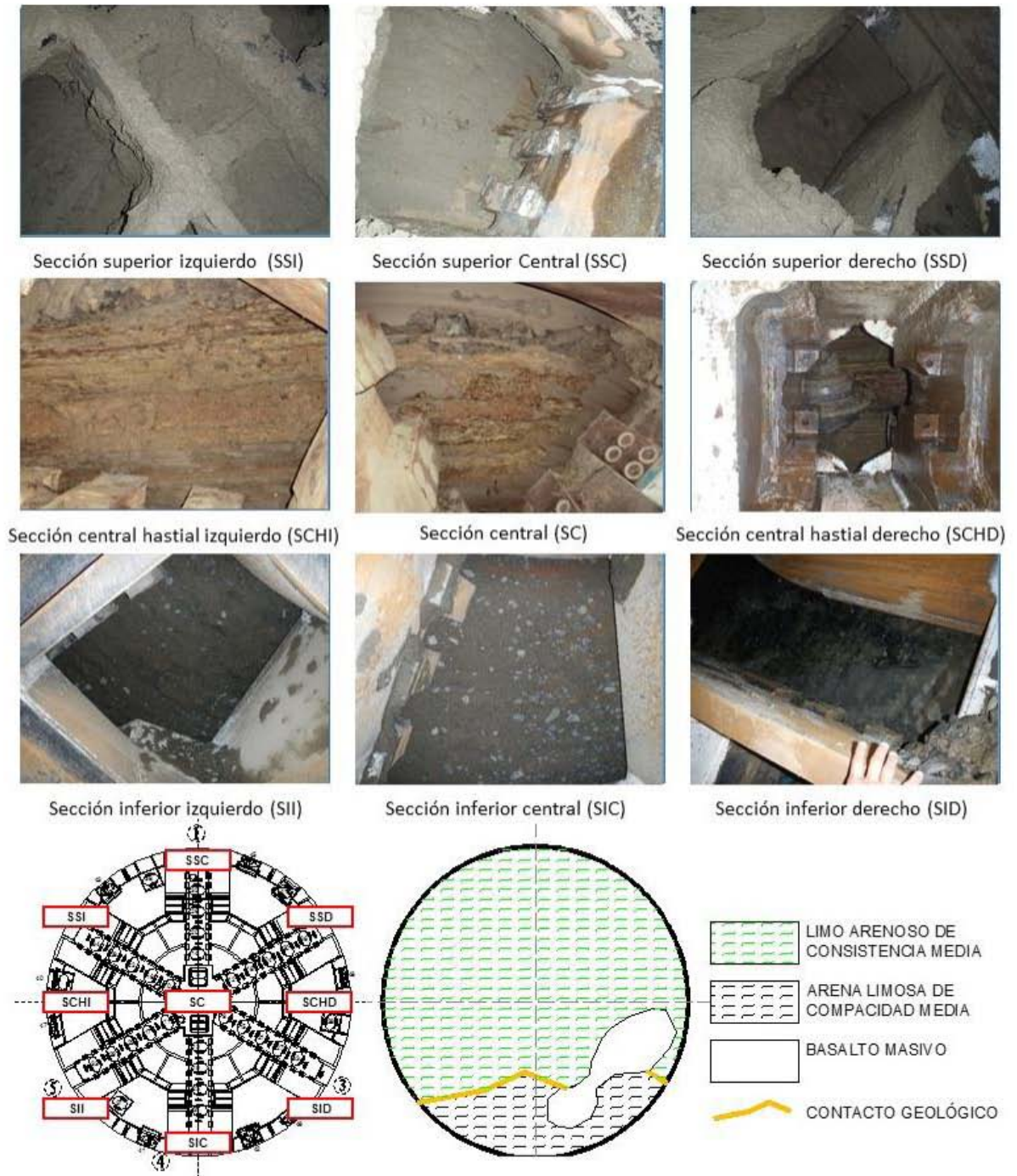


Figura 159. Conciliación del frente de excavación No. 1.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

Conciliación 2. Inspección y conciliación del frente de excavación durante la intervención atmosférica No. 12 (Anillo 176). El 95% de material es basalto masivo de color gris, en la sección interior derecha se observa arena limosa en un área aproximada del 5%, considerado un frente con material del tipo "ROCA".

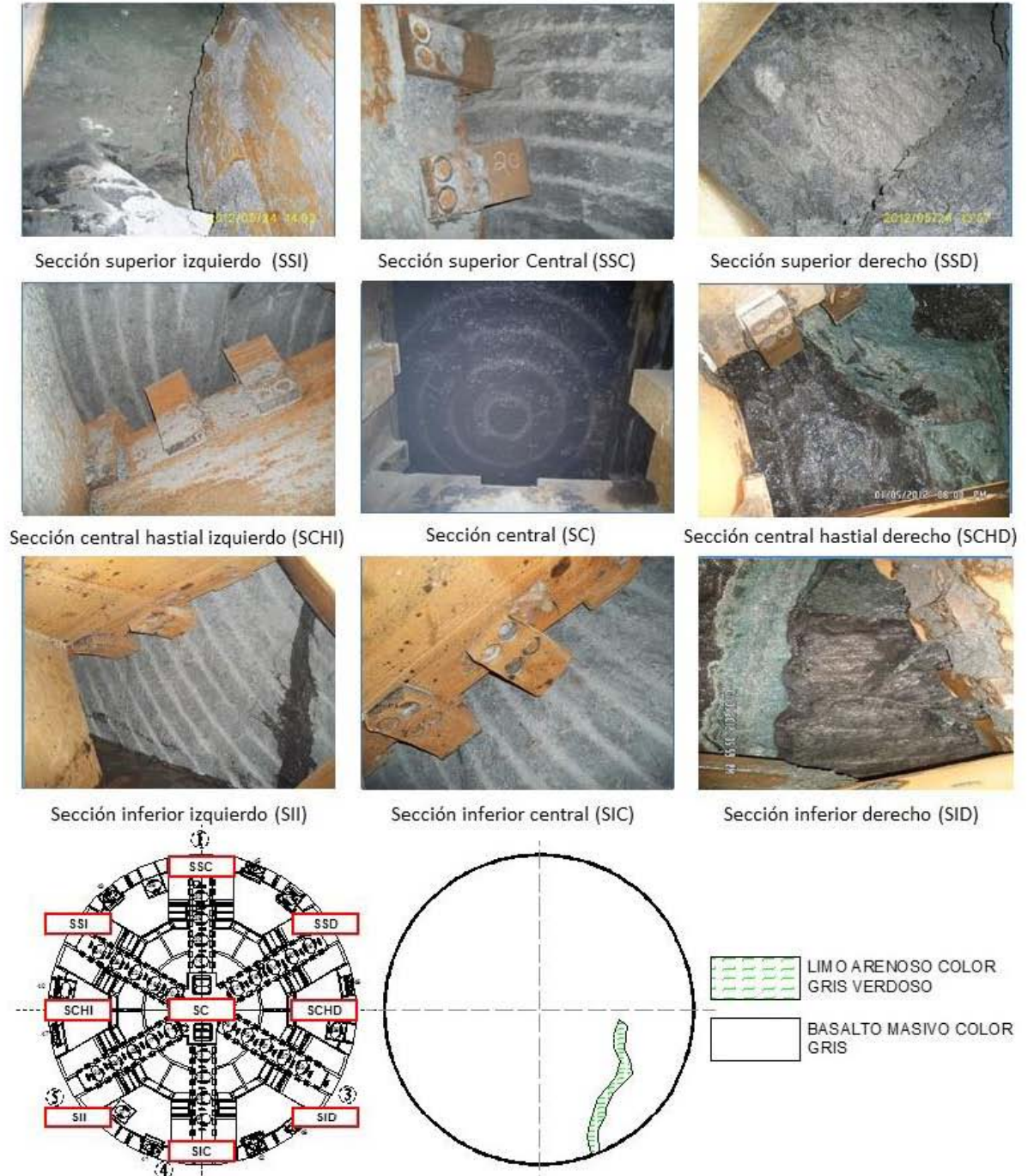


Figura 160. Conciliación del frente de excavación No. 2.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

Conciliación 3. Inspección y conciliación del frente de excavación durante la intervención atmosférica No. 15 (Anillo A226). El 60% de material observado en la sección media inferior es basalto masivo, en la parte central en un área correspondiente al 20% se observa un estrato de limo arenoso presente en todo el frente de excavación y en la parte superior correspondiente al 20% del área se observa basalto fracturado, considerado un frente con material del tipo “MIXTO”.

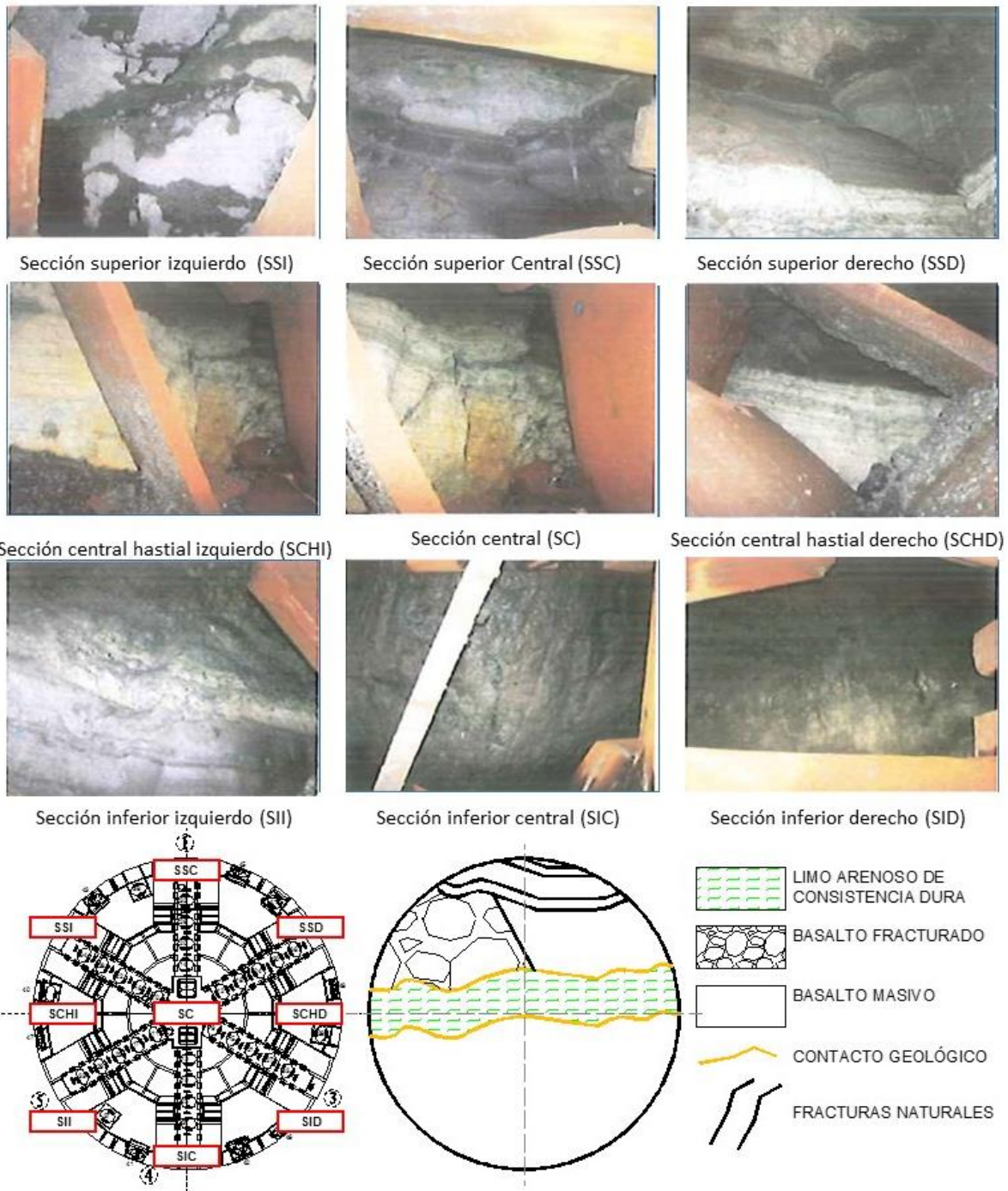


Figura 161. Conciliación del frente de excavación No. 3.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

Conciliación 4. Inspección y conciliación del frente de excavación durante la intervención atmosférica No. 17 (Anillo A271). Frente de excavación completamente de material limo arenoso de consistencia media con pequeños fragmentos aislados de basalto con un tamaño entre 8 y 15 pulgadas, considerado un frente con material del tipo “SUELO”.

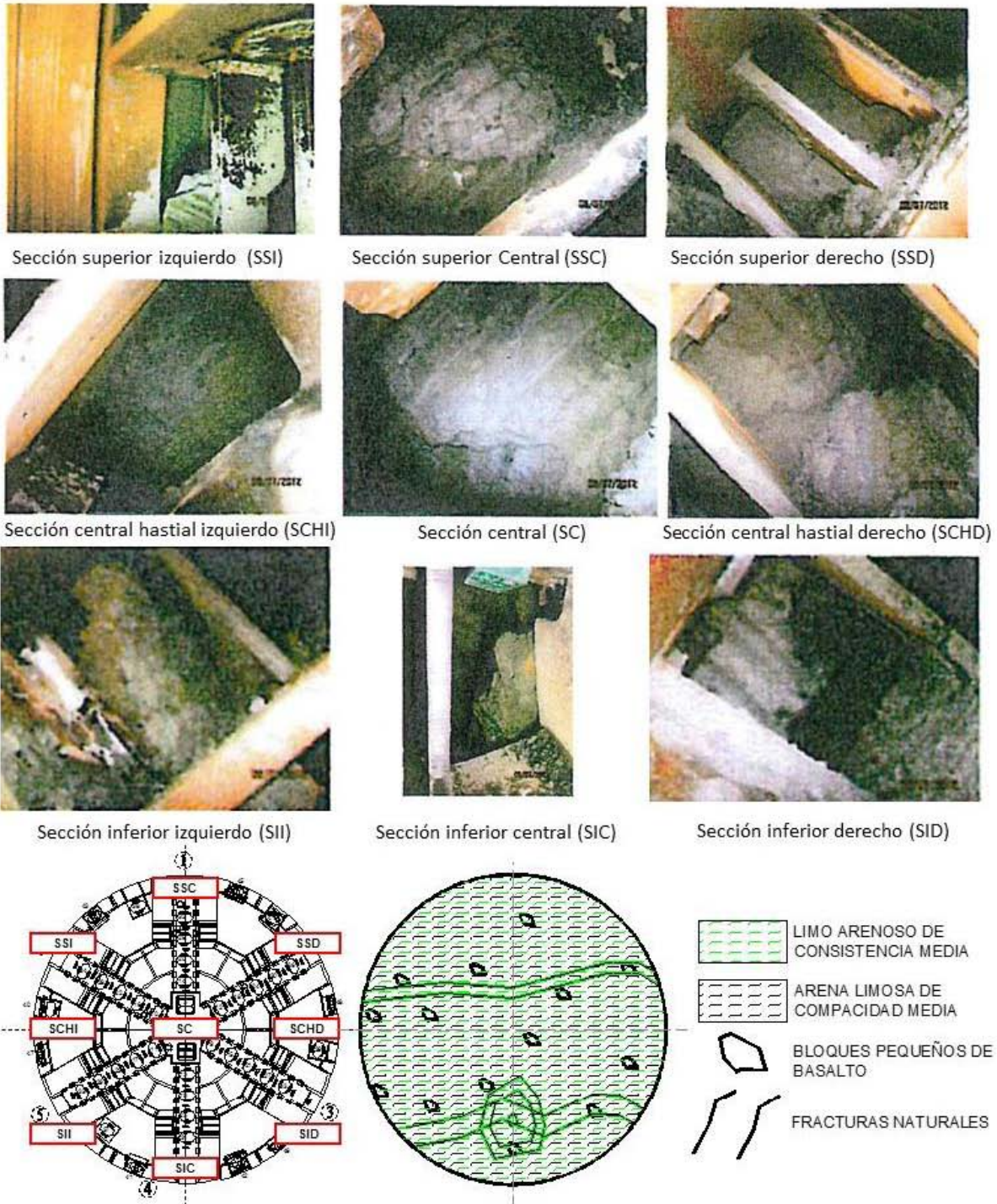


Figura 162. Conciliación del frente de excavación No. 4.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

Conciliación 5. Inspección y conciliación del frente de excavación durante la intervención atmosférica No. 20 (Anillo A365). Frente de excavación de material limo arenoso de consistencia media con intercalaciones de arena limosa de compacidad media, además de observar que en la sección superior izquierda intercalaciones de ceniza volcánica, considerado un frente con material del tipo "SUELO".

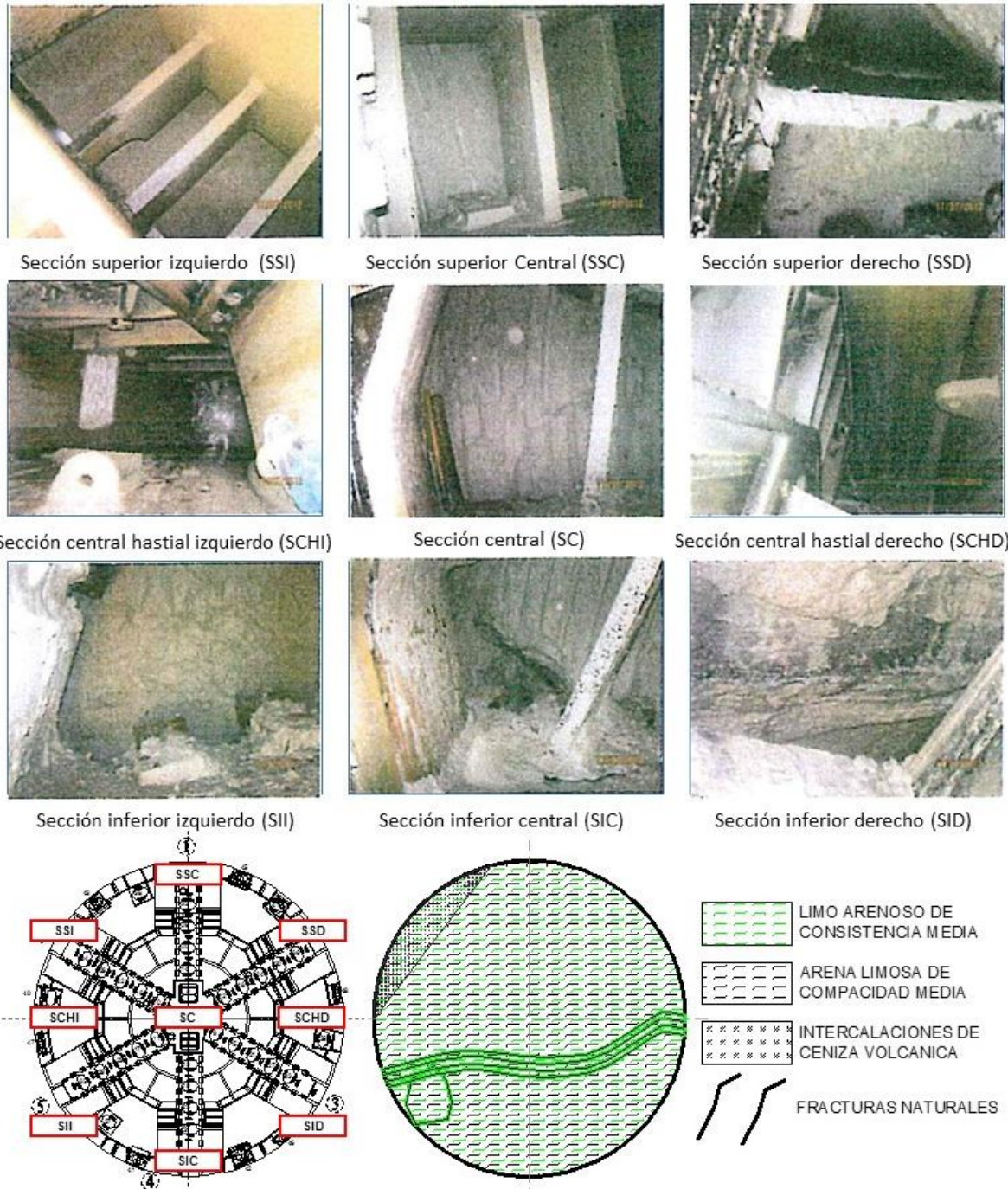


Figura 163. Conciliación del frente de excavación No. 5.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

Conciliación 6. Inspección y conciliación del frente de excavación durante la intervención atmosférica No. 22 (Anillo A565). Frente de excavación de material limo arenoso de consistencia firme, con un estrato de 0.01 metro de limo con carbonato de calcio, un estrato de 0.60 metro y 0.30 metro de ceniza volcánica compacta con intercalaciones de grava basáltica, considerado un frente con material del tipo “SUELO”.

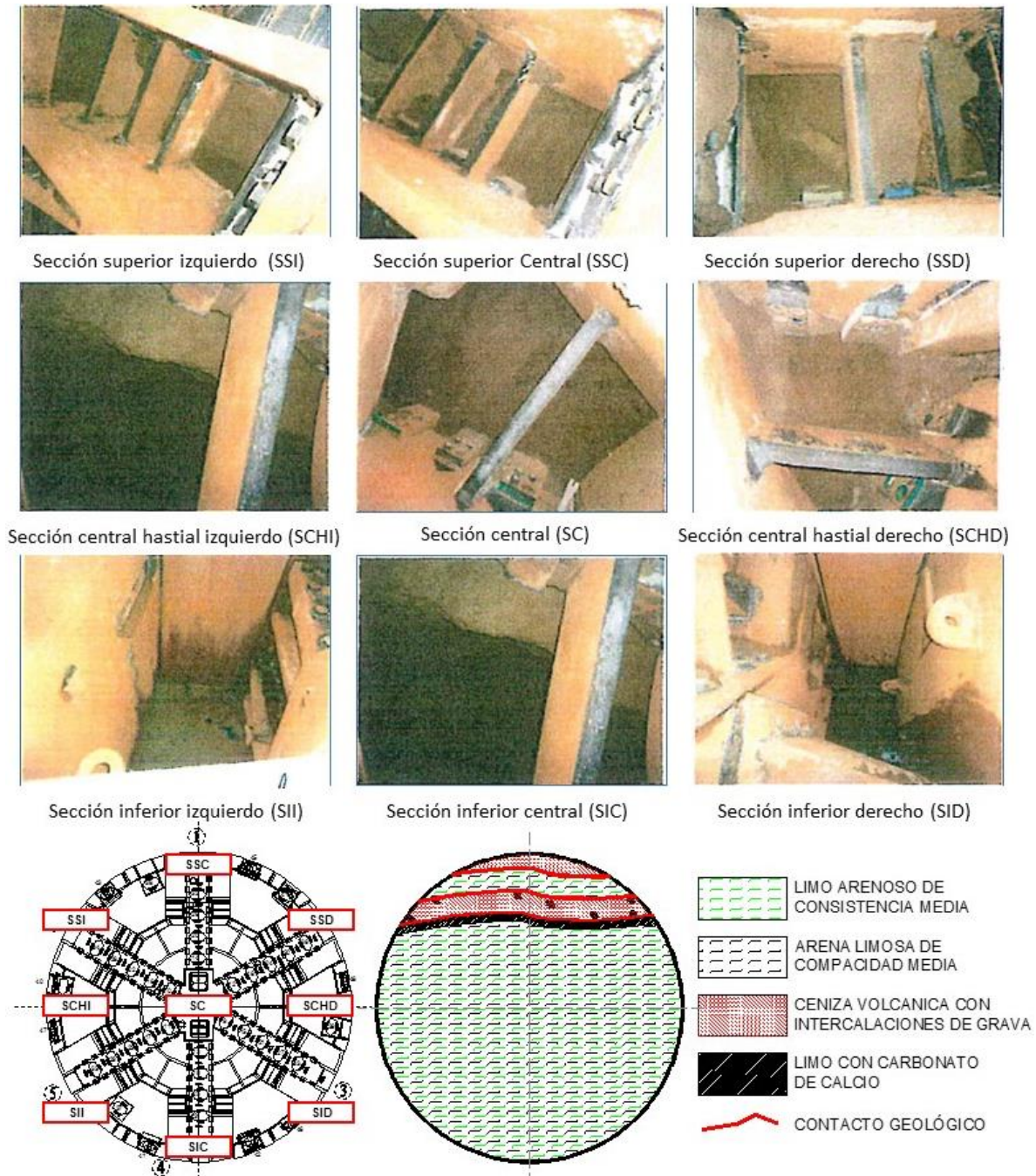


Figura 164. Conciliación del frente de excavación No. 6.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

Conciliación 7. Inspección y conciliación del frente de excavación durante la intervención atmosférica No. 23 (Anillo A696). Frente de excavación de material limo arenoso con arcillas de consistencia firme, compuesto con dos estratos de ceniza volcánica y presencia de limo con carbonato de calcio, considerado un frente con material del tipo “SUELO”.

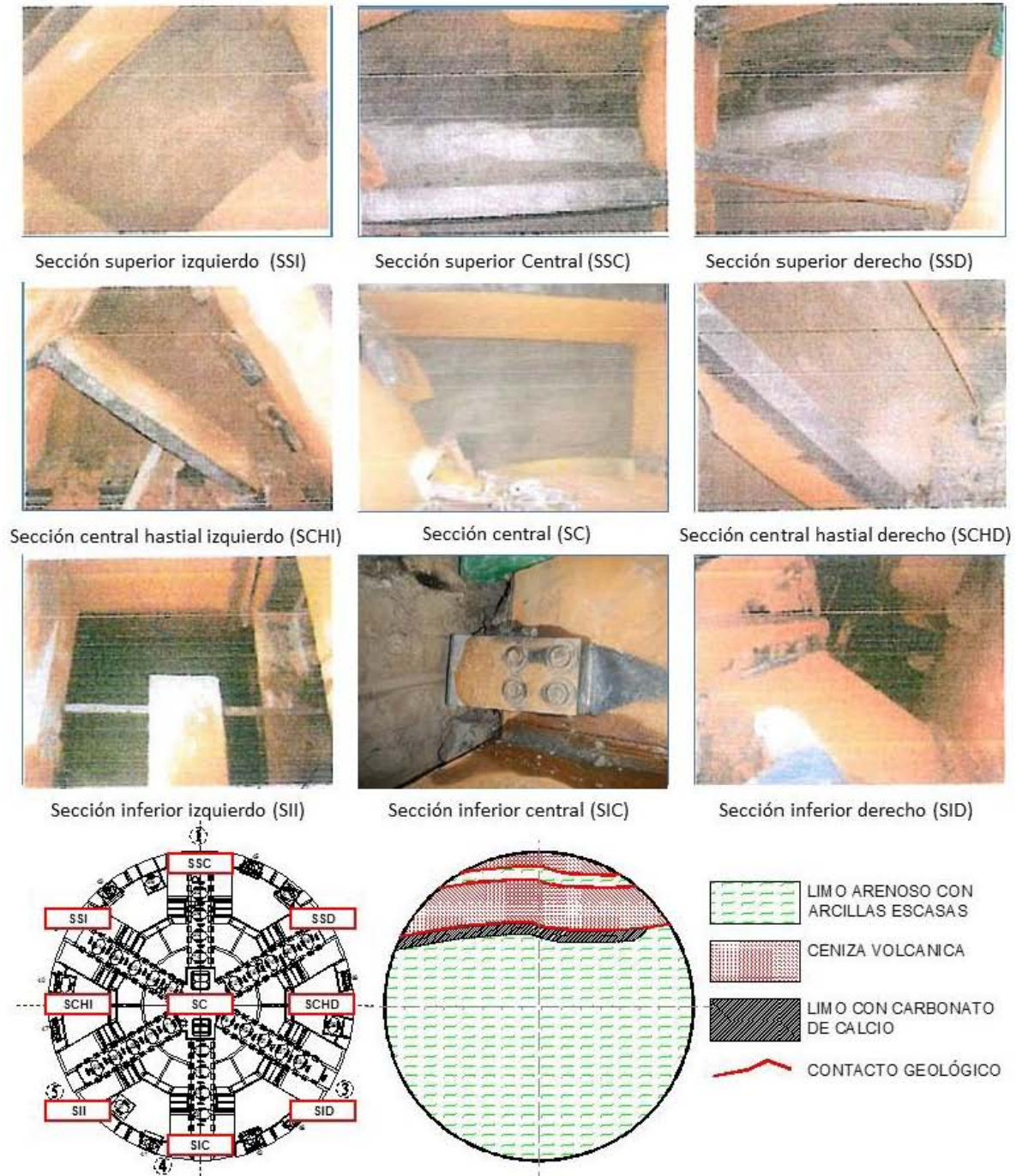


Figura 165. Conciliación del frente de excavación No. 7.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

Conciliación 8. Inspección y conciliación del frente de excavación durante la intervención atmosférica No. 25 (Anillo A808). Frente de excavación de material basalto masivo en la parte media superior de un área aproximada del 60% con grieta vertical al centro rellena con arcilla color verde, en la mitad inferior se aprecia un estrato de arena pumítica cementada de 1.0 metro de espesor y un suelo limo arenoso de consistencia firme en un área aproximada del 40%, considerado un frente con material del tipo "MIXTO".

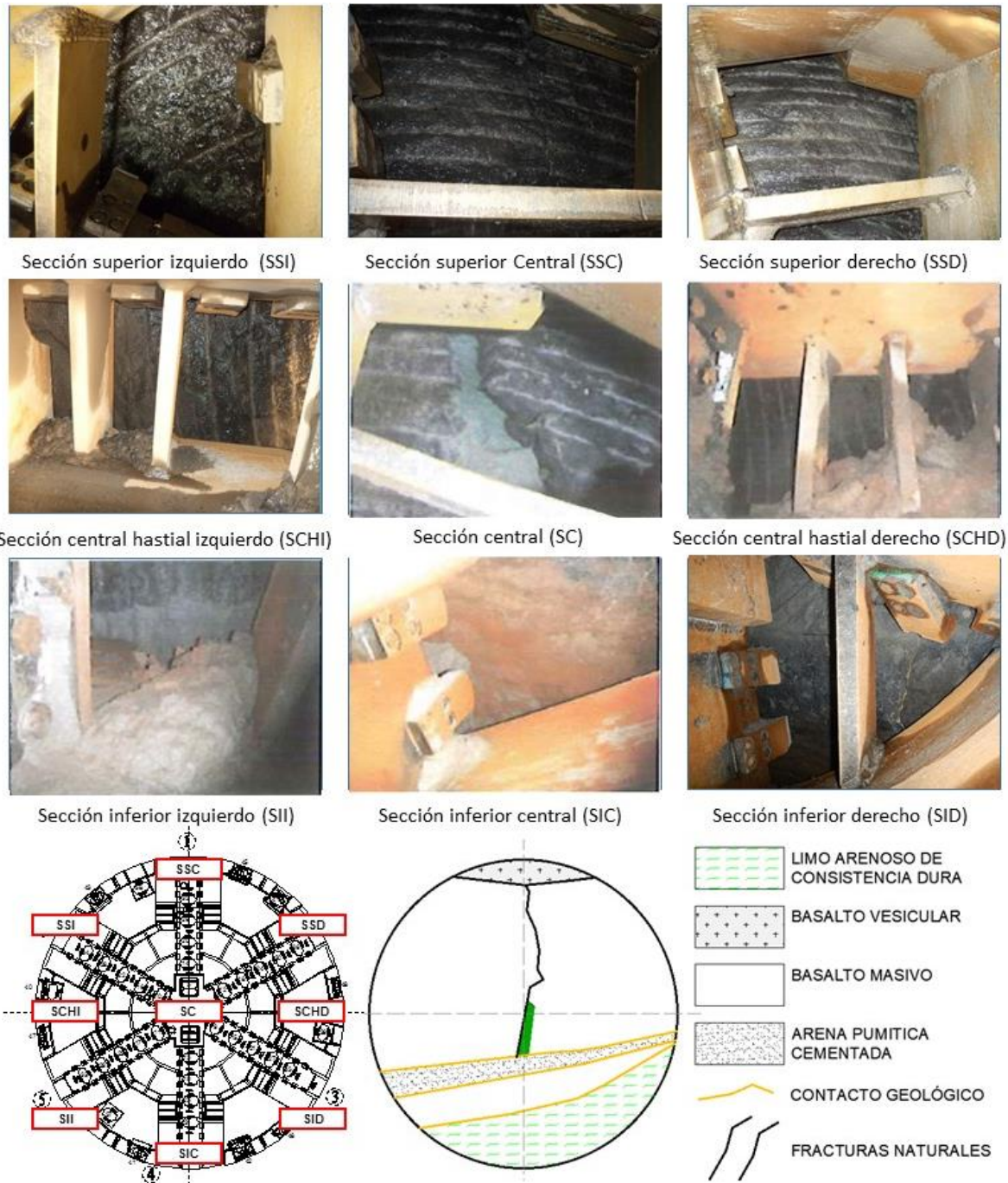


Figura 166. Conciliación del frente de excavación No. 8.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

Conciliación 10. Inspección y conciliación del frente de excavación durante la intervención atmosférica No.33 (Anillo A1014). Frente de excavación de material de basalto sano con fractura natural rellena de limo arenoso en área de aproximadamente 60%, se observa un estrato de limo arenoso cementado de consistencia dura en el área restante, es decir un 40%, considerado un frente con material del tipo "MIXTO".

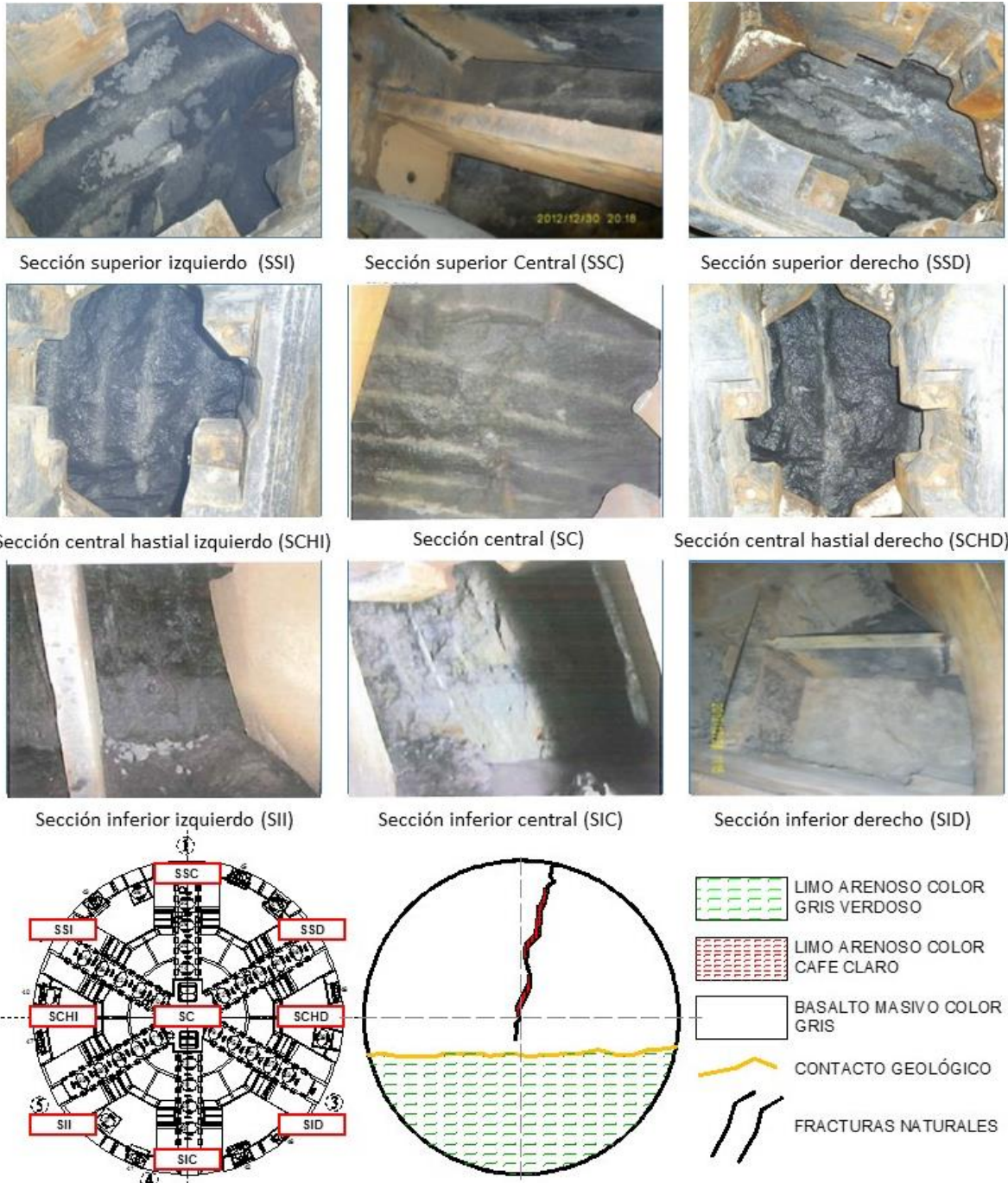


Figura 168. Conciliación del frente de excavación No. 10.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

Conciliación 11. Inspección y conciliación del frente de excavación durante la intervención atmosférica No. 42 (Anillo 1052). Frente de excavación con 85% de basalto masivo color gris con una fractura natural, presencia de un estrato de limo arenoso muy cementado de consistencia dura en un área del 15%, ceniza volcánica, considerado un frente con material del tipo “ROCA”.

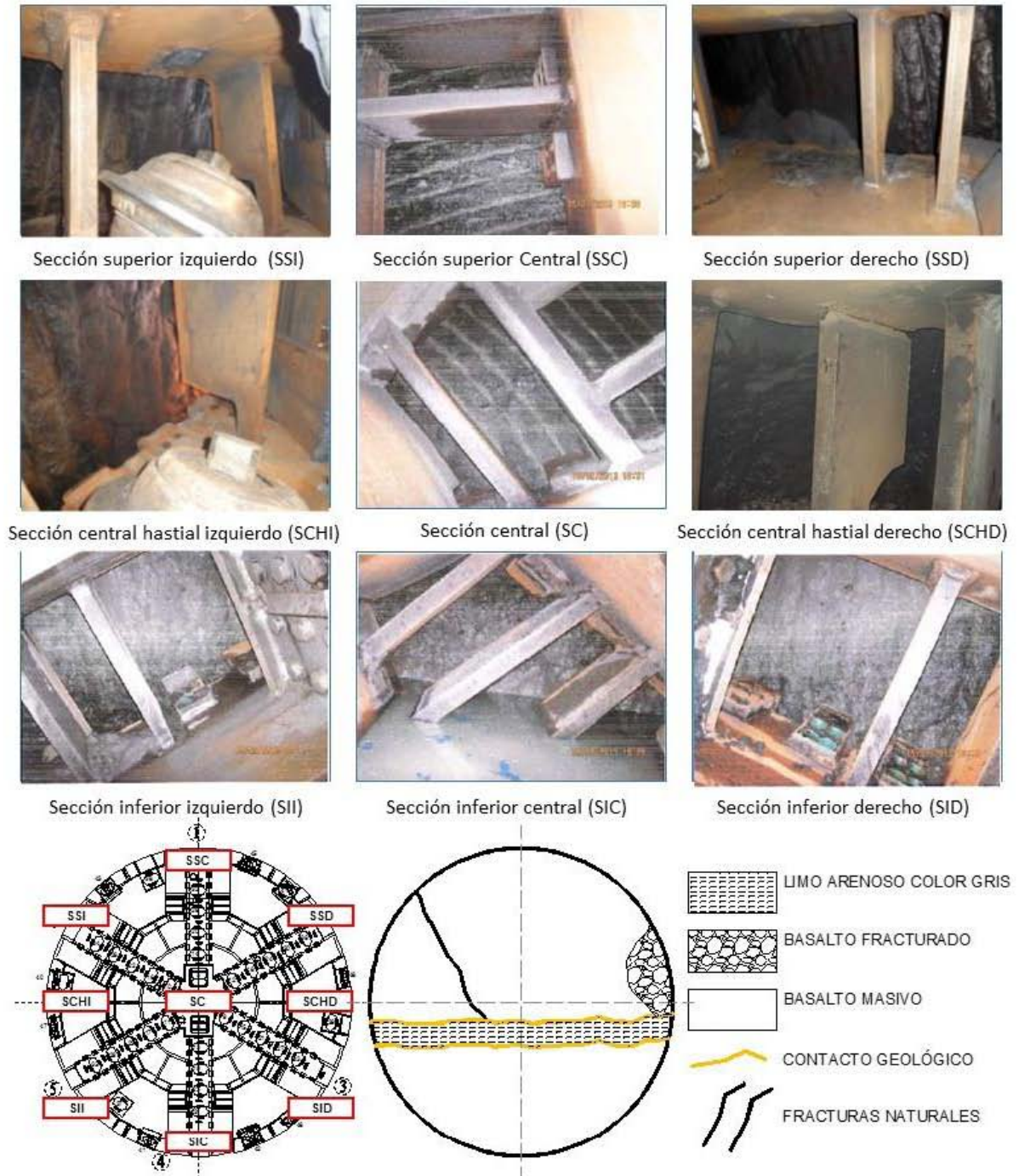


Figura 169. Conciliación del frente de excavación No. 11.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

Conciliación 12. Inspección y conciliación del frente de excavación durante la intervención atmosférica No. 55 (Anillo A1130). Frente de excavación de material basalto masivo de buena calidad con un RQD>50% color gris con basalto vesicular en un área de aproximadamente 45%, en la parte inferior se observa un estrato de limo arenoso muy cementado de consistencia dura en un área del 65%, considerado un frente con material del tipo "MIXTO".

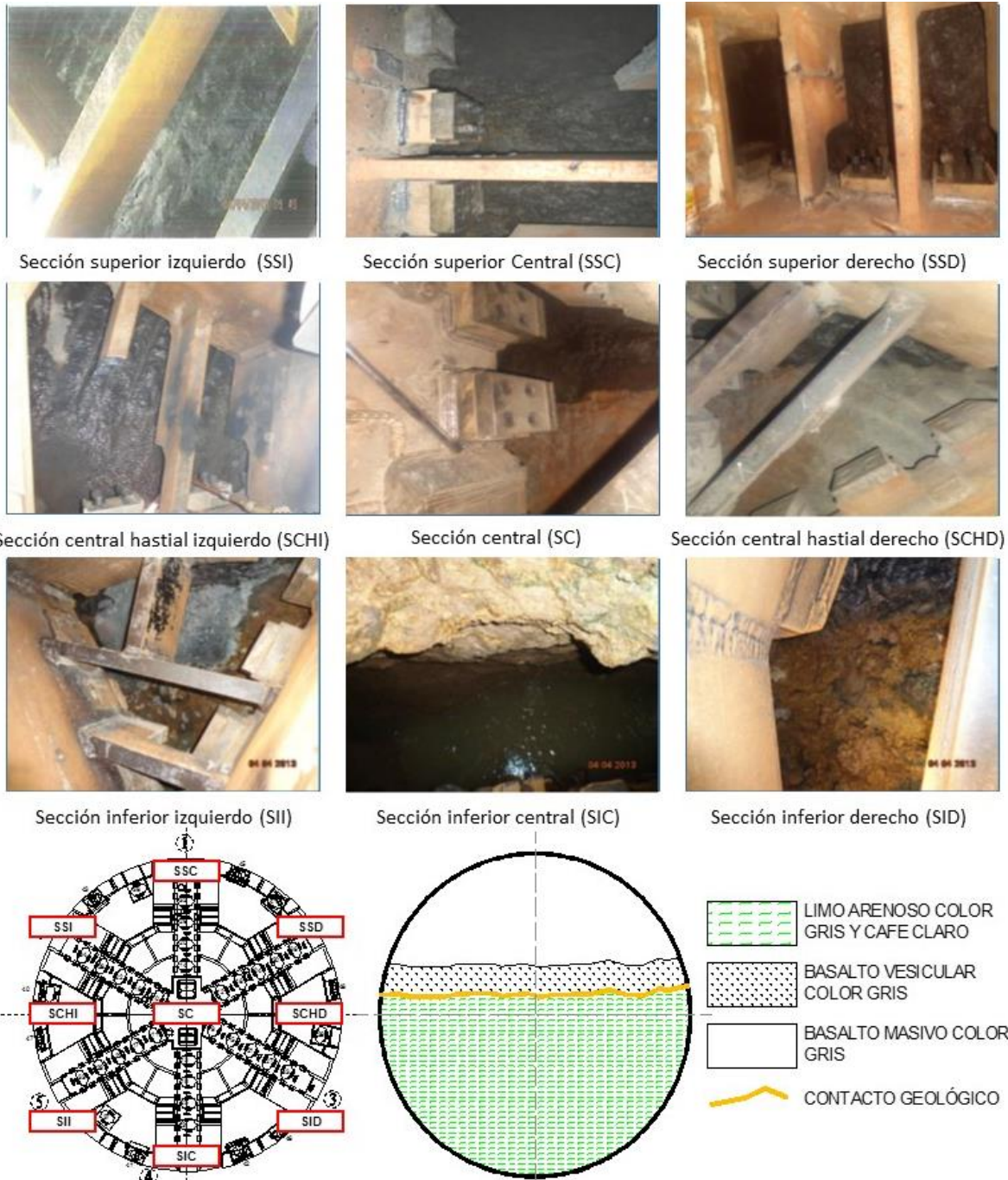


Figura 170. Conciliación del frente de excavación No. 12.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

Conciliación 13. Inspección y conciliación del frente de excavación durante la intervención atmosférica No. 153 (Anillo 1706). Frente de excavación con 100% de basalto masivo fracturado con cinco discontinuidades y un RQD>90%, considerado un frente con material del tipo “ROCA”.

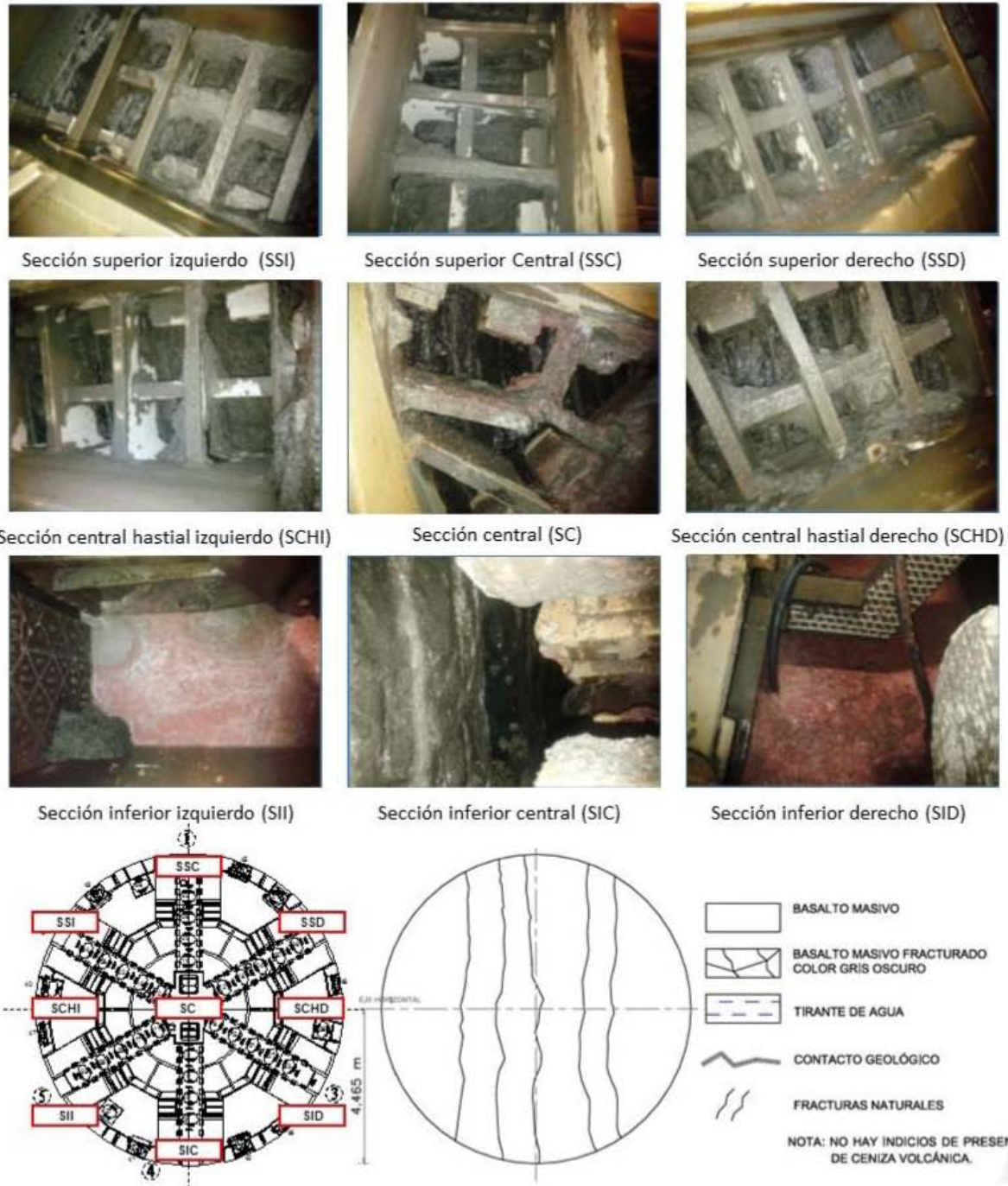


Figura 171. Conciliación del frente de excavación No. 13.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

Conciliación 14. Inspección y conciliación del frente de excavación durante la intervención atmosférica No. 174 (Anillo 1821). Frente de excavación con 45% de basalto vesicular fracturado de buena calidad con un RQD>90%, en la sección inferior se observa arena media de compactidad densa cementada en un área del 7% y un estrato de arena limosa cementada de un área del 48%, considerado un frente con material del tipo “MIXTO”.

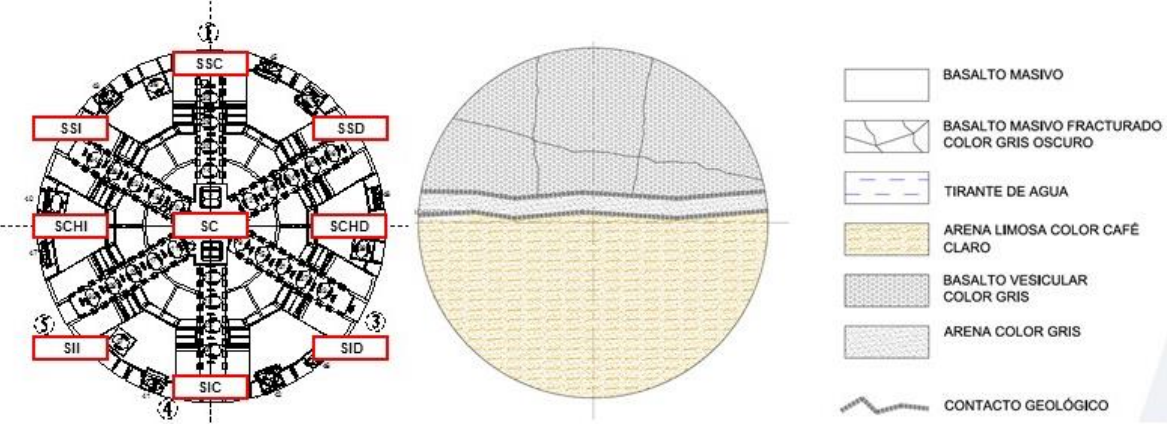


Figura 172. Conciliación del frente de excavación No. 14.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

Con un total de 208 intervenciones atmosféricas se conciliaron los tiempos de ejecución y la longitud por tipo de material que se resume en las **Figuras 173, 174 y 175**, en donde se aprecia que el sumbtramo en cuestión se compone en realidad de un 45% de material MIXTO, 27% de ROCA y un 26% de tipo SUELO, logrando realizar un análisis más específico en cuanto a los rendimientos por tipo de material.

No. De anillo		Total parcial	Cadenamiento		Longitud [metros]	Periodo de excavación		Total [Días calendario]	Total [Días efectivos]	Tipo de material
DE	A		DE	A		DE	A			
A1	A60	60 Anillos	21+654.129	21+744.568	90.439	19/01/2012	16/03/2012	58	28	SUELO
A61	A118	58 Anillos	21+744.568	21+831.724	87.156	17/03/2012	15/04/2012	30	16	MIXTO
A119	A213	95 Anillos	21+831.724	21+974.521	142.797	16/04/2012	19/06/2012	65	27	ROCA
A214	A258	45 Anillos	21+974.521	22+042.155	67.634	20/06/2012	03/07/2012	14	6	MIXTO
A259	A736	478 Anillos	22+042.155	22+760.490	718.335	04/07/2012	28/08/2012	56	42	SUELO
A737	A884	148 Anillos	22+760.490	22+983.033	222.543	29/08/2012	03/10/2012	36	22	MIXTO
A885	A975	91 Anillos	22+983.033	23+119.818	136.785	04/10/2012	25/11/2012	53	15	ROCA
A976	A1042	67 Anillos	23+119.818	23+222.051	102.233	26/11/2012	13/02/2013	80	18	MIXTO
A1043	A1065	23 Anillos	23+222.051	23+255.135	33.084	14/02/2013	11/03/2013	26	5	ROCA
A1066	A1388	323 Anillos	23+255.135	23+740.677	485.542	12/03/2013	14/10/2013	217	82	MIXTO
A1389	A1780	392 Anillos	23+740.677	24+330.108	589.431	15/10/2013	30/11/2014	412	139	ROCA
A1781	A2072	292 Anillos	24+330.108	24+768.593	438.485	01/12/2014	21/04/2015	142	64	MIXTO
Suma		2072	Suma		3114.464	Suma		1189	464	

Figura 173. Material conciliado en subtramo L10-L11.

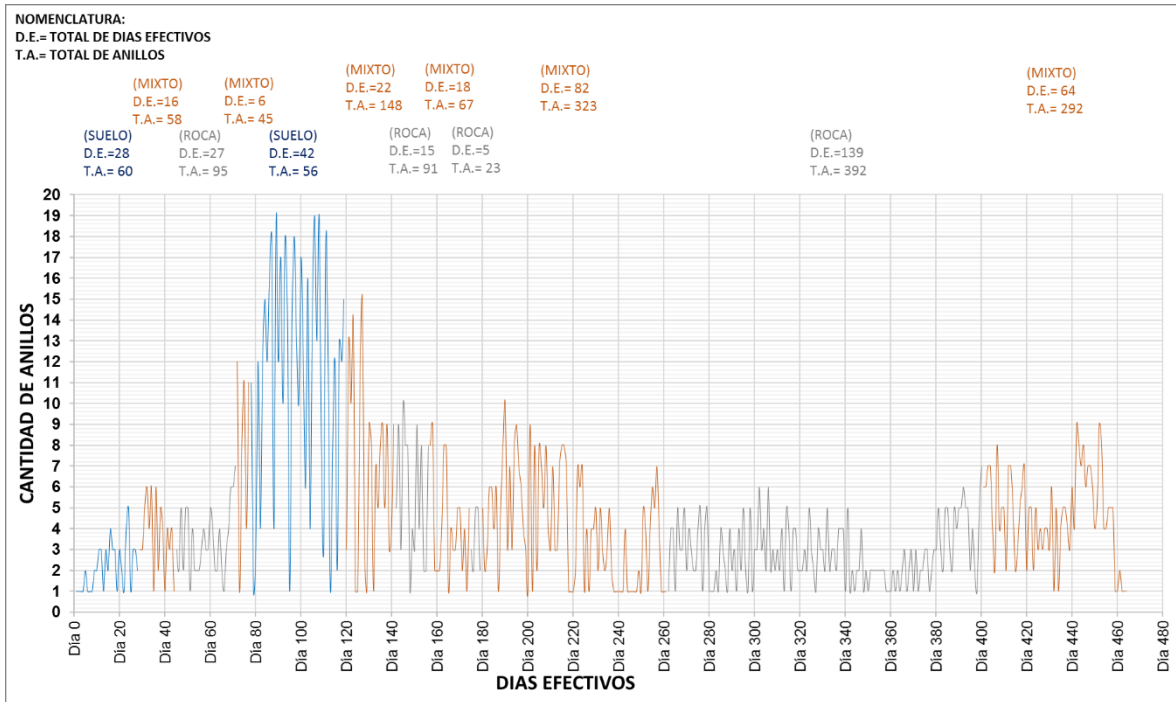
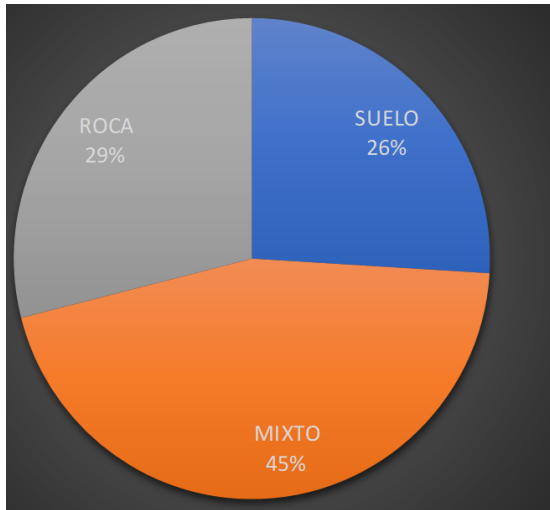


Figura 174. Material conciliado por días efectivos.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO



Material	Longitud [metros]	Cantidad [Anillos]	Dias efectivos
SUELO	808.774	538	70
MIXTO	1403.593	933	208
ROCA	902.097	601	186

Figura 175. Porcentaje de material conciliado.

Análisis de rendimiento por material “SUELO” (Res1). De la longitud total de túnel que comprende el subtramo, un 26% del frente encontrado durante la excavación es del tipo “SUELO”, su longitud aproximada es de 808.774 metros es decir 538 anillos excavados en un tiempo efectivo de 70 días, este a su vez se divide en dos secciones que van desde el anillo número A1 hasta el anillo A60 y desde el anillo A259 hasta el anillo A736, como se indica en la Figura 158. El rendimiento alcanzado por día efectivo de trabajo se muestra de manera gráfica en la **Figura 176**. Un análisis simple de la gráfica deduce un menor rendimiento en la primera sección, sin embargo, esto es justificable debido a que la tuneladora se encuentra en proceso de ensamble de todos sus componentes en un periodo aproximado de 100 anillos para dar continuidad al proceso de excavación en su fase definitiva.

El rendimiento efectivo se deduce de la siguiente manera:

$$R_{es1} = \frac{\text{Longitud de excavación}}{\text{Duración efectiva}} = \frac{l_e}{t} = \frac{808.774 \text{ m}}{70 \text{ dias}} = 11.554 \frac{\text{m}}{\text{dia}} = 7.701 \frac{\text{anillos}}{\text{dia}}$$

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

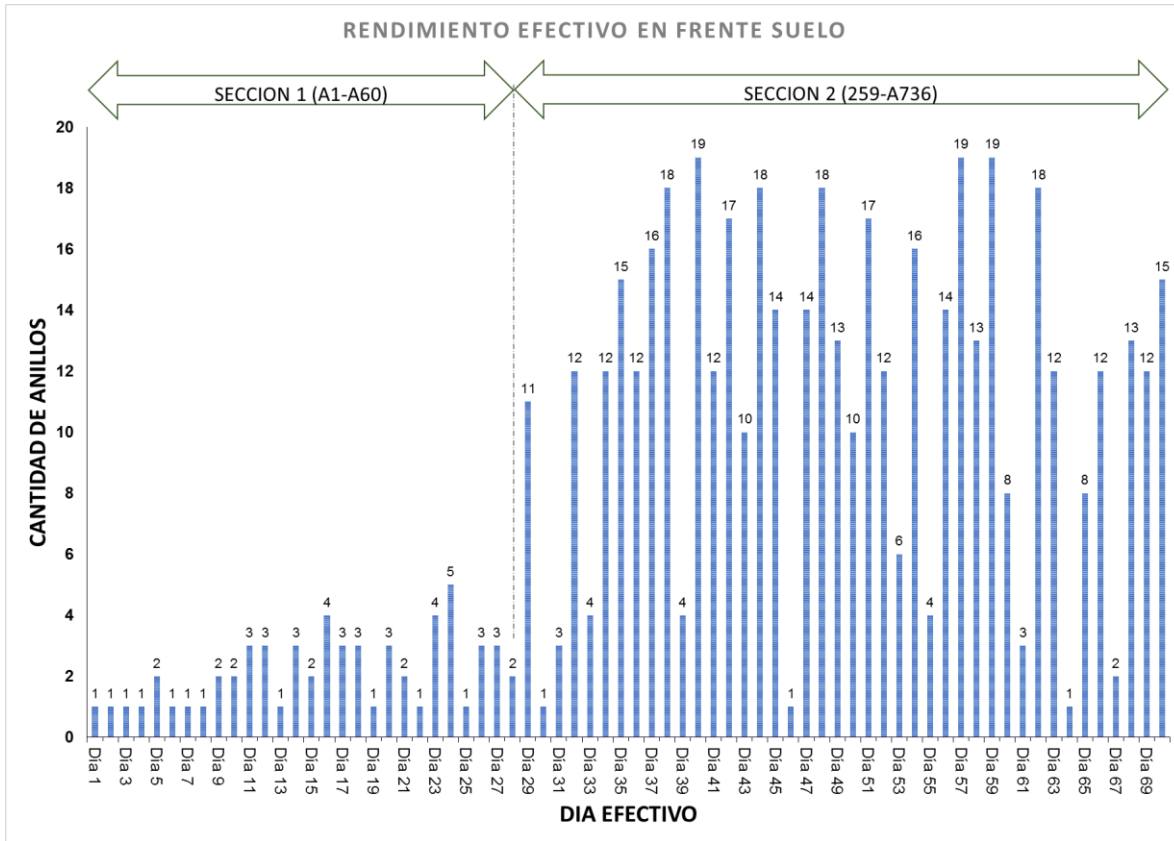


Figura 176. Rendimiento efectivo por material “SUELO”.

Análisis de rendimiento por material “MIXTO” (Rem1). De la longitud total de túnel que comprende el subtramo, un 45% del frente encontrado durante la excavación es del tipo “MIXTO”, su longitud aproximada es de 1403.593 metros es decir 933 anillos excavados en un tiempo efectivo de 208 días, este a su vez se divide en seis secciones que van desde el anillo número A61 al A118, A214 al A258, A737 al A884, A976 al A1042, A1066 al A1388 y desde el anillo A1781 hasta el anillo A2072, como se indica en la Figura 166. El rendimiento alcanzado por día efectivo de trabajo se muestra de manera gráfica en la **Figura 177**, en donde se dividen las seis secciones de longitud.

El rendimiento efectivo se deduce de la siguiente manera:

$$R_{em1} = \frac{\text{Longitud de excavación}}{\text{Duración}} = \frac{l_e}{t} = \frac{1403.593 \text{ m}}{208 \text{ días}} = 6.748 \frac{\text{m}}{\text{día}} = 4.497 \frac{\text{anillos}}{\text{día}}$$

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

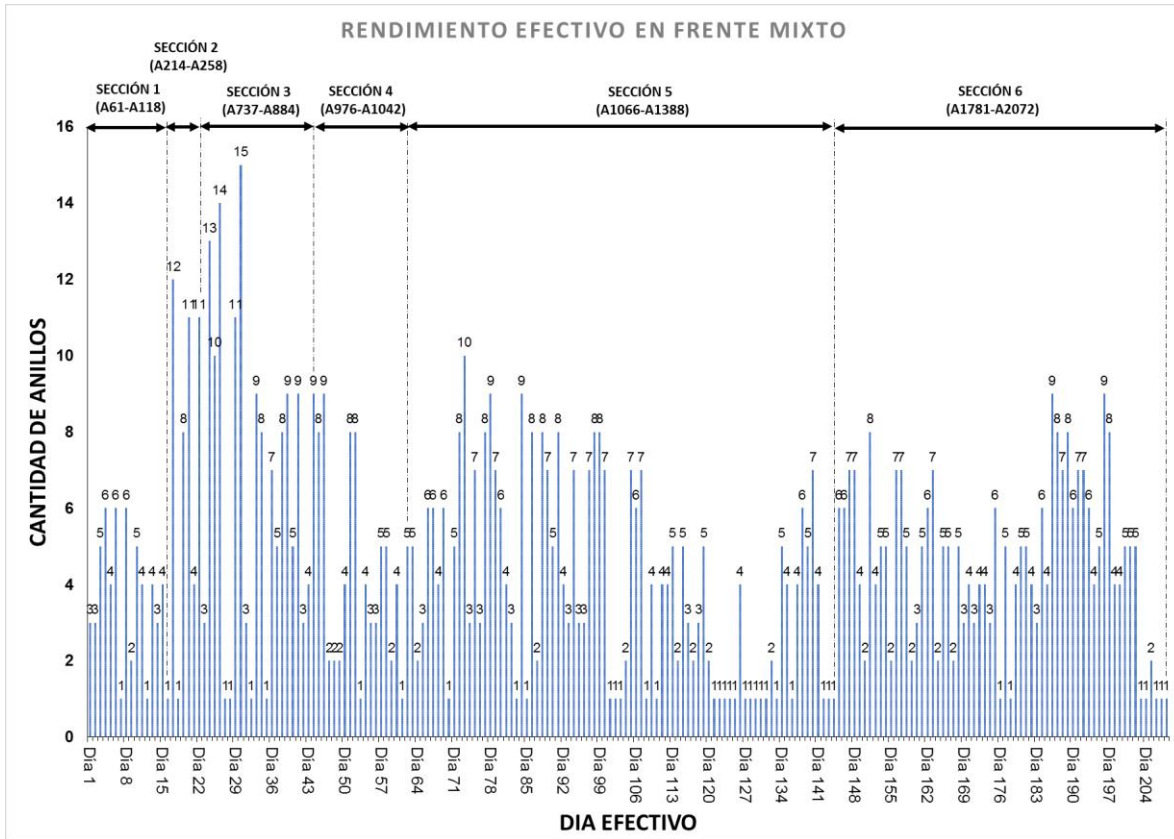


Figura 177. Rendimiento efectivo por material “MIXTO”.

En este caso el análisis simple de la gráfica deduce un rendimiento de menor variación, en donde los días de menor producción se deben principalmente a incidencias menores.

Análisis de rendimiento por material “ROCA” (Rer1). De la longitud total de túnel que comprende el subtramo, un 29% del frente encontrado durante la excavación es del tipo “ROCA”, su longitud aproximada es de 902.097 metros es decir 601 anillos excavados en un tiempo efectivo de 186 días, este a su vez se divide en cuatro secciones que van desde el anillo número A119 al A213, A885 al A975, A1043 al A1065, y desde el anillo A1389 hasta el anillo A1780, como se indica en la Figura 166. El rendimiento alcanzado por día efectivo de trabajo se muestra de manera gráfica en la **Figura 178**, en donde se dividen las cuatro secciones de longitud.

El rendimiento efectivo se deduce de la siguiente manera:

$$R_{er1} = \frac{\text{Longitud de excavación}}{\text{Duración}} = \frac{l_e}{t} = \frac{902.097 \text{ m}}{186 \text{ dias}} = 4.849 \frac{\text{m}}{\text{dia}} = 3.232 \frac{\text{anillos}}{\text{dia}}$$

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

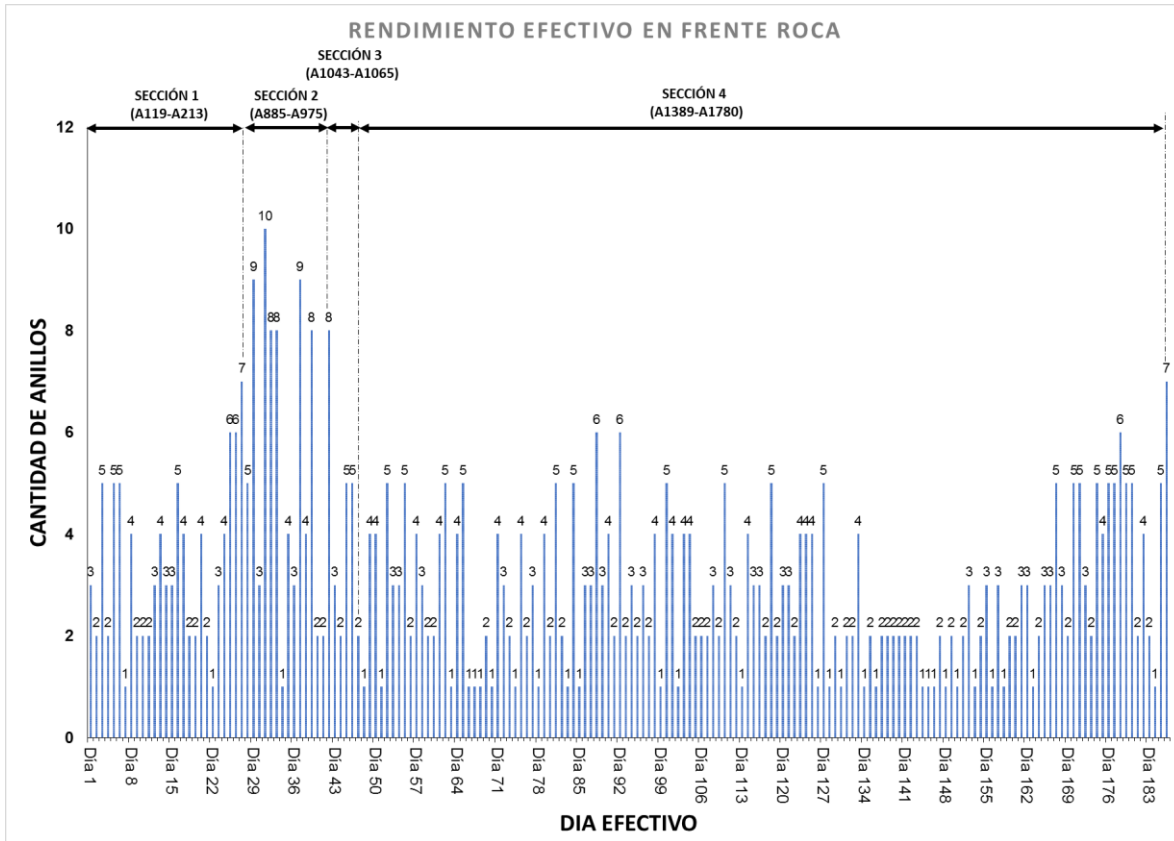


Figura 178. Rendimiento efectivo por material “ROCA”.

En este caso el análisis simple de la gráfica deduce un rendimiento estable durante los días efectivos de producción, sin embargo, se observa que existe un significativo número de días en donde la producción es menor o igual a 3 anillos excavados, dando pauta a considerar que el rendimiento es menor en este tipo de material.

IV.2.2 Subtramo L11-L12.

Rendimiento General (Rg). Este subtramo comprende una longitud total de 2.815 kilómetros de túnel, es decir 1873 anillos de concreto colocados, considerando los 1.5031 metros por anillo. La duración total de excavación fue de 717 días calendario, teniendo como inicio de actividades el día 7/Mayo/2015 y concluyendo el día 22/Abril/2017.

El cálculo del rendimiento general se calcula de la siguiente forma:

$$R_g = \frac{\text{Longitud de excavación}}{\text{Duración}} = \frac{l_e}{t} = \frac{2815 \text{ m}}{717 \text{ dias}} = 3.926 \left[\frac{\text{m}}{\text{dia}} \right] \cong 2.612 \left[\frac{\text{anillos}}{\text{dia}} \right]$$

Al igual que el subtramo anterior, este rendimiento incluye todos los periodos muertos (días sin excavación), en donde se engloban las intervenciones

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

atmosféricas, intervenciones hiperbáricas o trabajos de alguna reparación mecánica de la tuneladora.

La **Figura 179** resume de manera gráfica el rendimiento diario alcanzado de manera más específica, teniendo como variable la cantidad de anillos excavados por día calendario.

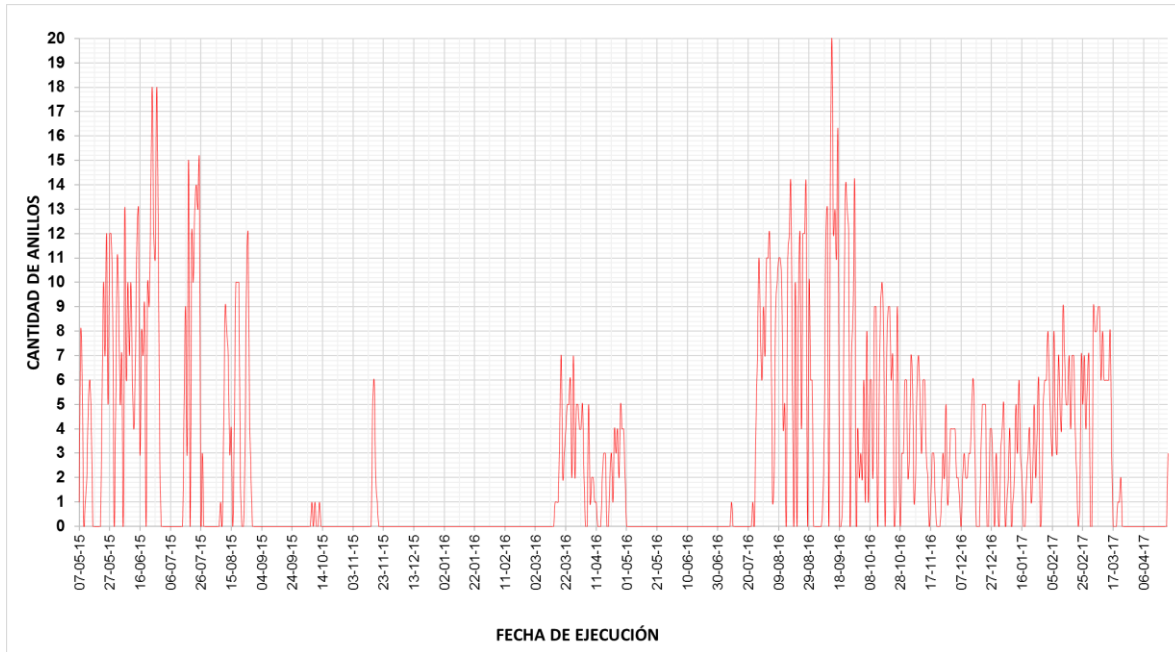


Figura 179. Rendimiento diario de excavación del subtramo L11-L12.

Rendimiento efectivo (Re). Eliminando los periodos de tiempo muertos de la gráfica anterior, es decir solo considerando los días efectivos de trabajo se obtiene la gráfica de la **Figura 180**, en donde se aprecia un rendimiento máximo alcanzado de 20 anillos excavados y un mínimo de solo 1 anillo, el total de días efectivos de trabajo es de 321 para la excavación de los 1873 anillos que componen el subtramo.

El rendimiento efectivo general se calcula de la siguiente manera:

$$R_e = \frac{\text{Longitud de excavación}}{\text{Duración efectiva}} = \frac{l_e}{t} = \frac{3114 \text{ m}}{464 \text{ dias}} = 8.770 \frac{\text{m}}{\text{dia}} = 5.834 \frac{\text{anillos}}{\text{dia}}$$

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

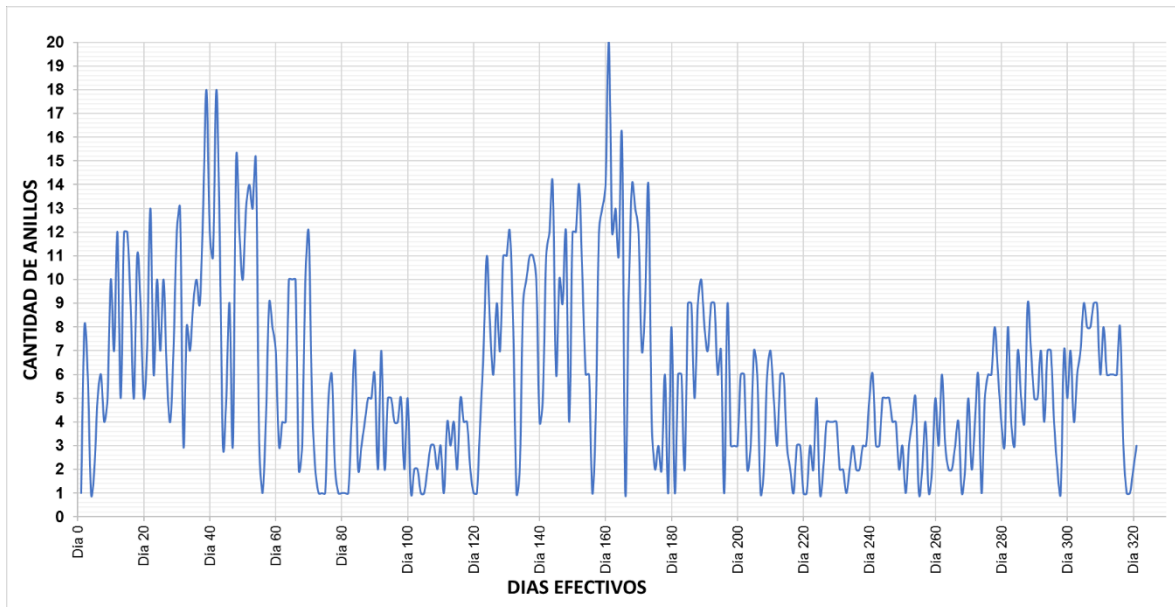


Figura 180. Rendimiento efectivo del subtramo L11-L12.

De forma analítica se observa que poca variación en los rendimientos alcanzados por día efectivo de trabajo, sin embargo, aún no se considera el tipo de material.

Rendimiento por tipo de material (Res, Rem, Rer). El perfil estratigráfico del subtramo L11-L12 se representa en la **Figura 181**, observando un frente de excavación compuesto por basaltos permeables, estratos de cenizas volcánicas, partes alternadas de arcilla, suelos y arenas aluviales con gravas y depósitos lacustres arcillo-arenosos pumíticos con pómez, es decir; un frente de excavación intermitente del tipo “MIXTO”, “SUELO” y “ROCA”. Sin embargo, como así lo demuestran las **Figuras 182 a la 190**, obtenidas de conciliaciones representativas del todo el subtramo, se puede determinar de forma directa el tipo de material encontrado para posteriormente realizar un análisis más significativo de los rendimientos obtenidos.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

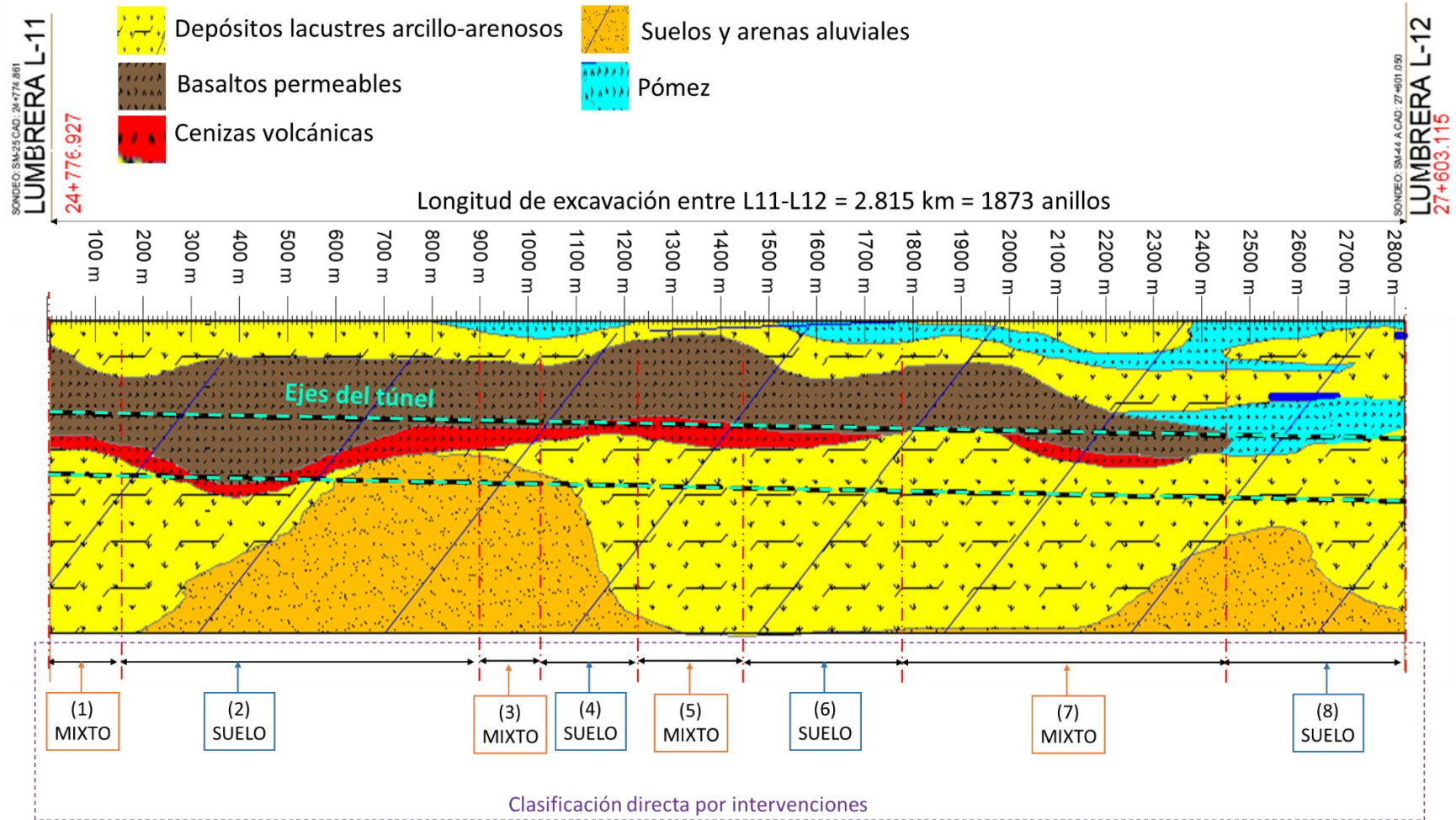


Figura 181. Perfil estratigráfico del subtramo L11-L12.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

Conciliación 15. Inspección y conciliación del frente de excavación durante la intervención atmosférica No. 1 (Anillo 16). Frente de excavación con un área aproximada de 22% de la sección se observa basalto fracturado con un RQD $\geq 90\%$ subyacente se observa un estrato de arena limos color gris verdoso en un 22% de área y en el área restante se observa arena limosa color café claro de compactidad densa cementada, considerado un frente con material del tipo "MIXTO".

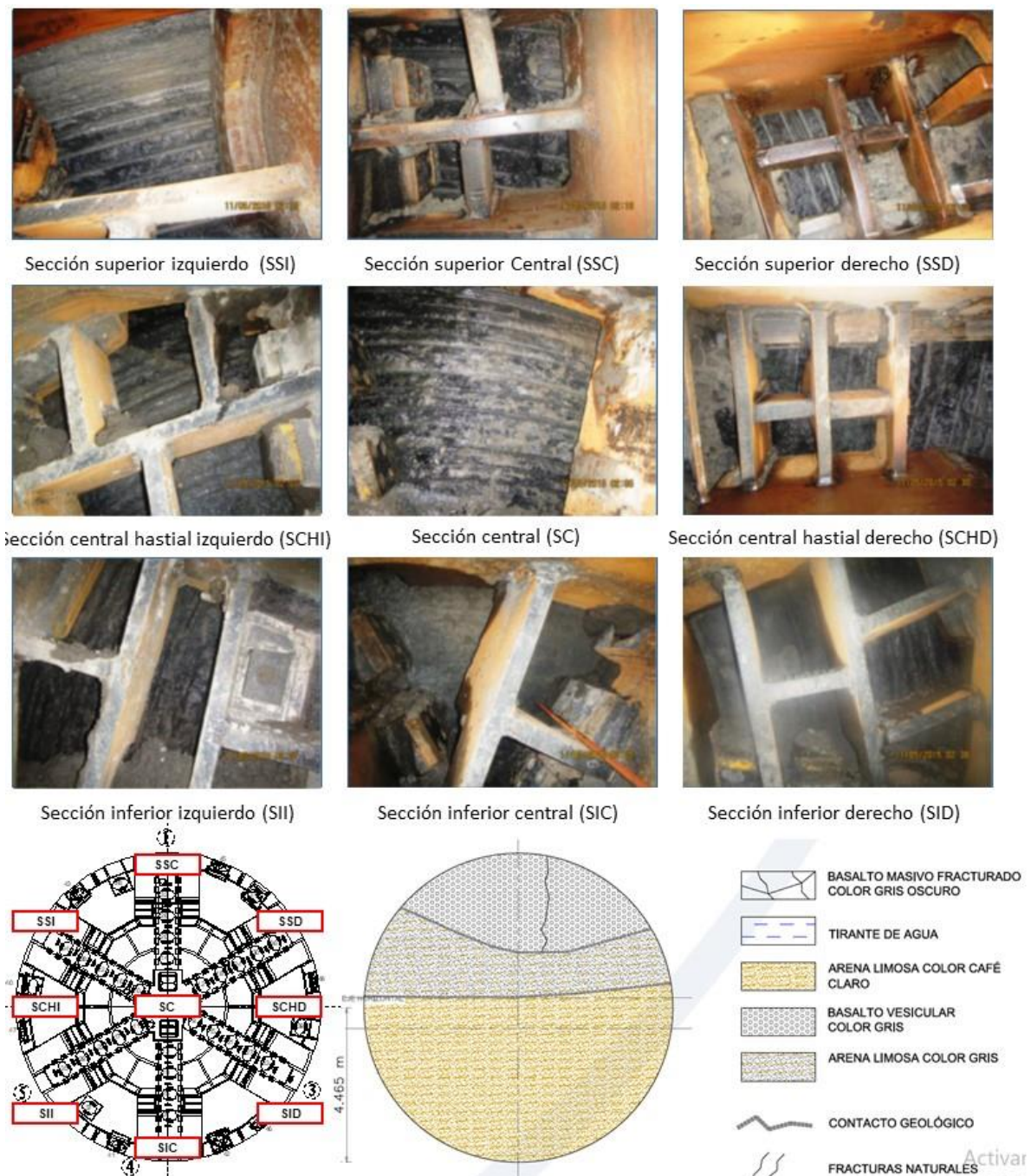


Figura 182. Conciliación del frente de excavación No. 15.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

Conciliación 16. Inspección y conciliación del frente de excavación durante la intervención atmosférica No. 6 (Anillo 143). Frente de excavación con un área aproximada de 8% de la sección se observa basalto vesicular sano con un RQD >= 90% subyacente se observa un estrato de arena limosa color café claro con intercalaciones de limo arenoso en un 65% de área y en el área restante se observa arena limosa cementada, considerado un frente con material del tipo "SUELO".

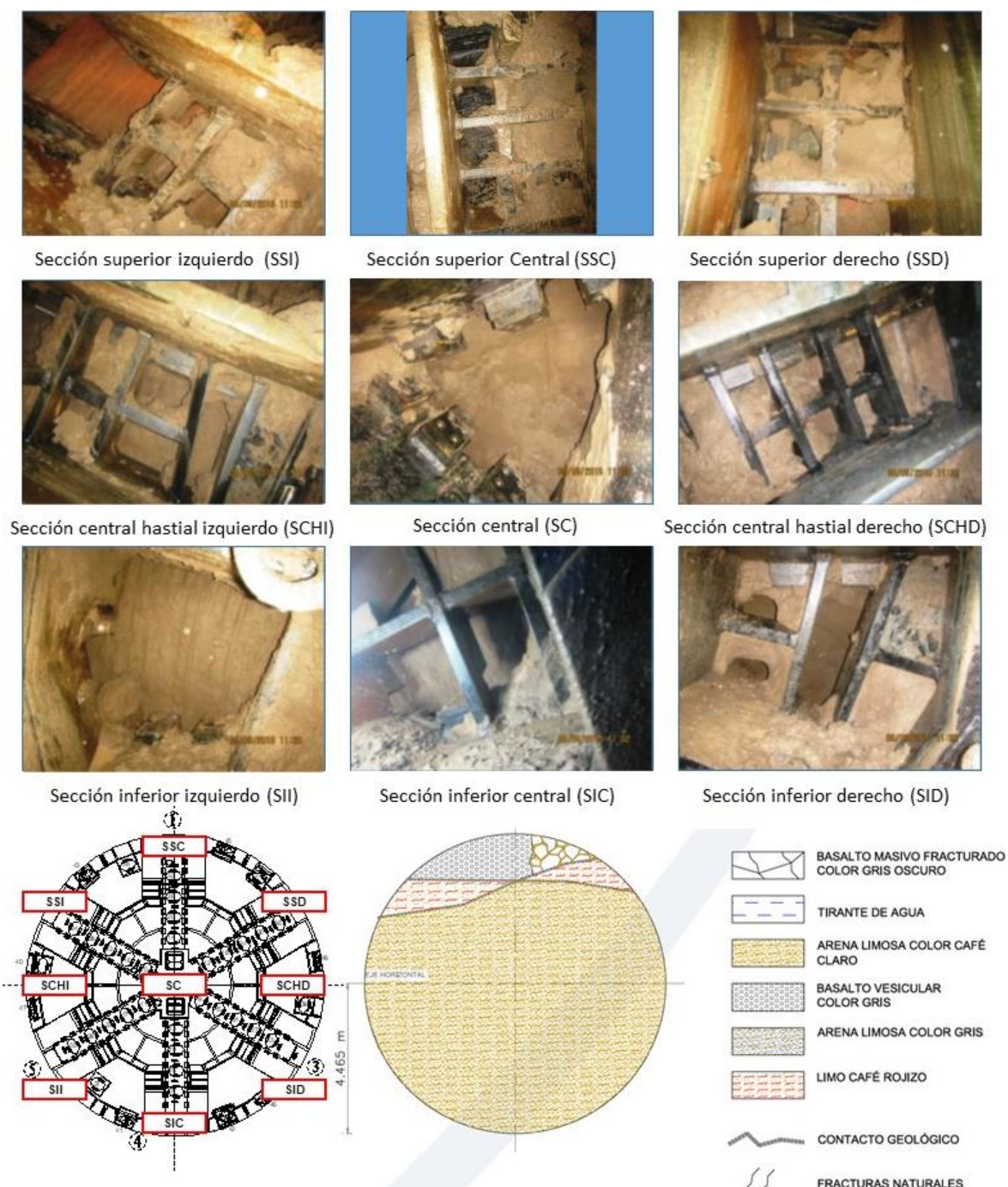
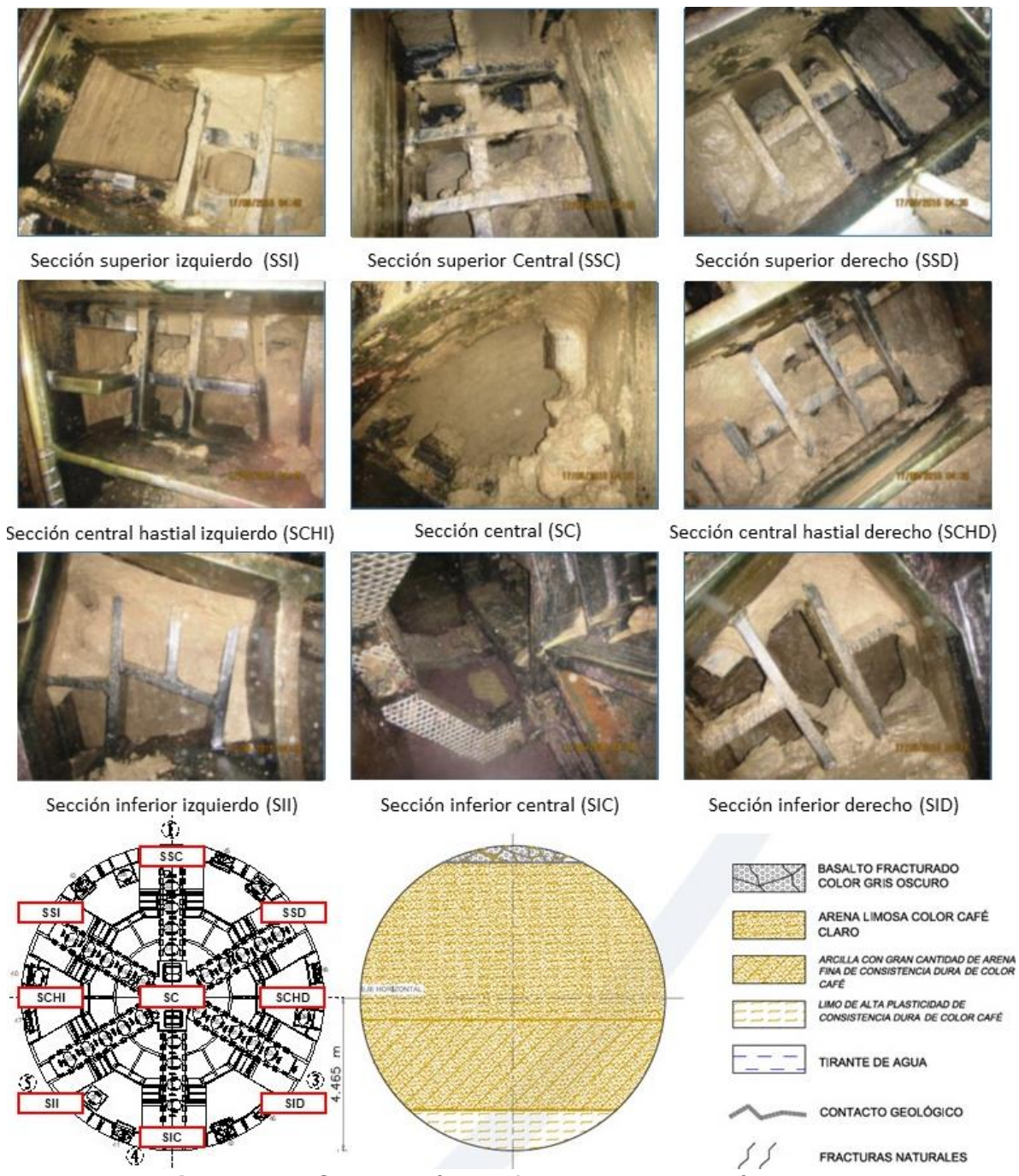


Figura 183. Conciliación del frente de excavación No. 16.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

Conciliación 17. Inspección y conciliación del frente de excavación durante la intervención atmosférica No. 9 (Anillo 234). Frente de excavación con un área aproximada de 5% de la sección se observa basalto vesicular fracturado de mala calidad, subyacente se observa un estrato de arena limosa cementada con intercalaciones de limo arenoso en el área restante, considerado un frente con material del tipo “SUELO”.



PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

Conciliación 18. Inspección y conciliación del frente de excavación durante la intervención atmosférica No. 11 (Anillo 364). Frente de excavación con un área aproximada de 5% de la sección se observa arena fina de compacidad densa color gris, subyacente se observa un estrato de intercalaciones de arena limosa color café claro y arena arcilloso en toda el área restante del frente, considerado así un frente con material del tipo “SUELO”.

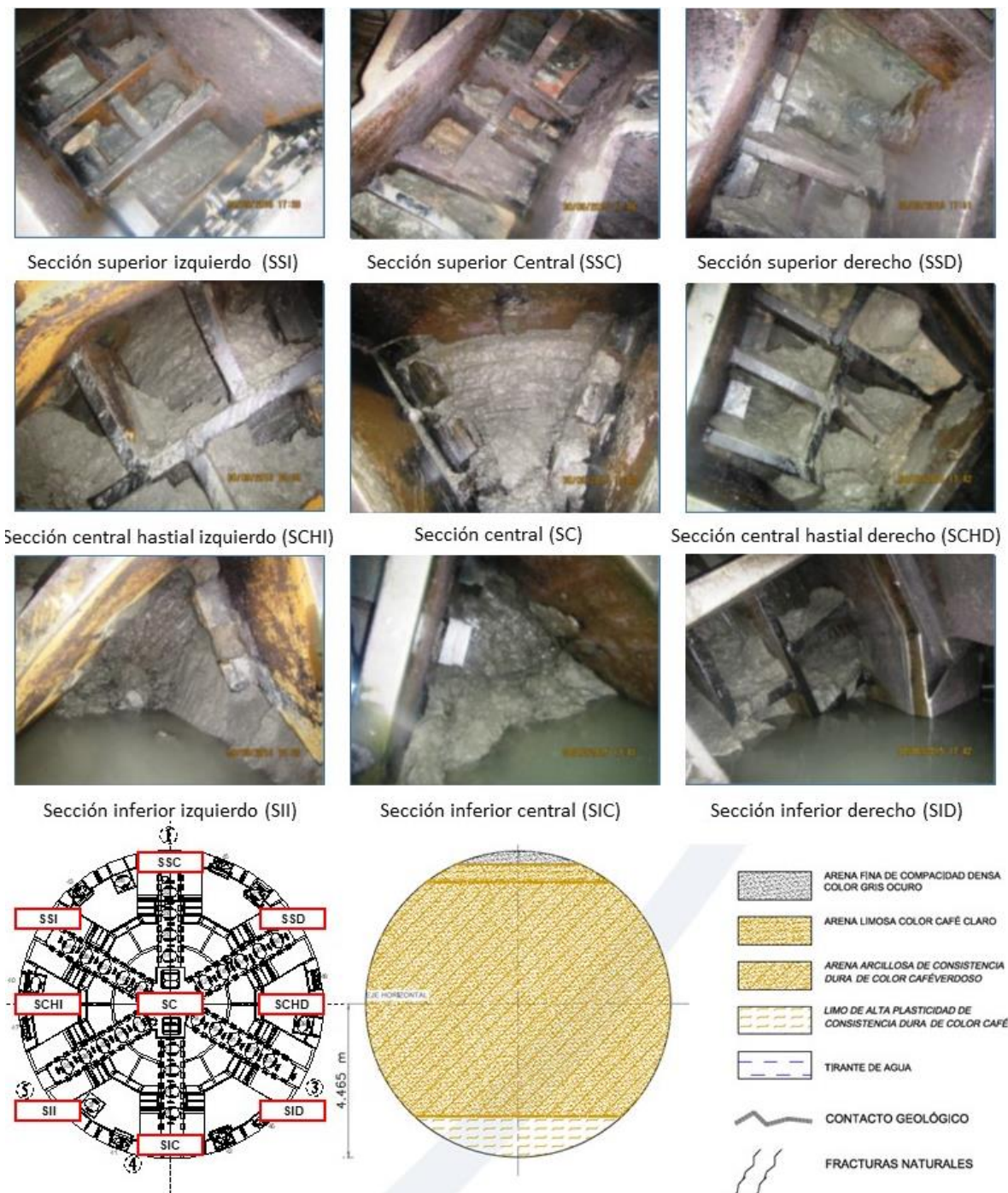


Figura 185. Conciliación del frente de excavación No. 18.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

Conciliación 19. Inspección y conciliación del frente de excavación durante la intervención atmosférica No. 18 (Anillo 822). Frente de excavación con un área aproximada de 5% de la sección se observa arena fina a media empacada en una matriz limo-arcillosa café claro, subyacente se observa un estrato de intercalaciones de limo arenoso color gris verdoso de consistencia dura en toda el área restante del frente, debido a que existe presencia de agua y rezaga la zona inferior no es visible, considerado así un frente con material del tipo “SUELO”.

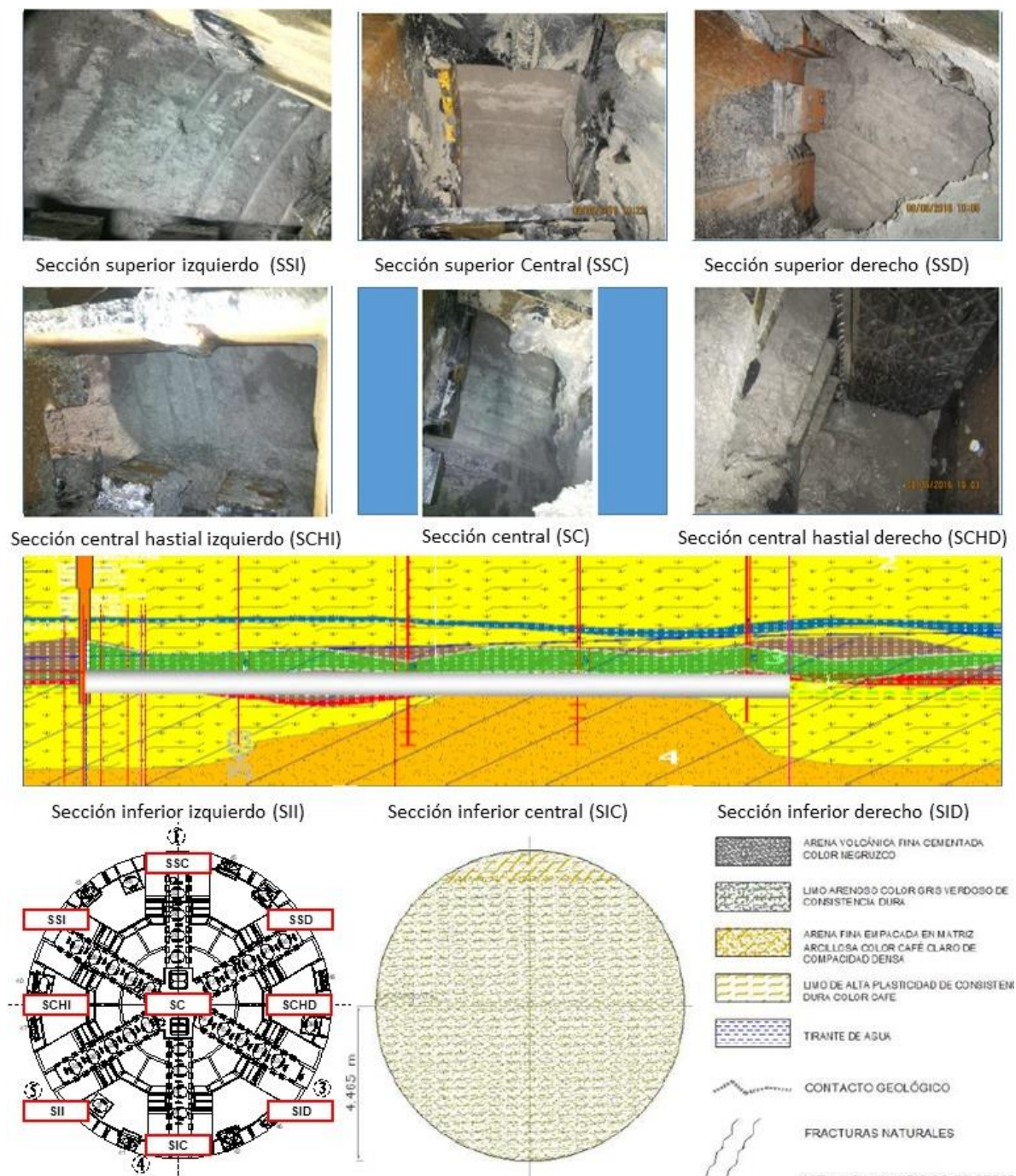


Figura 186. Conciliación del frente de excavación No. 19.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

Conciliación 20. Inspección y conciliación del frente de excavación durante la intervención atmosférica No. 18 (Anillo 1022). Frente de excavación con un área aproximada del 5% en la parte superior se observa un estrato de arena volcánica fina cementada color negro y compacidad densa, subyacente se observa un estrato de arena limosa de compacidad densa en un 15% de área total, posteriormente se aprecia un estrato de arena media de origen aluvial color gris en el 20% del área, finalmente en la parte inferior un estrato de arena fina arcillosa de compacidad densa (toba) considerado así un frente con material del tipo “SUELO”.



Sección superior izquierdo (SSI)

Sección superior Central (SSC)

Sección superior derecho (SSD)



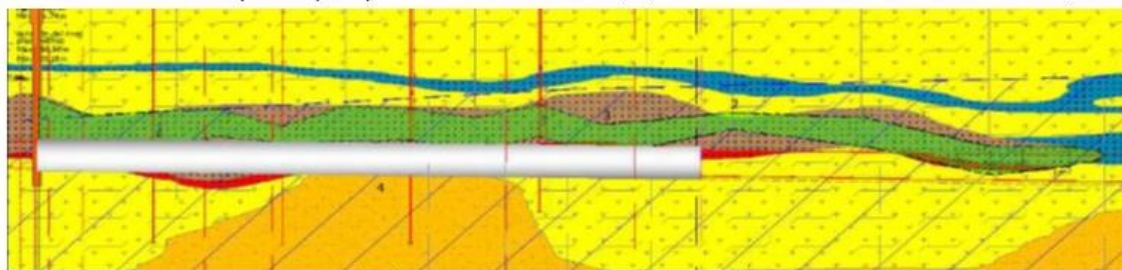
Sección central hastial izquierdo (SCHI)



Sección central (SC)



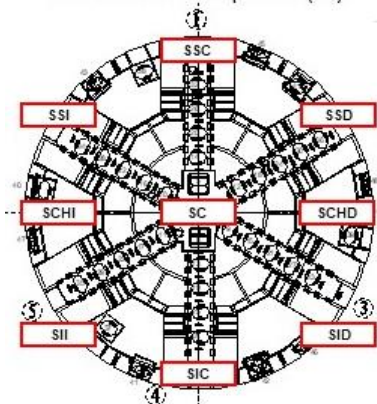
Sección central hastial derecho (SCHD)



Sección inferior izquierdo (SII)

Sección inferior central (SIC)

Sección inferior derecho (SID)



- ARENA VOLCÁNICA FINA CEMENTADA COLOR NEGRUZO
- ARENA LIMOSA COLOR GRIS VERDOSO DE COMPAQIDAD DENSA
- ARENA CON POCO LIMO COLOR GRIS DE COMPAQIDAD MEDIA
- ARENA FINA EMPACADA EN MATRIZ ARCILLOSA COLOR CAFE CLARO DE COMPAQIDAD DENSA
- TIRANTE DE AGUA
- CONTACTO GEOLÓGICO
- FRACTURAS NATURALES

Figura 187. Conciliación del frente de excavación No. 20.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

Conciliación 21. Inspección y conciliación del frente de excavación durante la intervención atmosférica No. 21 (Anillo 1138). En la parte superior central se observa un estrato de limo arenoso café claro, con incrustaciones de arena volcánica color rojizo de consistencia dura, subyaciendo a esta se tiene un lente de arena volcánica fina cementada, posteriormente se observa un estrato de material tobáceo constituido por arena limosa de compacidad densa color gris verdoso, posteriormente se aprecia arena fina de origen aluvial color gris, finalmente se observa un estrato de arena limosa de compacidad alta, considerado así un frente con material del tipo “SUELO”.

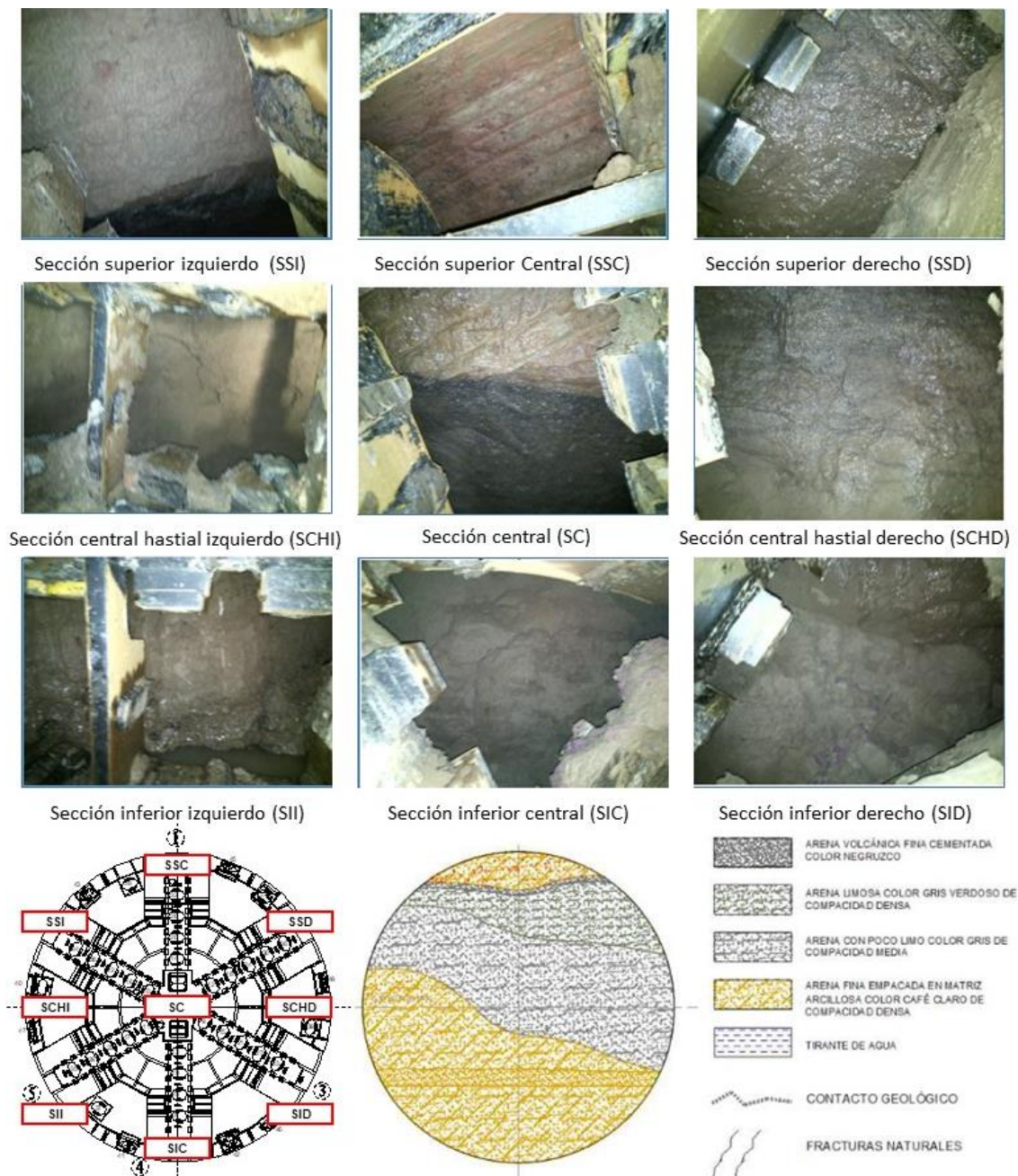


Figura 188. Conciliación del frente de excavación No. 21.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

Conciliación 22. Inspección y conciliación del frente de excavación durante la intervención atmosférica No. 33 (Anillo 1396). En la parte superior central se observa un estrato de basalto vesicular fracturado de mediana calidad en un área del 11%, subyacente se observa un estrato de arena limosa gris y café con incrustaciones de arena arcillosa color rojizo, posteriormente se tiene un lente de arena volcánica fina cementada y en la parte inferior se tiene un estrato de arena fina café claro de compacidad media, considerado así un frente con material del tipo "MIXTO".

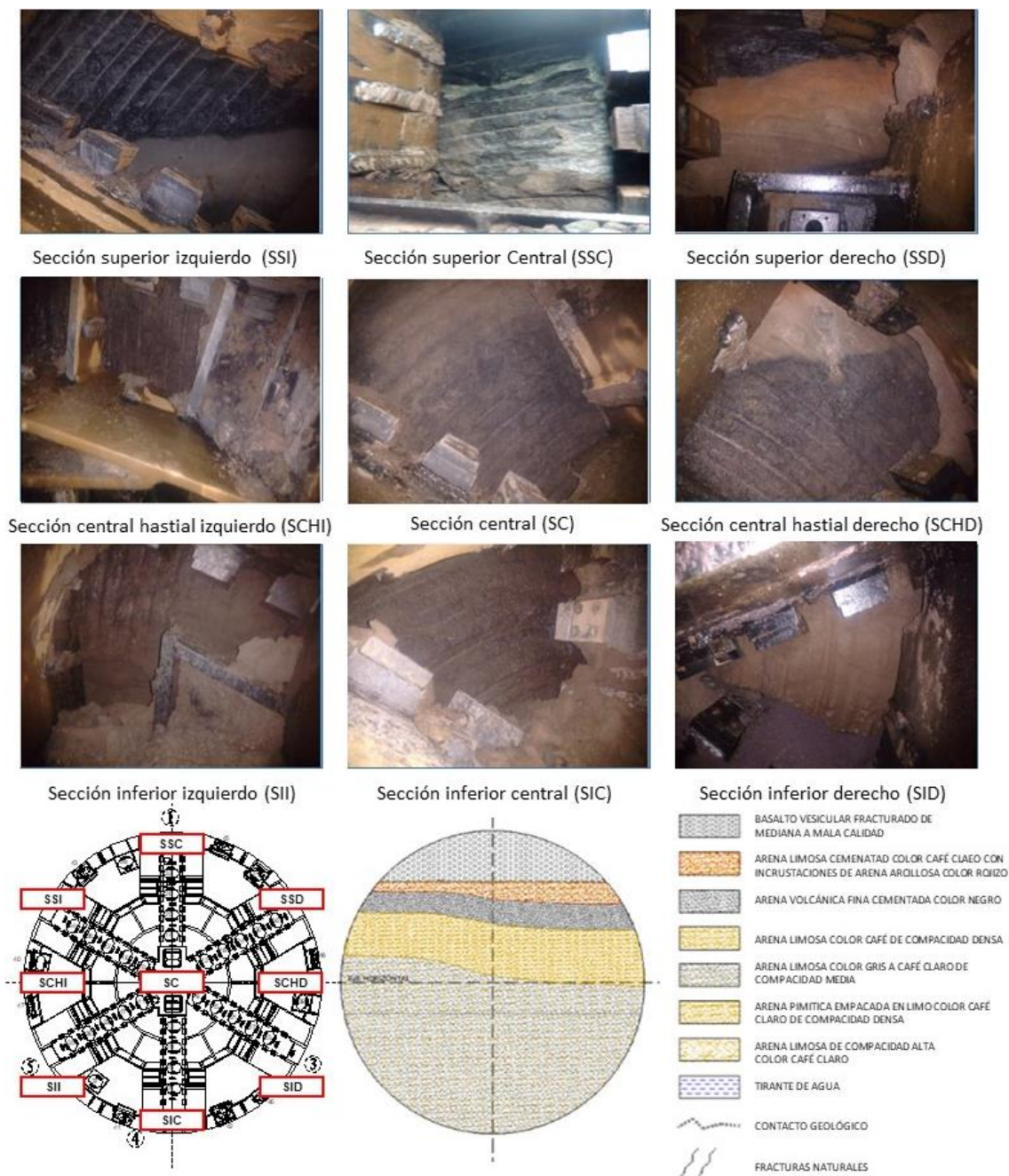


Figura 189. Conciliación del frente de excavación No. 22.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

Conciliación 23. Inspección y conciliación del frente de excavación durante la intervención atmosférica No. 40 (Anillo 1559). En la parte superior central se observa un estrato de basalto vesicular fracturado de mediana calidad en un área del 40%, subyacente se observa un estrato de arena gruesa a fina limosa muy cementada, finalmente se observa un estrato de arena limo arcillosa café claro con intercalaciones de arena color gris de compactidad media, considerado así un frente con material del tipo "MIXTO".

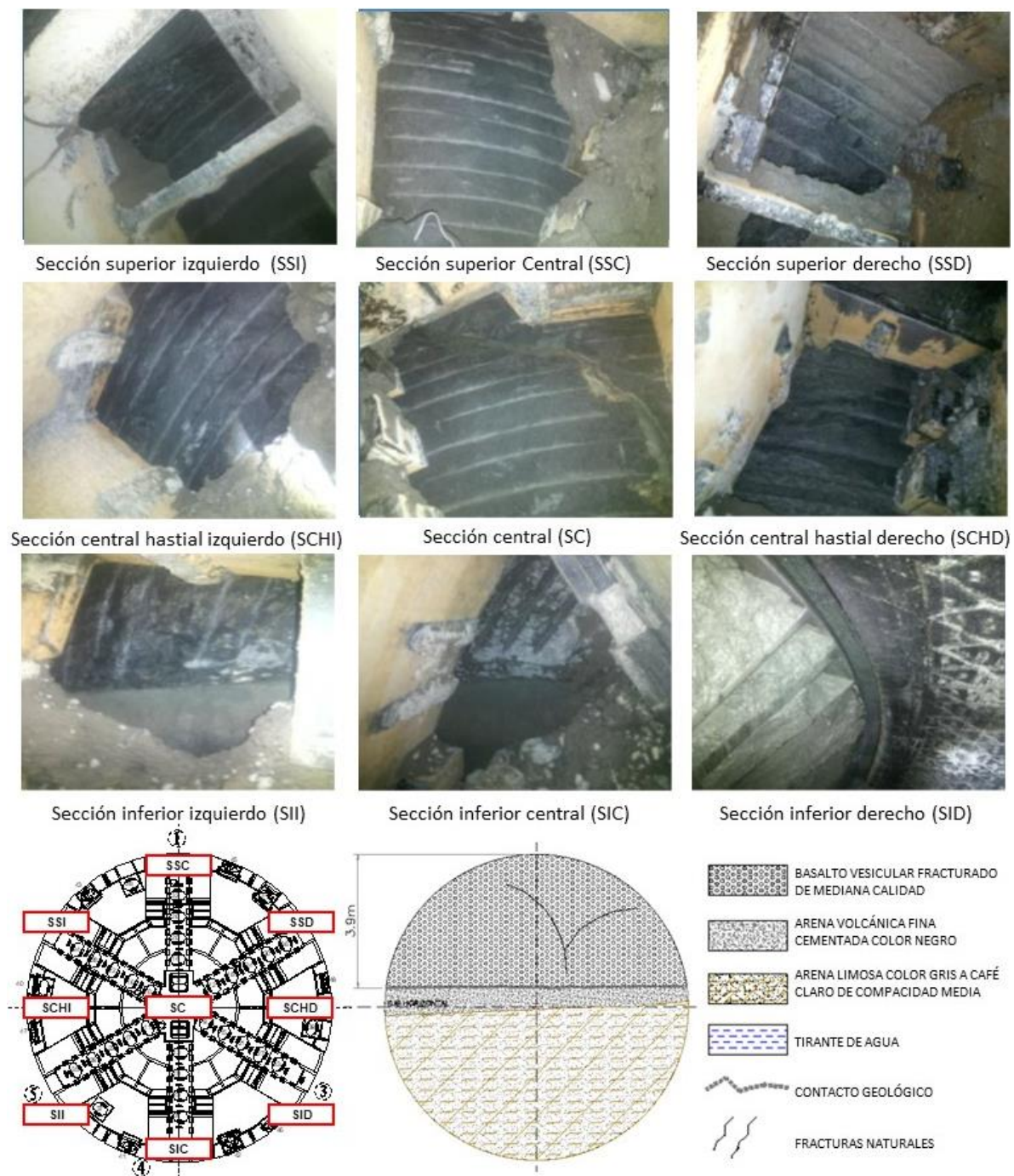


Figura 190. Conciliación del frente de excavación No. 23.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

Con un total de 43 intervenciones atmosféricas se conciliaron los tiempos de ejecución y la longitud por tipo de material que se resume en las **Figuras 191, 192 y 193**, en donde se aprecia que el subtramo en cuestión se compone en realidad de un 43% de material MIXTO y un 57% de tipo SUELO, logrando realizar un análisis más específico en cuanto a los rendimientos por tipo de material.

No. De anillo DE	A	Total parcial	CADENAMIENTOS		Longitud [metros]	Periodo de excavación		Total [Días calendario]	Total [Días efectivos]	MATERIAL
			DE	A		DE	A			
A1	A100	100	24+782.377	24+932.534	150.157	07/05/2015	29/05/2015	23	16	MIXTO
A101	A596	496	24+932.534	25+678.040	745.506	29/05/2015	19/11/2015	174	63	SUELO
A597	A683	87	25+678.040	25+808.767	130.727	19/11/2015	14/04/2016	147	26	MIXTO
A684	A810	127	25+808.767	25+999.693	190.926	14/04/2016	03/08/2016	111	26	SUELO
A811	A960	150	25+999.693	26+225.152	225.459	03/08/2016	24/08/2016	21	17	MIXTO
A961	A1183	223	26+225.152	26+560.350	335.198	24/08/2016	24/09/2016	31	22	SUELO
A1184	A1653	470	26+560.350	27+266.727	706.377	24/09/2016	06/02/2017	135	111	MIXTO
A1654	A1873	220	27+266.727	27+597.665	330.938	06/02/2017	22/04/2017	75	40	SUELO
SUMA		1873		SUMA	2815.288		SUMA	717	321	

Figura 191. Material conciliado en subtramo L11-L12.

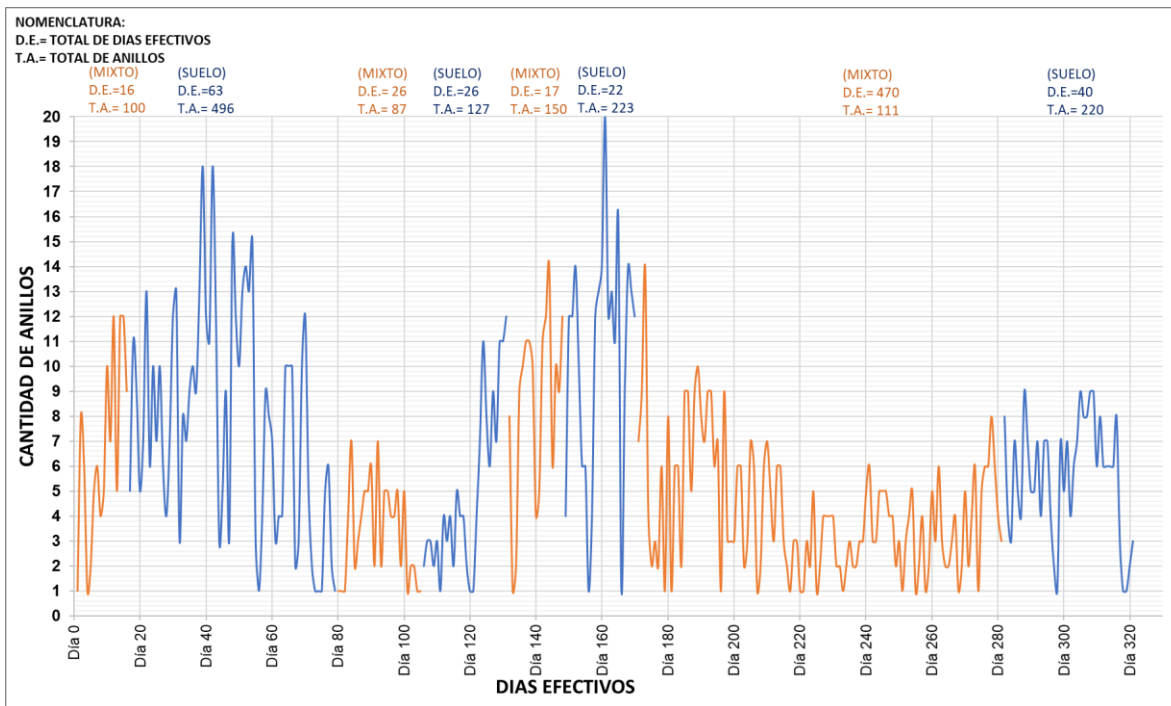
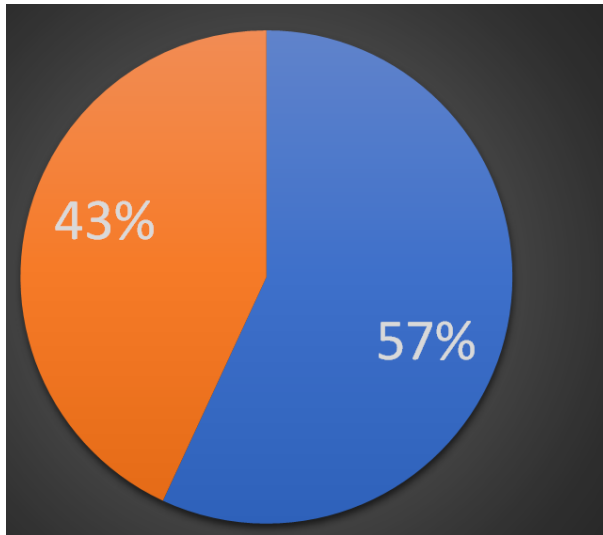


Figura 192. Material conciliado por días efectivos.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO



Material	Longitud [metros]	Cantidad [Anillos]	Dias efectivos
SUELO	1602.568	1066	151
MIXTO	1212.72	807	170

Figura 193. Porcentaje de material conciliado.

Análisis de rendimiento por material “SUELO” (Res2). De la longitud total de túnel que comprende el subtramo, el 57% del frente encontrado durante la excavación es del tipo “SUELO”, su longitud aproximada es de 1602.568 metros es decir 1066 anillos excavados en un tiempo efectivo de 151 días, este a su vez se divide en cuatro secciones que van desde el anillo número A101 hasta el anillo A596, del anillo A684 hasta el anillo A810, del anillo A961 hasta el anillo A1183 y desde el anillo A1654 hasta el anillo A1873, como se indica en la Figura 181. El rendimiento alcanzado por día efectivo de trabajo se muestra de manera gráfica en la **Figura 194**. Un análisis simple de la gráfica deduce un rendimiento estable, por lo que el valor calculado representa de forma correcta el ritmo de producción.

El rendimiento efectivo se deduce de la siguiente manera:

$$R_{es2} = \frac{\text{Longitud de excavación}}{\text{Duración efectiva}} = \frac{l_e}{t} = \frac{1602.568 \text{ m}}{151 \text{ dias}} = 10.613 \frac{\text{m}}{\text{dia}} = 7.073 \frac{\text{anillos}}{\text{dia}}$$

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

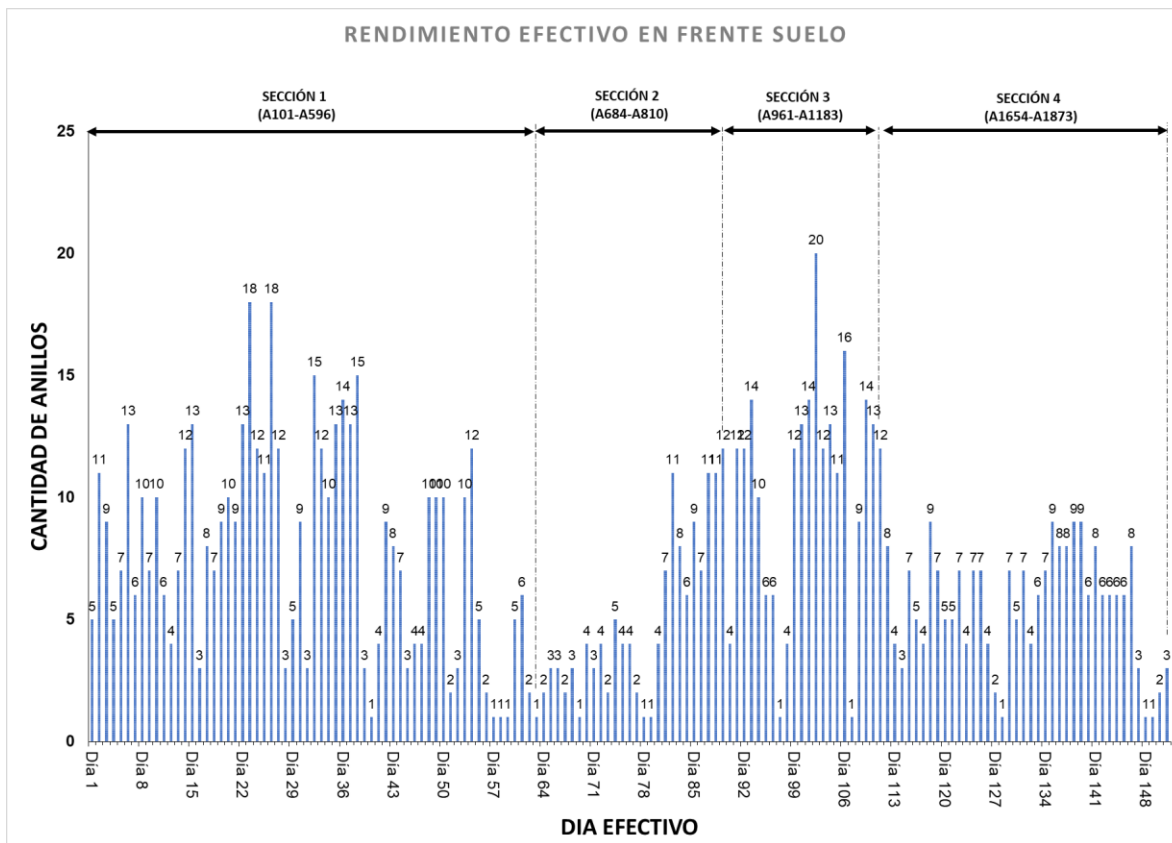


Figura 194. Rendimiento efectivo por material “SUELO”.

Análisis de rendimiento por material “MIXTO” (Rem2). De la longitud total de túnel que comprende el subtramo, un 43% del frente encontrado durante la excavación es del tipo “MIXTO”, su longitud aproximada es de 1212.720 metros es decir 807 anillos excavados en un tiempo efectivo de 170 días, este a su vez se divide en cuatro secciones que van desde el anillo número A1 al A100, del anillo A597 al A683, del anillo A811 al A960 y desde el anillo A1184 hasta el anillo A1653, como se indica en la Figura 181. El rendimiento alcanzado por día efectivo de trabajo se muestra de manera gráfica en la **Figura 195**, en donde se dividen las cuatro secciones de longitud mencionadas.

El rendimiento efectivo se deduce de la siguiente manera:

$$R_{em2} = \frac{\text{Longitud de excavación}}{\text{Duración}} = \frac{l_e}{t} = \frac{1212.720 \text{ m}}{170 \text{ dias}} = 7.133 \frac{\text{m}}{\text{dia}} = 4.754 \frac{\text{anillos}}{\text{dia}}$$

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

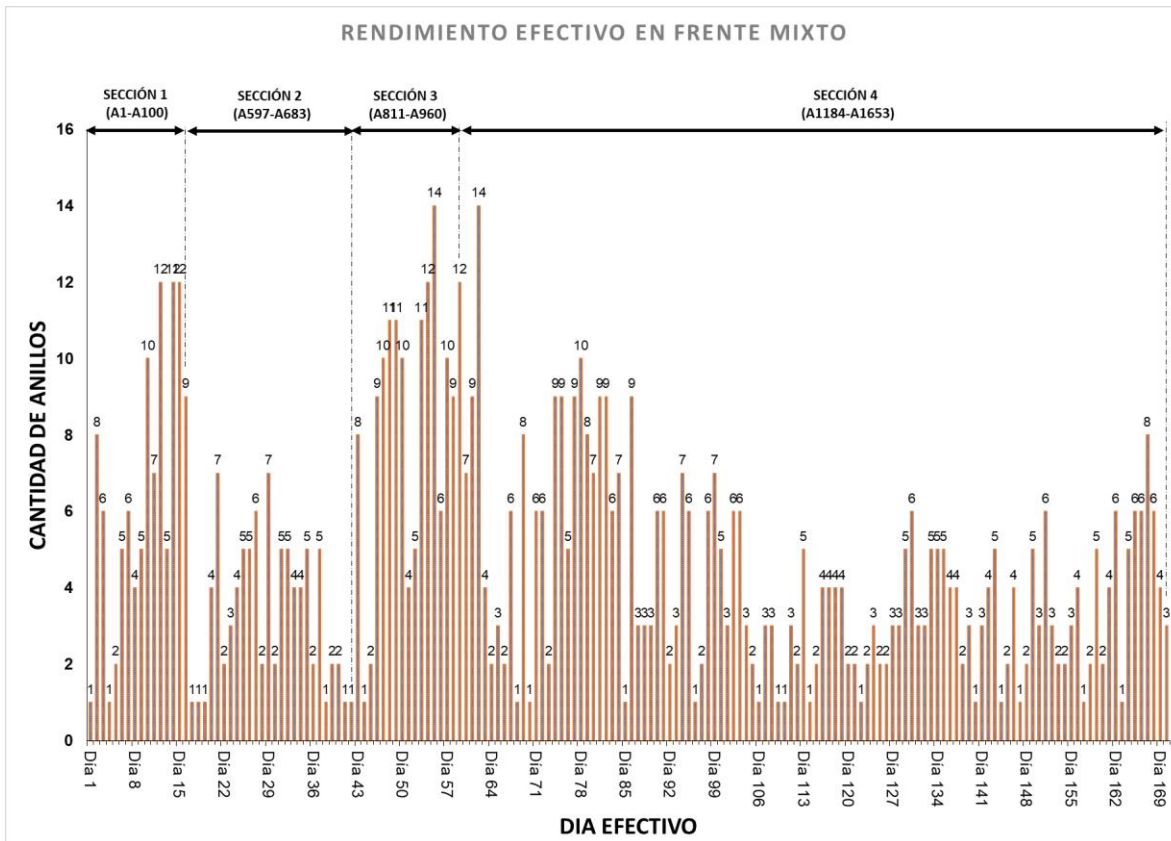


Figura 195. Rendimento efectivo por material "MIXTO".

En este caso el análisis simple de la gráfica deduce un rendimiento de menor variación, en donde los días de menor producción se deben principalmente a incidencias menores.

IV.2.3 Subtramo L12-L13.

Rendimento General (Rg). Este subtramo comprende una longitud total de 3.178 kilómetros de túnel, es decir 2115 anillos de concreto colocados, considerando los 1.5031 metros por anillo. La duración total de excavación fue de 342 días calendario, teniendo como inicio de actividades el día 7/Mayo/2017 y concluyendo el día 13/Abril/2018.

El cálculo del rendimiento general se calcula de la siguiente forma:

$$R_g = \frac{\text{Longitud de excavación}}{\text{Duración}} = \frac{l_e}{t} = \frac{3178 \text{ m}}{342 \text{ dias}} = 9.295 \left[\frac{\text{m}}{\text{dia}} \right] \cong 6.184 \left[\frac{\text{anillos}}{\text{dia}} \right]$$

Al igual que el subtramo anterior, este rendimiento incluye todos los periodos muertos (días sin excavación), en donde se engloban las intervenciones atmosféricas, intervenciones hiperbáricas o trabajos de alguna reparación mecánica de la tuneladora.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

La **Figura 196** resume de manera gráfica el rendimiento diario alcanzado de manera más específica, teniendo como variable la cantidad de anillos excavados por día calendario.

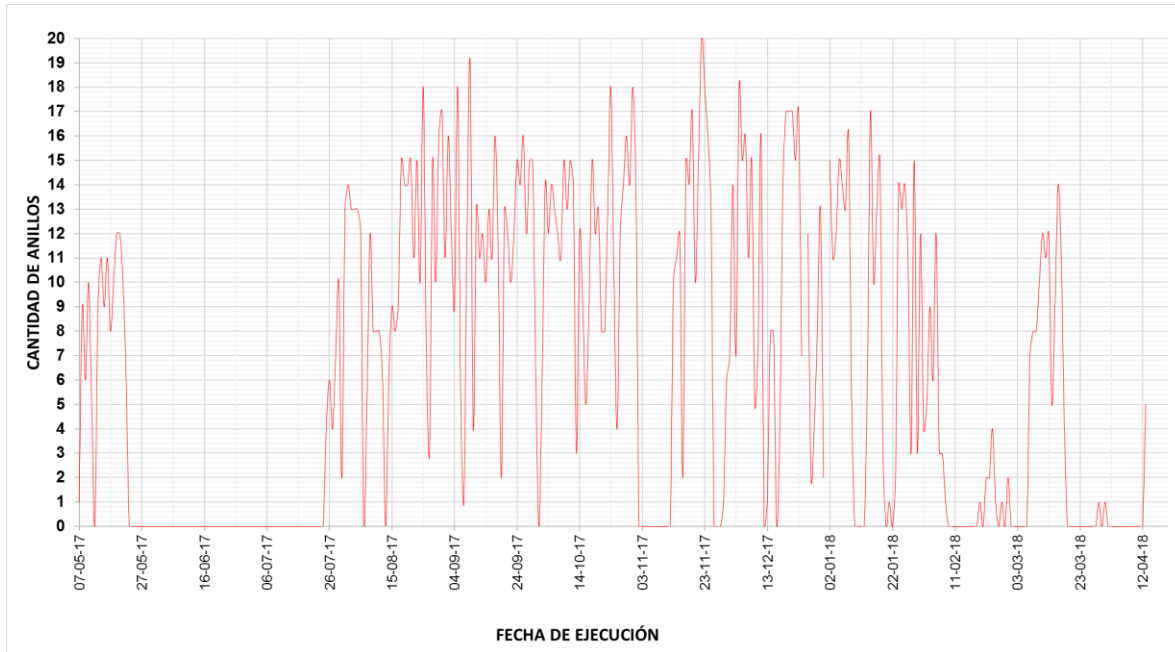


Figura 196. Rendimiento diario de excavación del subtramo L12-L13.

Rendimiento efectivo (R_e). Eliminando los periodos de tiempo muertos de la gráfica anterior, es decir solo considerando los días efectivos de trabajo se obtiene la gráfica de la **Figura 197**, en donde se aprecia un rendimiento máximo alcanzado de 20 anillos excavados y un mínimo de solo 1 anillo, el total de días efectivos de trabajo es de 209 para la excavación de los 2115 anillos que componen el subtramo.

El rendimiento efectivo general se calcula de la siguiente manera:

$$R_e = \frac{\text{Longitud de excavación}}{\text{Duración efectiva}} = \frac{l_e}{t} = \frac{3178 \text{ m}}{209 \text{ dias}} = 15.210 \frac{\text{m}}{\text{dia}} = 10.120 \frac{\text{anillos}}{\text{dia}}$$

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

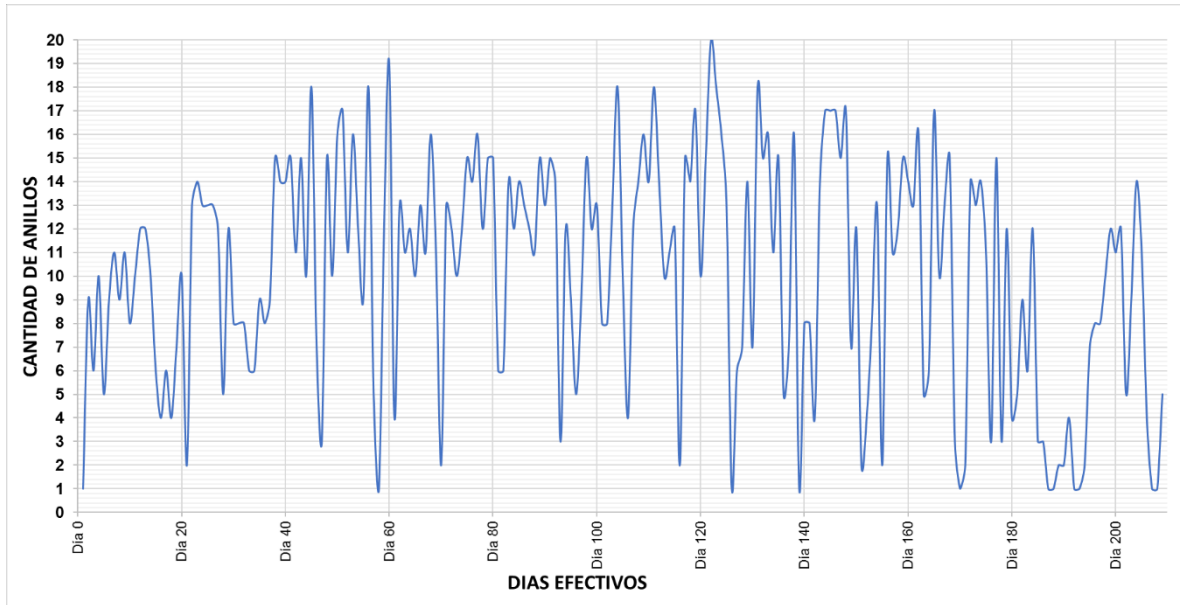


Figura 197. Rendimiento efectivo del subtramo L12-L13.

De forma analítica se observa poca variación en los rendimientos alcanzados por día efectivo de trabajo, sin embargo, aún no se considera el tipo de material.

Rendimiento por tipo de material (Res). A diferencia de los subtramos anteriores, este se compone solamente del tipo “SUELO” como lo indica la **Figura 198**. Las **Figuras 199 y 200**, presentan conciliaciones representativas del todo el subtramo, en las cuales se aprecia de forma directa el tipo de material encontrado. En resumen, el frente de excavación se compone principalmente de depósitos lacustres arcillo arenosos, suelos ya arenas aluviales, cenizas volcánicas y pómez, sin presencia de basaltos.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

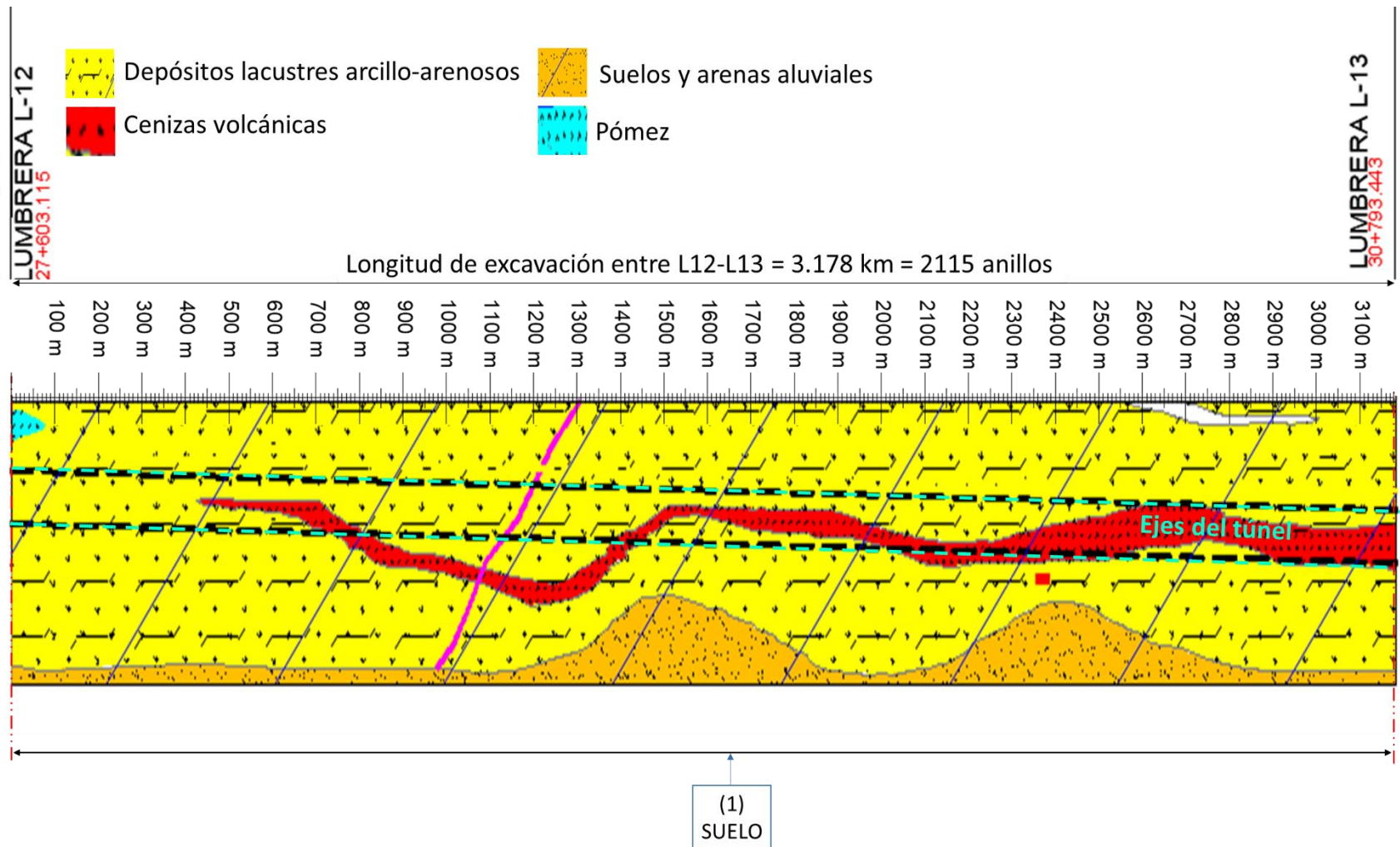


Figura 198. Perfil estratigráfico del subtramo L12-L13.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

Conciliación 24. Inspección y conciliación del frente de excavación durante la intervención atmosférica No.2 (Anillo 287). Frente de excavación con un estrato de limo color café claro en la parte superior, subyacente se observa un lente de arena fina limpia volcánica de compacidad alta, posteriormente se observa un estrato de limo arenoso con gravillas y finalmente se observa un estrato de limo arenoso de compacidad alta considerado un frente con material del tipo “SUELO”.

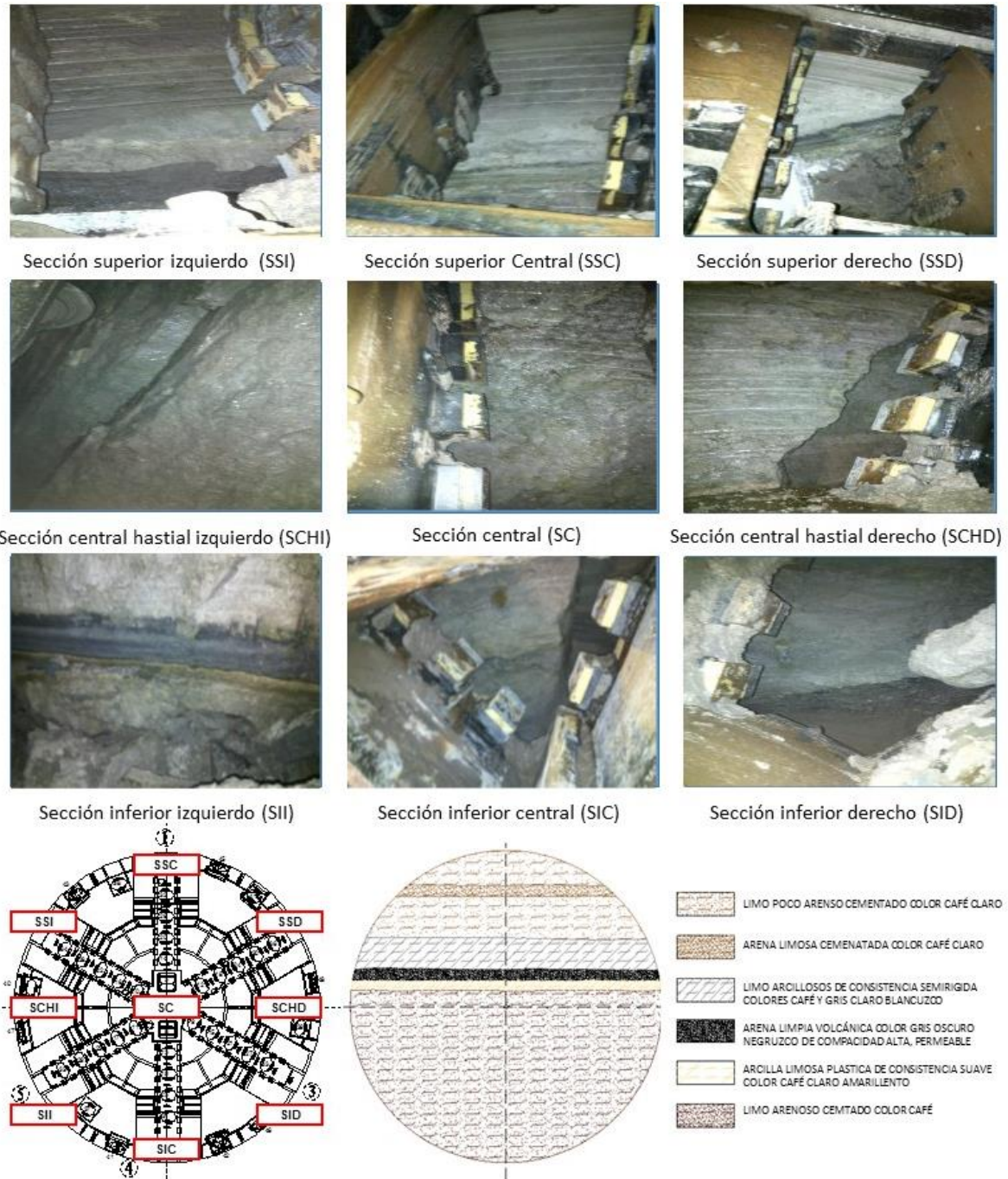


Figura 199. Conciliación del frente de excavación No. 24.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

Conciliación 25. Inspección y conciliación del frente de excavación durante la intervención atmosférica No. 5 (Anillo 703). Frente de excavación con un estrato de limo arenoso con gravas en la parte superior, subyacente se observa un estrato de limo arenoso con gravas color gris claro, posteriormente se observa un estrato de limo poco arenoso color café claro, posteriormente se observa un estrato de limo arcilloso color café olivo, subsecuente se tienen dos lentes de limo en partes arcilloso, finalmente se observa un estrato de limo arenoso de color café claro, considerado un frente con material del tipo “SUELO”.

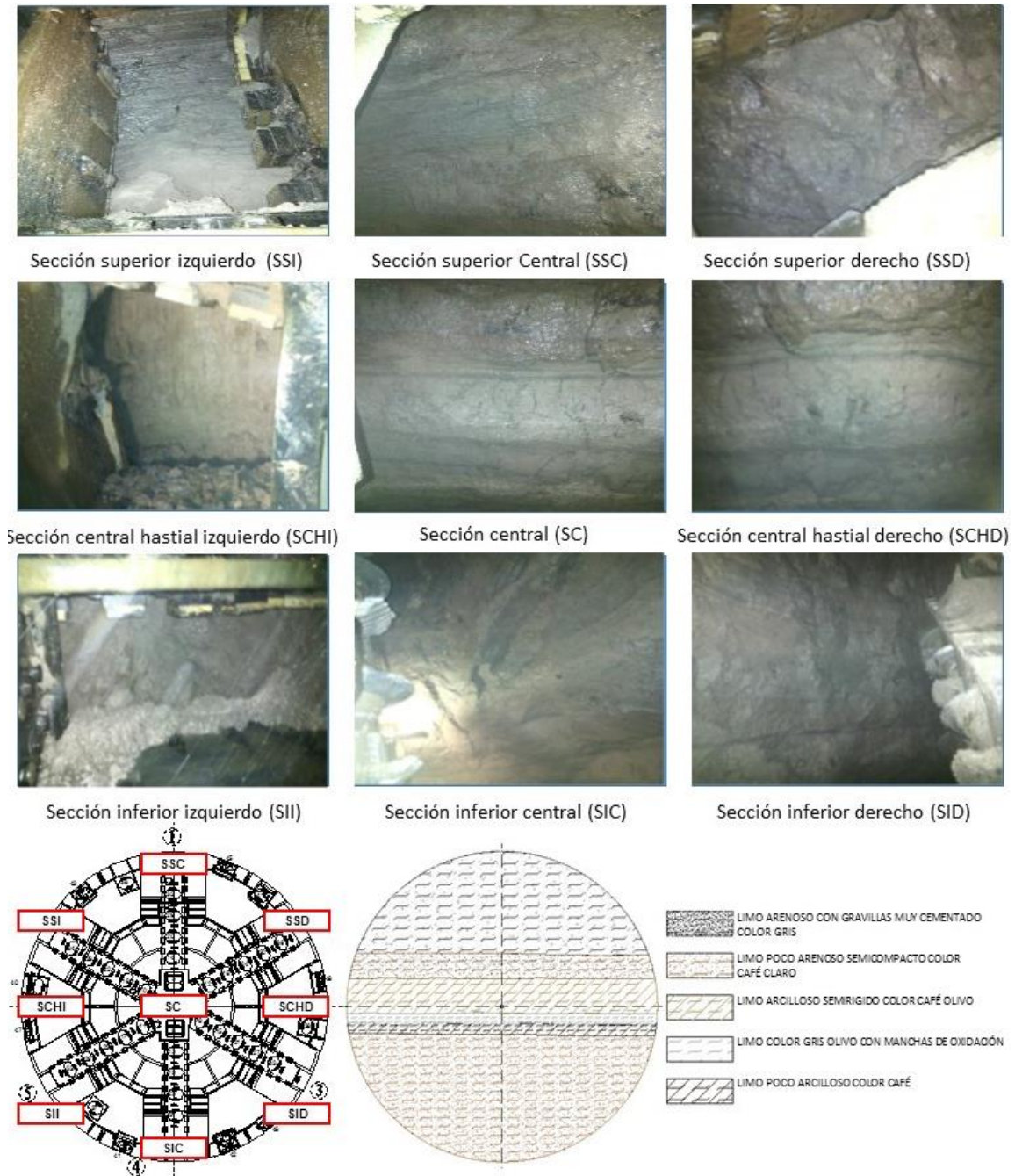


Figura 200. Conciliación del frente de excavación No. 25.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

Rendimiento por material “SUELO” (Res3). Tomando como referencia la clasificación anterior, la longitud total del subtramo es de un frente de excavación del tipo “SUELO”, por lo que el rendimiento obtenido por tipo de material es:

$$R_{es3} = \frac{\text{Longitud de excavación}}{\text{Duración efectiva}} = \frac{l_e}{t} = \frac{3178 \text{ m}}{209 \text{ dias}} = 15.210 \frac{\text{m}}{\text{dia}} = 10.120 \frac{\text{anillos}}{\text{dia}}$$

IV.2.4 Rendimientos generales por tipo de material.

A continuación, se resumen los rendimientos alcanzados de manera general por tipo de material encontrado en el frente de excavación y en toda la longitud que comprende el tramo 3, siendo el de mayor efectividad el material denominado “SUELO” compuesto de material blandos como son arcillas, limos arenas y cenizas volcánicas.

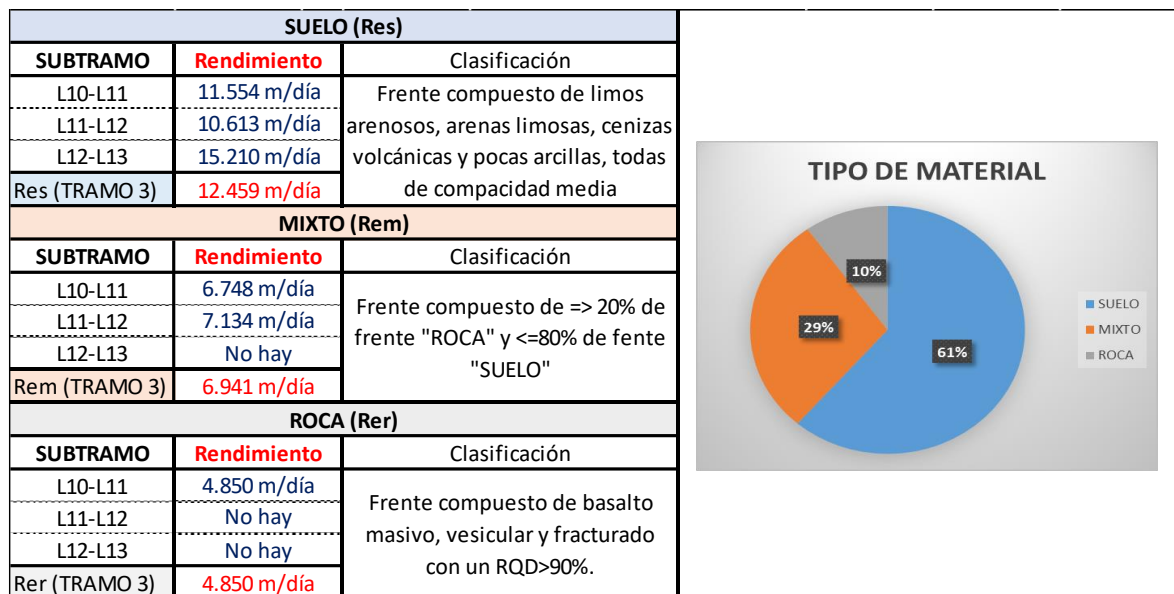


Figura 201. Rendimientos de excavación por tipo de material encontrado en el Tramo 3 del TEO.

IV.3 Trabajos complementarios durante el proceso de excavación.

Durante el proceso de excavación se realizan actividades complementarias y en ocasiones no previstas que ayudan a obtener un mejor rendimiento en la producción y que en algunos casos son necesarias para dar continuidad al proceso constructivo. Las principales actividades son; suministro de insumos, intervención atmosférica, intervención hiperbárica, paso por lumbrera, cambio de cepillos, cambio de instalaciones.

IV.3.1 Intervención atmosférica.

Se denomina intervención atmosférica al conjunto de actividades que se realizan en la rueda de corte de la TBM para su inspección y mantenimiento en un ambiente atmosférico, es decir, sin presión de tierra en el frente de excavación como así se muestra en la **Figura 202**, debido a la profundidad y la estabilidad del terreno es posible realizar esta actividad sin correr el riesgo de derrumbe del frente.

Los criterios considerados para realizar una intervención atmosférica dependen principalmente de los parámetros observados, la tuneladora cuenta con herramientas computacionales que permiten registrar uno a uno los parámetros de operación, mediante el registro, envío y grabación de señales enviadas desde sensores colocados en los diferentes componentes y sistemas de la máquina, permitiendo con ello el registro, lectura e interpretación de diversos valores durante el proceso de excavación de un anillo en tiempo real. Valores con los cuales, el usuario del sistema de monitoreo de los parámetros puede detectar e interpretar a tiempo cualquier valor atípico, previendo algún daño en el equipo excavador, o analizar cualquier parámetro ante algún suceso durante el proceso de excavación.

Durante la etapa de excavación del tramo 3 del Teo se definieron cuatro principales criterios:

- Se consideró realizar una inspección de las herramientas de corte a cada 100 anillos colocados, con el objetivo de observar el rendimiento y estado de la rueda de corte y sus herramientas, sin embargo, se pudo prescindir de este criterio cuando los parámetros de la tuneladora se comportaron en un rango aceptable.
- Durante los paros programados, como es el empalme de la banda de rezaga o empalme de cables eléctricos.
- Cuando se presenta una elevada fuerza de empuje, ya sea mayor o igual a 65000 kN, valor establecido como máximo permisible durante la excavación.
- Cuando se presenta un elevado valor del torque de la rueda corte, mayor o igual a 6000 kNm, valor máximo permisible establecido en obra.

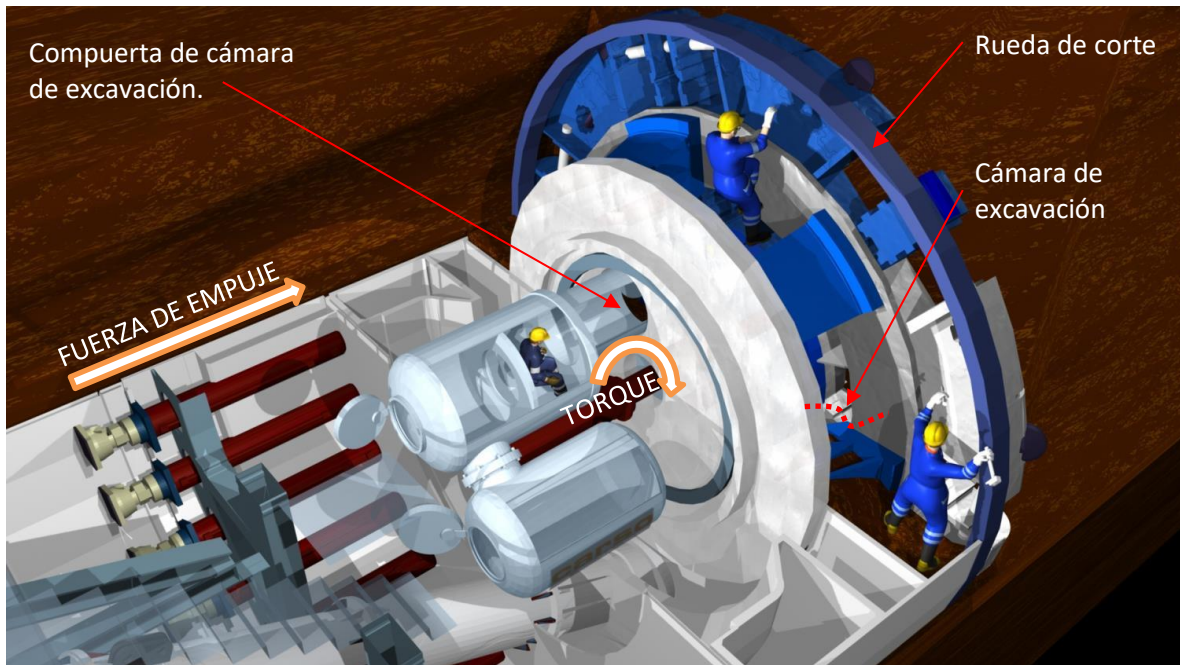


Figura 202. Trabajos de intervención en medio atmosféricos.

El procedimiento establecido para realizar una intervención se describe a continuación:

Extensión y retracción de la articulación. Durante la excavación del anillo anterior al paro programado se extiende y retrae la articulación de la TBM no menos de 200 milímetros, esto para generar un espacio entre el terreno y la rueda de corte como lo indica la **Figura 203**. este espacio permite realizar los trabajos de revisión y cambio de las herramientas.

Vaciado de cámara de excavación. Una vez retraída la articulación se extrae el material sólido acumulado en la cámara mediante la inyección de aire comprimido y por medio del tornillo sin fin y el sistema de bandas, la forma de saber si se ha vaciado es observando el material a la salida del tornillo y monitoreando los sensores de presión.

Control de aportación de agua. Si el tipo de material del frente es permeable se presentan aportaciones de agua al interior de la cámara, debido a que ya no hay rezaga que ejerza una presión de equilibrio. El mamparo de la tuneladora cuenta con un total de 28 válvulas tipo esfera de un diámetro de 4" que son canalizadas por medio de mangueras a la zona del faldón y gantries, posteriormente se desaloja con una bomba de 58 H.P. hasta el fondo de lumbrera en donde se utiliza una bomba tipo flygt de 140 H.P. para su disposición final en superficie. En las intervenciones realizadas en el Tramo 3 del TEO, se observaron gastos de aportación promedio de 15 lps en materiales poco permeables (basaltos masivos, arcillas y limos) y de hasta 250 lps en materiales permeables (gravas y arenas con poca presencia de finos).

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

Se puede realizar la intervención atmosférica sin mayores incidencias con una aportación máxima de agua proveniente del frente del orden de 100 l/s, debido que este gasto aun es abatible en la tuneladora y el fondo de lumbrera.

Apertura de compuerta de cámara de excavación. El mamparo de la TBM también cuenta con un total de 10 sensores que indican la cantidad de presión ejercida en el frente. Una vez controlada la aportación del agua los sensores superiores y medios (#8, #1, #7, #2, 10 y #9) indican un valor aproximado de 0.00 bar como se aprecia en la **Figura 203**, estableciendo de esta manera únicamente la presencia de aire y dando la pauta para realizar la apertura de la compuerta.

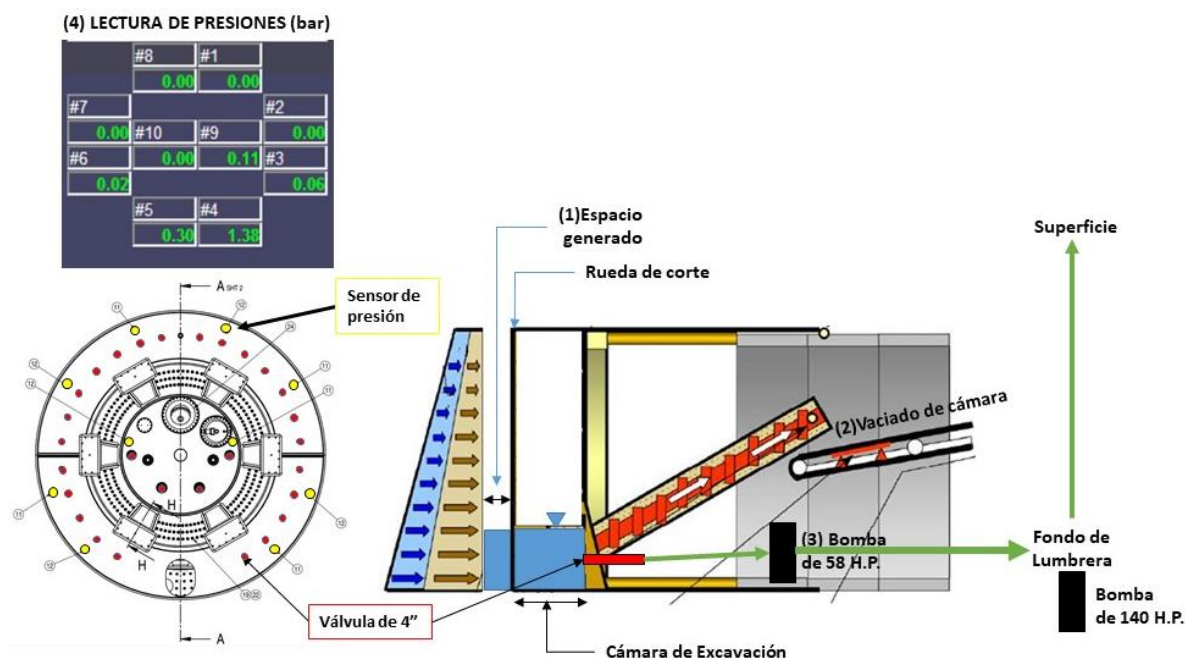


Figura 203. Ubicación de válvulas de desfogue y sensores de presión en mamparo de TBM.

Medición de gases. Ningún riesgo de contaminación por gases tóxicos procedentes del suelo fue previsto en este proyecto, según la descripción geológica del túnel, ningún gas de origen orgánico o contaminación del suelo aparece, sin embargo, una vez abierta la compuerta se toma una muestra del aire utilizando un detector de gas portátil (Explosímetro) con el objetivo de revisar su calidad. El control de los gases (en particular el CO debe ser menor de 50ppm, el CO₂ menor del 1% y el O₂ entre 19.5% y 23.0%) es sistemático y continuo en caso de trabajos de soldadura y corte con el fin de prevenir todo riesgo de intoxicación del personal. Como una acción preventiva se realiza la ventilación de la cámara con un equipo portátil denominado RAM FAM como el utilizado en **Figura 204**.



Figura 204. Ventilador RAM FAM.

Ingreso de personal e Inspección de herramientas. Verificada la calidad del aire dentro de la cámara de excavación se procede al ingreso del personal calificado con su equipo de protección personal (casco, botas de casquillo, ropa con reflejante, arnés y guantes).

En primera instancia se realiza la limpieza de la rueda de corte mediante agua a presión o rompedoras neumáticas si el material rezagado se encuentra apelmazado en las ventanas o cubriendo las herramientas, posteriormente se realiza la medición de desgaste de los 48 discos cortadores y los 188 scrapers con un escantillón fabricado para esta actividad como se muestra en la **Figura 205**.

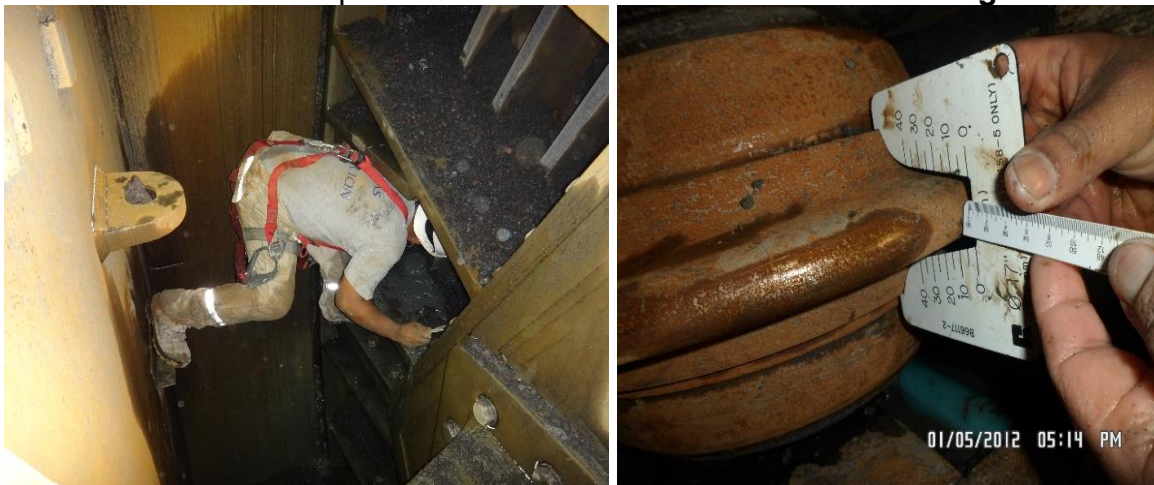


Figura 205. Revisión y medición de desgaste de los discos cortadores.

Trabajos de mantenimiento. Cuando se finaliza la revisión de todas las herramientas de corte de la rueda (discos cortadores y scrapers) se determinan las piezas a reemplazar mediante criterios de desgaste y daños, basándose en la guía proporcionada por la empresa fabricante de la tuneladora, así mismo se utilizan herramientas de apoyo como son polipastos manuales de 1.0 tonelada de capacidad y “trampas” elaboradas con cable de acero. El tiempo efectivo para el reemplazo de un disco cortador es de 30 minutos y para el remplazo de 1 scraper de 10 minutos.

Los discos cortadores utilizados en el proyecto son de 17” de diámetro y de una dureza MD-3/4 (entre 52HRC y 54HRC), están diseñados para trabajar bajo presión mediante sellos para evitar la pérdida de aceite o el ingreso de suciedad a su interior que pueden comprometer los rodamientos y otras partes internas, se dividen, por sus características y piezas que lo componen, en discos cortadores sencillos y dobles como lo indica la **Figura 206**, así mismo por su ubicación en la rueda se subdividen en grupos denominados centrales, frontales y periféricos. La rueda de la tuneladora “Hidalgo” se equipó con un total de 4 discos centrales (dobles), 31 discos frontales (sencillos) y 9 discos periféricos (sencillos).



PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

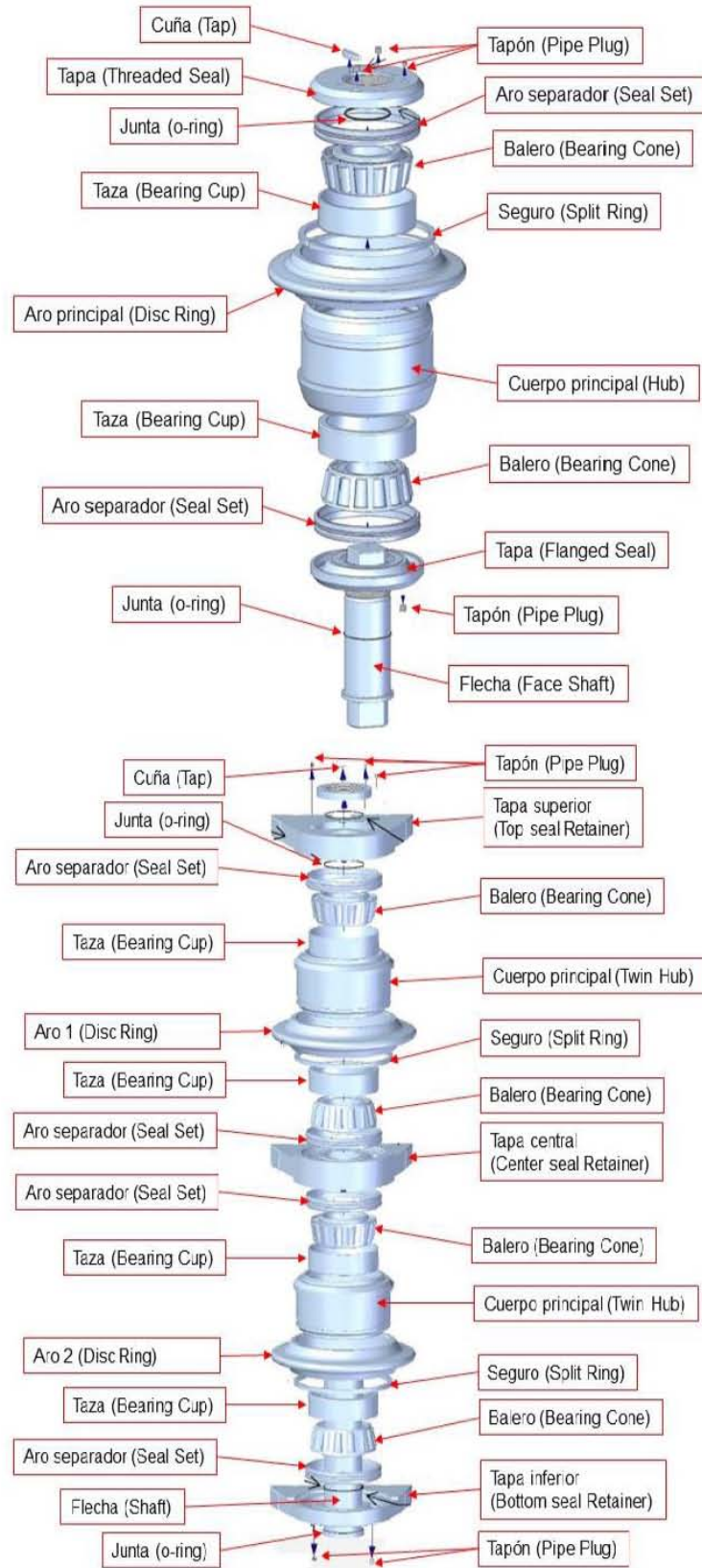


Figura 206. Despiece de un cortador sencillo y un cortador doble.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

Los scrapers o limpiadores son piezas de acero cubiertas con soldadura anti desgaste que se encuentran atornilladas en los brazos de la rueda para ser reemplazadas cuando sea necesario, se dividen en frontales y periféricos como lo indica la **Figura 207**. La rueda de la tuneladora del tramo 3 del TEO se compone por un total de 128 scrapers frontales del mismo tamaño y 60 piezas de scrapers periféricos que por su forma y tamaño se subdividen en grupos de 5 piezas denominados “izquierdos” y “derechos”.

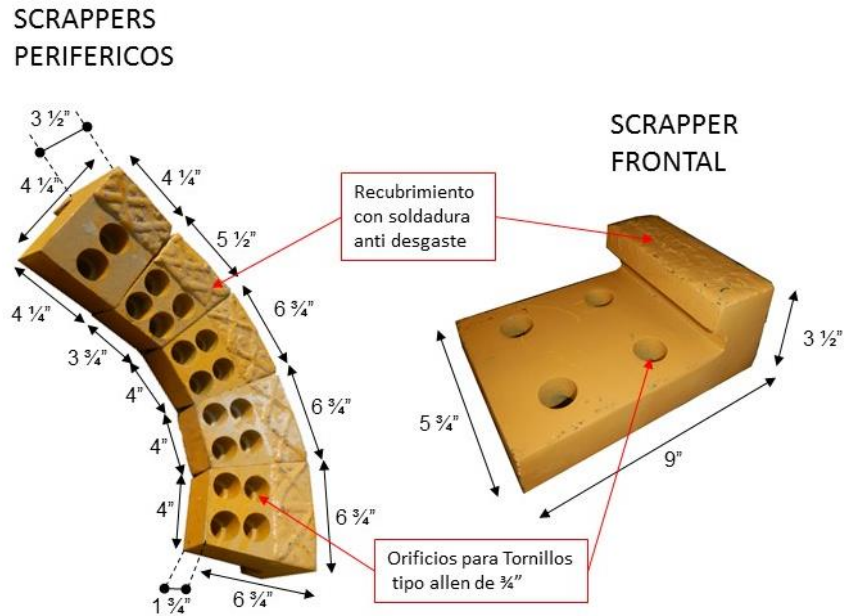


Figura 207. Despiece de limpiadores o scrapers.

La eficiencia de un sistema de excavación depende de todo un conjunto de herramientas cuyos elementos interaccionan entre sí. Como su nombre lo indica, la función de los discos cortadores es aplicar una fuerza de corte desarrollada por una fuerza de rodadura derivada de una elevada fuerza de empuje o penetración logrando así un mecanismo de formación de lascas (chips), características de una típica fractura a tracción en un material rocoso. Realizado el proceso de formación de chips, el conjunto de scrapers realizan la función de limpieza y retiro de material rezagado en el plano de corte. El proceso de acción de los discos cortadores y los scrapers se representa en las **Figuras 208 y 209**.

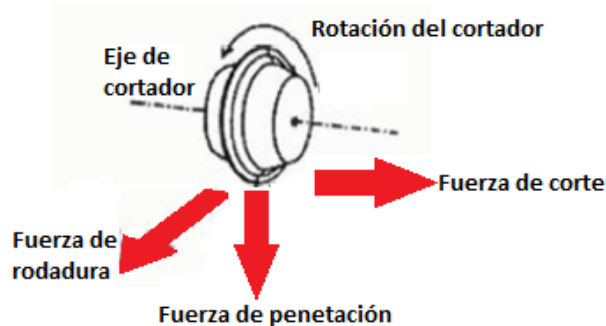


Figura 208. Fuerzas actuantes en un disco cortador.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

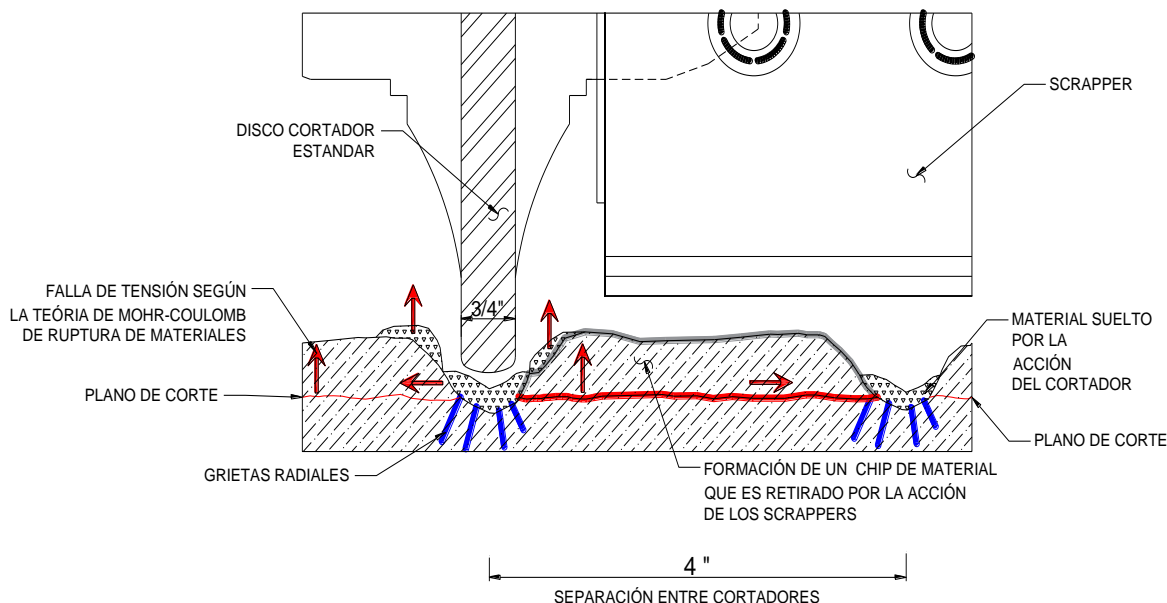


Figura 209. Proceso de corte y limpieza del frente de excavación.

Criterios de cambio de herramientas por desgaste. Se establecieron dos criterios de cambio por desgaste cuyo objetivo es evitar el contacto del terreno con el cuerpo de la rueda, primordialmente en la periferia debido a que las herramientas ubicadas en esta zona constituyen el diámetro de la excavación y la consecuencia de no limitar su desgaste implica el cierre del GAP o reducción del espacio que existe entre el diámetro de excavación y el diámetro de la tuneladora, reflejándose en una elevada fuerza de empuje o daños mayores en la máquina.

Para los cortadores, el primer criterio se determina con la medición del desgaste del aro principal y basándose en los valores de desgastes máximos permisibles o "W" como lo indica en la **Figura 210** se determina la pieza a reemplazar. El desgaste radial de los discos cortadores no siempre es uniforme sino sesgado por la rotación y fuerzas actuantes, para establecer el desgaste de los cortadores se mide con el escantillón a la derecha y a la izquierda a fin de consignar el promedio de ambos. Para los scrapers se estableció un valor máximo de 40 milímetros.

El segundo criterio solamente se aplica para los cortadores y se determina observando de manera analítica el desgaste en grupos (centrales, frontales y periféricos), con el objetivo de evitar cargas excesivas en una determinada zona de la rueda de corte y hacer más eficientes las herramientas. Los valores de desgaste máximos permisibles en grupos o "D" se indican en la **Figura 210**.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

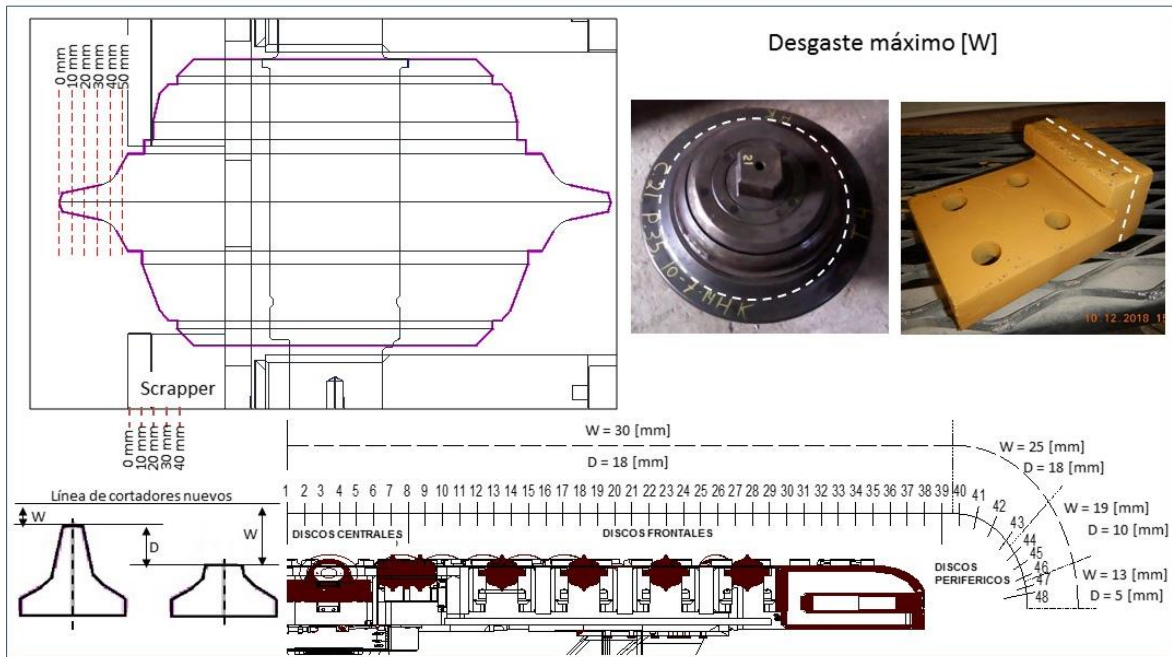


Figura 210. Desgastes máximos permisibles de las herramientas.

Un ejemplo de levantamiento de desgastes y cambio de cortadores se muestra en la **Figura 211**, realizado en la intervención atmosférica No. 10 del subtramo L11-L12 en un frente de tipo SUELO, en ella se observa la necesidad de cambiar cortadores por los dos criterios mencionados.

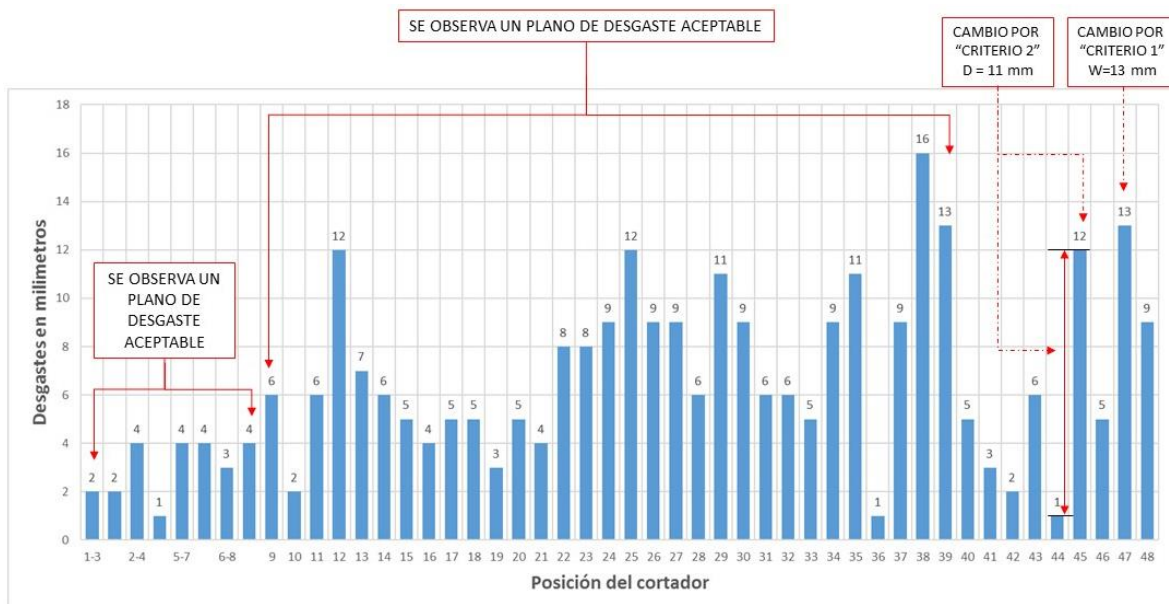


Figura 211. Levantamiento de desgastes realizado en intervención atmosférica No. 10 del subtramo L11-L12.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

Criterios de cambio de herramientas por daños. Estos criterios dependen básicamente de los daños que sufren las herramientas en sus componentes, en la **Figura 212** se enlistan los principales daños que se observaron durante la excavación del tramo 3.

Cortador con desgaste	Scraper con desgaste	Cortador con pérdida de aceite y daño en tapas
		
Cortador con aro plano	Cortador sin aro principal	Cortador con aro plano y hexagonal (en punta)
		
Cortador con aro principal roto	Cortador con aro principal roto	Cortador sin aro, daño en tapas, pérdida de aceite y daño en hub (daño en cuerpo)
		
Cortador sin aro, daño en tapas y en hub (daño en cuerpo)	Cortador con aro aplanado, daño en tapas, pérdida de aceite y daño en hub y flecha (pérdida total)	Cortador sin aro, daño en tapas y en hub (pérdida total)
		

Figura 212. Criterios de cambio por daños.

Rendimiento de discos cortadores en diferentes tipos de material. La tuneladora “Hidalgo” fue diseñada para la excavación en los tres diferentes tipos de material, por lo que para un frente del tipo “Suelo” se equiparía la rueda con herramientas denominadas “rippers” y para un frente del tipo “Mixto” y “Roca” se utilizarían discos cortadores. Se utilizaron “rippers” en los primeros 150 metros de excavación y en el resto del tramo se optó por utilizar los discos cortadores debido a que la geología del frente así lo requería.

Cada vez que se extrae un cortador de la rueda de la TBM por desgaste, la mayoría de las partes se vuelven a utilizar (ensamblar). Las partes que normalmente se reemplazan son: Los aros principales, los empaques (O-ring), los retenes (Tapas) y el aceite. Uno de los problemas más frecuentes cuando se utilizan discos cortadores es la entrada de material fino al interior de los rodamientos, haciendo que se bloquee y se dañen sus piezas internas, si se observa la **Figura 213** en la imagen de lado derecho se muestra un cortador recién ensamblado con partes nuevas y en la imagen del lado izquierdo el mismo cortador después de un tiempo de trabajo.



Figura 213. Ingreso de material fino al interior del disco cortador.

Con un total de 259 intervenciones atmosféricas realizadas se obtuvieron los datos mostrados en la **Figura 214**, en donde el eje horizontal representa la longitud total de excavación, el eje vertical el desgaste acumulado, las líneas graficadas son los discos cortadores respecto a su posición en la rueda y las líneas divisorias etiquetadas con letras “S”, “M” y “R” representan el tipo de material encontrado en el frente de excavación. Estos datos solo presentan el desgaste medido del aro principal de cada cortador.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

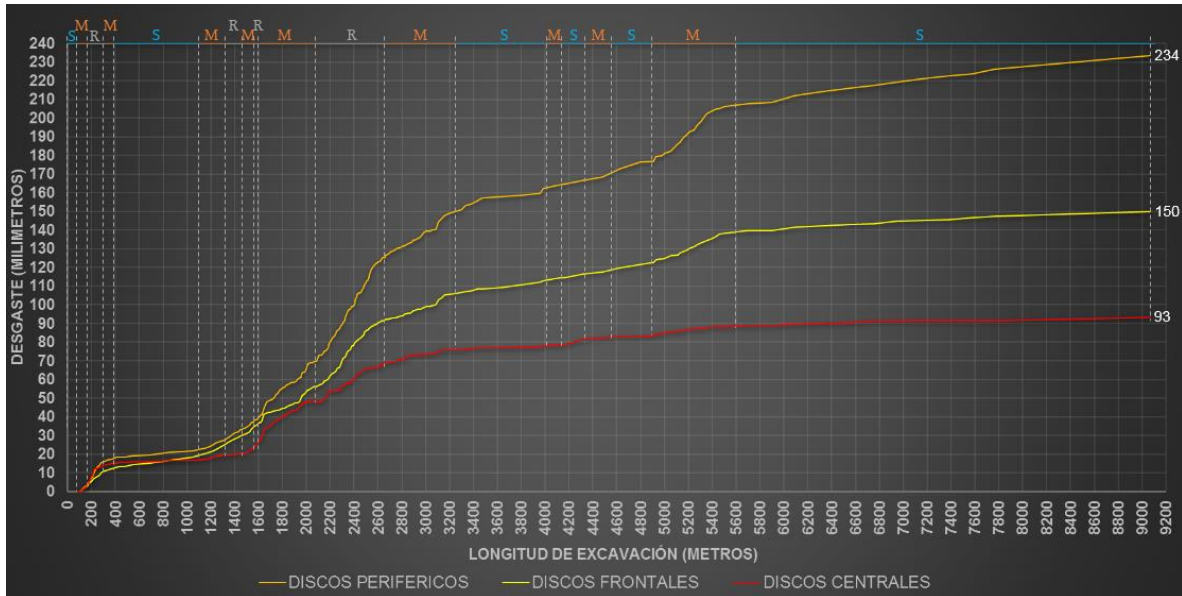


Figura 214. Desgastes obtenidos de los cortadores utilizados en Tramo 3.

De manera analítica se observa un mayor desgaste en cortadores periféricos y con una tendencia a aumentar en un frente del tipo “Roca” y “Mixto”, la eficiencia por desgaste y por zona se obtiene de la siguiente manera:

Material	(1) Longitud de excavación [km]	(2) Desgastes acumulados [mm]			[(2)/(1)] Eficiencia [mm/km]		
		Zona periférica	Zona frontal	Zona central	Zona periférica	Zona frontal	Zona central
SUELO	5.59	50.778	29.645	12.625	9.083721	5.30322	2.2584973
MIXTO	2.616	108.222	71.677	46.750	41.36927	27.39946	17.870795
ROCA	0.902	74.667	48.452	34.00	82.77938	53.71619	37.694013
Totales	9.108	233.667	149.774	93.375			

Los valores más desfavorables de eficiencia por desgaste se obtuvieron en un frente del tipo “roca” conformado principalmente por basaltos masivos y en la zona periférica de la rueda de corte. Dentro de los valores de desgastes acumulados se aprecia un valor total de 476.816 milímetros, es decir 47.6 centímetros por los 9.108 kilómetros de túnel excavado, lo cual comprueba una excelente eficiencia de las herramientas.

$$Eficiencia\ general\ por\ desgaste = \frac{233.667 [mm] + 149.774 [mm] + 93.375 [mm]}{9.10863 [km]}$$

$$Eficiencia\ general\ por\ desgaste = \frac{476.816 [mm]}{9.10863 [km]} = \frac{52\ mm}{km\ de\ túnel}$$

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

La eficiencia por desgaste no considera la cantidad de veces que se reemplazó un cortador debido a daños en su composición o por término de su vida útil por lo cual no es un buen indicador, sin embargo, en la **Figura 215** se resume el total de cortadores reemplazados en base al tipo de material y las características de daño presentadas, siendo la más frecuente el cambio por desgaste útil y sin aro.

Si se considera la cantidad total de cambios dividida entre la longitud de excavación se tiene lo siguiente:

$$Eficiencia\ general\ por\ daños = \frac{Total\ de\ piezas\ cambiadas}{Longitud\ de\ excavación\ total}$$

$$Eda = \frac{944\ piezas}{9.108\ km} = 103.645 \frac{piezas}{km\ de\ túnel}$$

Siendo este valor el más aceptado debido a que engloba todas las problemáticas presentadas en los cortadores.

		Cambios por tipo de suelo [Pieza]			Subtotal
		SUELO	MIXTO	ROCA	
		5.590 km	2.616 km	0.902 km	
Cambios por problemática	Pérdida de aceite	4	31	8	43 Piezas
	Sin aro	32	62	82	176 Piezas
	Desgaste útil	37	124	86	247 Piezas
	Daño en cuerpo	33	14	28	75 Piezas
	Aro suelto	1	21	4	26 Piezas
	Aplanado	25	45	28	98 Piezas
	En punta	0	3	2	5 Piezas
	Aro roto	6	71	81	158 Piezas
	Bloqueado	52	34	30	116 Piezas
Subtotal	190 Piezas	405 Piezas	349 Piezas	944 Piezas	

Eficiencia	33.99 [pza/km]	154.82 [pza/km]	386.92 [pza/km]
-------------------	-----------------------	------------------------	------------------------

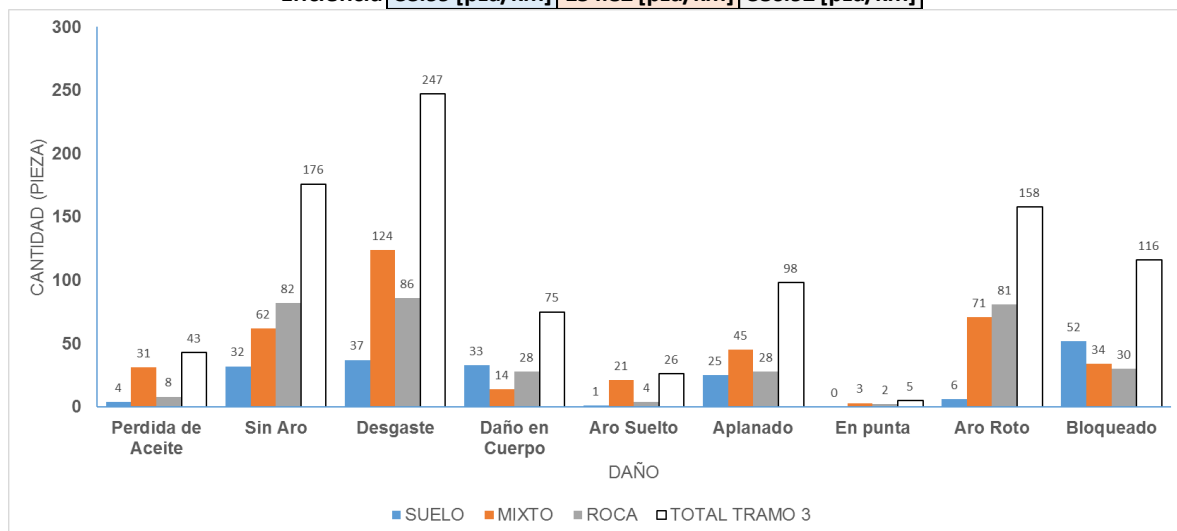


Figura 215. Cantidades de discos cambiados dependiendo el tipo de material.

La **Figura 216** resume en porcentaje todas las problemáticas que los cortadores presentaron durante la excavación del tramo 3.

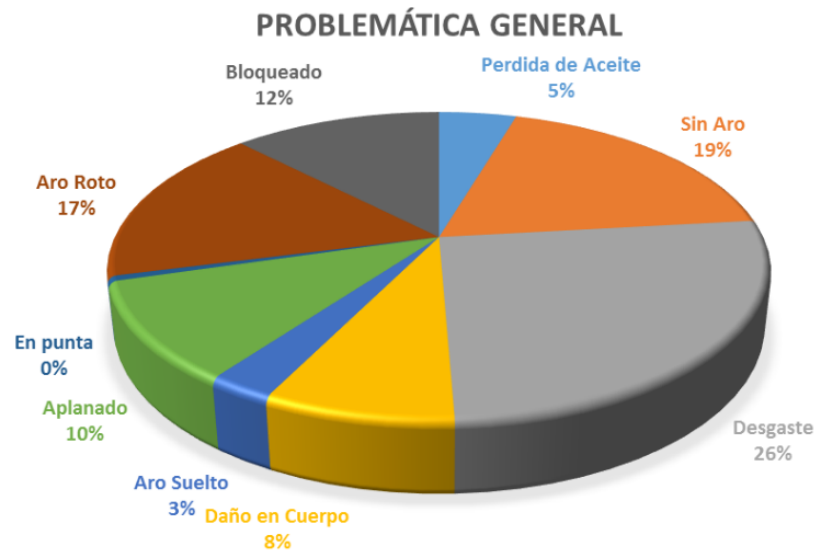


Figura 216. Porcentaje de cortadores cambiados dependiendo el tipo de daño.

Rendimiento de limpiadores (Scrapers). Dado que la mayor fuerza de trabajo es ejercida por los cortadores, el rendimiento de los scrapers es mayor y siempre en conjunto, por lo cual se debe de reemplazar todas las piezas en una misma acción.

En todo el tramo se utilizaron 6 juegos de scrapers en total (periféricos y frontales), por lo que el cálculo del rendimiento se obtiene de la siguiente manera:

$$R_{sc} = \frac{6 \text{ juegos}}{9.108 \text{ km}} = 0.67 \frac{\text{juegos}}{\text{km de túnel}}$$

Cierre de compuerta y tiempos de intervención. Finalizadas las actividades de mantenimiento, se realiza el retiro de todas las herramientas utilizadas durante la actividad y el personal involucrado dando la pauta para el cierre de compuertas y reinicio de la excavación. Los tiempos de intervención se establecieron en base a los tiempos de ejecución durante el proceso de excavación. De un total de 6060 anillos colocados o 9108.63 metros de excavación se efectuaron 259 intervenciones, la mayoría realizadas en un frente del tipo "MIXTO" como así lo muestra la **Figura 217**, en donde las líneas graficadas son los desgastes acumulados de cada uno de los 48 cortadores en base a la longitud de túnel del tramo 3 del TEO y los puntos resaltados son la cantidad de intervenciones realizadas.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

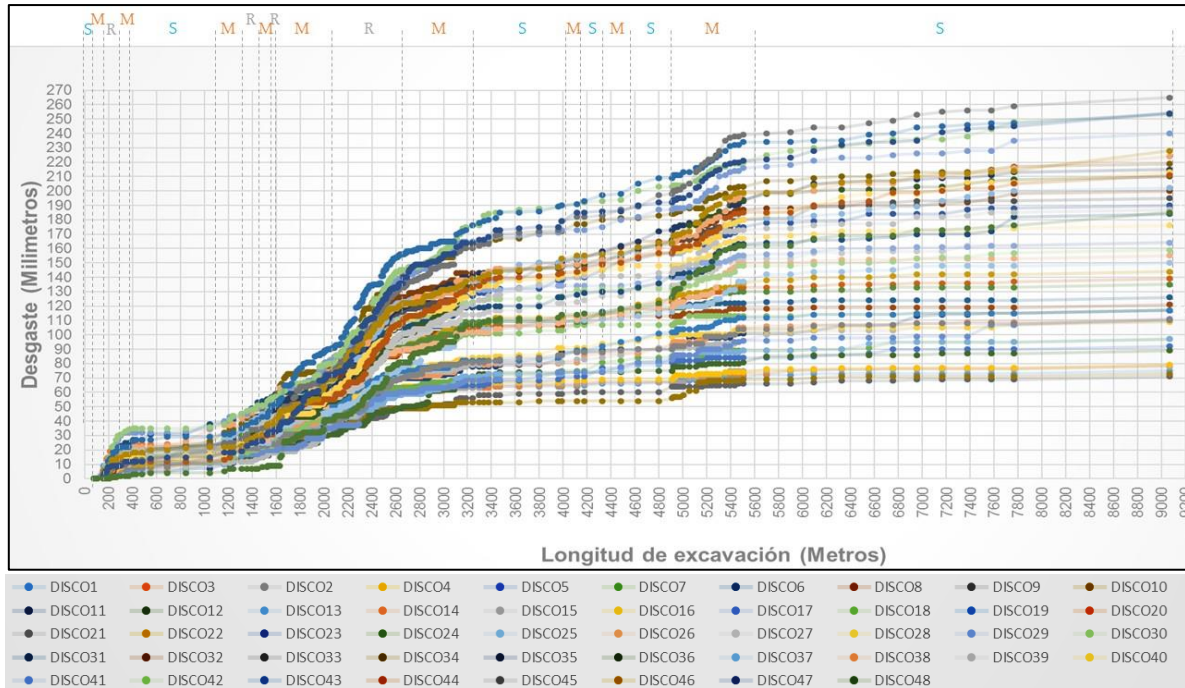
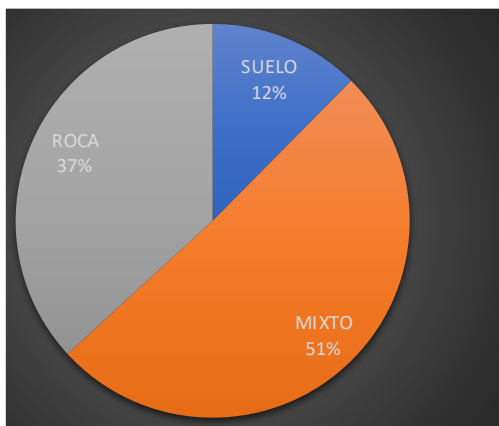


Figura 217. Degastes medidos por intervención.

Frecuencia de intervenciones. La frecuencia con el que se realizan las intervenciones varía dependiendo de las condiciones del frente y de los parámetros de la tuneladora, en el tramo 3 del TEO se obtuvieron las siguientes:

- La frecuencia en material excavado del tipo “Suelo” fue a cada 116 anillos con un tiempo de intervención de 5 horas.
- En un material del tipo “Mixto” fue a cada 13 anillos con un tiempo de intervención de 12 horas.
- Para un material del tipo “Roca” la frecuencia fue a cada 6 anillos con un tiempo de intervención de 10 horas.



TIPO DE MATERIAL	TOTAL [ANILLOS]	INTERVENCIONES REALIZADAS	FRECUENCIA
SUELO	3719	32	116
MIXTO	1740	131	13
ROCA	601	95	6
TOTAL TRAMO 3	6060	258	

Figura 218. Frecuencia de intervenciones dependiendo del tipo de material.

IV.3.2 Intervención hiperbárica.

Una intervención hiperbárica se define como los trabajos de mantenimiento realizados a la rueda de corte de la tuneladora en un ambiente hiperbárico, es decir, bajo una presión de confinamiento mayor a la atmosférica dentro de la cámara de excavación.

Los trabajos de mantenimiento y criterios de cambio de herramientas aplicados son los mismos que se realizan en una intervención atmosférica, la diferencia es el procedimiento que se ejecuta y las medidas de seguridad establecidas con el personal especializado. Los criterios para realizar una intervención hiperbárica dependen de los parámetros de operación de la tuneladora y adicionalmente de las condiciones del frente de excavación.

Durante la etapa de excavación del tramo 3 del TEO se realizó únicamente una intervención hiperbárica; en el subtramo L11-L12, las razones fundadas que se aplicaron para realizar esta actividad se enlistan a continuación:

- Los valores máximos permisibles de los parámetros de operación son los mismos establecidos en una intervención atmosférica (fuerza de empuje y torque de la rueda de corte), estos parámetros se habían sobrepasado durante la excavación del anillo No.581 por lo cual era necesario realizar una inspección de las herramientas de corte.
- Las condiciones geológicas y geotécnicas que prevalecen en el Tramo 3, así como lo niveles freáticos existentes no previstos, particularmente en el sub tramo L11 a L12, generaron condiciones que afectaron al proceso de excavación, y por ende, para la revisión de las herramientas de corte para salvaguardar la integridad de la rueda de corte y de los propios cortadores, fue necesario realizar una intervención hiperbárica ya que las condiciones existentes de niveles freáticos imposibilitaba realizarla en un ambiente atmosférico.
- Como se aprecia en la **Figura 219**, el material del frente de excavación conciliado estaba compuesto 100% del tipo “Suelo” (arena fina, limo y arcilla).
- Durante el desfogue de la cámara de excavación se observó una aportación considerable de agua; gasto promedio de 250 litros por segundo, para lograr abatir esta aportación es necesaria la instalación de un sistema de bombeo en la tuneladora y en el fondo de lumbrera más complejo, lo que conlleva riesgos y tiempos de demora considerables, adicionalmente, siendo el sentido de la excavación igual al sentido del túnel se corre un enorme riesgo de inundación en caso de que el sistema de bombeo falle.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

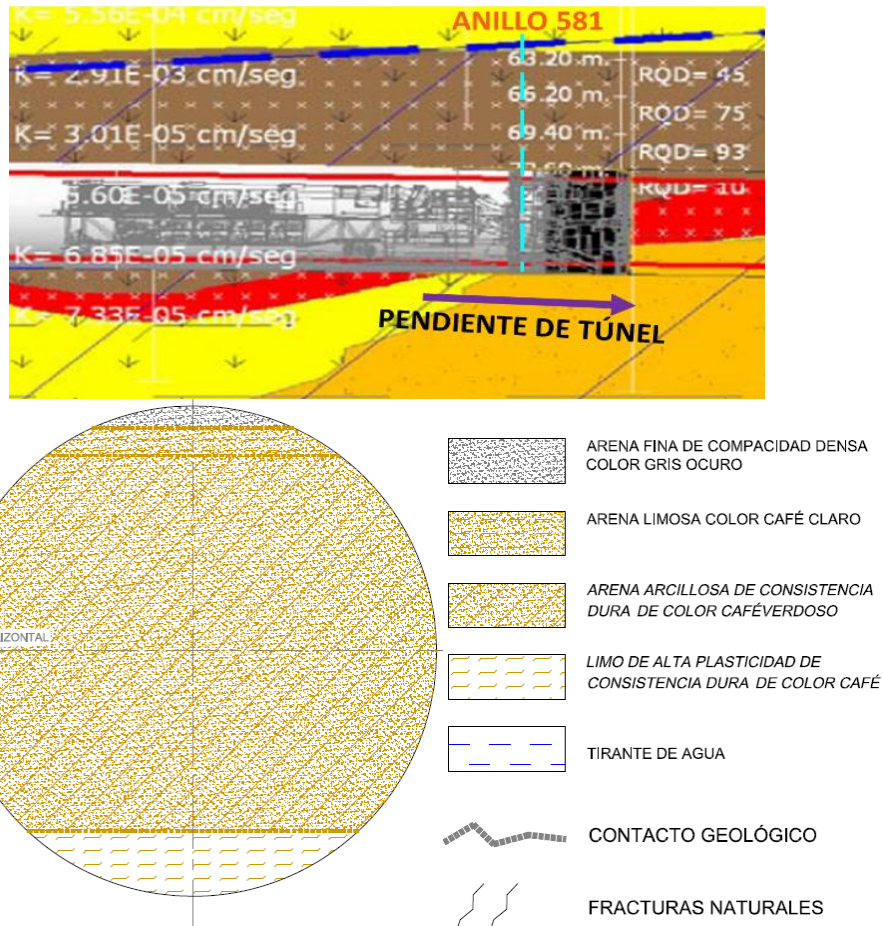


Figura 219. Condiciones del frente durante la excavación del anillo No. 581.

El procedimiento establecido para realizar una intervención hiperbárica integra procesos similares a los de la intervención atmosférica pero más especializados y su seguimiento se describe a continuación:

Reconocimiento de equipo. La mayoría de las tuneladoras y en especial la tuneladora “Hidalgo”, están equipadas con componentes diseñados para realizar una intervención hiperbárica, estos componentes se muestran de manera ilustrativa en la **Figura 220** y sus funciones se enlistan a continuación:

- Compresores de aire comprimido y respirable: ubicados en el primer gantry de la TBM, tienen la función de inyectar aire al interior de la cámara de excavación. Los compresores de aire respirable están equipados adicionalmente con un sistema SAMSON para regulación del caudal y control de presión de aire.
- Cámara hiperbárica principal: Es un compartimento de acero herméticamente cerrado que es sometido a un aumento de presión a la normal, está ubicado y conectado con la cámara de excavación, tiene dos compuertas laterales, la primera denominada “compuerta exterior” y la denominada “compuerta interior”. La función de esta cámara es someter de

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

forma gradual a una presión constante al personal especializado logrando que el organismo se adapte a la presión ejercida en el frente de excavación.

- Cámara gemela: Es un compartimento ubicado y conectado a la cámara principal, tiene la función de disminuir la presión ejercida en el cuerpo del personal que realiza los trabajos en el frente de excavación hasta lograr adaptar el organismo a la presión atmosférica, eliminado así el gas inerte disuelto en los tejidos del hiperbarista por medio de la respiración de oxígeno 100% medicinal. La oxigenación hiperbárica es un tratamiento que induce a procesos de estabilización y recuperación, estimulando las células de defensa y acelerando la regeneración celular.
- Cámara médica y de transporte. Es un compartimento móvil semejante a la cámara gemela, su función es transportar y dar atención medica con personal sometido a presión en caso de emergencia.

Todos estos componentes mencionados se deben verificar en cuanto a su funcionamiento y procedimientos de emergencia en caso de falla.

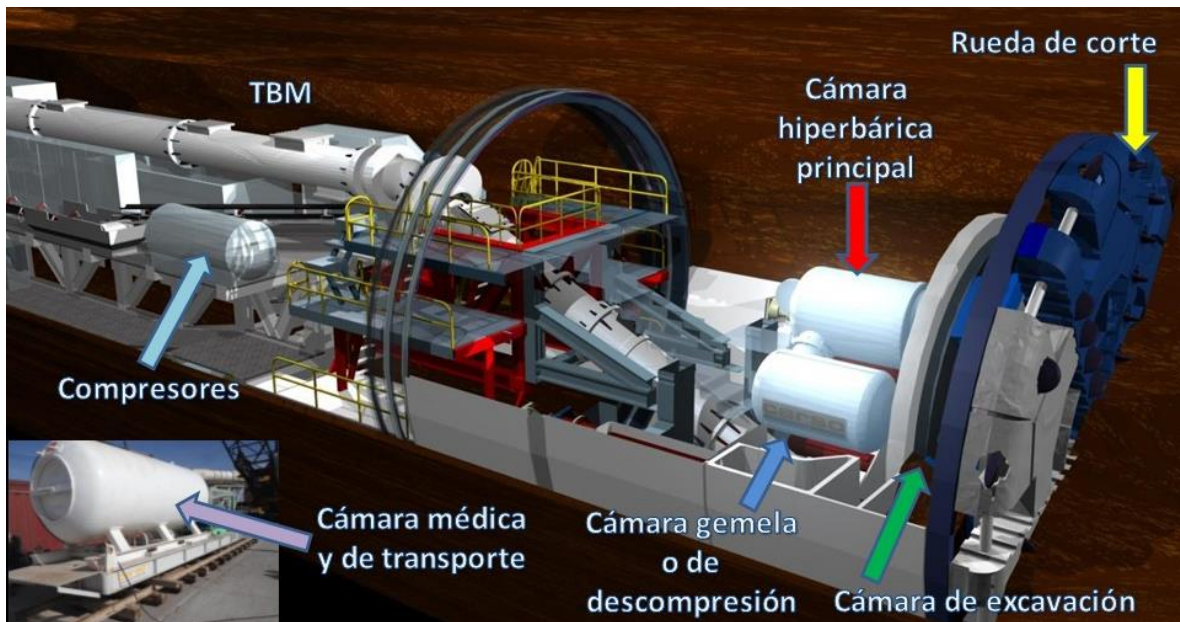


Figura 220. Equipo principal para intervenciones hiperbárica.

Estabilidad del frente de excavación. Las condiciones del frente de excavación son de suma importancia y asegurar su estabilidad permite realizar los trabajos de mantenimiento de la rueda de corte sin mayores incidencias. Cuando se trabaja en un medio hiperbárico se realiza la elaboración de una pantalla impermeable o “CAKE” a base de lodo bentonítico e inyección de aire comprimido como lo ilustra la **Figura 221**, la formación de esta pantalla además de estabilizar el frente, impide la filtración de agua al interior de la cámara funcionando como una burbuja para el ingreso del personal.

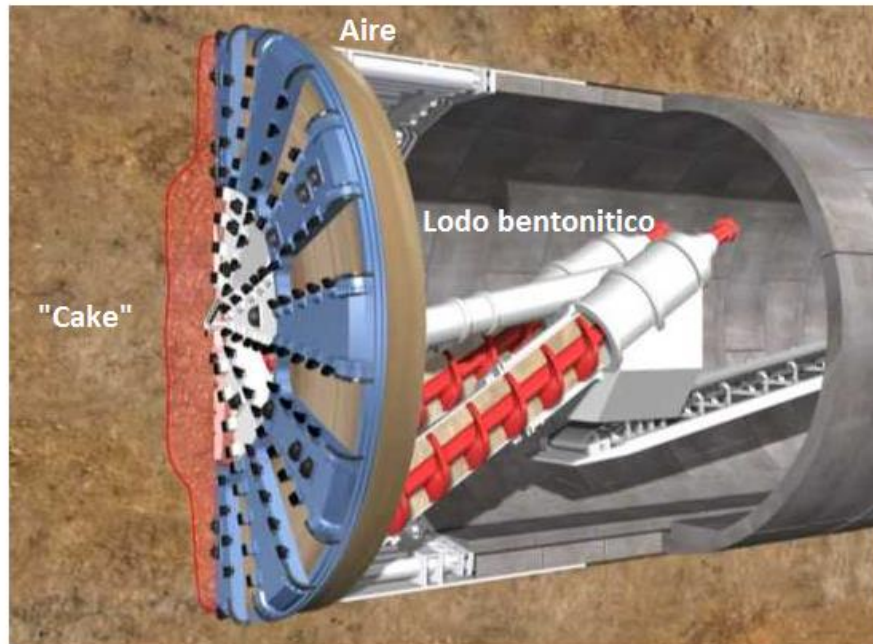


Figura 221. Elaboración del cake.

El proceso de formación del “Cake” se describe de la siguiente manera:

- Una vez establecido el paro programado se realiza el drenado de agua de la cámara de excavación a través de dos válvulas de desfogue superiores ubicadas en el mamparo de la TBM, manteniéndolas abiertas hasta que se obturen por la entrada de material con la finalidad de disminuir la presión hidráulica en dicha cámara. Posteriormente se debe realizar el empuje o excavación teniendo claro el objeto de sustituir el agua de la cámara por terreno del frente de excavación, avanzando la excavación sin extraer material por los tornillos hasta que se consiga sustituir la mayor cantidad posible de agua por terreno teniendo la cámara de excavación lo más llena posible.
- Se continua con la excavación de 1 o 2 anillos dependiendo del gradiente de presión medido entre los sensores de presión de tierra de la TBM entre la parte superior y la intermedia de la cámara de excavación, con los parámetros adecuados para el tipo de terreno a excavar, que en este caso es del tipo “Suelo”, inyectando la espuma necesaria para el acondicionamiento del terreno, grasa de cola y mortero. Observando en todo momento a la salida del tornillo sin fin el material excavado, como precaución de que no exista cualquier material extraño (scrapers, herramienta de corte, etc.) y el grado de humedad, con el objeto de calcular la cantidad de agua que aporta el frente de excavación. A su vez se debe de revisar el imán existente en el sistema de bandas de rezaga. La finalidad de la excavación de estos anillos es llenar la cámara de excavación y el tornillo sin fin de material, para desplazar el agua existente en la misma.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

- Se pone en funcionamiento el sistema “Samson”, (preferentemente equipado con un caudalímetro lo más cerca posible del mamparo, para controlar el posible consumo de aire en el frente de excavación), la presión de referencia se considera en $P1 = P + 0.2 \text{ bar} = 2.2 \text{ bar}$, existentes en la parte superior de la cámara de excavación.
- Sin girar la cabeza de corte se pone en marcha el tornillo sin fin y se extraen 45 toneladas de material, aproximadamente 28.6 m^3 (la densidad del material calculado comprende del orden de 1.6 ton/m^3), es decir, la mitad del material almacenado en la cámara, a la vez que se va inyectando lodo bentonítico al frente con las bombas putzmeister. Una vez evacuado este peso de material se sigue inyectando lodo hasta que $P1$ alcance el valor de la presión de trabajo correspondiente, más una sobrepresión de 0.4 bar ($P=P1+0.4 \text{ bar}$), girando la cabeza de corte a una velocidad de 0.5 rpm con el objetivo de que el lodo bentonítico rellene adecuadamente las fisuras del terreno.

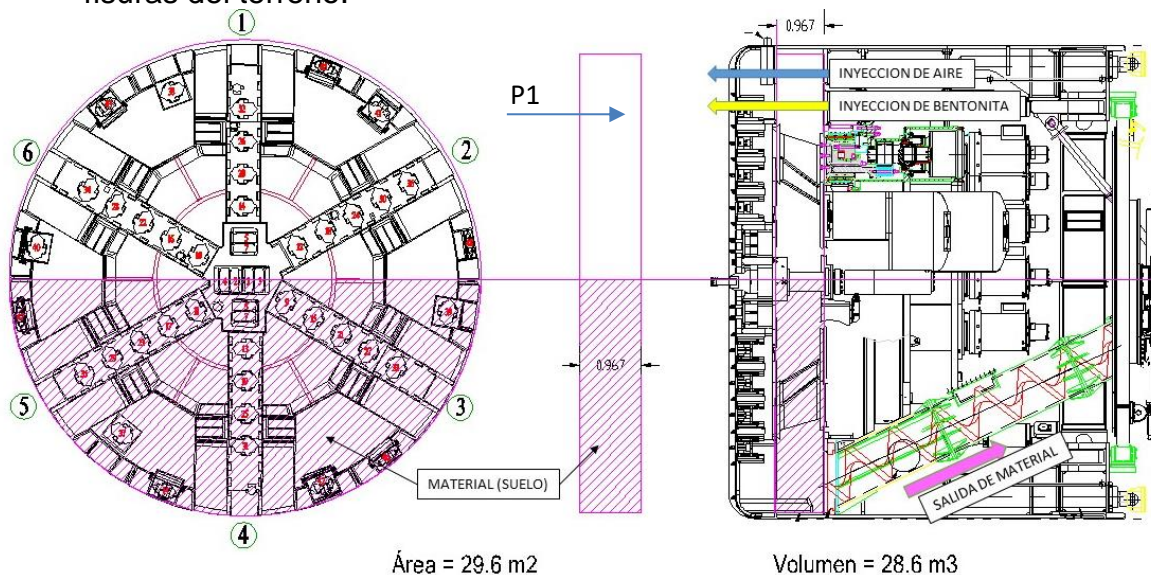


Figura 222. Volumen desalojado de material.

- Finalizada la extracción del material se detiene la rueda de corte, se baja el caudal de aire del sistema “Samson” a la presión de trabajo (2.2 bares) y se observa si hay pérdidas importantes de aire por el frente durante al menos 15 minutos mediante la observación de los sensores de presión y manómetros.
- Al igual que en la intervención atmosférica, se retrae la articulación 50 milímetros para dejar un espacio de trabajo en el frente, manteniendo la presión del frente con el lodo bentonítico por un periodo aproximado de 20 minutos y girando la rueda de corte a una velocidad de 0.5 r.p.m.
- Posteriormente se realiza el vaciado de la cámara de excavación mediante el tornillo sin fin hasta por debajo del nivel de la compuerta de la cámara hiperbárica. Este vaciado se hace lentamente y siempre observando el caudal de entrada de aire que suministra el sistema “Samson”. Se

comprueba que el nivel de material haya bajado por debajo de la compuerta de la cámara hiperbárica principal, abriendo la válvula situada por debajo de este nivel, observando el material que sale (bentonita o suelo). Debe controlarse la cantidad de material extraído comparándolo con la presión observada en el frente, para detectar posibles sobrexcauciones, así mismo, debe de observarse las posibles fluctuaciones de presión en todos los manómetros de presión durante toda la operación con el objetivo de encontrar posibles anomalías en el frente (inestabilidad, vías de agua).

- Una vez que se ha bajado el nivel de material y que no existen problemas con pérdidas de aire en el frente (de 2 a 4 horas observando si hay consumo de aire o pérdida de presión), se baja la presión en la cámara con el sistema “Samson” a la establecida para la entrada de los técnicos en trabajos hiperbáricos. La **Figura 223** muestra de manera gráfica el resultado del proceso de elaboración del “cake”.

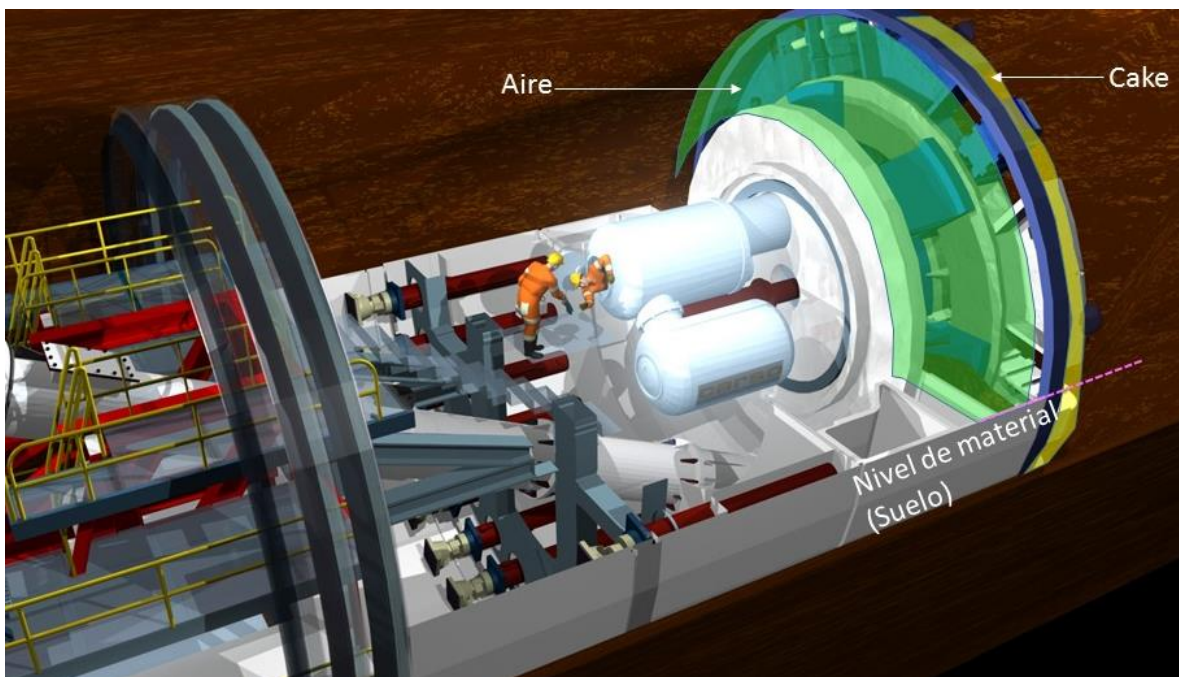


Figura 223. Resultado durante la elaboración del cake.

Características del lodo bentonítico. El lodo bentonítico es fabricado en obra con ayuda de la planta dosificadora, para posteriormente ser suministrado a la TBM con apoyo de los contenedores móviles de eje helicoidal y locomotoras.

Las características del material utilizado para la fabricación del lodo bentonítico son las siguientes:

- Bentonita PSC sódica pulverizada a 200 mallas.
- Capacidad de desarrollo de viscosidad.
- PH (suspensión al 5%) de 8.0 a 10.0.
- Hinchamiento libre 26 cc Min.
- Agua potable.

La dosificación base utilizada es de 150 kilogramos de bentonita por 1000 litros de agua con una viscosidad >50 segundos, medida y monitoreada mediante la prueba "Marsh".

Presión de confinamiento en el frente de excavación. Durante la excavación de los anillos anteriores al paro programado y durante el llenado de la cámara de excavación, la presión relativa necesaria para equilibrar la carga hidrostática del frente de excavación se mantuvo en el margen de 2.03 bares, por lo cual se eligió este valor como la presión de confinamiento a la estarán sometidos los hiperbaristas o comúnmente denominados buzos.

$$P_c = 2.03 \text{ bares}$$

Personal hiperbarista, material y equipo de protección. Para realizar una intervención hiperbárica es necesario contar con personal calificado; hiperbaristas profesionales o buzos, los cuales cumplen una determinada planeación y organización de trabajo, las funciones del personal involucrado son:

- **Jefe de operaciones hiperbáricas.** Designado por el Superintendente de TBM, supervisa todas las intervenciones hiperbáricas en curso, y participa en otras actividades sobre la obra, debe estar disponible inmediatamente en caso de urgencia para conducir las operaciones. Con conocimiento de los procedimientos de intervenciones normales y de emergencia. Prepara la operación, decide la ejecución y tiene toda autoridad en decidir la interrupción o adoptar todas las medidas urgentes que una situación anormal podría implicar. Garantiza que durante toda la duración de la intervención hiperbárica ningún trabajo sea incompatible con la seguridad de las personas que trabajan bajo presión.
- **Jefe de cámara o supervisor.** El jefe de cámara es el supervisor de las operaciones. Se designa por el jefe de operaciones hiperbáricas para supervisar una operación en curso y realizar las maniobras de recompresión si una o más operaciones son necesarias. No puede ejercer otras actividades hasta el final de la operación hiperbárica a la cual se afecta exclusivamente. El jefe de la cámara deberá haber adquirido las competencias necesarias correspondientes a su puesto. Su nombre debe figurar en la hoja de intervención, debe por otra parte llenar el registro de jefe de cámara para cada intervención. No es necesariamente apto médicamente en los trabajos Hiperbáricos. El jefe de cámara tiene la autoridad sobre todas las personas que se encuentren en situación hiperbárica, cualquiera que sea el nivel jerárquico de esta persona se coloca bajo las órdenes directas del jefe de operaciones hiperbáricas.
- **Trabajadores en medios Hiperbáricos (hiperbaristas).** Personal capacitado con formación para los trabajos hiperbáricos, esta formación les da los siguientes conocimientos elementales:
 - Beneficios de la utilización del aire comprimido.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

- Conocimientos básicos en la física (presión, unidades, etc.)
- Conocimientos fisiológicos básicos (respiración, circulación, control térmico, gases disueltos en la sangre).
- Consecuencias sobre el cuerpo de las estancias en medio hiperbárico (barotraumatismo, efecto de fuertes presiones parciales de gas, problemas vinculados a la descompresión).
- Riesgos de incendio en medio hiperbárico y medio de intervención
- Accidente laboral en medio hiperbárico (normas de seguridad).
- Síntomas de los desórdenes específicos (oreja y seno, efecto de la toxicidad de los gases, ayuda como medio hiperbárico, principios de descompresión urgentes).
- Cortar, moler y soldar con autógena en medio hiperbárico (normas de seguridad asociadas).
- Operaciones de cámara, comunicación, apertura de las puertas, de acceso al frente de excavación, procedimiento de compresión y conocimientos generales sobre la lucha anti incendio en medio hiperbárico.
- Todos los trabajadores deben estar en posesión de un certificado médico que los autoriza a trabajar en medio hiperbárico.
- La visita médica consiste en:
 - Examen radiográfico de los pulmones, hombros y caderas.
 - Examen sanguíneo.
 - Prueba al esfuerzo (pulsación cardíaca).
 - Prueba auditiva.
 - Evaluación general por doctor especialista hiperbárico para un certificado médico o para una actividad física en medio hiperbárico.
- **Hiperbarista de seguridad.** Es un trabajador hiperbárico. Se designa por el jefe de operación hiperbárico antes de cada intervención entre las personas habilitadas. Está en condiciones de ayudar a los trabajadores hiperbáricos por orden del jefe de cámara.
- **Electromecánico.** Está a cargo del buen funcionamiento de la producción de aire comprimido. Debe permanecer sobre el lugar a lo largo de la intervención hiperbárica. Debe garantizar el mantenimiento diario, el mantenimiento preventivo y las pruebas de los materiales interesados en la producción de aire comprimido. Deben sustituirle en caso de enfermedad.
- **Médico.** Debe ser apto a proporcionar un dictamen médico profesional sobre todo problema relativo en los trabajos hiperbárico que pueden ocurrir. Debe por otro lado:
 - Poder comprimirse en la cámara de recompresión urgente durante la recompresión de un trabajador,
 - Acostumbrarse a la utilización del oxígeno durante la recompresión (aunque la descompresión se realiza al aire),
 - Conocer las tablas de descompresión en uso sobre la obra.
 - Estará en condición física suficiente para soportar la presurización y deberá además haberse familiarizado con los equipamientos utilizados sobre la obra (cámara y cajón de recompresión).

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

- En función de las frecuencias de intervención hiperbárica y de las especificaciones de la obra, el director del Proyecto podrá recurrir a distancia al Hospital General Naval de Alta Especialidad; México D.F.
- **Número máximo de hiperbaristas admitidos en la cámara hiperbárica.**
2 hiperbaristas en el frente de excavación y 1 hiperbarista en la compuerta interior de la cámara hiperbárica.

Proceso de compresión de buzos. La compresión de los buzos se efectúa en el interior de la cámara hiperbárica principal con el objetivo es ecualizar las presiones de las cámaras (principal y excavación), se realiza bajo el control del jefe de cámara hiperbárica, con ayuda de una válvula de compresión interna para inyección de aire respirable. La velocidad de compresión es lenta y se hace de modo que ningún hiperbarista experimente malestar. En el primer minuto que inicia la compresión, la presión aumenta hasta 0.35 bar, posteriormente la presión aumenta con una velocidad máxima de 1 bar/min hasta alcanzar la ecualización de presiones.

En caso de sensación de malestar en los oídos de alguno de los hiperbaristas la compresión se para inmediatamente y la presión ligeramente disminuida hasta que el hiperbarista en cuestión pueda restablecer el equilibrio de las presiones y aliviar su dolor. Informa al jefe de la cámara por medio del intercomunicador de la cámara. La compresión puede reanudarse 2 minutos después de que la sensación de malestar se haya detenido. Si el dolor reaparece, entonces se debe cancelar la intervención, retirar al hiperbarista y someterlo a examen médico.

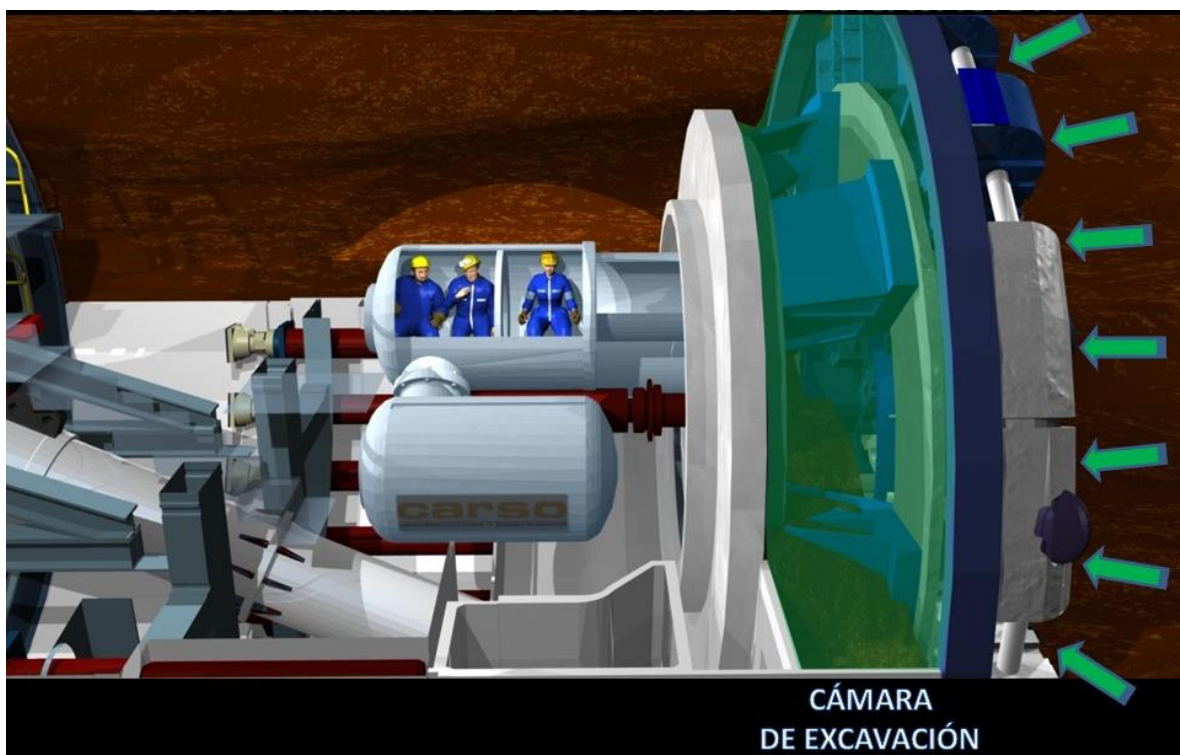


Figura 224. Ecualización de presiones.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

Trabajos de mantenimiento. Los trabajos de mantenimiento referentes a la rueda de corte son los mismos establecidos durante una intervención atmosférica para el caso de cambio de herramienta.

Tiempo efectivo de trabajo en la cámara de excavación. El tiempo efectivo de trabajo dentro de la cámara de excavación depende primordialmente de la cantidad de presión a la que se someten los buzos, para estimar este tiempo se consulta una tabla de tiempo de trabajo y descompresión como la observada en la **Figura 225**, en ella se establece la mezcla de aire y el tiempo de trabajo permisible dependiendo de la cantidad de presión de confinamiento a la que estará sometido el buzo. Entre mayor sea la presión de trabajo mayor es el tiempo que el cuerpo humano necesita para eliminar el nitrógeno acumulado en la sangre.

Considerando una presión de trabajo de 2.03 bares, se obtiene un tiempo de trabajo de 2 horas 00 minutos, los tiempos efectivos obtenidos durante la intervención hiperbárica realizada en el tamo 3 del TEO fueron en promedio de 110 minutos, lo cual deriva en establecer más cuadrillas de trabajo para el ingreso a la cámara de excavación.

Presión [bar] al nivel del mar	Mezcla de trabajo	Tiempo de trabajo (<75 minutos de descompresión)	Tiempo de descompresión (menos de 75 minutos)	Tiempo máximo de trabajo	Tiempo de descompresión (minutos)	Metodo de descompresión	Tiempo máximo total de intervención
1.65	Aire	4h 00m	73	4h 30m	88	Oxígeno	5h 58m
1.80	Aire	3h 00m	68	4h 00m	98	Oxígeno	5h 38m
1.95	Aire	2h 30m	59	4h 00m	119	Oxígeno	5h 59m
2.10	Aire	2h 00m	54	3h 30m	121	Oxígeno	5h 31m
2.40	Aire	1h 30m	55	3h 00m	134	Oxígeno	5h 14m
2.70	Aire	1h 00m	46	2h 30m	145	Oxígeno	4h 55m
3.00	Aire	1h 00m	52	2h 30m	190	Oxígeno	5h 40m
3.30	Aire	1h 00m	65	1h 30m	124	Oxígeno	3h 34m
3.60	Aire	45m	51	1h 30m	147	Oxígeno	3h 57m
3.90	Aire	45m	64	1h 30m	180	Oxígeno	4h 30m
4.20	Aire	30m	48	1h 00m	121	Oxígeno	3h 01m
4.50	Aire	30m	56	1h 00m	142	Oxígeno	3h 22m
4.80	Aire	30m	59	1h 00m	165	Oxígeno	3h 45m
5.00	Trimix	20m	46	1h 30m	279	Oxígeno	6h 09m
5.50	Trimix	20m	56	1h 30m	305	Oxígeno	6h 35m
6.00	Trimix	20m	65	1h 20m	310	Oxígeno	6h 30m
6.50	Trimix	20m	72	1h 20m	367	Oxígeno	7h 27m

Figura 225. Tabla para estimar el tiempo máximo de trabajo en un medio hiperbárico.

Proceso de descompresión. Finalizado el tiempo establecido dentro de la cámara de excavación, el equipo de buzos regresa a la cámara de principal y se realiza el cierre de compuertas, una vez dentro de la cámara hiperbárica se inicia el proceso de descompresión mediante un método denominado “**descompresión en superficie con oxígeno**” o “**SurD02**” extraído del **Manual de buceo de la Marina de E.U., Volumen 2 Operaciones de Buceo con Aire, Capítulo 9 Descompresión con aire.**

Los buzos que son sometidos a una presión de confinamiento absorben en el cuerpo una cierta cantidad de nitrógeno durante cada inmersión (entrada a la cámara de excavación). Dicha cantidad depende de la presión de confinamiento de la inmersión y del tiempo de trabajo, por lo que para eliminar el nitrógeno del cuerpo humano se debe someter a tiempos de descompresión hasta alcanzar de nuevo la presión atmosférica. El seguimiento de este proceso se basa en valores establecidos en una tabla de descompresión, en donde se indican el tiempo y los periodos de descompresión mediante la respiración de aire y oxígeno hasta lograr eliminar del cuerpo del buzo todo el nitrógeno absorbido.

De manera general, el proceso de descompresión establecido durante la intervención realizada en el Tramo 3 del TEO es una técnica que primeramente descomprime al buzo desde la presión de confinamiento hasta una presión de 40 pies agua de mar (PAM) equivalente a 1.20 bares, utilizando únicamente aire, posteriormente se descomprime al buzo con aire y hasta la presión atmosférica (de 40 PAM a 0 PAM), todo esto realizado en la cámara principal.

Una vez alcanzada la presión de 0 PAM, el buzo sale de la cámara principal para retirarse el equipo de seguridad y asearse, posteriormente ingresa a la cámara gemela en donde se recomprime hasta una presión de 50 PAM y se le realizan periodos de descompresión mediante la respiración de oxígeno medicinal hasta alcanzar nuevamente la presión atmosférica (0 PAM).

Ciclo de trabajo en medio hiperbárico. La intervención hiperbárica se puede definir como un conjunto de inmersiones o ciclos de trabajo que se obtienen sumando todos los tiempos de compresión y descompresión a los que es sometido el buzo que realiza los trabajos de mantenimiento en la rueda de corte.

En la intervención realizada en el Tramo 3 del TEO fue necesario realizar un total de 136 inmersiones para cambiar las herramientas que permitieran continuar el proceso de excavación. En la **Figura 226** se muestra el registro del ciclo de trabajo realizado durante la inmersión No.4, en donde se asentaron los tiempos reales de trabajo de una cuadrilla de buzos.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

SSI DIVING SERVICES		FORMATO DE INTERVENCIÓN HIPERBÁRICA TEO TRAMO III							COMISSA	
FECHA: 18 Octubre de		INMERSIÓN : #4			TIPO DE INTERVENCIÓN: AIRE					
HIPERBARISTA 1: MARCIAL VÁZQUEZ CAMPOS		HIPERBARISTA 2: MANUEL CARRILLO CÁRDENAS			HIPERBARISTA 3: MARTIN SOLARO SOLIS					
SUPERVISOR: MARIO PORO PALACIOS MANUBES		MEZCLA DE FONDO: AIRE								
PRESIÓN SAMSON 1.84 bar		PRESIÓN DE TRABAJO 2.03 bar			PRESIÓN CON CORRECCIÓN 2.81 bar			EVENTO		HORA [hh:mm]/TIEMPO [minutos]
PARADAS DE DESCOMPRESIÓN EN CÁMARA PRINCIPAL [minutos]							(a) HORA DE INGRESO A CÁMARA		11:33	
TIEMPO DE FONDO	(g) TIEMPO 1er ASCENSO	MEZCLA DE FONDO	(h) TIEMPO DE RESPIRACIÓN DE AIRE O MEZCLA DE GASES [50% OXÍGENO/50% HELIO]				100% OXIGENO	(b) HORA DE APERTURA DE COMPUERTA INTERIOR		11:36
								(c) TIEMPO DE PRESURIZACIÓN (b)-(a)		3 minutos
MINUTOS	MIN/SEG	3.06 BAR [100 PAM]	2.76 BAR [90 PAM]	2.45 BAR [80 PAM]	2.34 BAR [70 PAM]	1.83 BAR [60 PAM]	1.53 BAR [50 PAM]	1.23 BAR [40 PAM]	PERIODOS NECESARIOS EN CÁMARA GEMELA	(d) HORA SELLO DE COMPUERTA EN CÁMARA DE EXCAVACIÓN
110 min.	2 minutos	-	-	-	-	-	-	14 minutos	3.5	(e) TIEMPO EFECTIVO DE TRABAJO EN CÁMARA DE EXCAVACIÓN (d)-(b)
TIEMPO CAMBIO DE CÁMARA (0 PAM)		3.5 minutos	TIEMPO ASCENSO A 50 PAM		0.5 minutos	(i) TIEMPO DE DESCOMPRESIÓN CON AIRE O MEZCLA DE GASES		4 minutos	(f) TIEMPO EN PRESIÓN DE TRABAJO (c)+(e)	100 minutos
PARADAS DE DESCOMPRESIÓN EN CÁMARA GEMELA [minutos]							HORA DE TERMINO [hh:mm]			
PRESIÓN EN CÁMARA		TIEMPO DE PARADA [minutos]			HORA DE INICIO [hh:mm]		HORA DE TERMINO [hh:mm]		(k) TIEMPO TOTAL DE DESCOMPRESIÓN (g)+(h)+(i)+(f)	145 minutos
1.56 BAR (50 PAM)		15 minutos			13:33		13:48		TIEMPO TOTAL DE INMERSIÓN (f)+(k)	245 minutos
1.23 BAR (40 PAM)		105 minutos			13:48		15:33			
DE 1.23 BAR A 0		5 minutos			15:33		15:38			
(j) TIEMPO DE DESCOMPRESIÓN CON OXIGENO		125 minutos								
DESCRIPCIÓN DE LA INMERSIÓN: SE REALIZA E INSPECCIÓN DEL HOUSING Y DISCO CORTADOR #48, PRESENTA DESGASTE DE 13 mm Y ARO PRINCIPAL ROTO.										

Figura 226. Registro de la inmersión #4 realizada durante la intervención hiperbárica.

Del registro anterior se desprende el ciclo de trabajo que se muestra en la **Figura 229**, en donde de manera gráfica se observan los tiempos y la cantidad de presión a los que fue sometido la cuadrilla de trabajo.

IV.3.3. Ciclo de trabajo de la intervención hiperbárica realizada en el tramo 3 del TEO.

Para explicar de manera más específica el ciclo de trabajo del medio hiperbárico, se describirá a continuación el seguimiento que se realiza para obtener los valores de tiempo y presión:

Obtención del tiempo de presurización inicial de 0 a 2.01 bar o 69 PAM (Tpi). Una vez ingresada la cuadrilla de trabajo (buzos) a la cámara principal y cerrada la compuerta exterior (sellado) se da inicio al ciclo hiperbárico. El equipo de buzos se comprime o presuriza mediante la inyección aire durante un primer minuto hasta alcanzar una presión de 0.35 bares, posteriormente la presión aumenta con una velocidad máxima de 1 bar/min hasta llegar a los 2.01 bares o 69 PAM que es la presión de ecualización entre la cámara principal y la cámara de excavación.

En el registro de la inmersión No.4 de la Figura 226 se tiene un tiempo de compresión de 3.0 minutos el cual está indicado como “TIEMPO DE PRESURIZACIÓN”.

$$T_{pi} = 1 \text{ minuto [de 0 a 0.35 bares]} + 1.75 \text{ minutos [de 0.35 a 2.03 bares]}$$

$$T_{pi} = 2.75 \text{ minutos} \cong 3 \text{ minutos}$$

Es importante destacar que, por el tipo de trabajo realizado, el tiempo siempre se debe redondear a minutos completos del próximo superior.

Obtención del tiempo efectivo de trabajo en cámara de excavación (T_{eft}).

Después de la ecualización de presiones, se realiza la apertura de la compuerta interior de la cámara principal y se inician los trabajos de mantenimiento de la rueda de corte. Como anteriormente se mencionó el tiempo efectivo de trabajo se establece en base al valor de la presión de confinamiento que en este caso es de 2.01 bar, por lo cual, si se observa la tabla de la Figura 225, el tiempo de trabajo máximo no debe sobrepasar las 2 horas 00 minutos.

En el registro de la inmersión No.4 de la Figura 226 se indica como “TIEMPO EFECTIVO DE TRABAJO EN CÁMARA DE EXCAVACIÓN” una duración de 97 minutos, este valor considera el lapso de tiempo ocupado para el mantenimiento de la rueda, el lapso de tiempo para el repliegue de los buzos a la cámara y el instante en el que se cierra compuerta interior.

$$T_{eft} = 97 \text{ minutos.}$$

Obtención del tiempo descompresión con aire (T_{da}). El método “SurD02” establece que inicialmente se debe despresurizar al buzo desde la presión de confinamiento hasta la presión atmosférica utilizando aire comprimido debido a que la herramienta y los buzos entran con residuos de grasa industrial impregnados, entendiéndose que la grasa en presencia de oxígeno causa explosión. Así mismo establece que se debe despresurizar al buzo primeramente hasta los 40 PAM utilizando tiempos de “ascenso” y “parada” de descompresión indicados en una tabla obtenida del **Manual de Buceo de la Marina de E.U.**, para posteriormente despresurizarlo hasta los 0 PAM a una velocidad de 40 PAM/min, la elección de esta tabla depende de un **tiempo de fondo** y **la presión de trabajo corregida**. Un “ascenso” de descompresión es un lapso de tiempo máximo que se utiliza para despresurizar al buzo y una “parada” de descompresión es un lapso de tiempo a presión constante que debe realizarse para permitir la eliminación progresiva del nitrógeno disuelto en el organismo del hiperbárista.

Este modo de descompresión tiene una enorme ventaja debido a que una vez que el buzo salga de la cámara principal se puede asear para posteriormente ingresar a la cámara de descompresión o cámara gemela y así continuar su proceso de descompresión, dando la posibilidad de extraer la herramienta de corte sustraída e la cámara de excavación, limpiar la cámara principal e iniciar nuevamente el proceso de presurización de la siguiente cuadrilla de trabajo, en la **Figura 227**, se muestra este modo de trabajo mencionado.

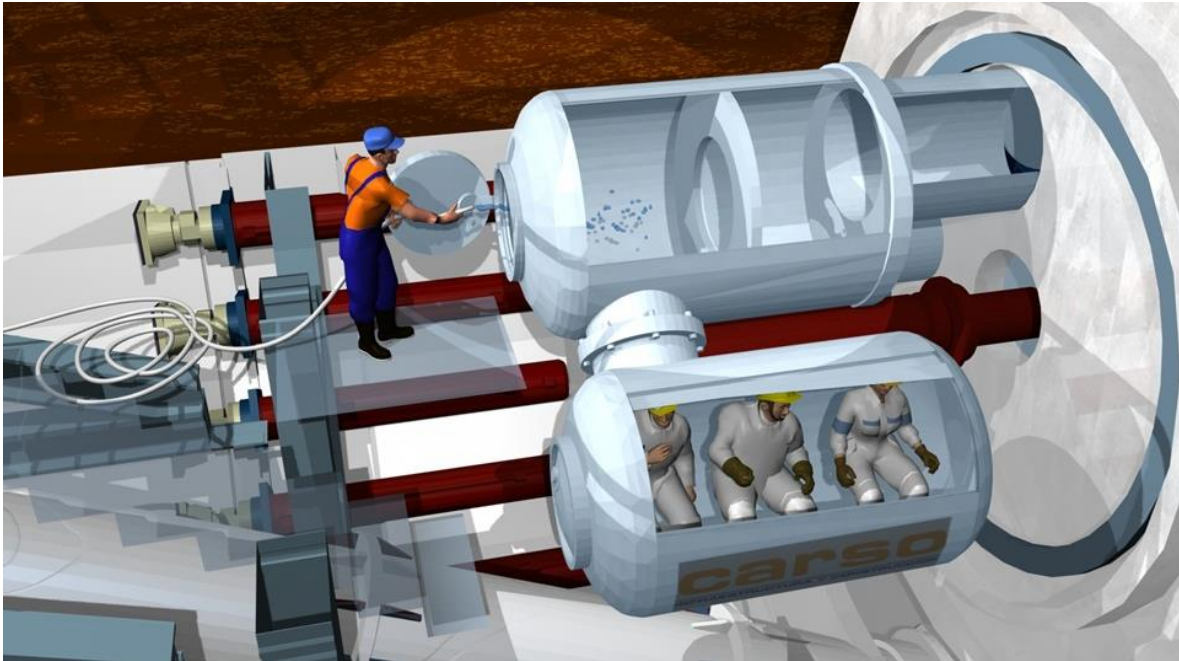


Figura 227. Descompresión de buzos en cámara gemela y limpieza de cámara principal.

Considerando la inmersión en estudio se tiene que la obra del TEO se encuentra a una altitud aproximada de 2 200 m.s.n.m. a esta altitud la presión atmosférica es de 0.78 bar, la “**presión de trabajo corregida**” se calcula adicionando el valor de la presión atmosférica a la presión de confinamiento:

$$P_{tc} = \text{Presión de confinamiento} + \text{Presión atmosférica} = 2.03 + 0.78 = 2.81 \text{ bar}$$
$$P_{tc} = 2.81 \text{ bar} = 94 \text{ PAM} \cong 100 \text{ PAM}$$

Con este valor se selecciona la tabla de descompresión que se muestra en la **Figura 228**, en donde los números de la columna denominada “**Bottom Time**” indican valores de duración de un tiempo denominado “tiempo de fondo”, los valores de las columnas “**Time to first stop**” y “**Decompression stops**” indican los lapsos de tiempos del primer “ascenso” y “parada” respectivamente; la suma de estos dos valores son los que se utilizan para obtener el **tiempo de descompresión con aire**.

El “tiempo de fondo” es el lapso de tiempo total desde el inicio de la presurización o compresión del personal en la cámara principal hasta el abandono de la cámara de excavación y sello de la compuerta interior para dar paso al inicio del proceso de descompresión, este tiempo es de suma importancia debido a que de ello dependen los tiempos de ascenso y parada de descompresión.

En la inmersión en estudio, se tiene un tiempo de fondo calculado de 100 minutos, el cual es la suma del “T_{pi}” más el “T_{eft}”, el cual está indicado en la Figura 226, como “TIEMPO EN PRESION DE TRABAJO”.

Si consideramos el tiempo de fondo anteriormente obtenido se debe de tener especial cuidado al momento de elegir los valores de la tabla, se puede afirmar que en este caso el valor es parcial, es decir no se contemplan los segundos transcurridos después de los 100 minutos, por lo cual este valor debe ser redondeado al minuto próximo superior, obteniendo así un tiempo de fondo corregido de 110 minutos.

Con el valor corregido se obtiene un tiempo de primer “ascenso” hasta los 40 PAM de 2 minutos, así mismo se obtiene el tiempo de la primer “parada” a 40 PAM el cual es de 14 minutos en donde se incluye el tiempo del segundo “ascenso” que se realiza a una velocidad de 40 PAM/min para alcanzar la superficie o 0 PAM.

El tiempo total de descompresión con aire se calcula sumando los tiempos parciales obtenidos de la tabla:

$$***T_{da} = 2 \text{ min} + 14 \text{ min} = 17 \text{ minutos.}***$$

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

Table 9-9. Air Decompression Table (Continued).
(DESCENT RATE 75 FPM—ASCENT RATE 30 FPM)

Bottom Time (min)	Time to First Stop (M:S)	Gas Mix	DECOMPRESSION STOPS (FSW) Stop times (min) include travel time, except first air and first O ₂ stop								Total Ascent Time (M:S)	Chamber O ₂ Periods	Repet Group			
			100	90	80	70	60	50	40	30				20		
100 FSW	25	3:20	AIR									0	3:20	0	H	
			AIR/O ₂									0	3:20			
30	2:40	AIR									3	6:20	0.5	J		
			AIR/O ₂								2	5:20				
35	2:40	AIR									15	18:20	0.5	L		
			AIR/O ₂								8	11:20				
In-Water Air/O ₂ Decompression or SurDO ₂ Recommended																
40	2:40	AIR									26	29:20	1	M		
			AIR/O ₂								14	17:20				
45	2:40	AIR									36	39:20	1	N		
			AIR/O ₂								19	22:20				
50	2:40	AIR									47	50:20	1	O		
			AIR/O ₂								24	27:20				
55	2:40	AIR									65	68:20	1.5	Z		
			AIR/O ₂								28	31:20				
60	2:40	AIR									81	84:20	1.5	Z		
			AIR/O ₂								33	35:20				
Exceptional Exposure: In-Water Air Decompression ----- In-Water Air/O ₂ Decompression or SurDO ₂ Required -----																
70	2:20	AIR									11	124	138:00	2	Z	
			AIR/O ₂								6	39	53:00			
80	2:20	AIR									21	160	184:00	2.5	Z	
			AIR/O ₂								11	45	64:00			
90	2:00	AIR									2	28	196	228:40	2.5	
			AIR/O ₂								2	15	52	82:00		
Exceptional Exposure: In-Water Air/O ₂ Decompression ----- SurDO ₂ Required -----																
100	2:00	AIR									9	28	241	280:40	3	
			AIR/O ₂								9	14	66	102:00		
110	2:00	AIR									14	28	278	322:40	3.5	
			AIR/O ₂								14	15	75	117:00		
120	2:00	AIR									19	28	324	373:40	4	
			AIR/O ₂								19	15	84	136:00		
Exceptional Exposure: SurDO ₂ -----																
150	1:40	AIR									3	26	46	461	538:20	5
			AIR/O ₂								3	26	24	108	183:40	

Figura 228. Tabla de descompresión para una presión de confinamiento de 100 PAM.

Obtención del tiempo en superficie (Ts). Una vez alcanzados los 0 PAM la cuadrilla de buzos sale de la cámara principal para retirarse los aparatos de respiración, asearse y cambiarse de ropa, para esto cuentan con un lapso de tiempo de aproximadamente tres y medio minutos, posteriormente ingresan a la cámara gemela para ser nuevamente presurizados con aire hasta los 50 PAM a la máxima velocidad de compresión que es de 100 PAM/min, es decir, en un lapso de tiempo de 0.5 minutos.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

El tiempo en superficie es la suma de lapsos de tiempo ocupados desde el momento en que el buzo sale de la cámara principal hasta el momento en que se recomprime a 50 PAM en la cámara gemela. Un intervalo en superficie normal no debe exceder 5 minutos sin incurrir en una penalización.

Considerando los criterios mencionados, el tiempo en superficie para la inmersión en estudio es:

$$T_s = 3.5 \text{ min} + 0.5 \text{ min} = 4 \text{ minutos}$$

Una vez que los buzos están en la cámara gemela, se procede inmediatamente a la limpieza imperativa de la cámara principal, se sacan los trajes sucios de lodo, el agua y las botas; las mascarillas se limpian y se desinfectan, se levantan los pisos de los compartimentos de la cámara y con una manguera de agua a presión se lava la cámara desde arriba hacia abajo, tratando de que todo residuo y suciedad se acumule en la parte baja de la cámara para abrir las válvulas de drenaje y extraer todo lo acumulado, esto se repite dos veces. El fango, el sudor y el calor contenidos en la cámara principal causan un ambiente de cultivo para bacterias y hongos el cual podría causar una inflamación timpánica y una obstrucción en las trompas de Eustaquio (conducto que comunica oídos con garganta); que es el conducto principal en la cabeza que proporciona la ecualización de presión entre el exterior y el interior del cuerpo humano. De no haber esta ecualización se romperían los tímpanos y quedarían los buzos fuera de trabajo por 45 días aproximadamente, además que las bacterias y hongos se alojan en la piel de las manos, axilas y coyunturas de los pies que causa escoriaciones y dermatitis. De no prevenir las afecciones citadas, los equipos de buceo (hiperbaristas) quedarían infectados y en 72 horas quedarían inhabilitados.

Obtención del tiempo de descompresión con oxígeno (Tdo). Una vez llegado a la presión de 50 PAM, se le suministra oxígeno medicinal al buzo mediante una mascarilla y en periodos de 30 minutos, y medios periodos de 15 minutos, el total de periodos se indican en la columna “**Chamber O2 periods**” de la Figura 232. El primer periodo consiste de 15 minutos de respiración con oxígeno a 50 PAM seguido de 15 minutos con oxígeno a 40 PAM, en este periodo se incluye el tiempo de ascenso. Los periodos subsecuentes son realizados a la presión de 40 PAM, si se requieren más de 4 periodos, los periodos restantes son realizados a 30 PAM. La velocidad de ascenso es de 30 PAM/min, el ascenso desde 40 a 30 PAM, si es requerido debe tomar lugar durante un rompimiento con aire.

Un rompimiento de aire es un intervalo de tiempo de respiración con aire después de cada 30 minutos de los periodos de respiración con oxígeno. Este tiempo con aire es considerado tiempo muerto y su duración es de 5.0 minutos. Cuando el último periodo con oxígeno ha sido completado, se regresa al buzo a respirar aire de la cámara y se despresuriza hasta los 0 PAM a una velocidad de 30 PAM/min o en un lapso de 5 minutos.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

Observando nuevamente la Figura 226, se tiene que para la inmersión en estudio se realizaron un total de 3.5 periodos, los cuales están indicados en la Figura 228 como “PERIODOS NECESARIOS EN CAMARA GEMELA”.

El cálculo del tiempo de descompresión con oxígeno se realiza de la siguiente manera:

$$Tdo = P_1O + R_1 + P_2O + R_2 + P_3O + R_3 + P_{3.5}O + D_{atm}$$
$$Tdo = 30 + 5 + 30 + 5 + 30 + 5 + 15 + 5 = \mathbf{125 \text{ minutos}}$$

En donde:

P_1O ; es el primer periodo de respiración con oxígeno, su duración es de 30 minutos (15 minutos a 50 PAM y 15 minutos a 40 PAM).

R_1 ; es el primer rompimiento de respiración con aire a 40 PAM, su duración es de 5 minutos.

P_2O ; es el segundo periodo de respiración con oxígeno a 40 PAM, su duración es de 30 minutos.

R_2 ; es el segundo rompimiento de respiración con aire a 40 PAM, su duración es de 5 minutos.

P_3O ; es el tercer periodo de respiración con oxígeno a 40 PAM, su duración es de 30 minutos.

R_3 ; es el tercer rompimiento de respiración con aire a 40 PAM, su duración es de 5 minutos.

$P_{3.5}O$; es el cuarto periodo de respiración con oxígeno a 40 PAM, solo que como lo indica el método, se debe de considerar solo medio periodo, es decir; con una duración de 15 minutos.

D_{atm} ; es el último ascenso que se realiza para llegar a los 0 PAM, su duración es de 5 minutos, haciendo que el buzo respire aire de la cámara.

Por lo tanto:

$$Tdo = 30 + 5 + 30 + 5 + 30 + 5 + 15 + 5 = \mathbf{125 \text{ minutos}}$$

Este valor está indicado en la Figura 226 como “TIEMPO DE DESCOMPRESIÓN CON OXIGENO”.

Tiempo total del ciclo. El ciclo total de la inmersión #4 se muestra de manera gráfica en la **Figura 233**, en donde se registran todos los tiempos de compresión y descompresión ejecutados por una cuadrilla de buzos, a la suma de estos tiempos se le denomina **tiempo total del ciclo** o **tiempo total de inmersión** y su valor está registrado en la Figura 230 como “TIEMPO TOTAL DE INMERSIÓN”, el cálculo se realiza de la siguiente manera:

$$Ttc = Tpi + Teft + Tda + Td + Tdo$$

$$Ttc = 3 + 97 + 16 + 4 + 125 = \mathbf{245 \text{ minutos}}$$

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

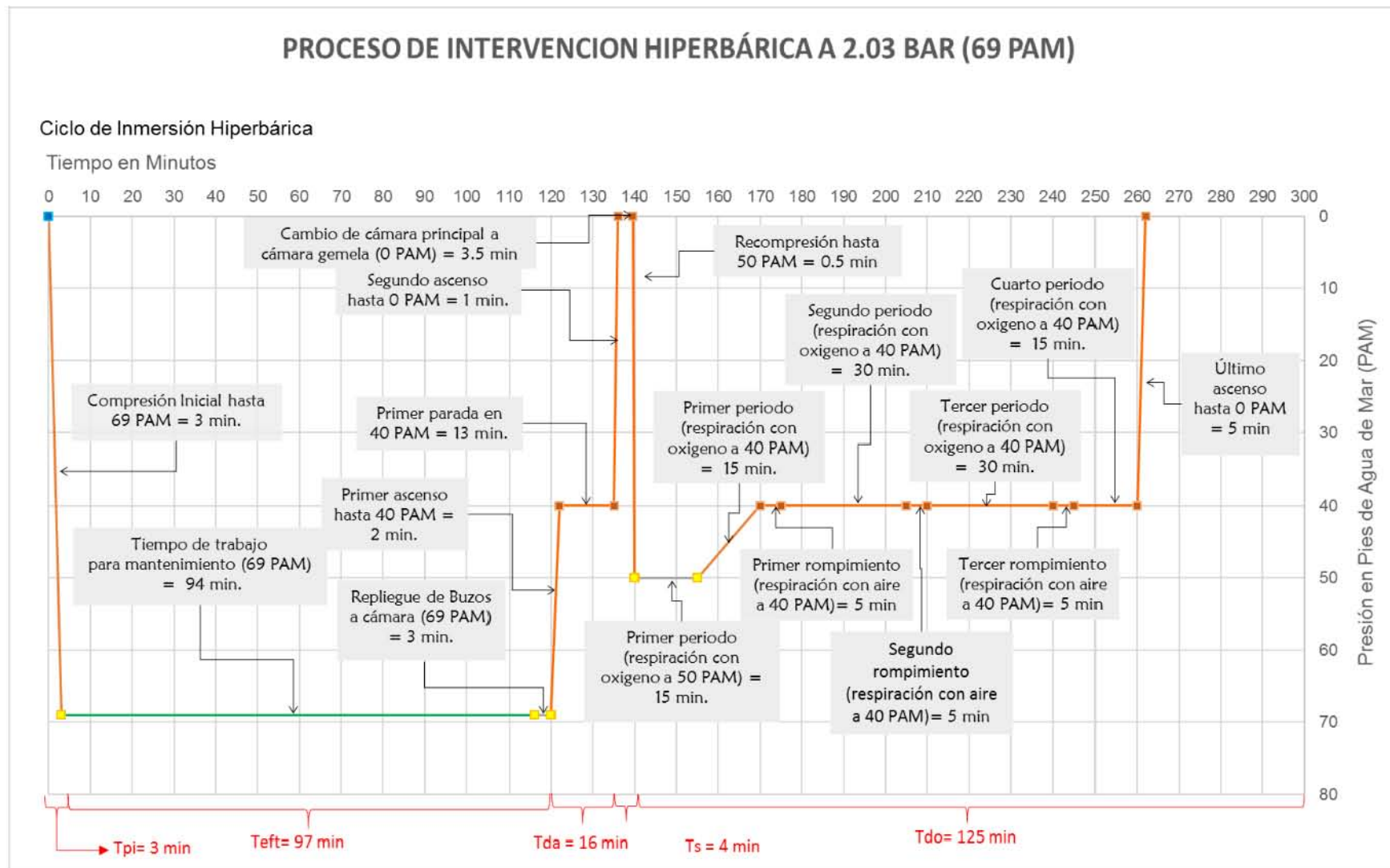


Figura 229. Ciclo de inmersión hiperbárica #4.

Duración total de intervención hiperbárica. El total de inmersiones realizadas para la ejecución de la intervención fueron 100 de una duración promedio de 200 minutos cada una y que en conjunto sumaron 26 126 minutos, es decir; aproximadamente 19 días de trabajo continuo que incluye la revisión, limpieza y cambio de herramientas. El tiempo total utilizado en la intervención hiperbárica realizada en el tramo 3 es el tiempo de las inmersiones adicionado al tiempo utilizado para los trabajos previos y posteriores, dando un aproximado de 35 días hábiles.

Las actividades que se realizaron durante las inmersiones ejecutadas son:

- Limpieza y medición de desgaste de los 48 discos cortadores.
- Cambio de 9 discos cortadores (No. 6-8, 40, 41, 42, 44, 45, 46, 47 y 48).
- Revisión y cambio de tornillería de junta rotaria y líneas de inyección de espuma.

Consideraciones. A diferencia de la intervención atmosférica, la hiperbárica se ejecuta en un tiempo mayor debido al proceso realizado, el cual depende de índices observados antes y durante las inmersiones, como es la presión de confinamiento y los trabajos de mantenimiento. Explicado de otra manera, entre mayor sea la presión de confinamiento, menor es el tiempo de trabajo efectivo realizado en cámara de excavación y el tiempo de descompresión aumenta por los periodos de respiración de aire y oxígeno que necesita el buzo para completar su ciclo. Los trabajos de mantenimiento es otro índice que afecta directamente al tiempo de ejecución de una intervención hiperbárica debido a que entre mayor sea la cantidad de herramienta dañada mayor es el tiempo efectivo de trabajo necesario dentro de la cámara de excavación.

IV.3.4 Paso por lumbrera.

El proceso de paso por lumbrera consta primordialmente de las actividades que se desarrollan cuando la tuneladora realiza la transición de un subtramo a otro mediante una lumbrera de paso o lumbrera de mantenimiento, el tramo 3 del TEO se conforma por dos lumbreras de este tipo la lumbrera L11 y la lumbrera L12.

Durante esta transición se realizan principalmente trabajos de mantenimiento a la máquina, trabajos que son más complejos de realizar durante el proceso de excavación. De manera consecutiva, el proceso de paso por lumbrera se desarrolla mediante las siguientes actividades:

Trabajos preliminares en fondo de lumbrera. Son trabajos necesarios e imprescindibles que garantizan el correcto paso de la tuneladora a través de la lumbrera, para lograr este objetivo se necesita; abatir el nivel de aguas freáticas con la instalación de un sistema de bombeo, realizar un mejoramiento en la zona de portales y adecuar la losa de fondo para recibir el equipo.

Sistema de bombeo. De acuerdo al modelo geotécnico, el material que se encuentra en la zona de portales de las dos lumbreras (L11 y L12) está

conformado por intercalaciones de limo y limo arenoso de consistencia dura, con algunos lentes de arena, la instalación de un sistema de bombeo evita el flujo de agua hacia el interior de la lumbrera, es decir, genera curvas de abatimiento como se muestra en la **Figura 230**.

El sistema de bombeo de la lumbrera L12 y L11 fue diseñado para un gasto promedio de 543 lps y un nivel dinámico de -106.00 metros, integrado por 18 pozos de bombeo, 16 de ellos con un diámetro de 17 ½" y ademe de 12" con una longitud promedio de 51 metros que corresponden a tubería lisa y 74 metros a tubería ranurada, los 2 pozos restantes fueron un diámetro de 22" y un ademe de 16", con una longitud aproximada de 70 metros de tubería lisa y 80 metros de tubería ranurada, la profundidad de los pozos fue variable en un promedio de 140 metros.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

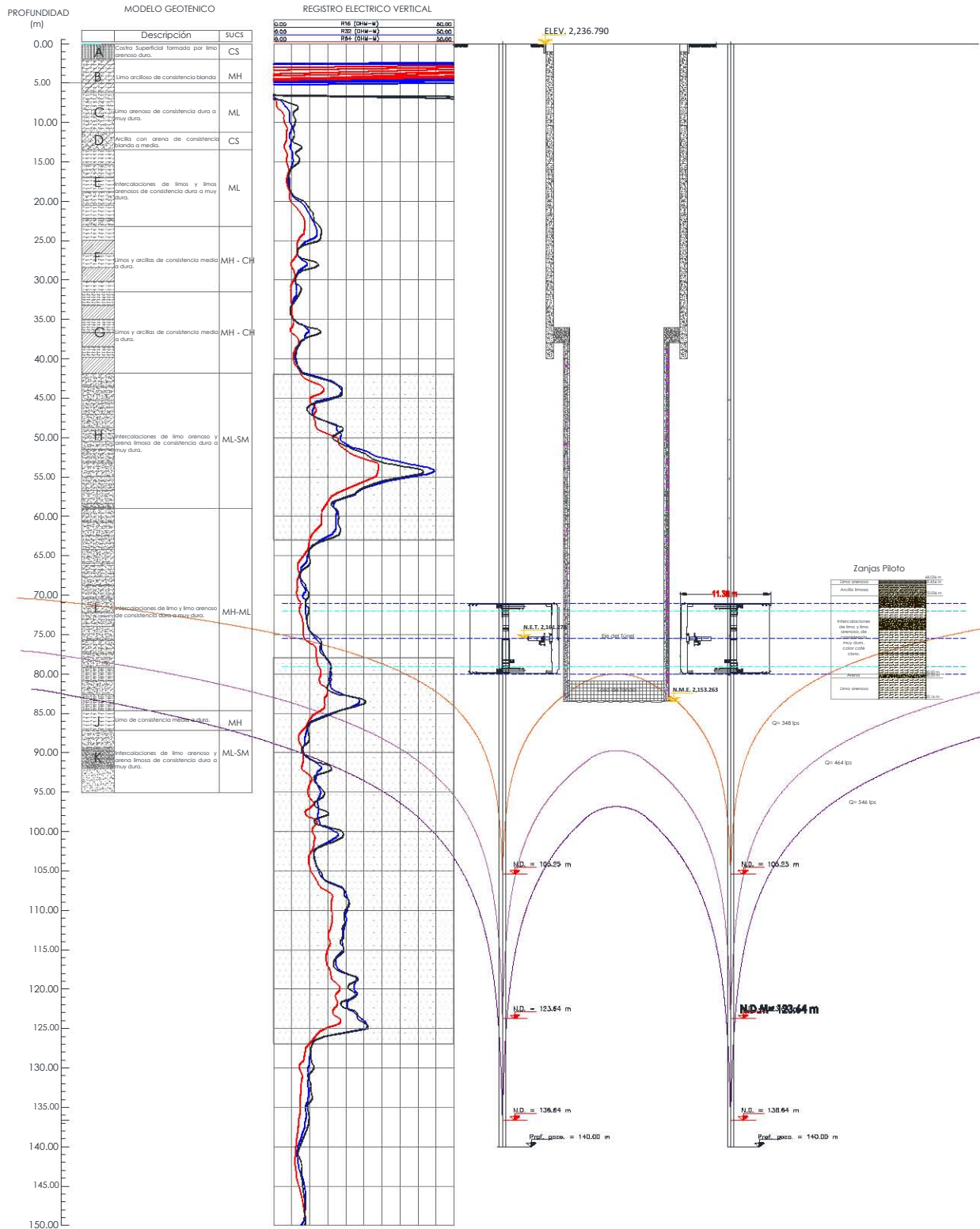


Figura 230. Proyección de curvas de abatimiento teóricas para un gasto de arreglo de 464 lps y 546 lps.

Mejoramiento de portales. El sistema de mejoramiento implementado en las lumbreras de paso consiste en la realización de barrenos en la periferia de los portales para posteriormente inyectar un producto que permita la formación de una aureola impermeable cuyo objetivo es disminuir al mínimo las filtraciones o escurrimientos que se presenten en el interior de la lumbrera, y como consecuencia evitar el arrastre de finos durante la llegada de la TBM. El producto inyectado es una lechada compuesta de una relación agua/cemento de 0.5, adicionado con 24 litros por m^3 de un aditivo acelerante, la dosificación se ajusta en campo de acuerdo a lo observado durante la ejecución. Este procedimiento se realiza posterior al abatimiento de presiones piezométricas mediante el sistema de bombeo. Pevio a los trabajos de barrenación e inyección se instalan tres drenes para medir las presiones en el frente de excavación, para esto se realiza una perforación de 2" de diámetro, utilizando agua o aire como fluido de perforación con una longitud de 14 metros, así mismo se utiliza un filtro de tubería de PVC de 1½" de diámetro, con una longitud de 14 metros. Este tubo de PVC es ranurado en el 70% del fuste (perímetro) y el 30% funciona como canal de conducción del agua filtrada. La disposición de estos drenes es la siguiente: el primero se ubica en el eje horizontal en la media sección del portal, el otro, cercano al nivel de desplante del portal, y el último cerca de la clave del túnel como se indica en la **Figura 231**. Una vez concluido e instalados los drenes dentro del barreno exploratorio se toma un mínimo de 3 aforos del mismo durante las 12 horas siguientes, para posteriormente colocar un manómetro que selle la salida del agua y permita evaluar la presión de la misma.

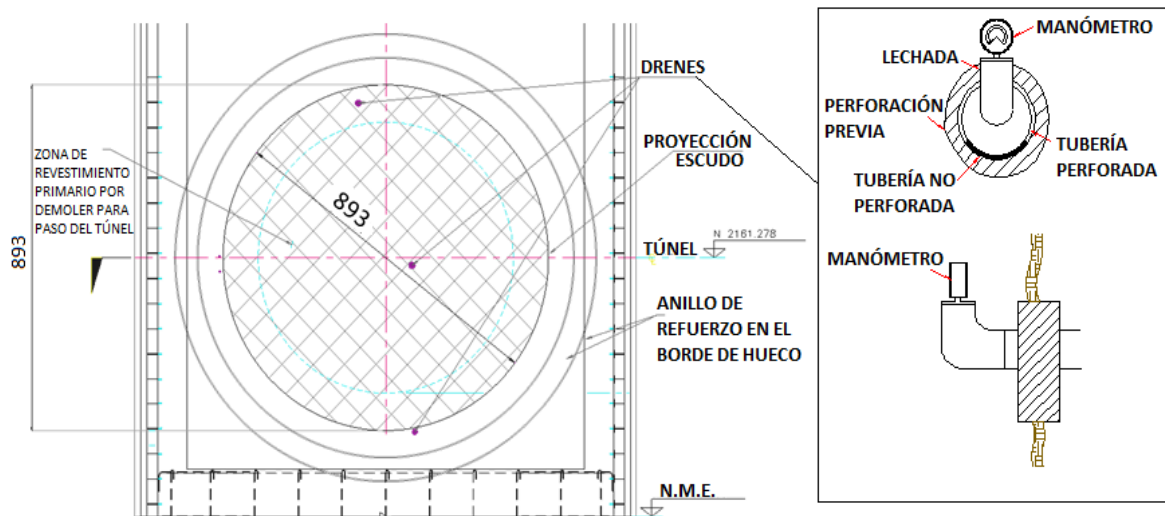


Figura 231. Colocación de drenes en portal.

La barrenación se realiza utilizando una perforadora horizontal equipada con una broca de 2", el procedimiento consta de 2 etapas:

- La primera etapa se desarrolla en la sección media superior de los portales de entrada y salida, la cual consiste en dos líneas de barrenación perimetral exterior. La primera línea de barrenación tiene una inclinación de 10°,

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

mientras que la segunda línea tiene una inclinación de 15° , la primera línea lleva una distancia de 0.40 metros entre un barreno y otro, la segunda línea se coloca en tres bolillo con una distancia aproximada de 0.40 metros, como lo muestra la **Figura 232**. Dichos barrenos se realizan con una longitud de 14 metros.

- La segunda etapa se desarrolla en la sección media inferior de los portales de entrada y salida, y su proceso es igual que la primera etapa.

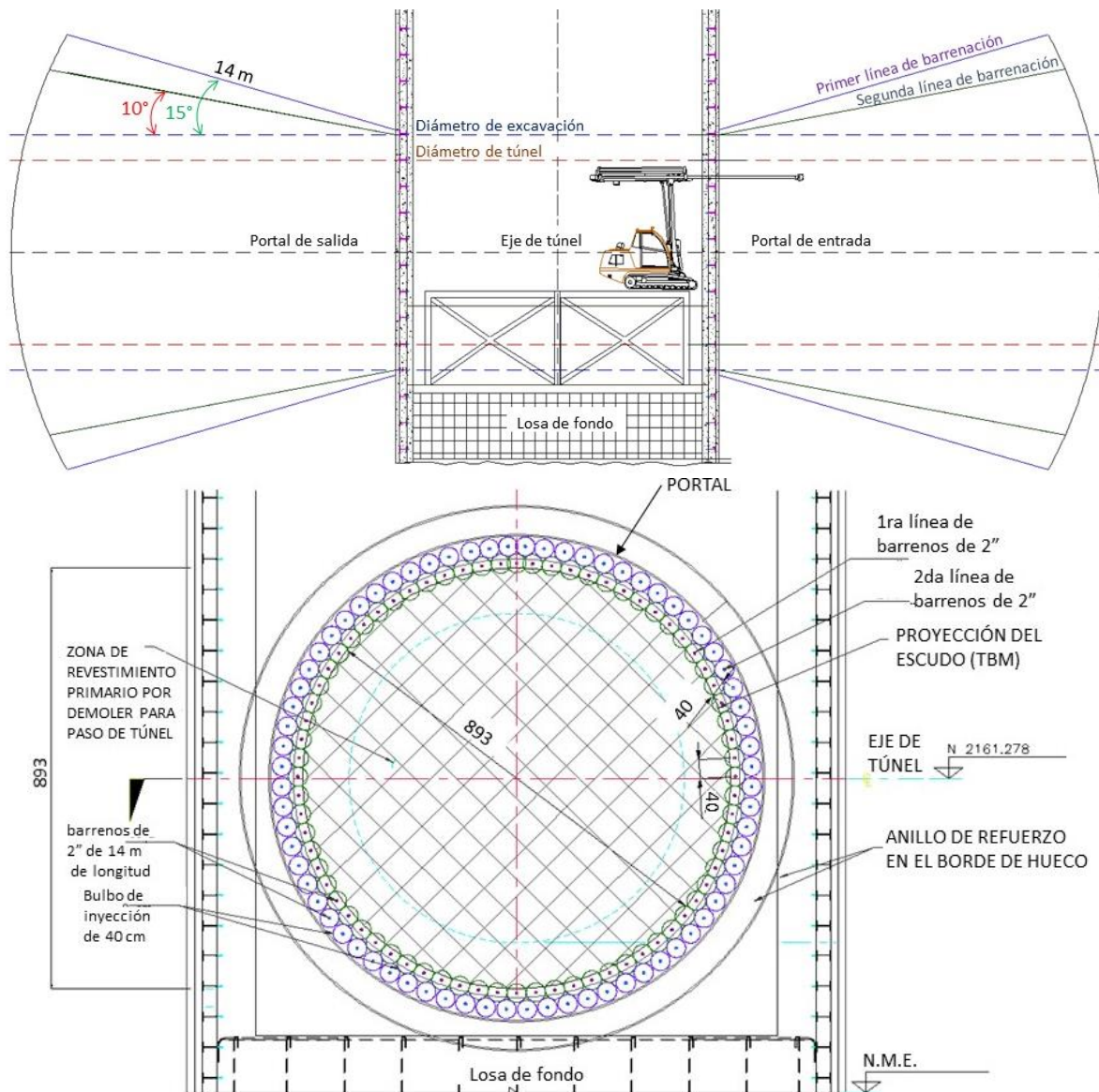


Figura 232. Vista de perfil y frontal de la barrenación en los portales de llegada y salida para la TBM.

Para el proceso de inyección se utilizan tubos de PVC de 1" de diámetro x la longitud indicada en metros lineales, colocando un tapón en la parte interior, y con barrenos intercalados en tresbolillo a todo lo largo del perímetro. El tubo de PVC, C40, se encamisa con tela de algodón para evitar que a la hora de realizarse la

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

inyección se sature con arena, en la parte superior se calafatea o encamisa para evitar que la lechada salga y en la parte inicial del tubo se utiliza una válvula de esfera de 1", con una reducción a ¼" para conectar a la manguera de la bomba, y además para regular la inyección en tiempos. La inyección se realiza a una presión de 0.50 kg/cm² mayor a la presión que se tenga en el flujo de agua la cual se medirá en campo colocando unos manómetros. Se debe tener especial cuidado de no rebasar la presión de inyección antes mencionada, pues de lo contrario, se podría dañar la estructura del suelo y con ello provocar un fracturamiento hidráulico, lo que conllevaría una mayor entrada de agua.

Los intervalos se realizan mediante el cierre y apertura de la válvula, repitiendo la operación hasta que la presión de la bomba se eleve como máximo a 0.50 kg/cm² arriba de la presión de poro existente contra la presión inicial. El volumen real a inyectar o inyectado se mide y se concilia en campo de acuerdo a los resultados que se observen. Tomando en cuenta que dicho volumen será el inyectado en el momento que se registre la presión de rechazo que será cuando la presión se eleve máximo a 0.5 a kg/cm² en comparación de la presión de poro.

Una vez terminado el mejoramiento de ambos portales y alcanzadas las condiciones geotécnicas requeridas como son la reducción de presiones hidráulicas y la disminución del nivel dinámico de los pozos de bombeo los cuales se deben de mantener en un nivel promedio de 100 metros de profundidad, Se procede al retiro de segmentos de marcos metálicos y demolición del concreto existente en la zona interior de los portales (componentes del revestimiento primario de la lumbrera y marcados en la **Figura 233**) con un martillo hidráulico montado sobre una retroexcavadora y con el objetivo de quitar toda obstrucción existente para el libre paso de la tuneladora.

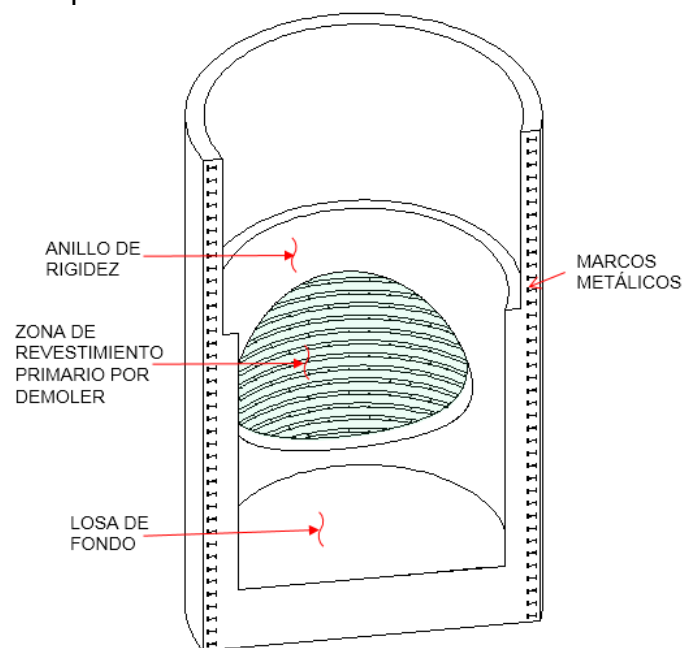


Figura 233. Isométrico del portal de salida y zona para demolición de revestimiento primario.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

Posterior al trabajo de demolición y retiro de marcos metálicos, se realiza la colocación de concreto vía húmeda por medio de presión de aire, utilizando una bomba de combustión la cual bombea el concreto por medio de mangueras de alta presión a un lanzador sobre orugas. La resistencia del concreto lanzado es $f'c=350 \text{ kg/cm}^2$ adicionado con aditivo acelerante instantáneo, el espesor de la capa producida debe ser en promedio 15 centímetros.

Adecuación de losa de fondo de lumbrera. Una vez puesto en operación el sistema de bombeo de achique y controlado el ingreso de agua, se procede a la adecuación en fondo de lumbrera consistente en la construcción de dos losas de concreto reforzado (losa 1 y losa 2 denominada "cuneta") de una resistencia $f'c=350 \text{ kg/cm}^2$, el objetivo de estas losas es dar la geometría y el guiado necesario para recibir a la tuneladora durante su paso por lumbrera. La losa 1 se construye completamente de concreto, su función es dar forma y profundidad a los cárcamos de bombeo y trincheras para la limpieza del fondo de lumbrera, la losa 2 funciona como una cuneta de arrastre para el paso de la tuneladora debido a la forma cilíndrica de la máquina, se construye de concreto reforzado, placas de acero embebidas y rieles metálicos como lo muestra la **Figura 234**.

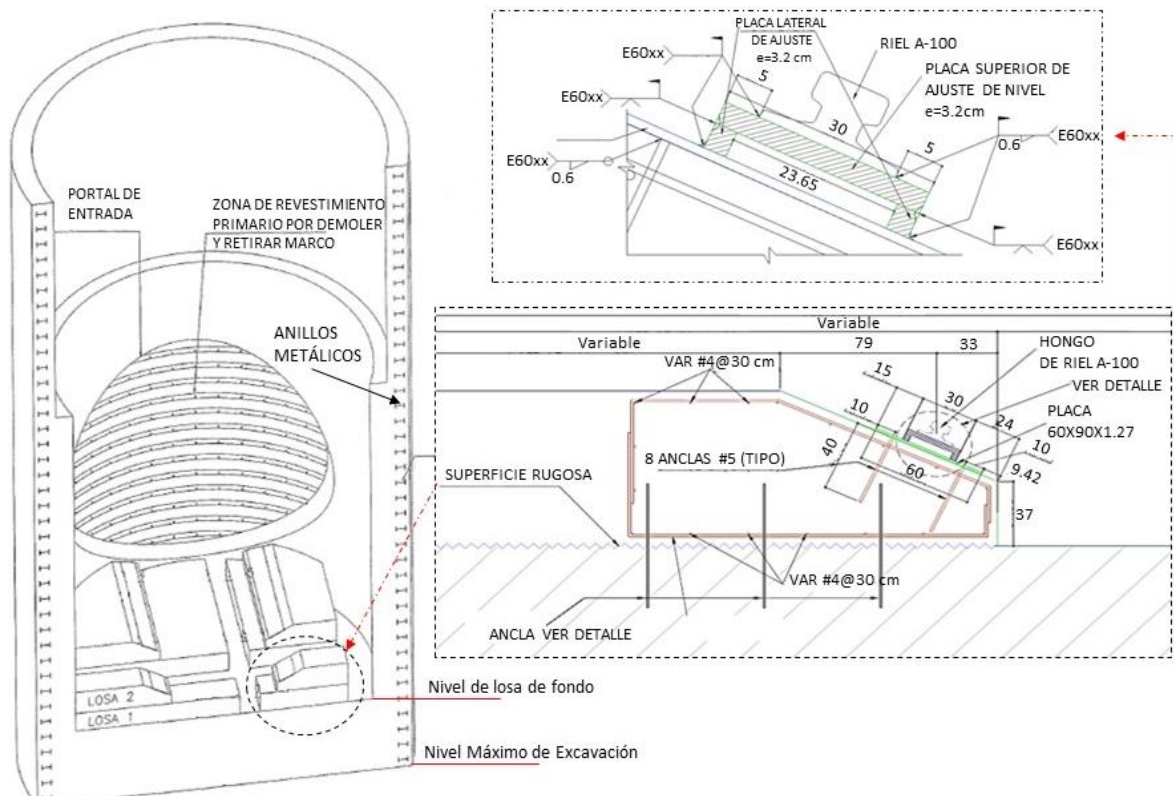


Figura 234. Isométrico de adecuación de losa de fondo de lumbrera.

Mantenimiento de la rueda de corte. Una vez terminadas todas las adecuaciones del fondo de lumbreira, se procede a avanzar la tuneladora siguiendo el proceso de excavación normal hasta que la rueda de corte se ubique justo en el borde del muro de lumbreira con el objetivo de iniciar los trabajos de revisión y mantenimiento.

Los trabajos de mantenimiento realizados a la rueda de corte de la tuneladora Hidalgo se basaron principalmente en la sustitución del blindaje el cual está constituido por una chapa (placas) de material hardox. Este blindaje se divide en placas frontales y perimetrales y su función principal es proteger de la abrasión el cuerpo principal de la rueda, en la **Figura 235** se observa el desgaste del blindaje en mención durante su paso por lumbreira L11.



Figura 235. Rueda de corte a la salida de lumbreira L11.

A continuación, se enlistan los trabajos de mantenimiento realizados durante el paso de lumbreira L11 y L12:

- Se realizó el retiro de los 48 cortadores para ser revisados individualmente y en caso de presentar algún daño ser sustituidos.
- Se realizó la sustitución de las 188 piezas de scrapers (Frontales y Periféricos).

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

- Se realizó la limpieza e inspección visual de la rueda de corte, identificando las placas más desgastadas del blindaje original.
- Para el caso en particular de la lumbrera L11, se realizó la sustitución de todas las placas (perimetrales y frontales) que constituyen el blindaje de la rueda de corte y que se encuentran señaladas en la **Figura 236**. Se realizó reemplazo de los 37 knife bits, para su retiro se utilizó el proceso de corte denominado “arc-air” y para la colocación de las piezas nuevas se aplicó soldadura de unión E7018 y recubrimiento antidesgaste 6006.
- Una vez finalizados los trabajos de sustitución del blindaje, se colocaron nuevamente los 48 cortadores para continuar con el avance de la tuneladora hasta el portal de entrada.

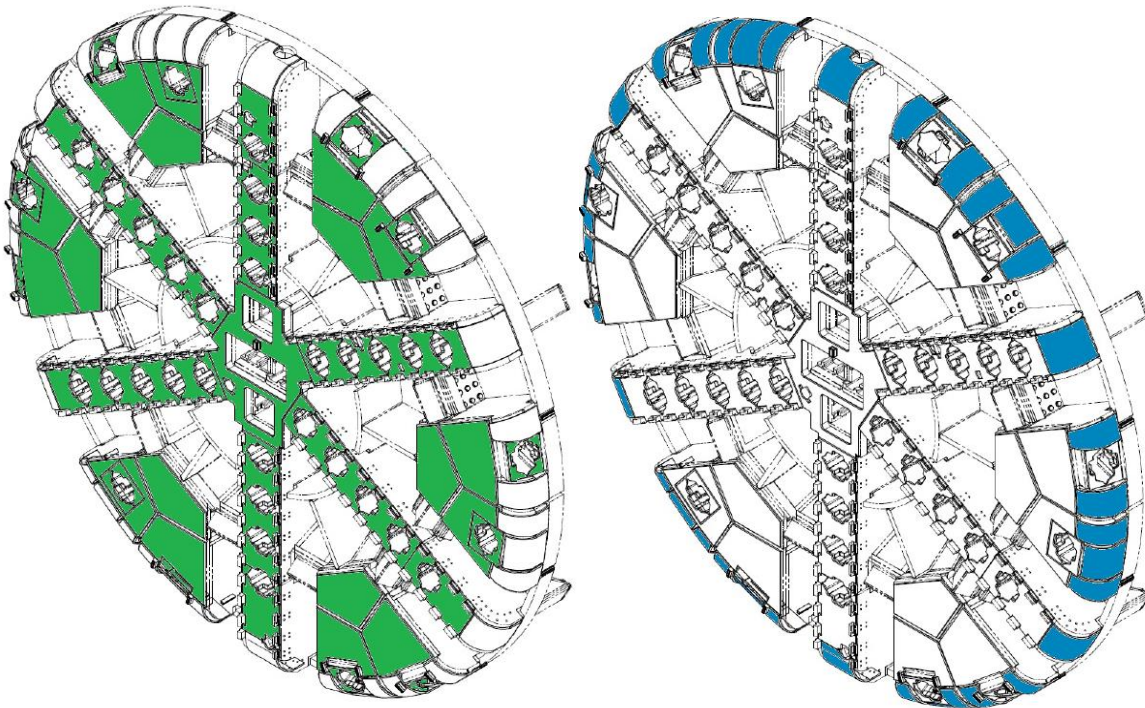


Figura 236. Blindaje frontal y perimetral de la rueda de corte de la tuneladora Hidalgo.

El procedimiento establecido para el reemplazo del blindaje de la rueda de corte se describe a continuación:

- Para el retiro de placas originales se utilizó el proceso mecanizado denominado “arc-air”, por el cual un potente chorro de aire a presión barre el metal de la zona de corte, fundido por efecto de un arco eléctrico provocado por un electrodo situado en la parte delantera de la zona de barrido.
- Se realiza la limpieza de soldadura excedente presente en el material base mediante métodos mecánicos y abrasivos, así como la eliminación de discontinuidades con la aplicación de soldadura E7018.

- Para el caso de la fijación de placas frontales se utiliza el método de multífama, realizando la unión a solape y aplicando soldadura E7018 todo a rededor por la parte exterior como lo indica la **Figura 237**.

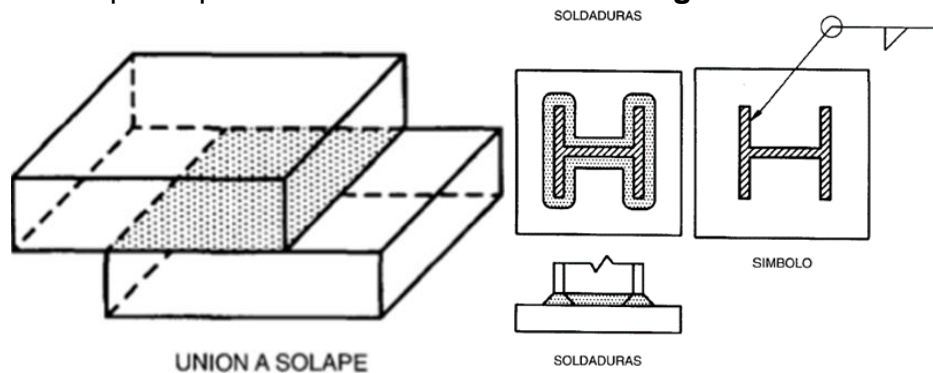


Figura 237. Método de unión a solape y a rededor.

- Para las placas perimetrales se utiliza el mismo método de multífama, sin embargo, la aplicación de soldadura difiere en el tipo de soldadura y la secuencia de unión placa-material base. En una primera instancia se aplica un sello y fondeo con material de aporte Xuper 680 CGS con un filete de $\frac{1}{4}$ ", posteriormente se aplica el "relleno" con un material de aporte E7018 como lo indica la **Figura 238**, finalmente se aplica un recargue duro en las áreas de impacto como medida protectora para la unión soldada con ME7D en los cordones que así lo permitan las condiciones.

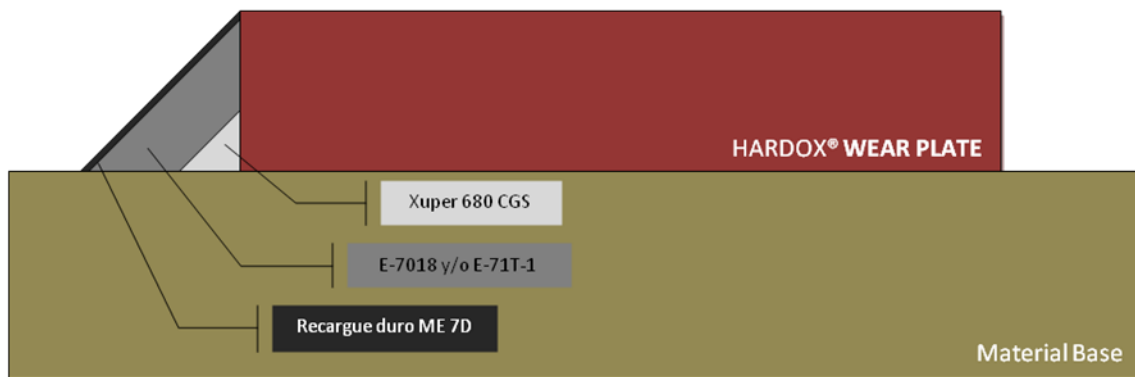


Figura 238. Método de aplicación de soldadura para el blindaje perimetral.

- Se realizaron pruebas no destructivas (Líquidos penetrantes) a la soldadura aplicada para garantizar la correcta colocación de placas.
- Como método de aseguramiento de calidad, se realizó la inspección de soldadura de unión en placas perimetrales por medio de partículas magnéticas con luz fluorescente.
- En la **Figura 239** se muestra parte del proceso.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO



Figura 239. Proceso de reemplazo de blindaje de la rueda de corte.

Cambio de cepillos. Finalizados los trabajos de mantenimiento de la rueda de corte, se procede a realizar el avance de la tuneladora hasta que el faldón quede al interior de la lumbrera para posteriormente realizar el cambio de los cepillos.

Los cepillos, como anteriormente se describen, son piezas metálicas compuestas por cerdas flexibles instaladas en el faldón del escudo que, combinado con la inyección de un tipo de grasa, tienen la función de impedir el ingreso de agua y material al interior de la tuneladora. Así como la rueda de corte, los cepillos sufren desgaste por el contacto que tienen con el suelo, el agua y el mortero, sin embargo, el diseño de la tuneladora permite sustituir estas piezas siguiendo un procedimiento específico y seguro.

Durante el proceso de excavación los cepillos siempre permanecen ocultos debido a que están en contacto con la cara exterior del último anillo de dovelas colocado. El paso de lumbrera da la posibilidad de descubrir las tres líneas de cepillos debido a que no existe presión hidrostática o de suelo que actúe en el faldón de la

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

máquina, siempre y cuando se posicione correctamente la tuneladora al interior de la lumbrera y se instale un anillo especial para esta actividad como lo muestra la **Figura 240**.

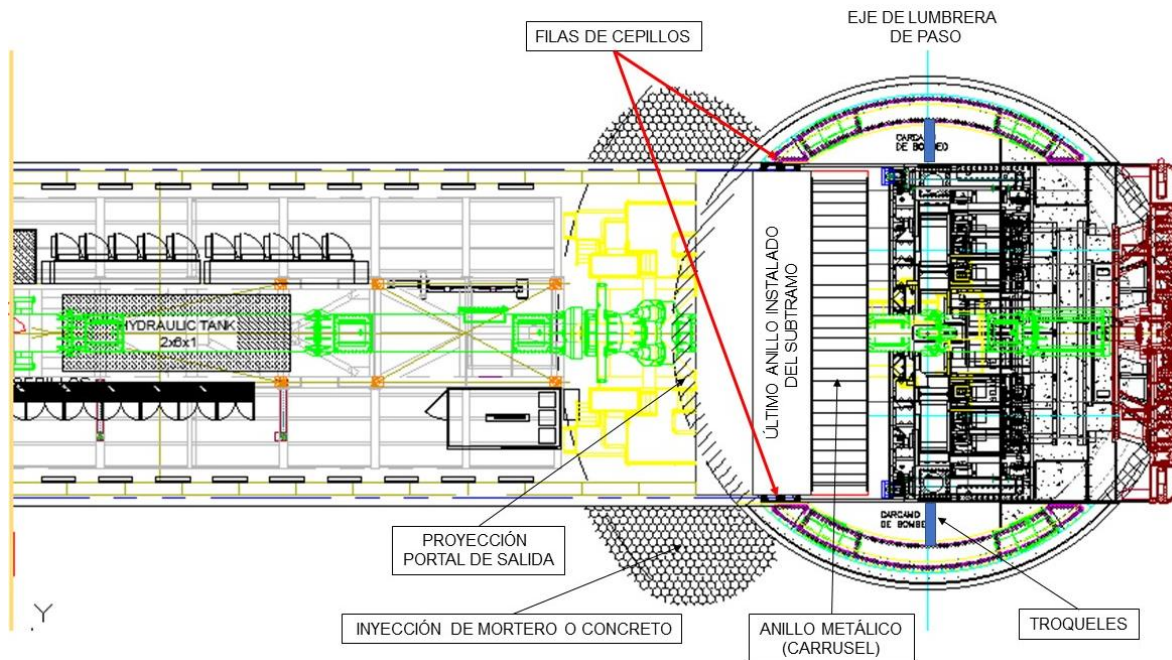


Figura 240. Ubicación de la tuneladora en la lumbrera para el cambio de cepillos.

Se define como anillo especial a una estructura metálica de dimensiones similares al anillo de dovelas que brinda la posibilidad de descubrir y acceder a los cepillos del faldón. Este anillo también es denominado “carrusel” y su diseño y dimensiones de fabricación de muestran en la **Figura 241**. Está formado por un total de 28 piezas prefabricadas (una por cada gato de empuje) diseñadas para soportar y transmitir la fuerza de empuje que ejercen los gatos a las dovelas, fabricadas por una sección de tubo de acero de 6” cedula 80 soldado a una sección de placa metálica A36 de 3/4” y cartabones triangulares.

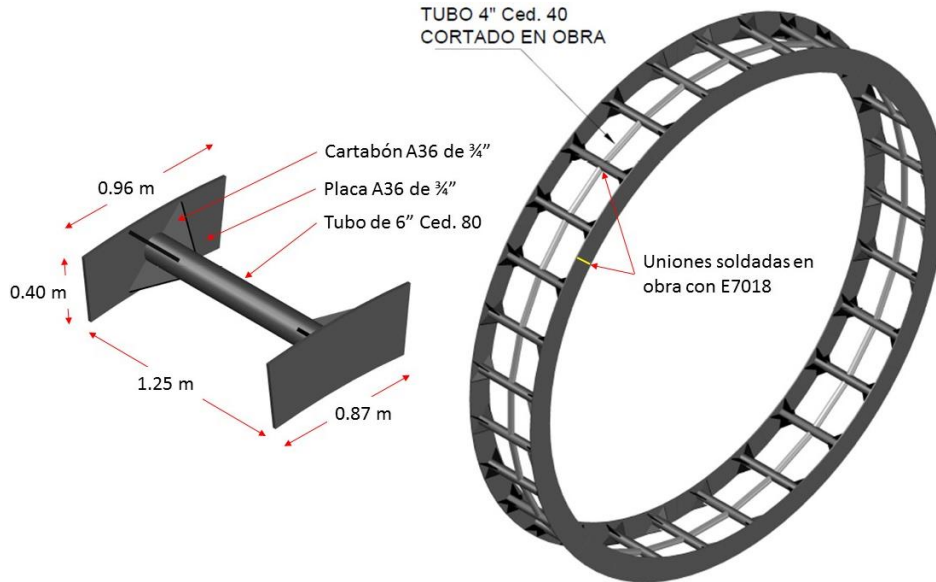


Figura 241. Anillo metálico o carrusel fabricado para el cambio de cepillos.

El procedimiento establecido para el reemplazo de los cepillos del faldón de la TBM su muestra en la **Figura 242** y se describe a continuación:

- Se realiza el avance de la TBM 1.5 metros posterior a la instalación del ultimo anillo del subtramo.
- Se realiza el suministro de las 28 piezas fabricadas para la instalación del anillo metálico.
- Mediante la unión de las 28 piezas metálicas con soldadura E7018 y el método multiflama se realiza la formación y montaje del anillo metálico ("Carrusel").
- Se realiza el avance de la TBM hasta lograr descubrir las 3 líneas de cepillos, el diseño del anillo metálico permite visualizar directamente las filas mencionadas. Es importante mencionar que la rueda de corte de la tuneladora ya se encuentra dentro del subtramo subsecuente, el procedimiento de avance e ingreso al portal de entrada se describe posteriormente.
- Una vez descubiertas las filas de cepillos, se inicia con su retiro mediante el método arc-air y métodos abrasivos.
- Se realiza la limpieza de la sección del faldón en donde serán instalados los cepillos nuevos.
- Se realiza el suministro e instalación de cepillos nuevos con la aplicación de soldadura de unión E7018.
- Como prueba de calidad se realiza la aplicación de una prueba de líquidos penetrantes no destructiva con el objetivo de detectar discontinuidades y porosidades en la soldadura de unión, y en caso de observar alguno de estos aspectos, se retira el cepillo por procesos mecánicos y se sustituye por uno nuevo.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

- Una vez instalados los cepillos en las 3 líneas del faldón, se saturan las cerdas metálicas con grasa del tipo CONDAT WR90 o similar, esta grasa tiene propiedades de resistencia al fuego, al agua, al deslavado, al mortero y a la deformación, es compresible y tiene adherencia a superficies metálicas, todas estas propiedades combinadas aseguran un perfecto sellado del faldón de la TBM evitando fugas e ingreso de material al interior de la máquina.

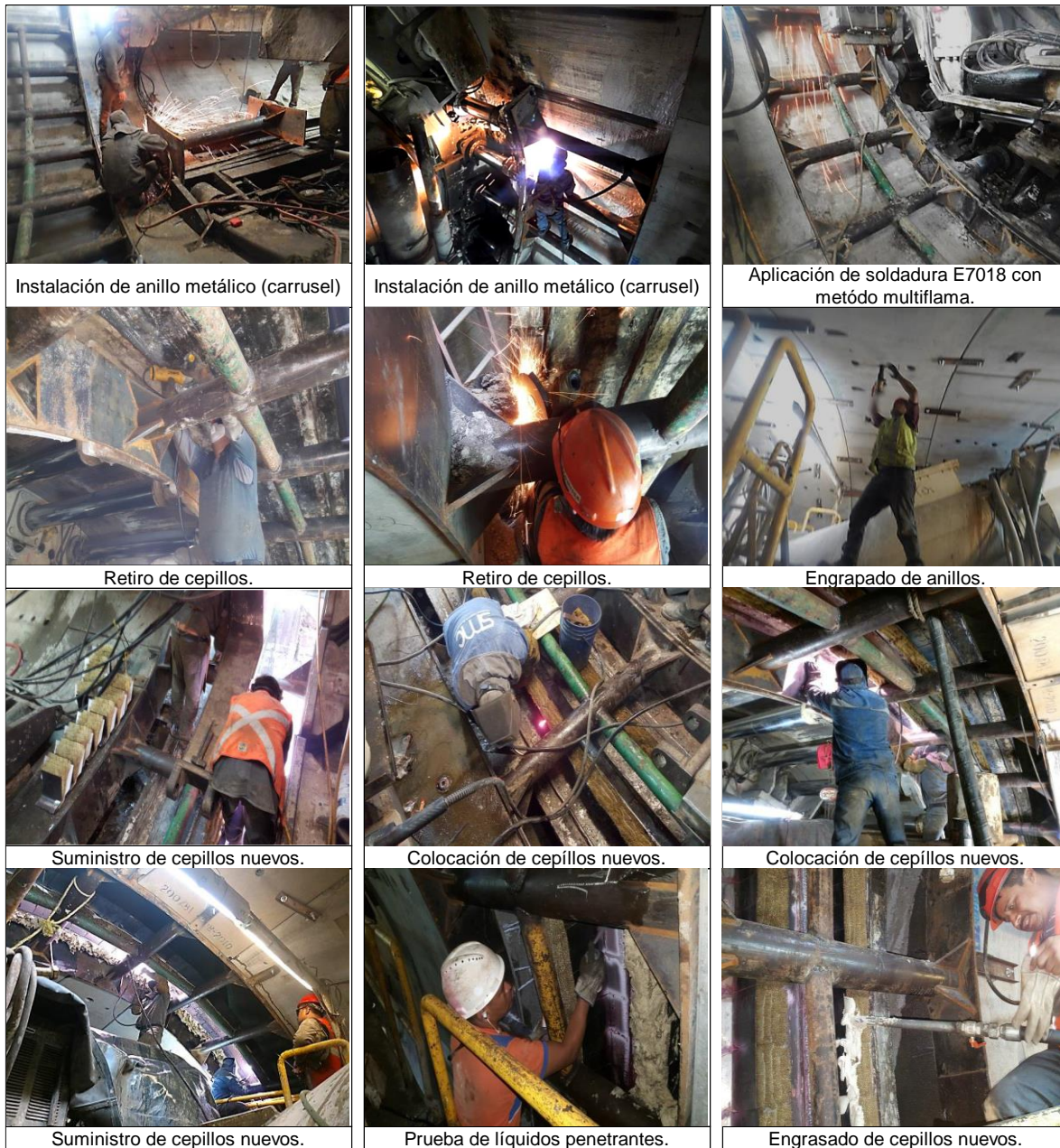


Figura 242. Procedimiento de cambio de cepillos.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

Ingreso al portal de entrada. Previo a reanudarse el proceso de excavación del subtramo subsecuente es de vital importancia realizar trabajos de “acondicionamiento” del portal de entrada, esto con el objetivo de garantizar el buen guiado de la TBM y la contención de presiones ejercidas del frente de excavación.

El acondicionamiento del portal de entrada consiste en la construcción de un tímpano y un sello de neopreno. El tímpano es un muro de concreto reforzado construido con el objetivo de obtener una geometría circular-plana del portal de entrada, debido a que los portales tienen forma de ovoide debido a que estos forman parte de la geometría cilíndrica de la lumbrera. El sello de neopreno es una estructura circular anclada al tímpano constituida por un anillo de neopreno y placas metálicas de seguridad.

El tímpano y el sello de neopreno en conjunto funcionan como un anillo monolítico que sella cualquier salida de material a la lumbrera por consecuencia de la excavación subtramo subsecuente, en la **Figura 243** se observa la tuneladora al momento de ingresar al portal de entrada y en la **Figura 244** se muestran el acondicionamiento realizado al portal.

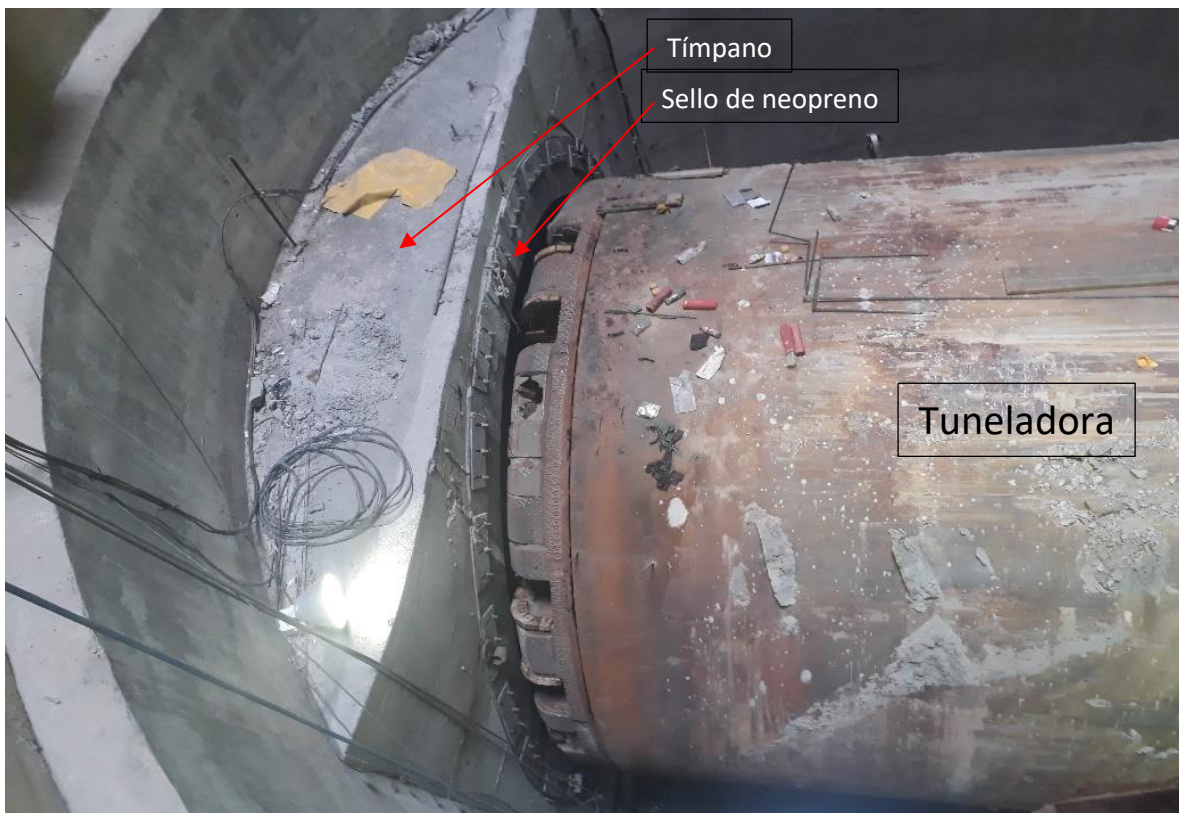


Figura 243. Tuneladora Hidalgo antes de ingresar al portal de entrada.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

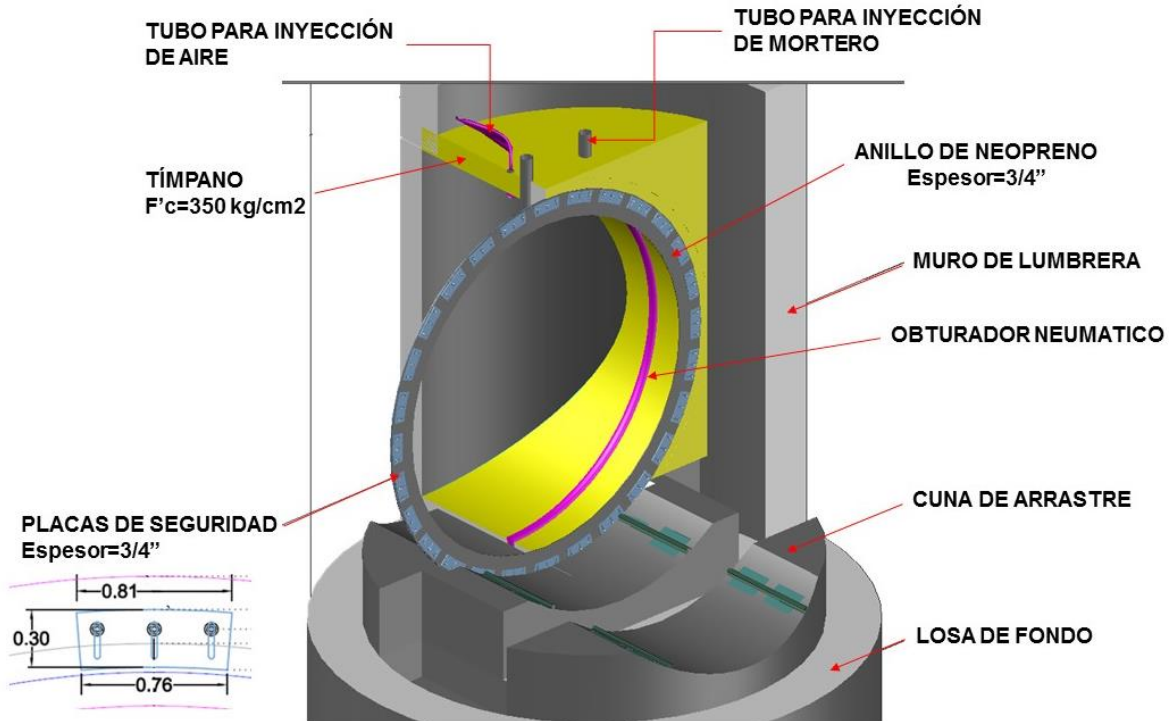


Figura 244. Acondicionamiento del portal de entrada.

El tímpano se construye a base de concreto reforzado de una resistencia $f'c=350 \text{ kg/cm}^2$ y un armado simple con varillas del No.4 y $f_y=4200 \text{ kg/cm}^2$, así mismo se anclan varillas del No.6 al muro de lumbreira que sirven como unión tímpano-muro, para el cimbrado se utiliza una estructura de acero de forma circular de medidas iguales a la rueda de corte de la máquina, el colado se realiza con bachas que suministran el concreto prefabricado.

El sello de neopreno es ensamblado en superficie con placas de seguridad que funcionan como retenes o prensas deslizables que evitan la abertura del sello de neopreno, su funcionalidad de muestra en la **Figura 245**.

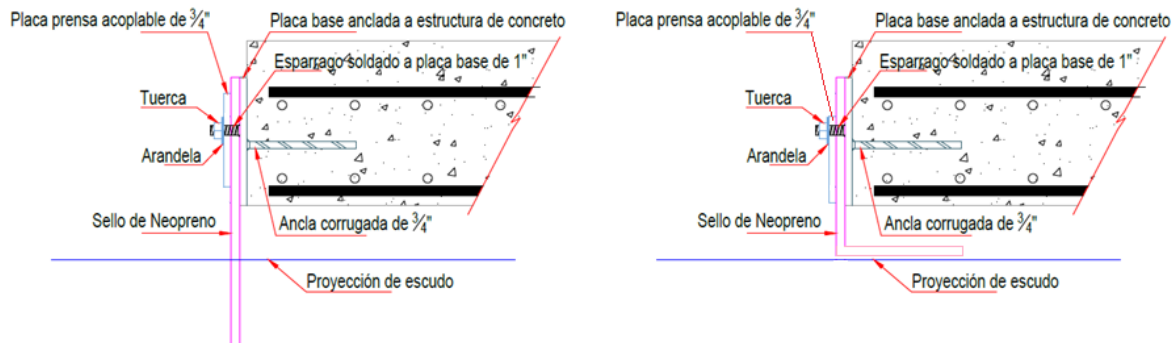


Figura 245. Sello de neopreno antes y después del paso de la TBM.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

Cuando la tuneladora vuelve a iniciar su proceso de excavación se inyecta mortero o relleno fluido en el área anular entre el escudo y tímpano de concreto, sirviendo como contenedores el mismo sello de neopreno y el obturador neumático (sello expandible) ubicado a un metro de este, hacia el portal de entrada, dando el fraguado necesario para tomar resistencia.

Túnel falso. Al haberse completado el cambio de cepillos y el ingreso de la TBM al portal de entrada se realiza el montaje del túnel falso con la instalación de anillos de dovelas que fueron “rechazadas” durante su fabricación y que funcionan como apoyo para que la tuneladora continúe el proceso de excavación del siguiente subtramo. Se le denomina túnel falso debido a que las dovelas instaladas en esta sección no forman parte del proyecto definitivo y no están diseñadas para soportar empujes del suelo, sin embargo pueden sufrir desplazamientos horizontales y verticales debido a que no tienen sostenimiento alguno, por lo cual durante el paso de la TBM se realiza su “engrapado” anclando tramos de 50 centímetros de un perfil tipo canal de 8” entre dovela y dovela desde 10 anillos antes del portal de salida y hasta 10 anillos posteriores al portal de entrada, igualmente se utilizan soportes y puntales que eviten la caída del anillo por su peso propio como lo muestra la **Figura 246**.

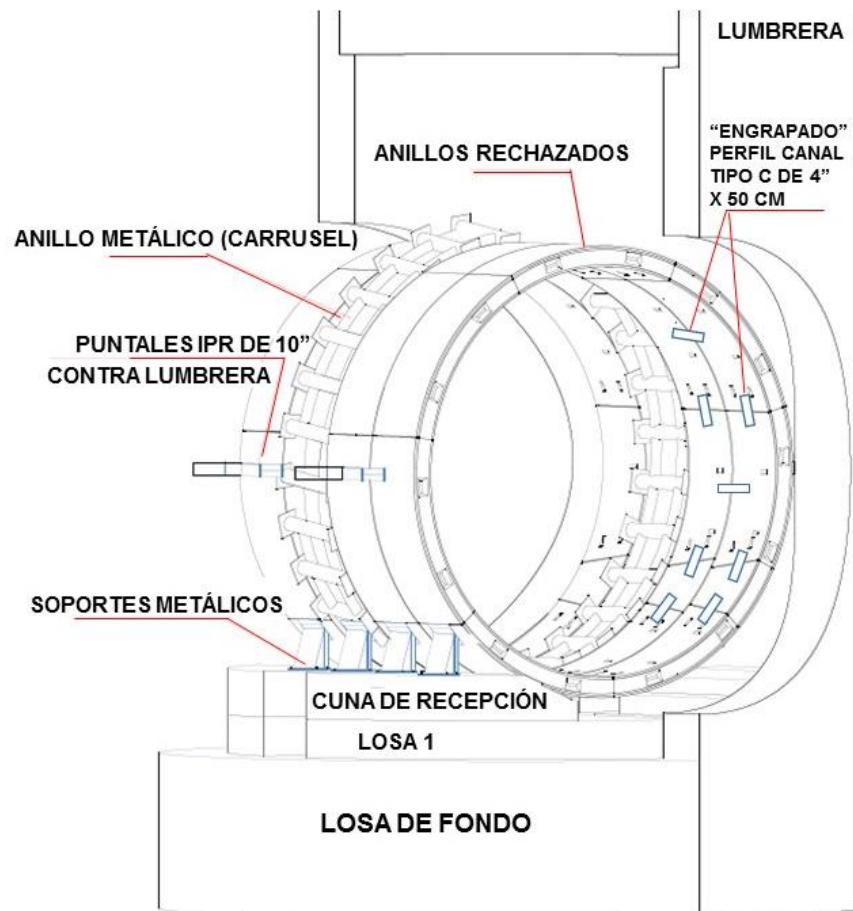


Figura 246. Túnel falso.

Consideraciones. En la **Figura 247** se muestran las diferentes estructuras montadas y construidas para el paso de la tuneladora por lumbrera L12, en donde se aprecia de izquierda a derecha; un anillo de atraque instalado en el portal de salida, un anillo metálico para el cambio de cepillos, anillos falsos para el paso de lumbrera y la construcción de un tímpano con su sello de neopreno. Cabe mencionar que estas estructuras son temporales debido a que posteriormente son desmanteladas o demolidas para el paso de la cimbra telescópica.



Figura 247. Estructuras para el paso de la tuneladora en lumbrera L12.

IV.4 Principales incidencias durante el proceso de excavación.

Se define como incidencias a los contratiempos que influyen directamente al rendimiento de la excavación de manera negativa y que para su resolución se requiere realizar una serie de actividades no previstas en el proyecto ejecutivo, estos contratiempos se subdividen en incidencias mecánicas e incidencias por error humano.

Las incidencias mecánicas se presentan cuando ocurre una falla en el funcionamiento de la tuneladora; ya sea por factores relacionados al tipo de suelo o por fallas en sus componentes. Las incidencias por error humano ocurren cuando interviene el criterio del personal que ejecuta los trabajos, por ejemplo; una mala operación de la tuneladora, una mala logística o una mala planeación.

La **Figura 248** es la gráfica de producción diaria del tramo 3, con una duración total de 2276 días de trabajo aprecian periodos de tiempo “MUERTOS” o de “producción cero”, algunos de ellos provocados por incidencias mayores (en color rojo) o por trabajos complementarios del proceso de excavación (en color negro). Si se eliminan los tiempos de producción cero se obtiene la gráfica de la **Figura 249**, esta grafica tiene una duración total de 997 días efectivos lo cual representa una considerable disminución del tiempo, en otras palabras, la cantidad de días en donde al menos un anillo fue excavado y colocado equivale a un 44% de la duración total de excavación del tramo 3 y el 56% restante es el tiempo total improductivo o de producción cero el cual engloba tiempos de ejecución para intervenciones, actividades complementarias e incidencias.

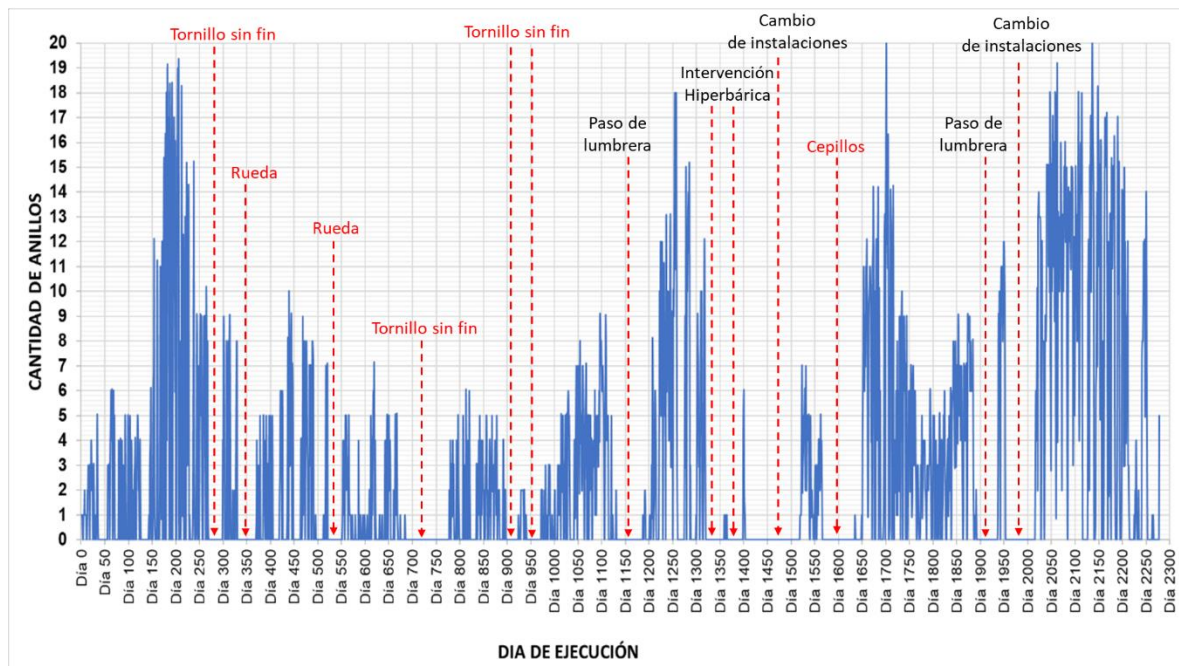


Figura 248. Producción diaria de excavación en el tramo 3 del TEO.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

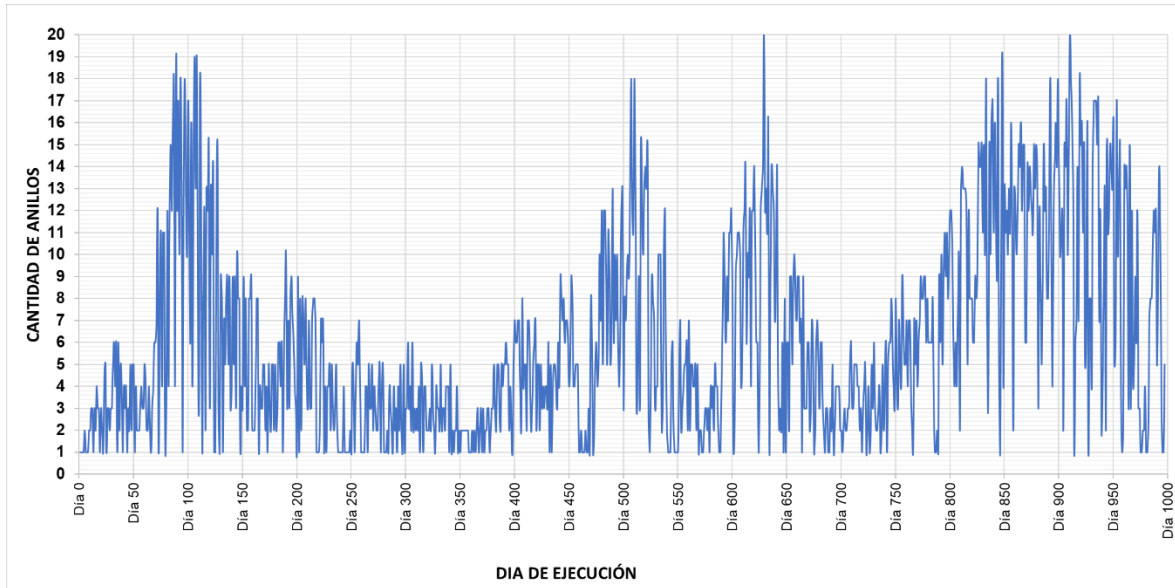


Figura 249. Producción de excavación diaria efectiva.

A continuación, se describirán las principales incidencias que se presentaron durante la excavación y las actividades realizadas para su resolución con su tiempo de ejecución, así mismo se presenta un análisis de producción en un determinado lapso tiempo en donde se indican las incidencias menores que al igual que las mayores repercuten en el rendimiento de la producción.

IV.4.1 Incidencias por operación (*Tornillo sin fin*).

Problemática 1. Inicialmente la tuneladora fue diseñada con dos tornillos sin fin o tornillos de Arquímedes (horizontal y vertical) que en conjunto extraían el material rezagado de la cámara de excavación, en la **Figura 250** se observa la diferencia entre los dos tornillos, el tornillo horizontal poseía un eje céntrico entre los alabes capaz de reducir en toda su sección la cantidad de presión de salida del material rezagado mientras que el tornillo vertical no poseía un eje por lo cual hacia más fácil la extracción de material de la cámara, aunado a esto, ambos tornillos se componían de compuertas de visualización y para extracción de boleos.

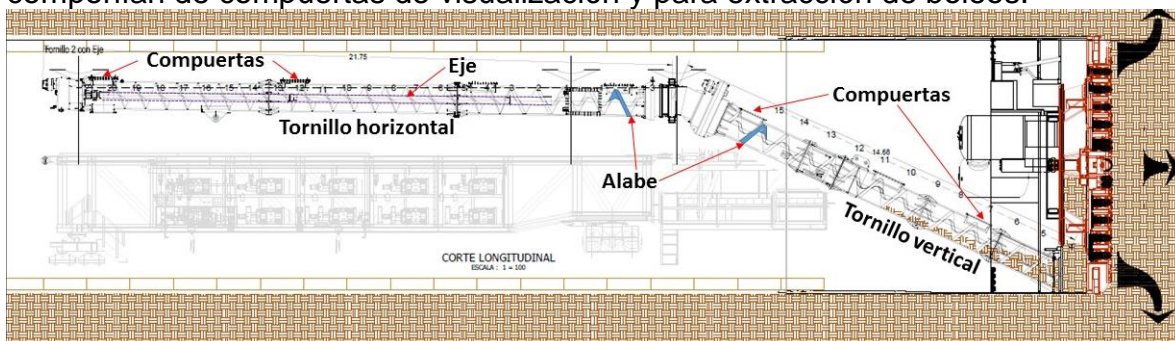


Figura 250. Tornillos de extracción de rezaga.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

Los discos cortadores son diseñados para que en conjunto “trituren” un frente rocoso siempre y cuando sea macizo y uniforme, aun así, existe una desventaja para este proceso de trituración y es la presencia de roca basáltica fracturada debido a que se corre el riesgo de generar boleos de roca mayores a 30 centímetros como lo muestra la **Figura 251** ocasionando dificultades para el desalojo de este tamaño de material a través de los tonillos sin fin.

El tramo 3 del TEO se compone en mayor parte de un frente del tipo mixto (suelo-roca) con abrasividades de roca variables, desde abrasividad media (2.5 a 3.5) hasta altamente abrasivas (4.25 a 4.5) del índice de Cerchar, con durezas que varían hasta el grado 7 en la escala de Mohs, la heterogeneidad de estos materiales en algunos casos puede provocar un bloqueo total del tornillo sin fin. La abrasividad del material que se extrae da como resultado que existan diferencias o separaciones discontinuas desde los 7 hasta los 25 milímetros de espacio entre las carcadas y el tornillo, esta situación tiene como consecuencia que durante el transporte de la rezaga del material de la excavación este va llenando estos espacios con fragmentos o lascas de roca y el material se compacta hasta bloquear el tornillo No.1 como lo muestra la **Figura 251**.

Al igual que existen sensores de presión en el frente de excavación, los tornillos sin fin se componen de sensores que muestran la cantidad de presión que ejerce el material rezagado en la entrada y en la salida de dicho componente, mediante la lectura que arrojan estos sensores el operador de la tuneladora puede correlacionar la cantidad de rezaga que sale por el tornillo con la cantidad de rezaga que se genera en la cámara de excavación. El operador de la máquina tiene tres principales maneras de saber si se ha generado un tapón en el tornillo, la primera es que durante el proceso de excavación no exista salida de material de manera que la presión de la cámara de excavación aumente conforme avance, la segunda es cuando los sensores del tornillo arrojan valores no congruentes en comparación con los sensores de presión en la cámara; es decir, que no existe comunicación entre la cámara de excavación y el tornillo, y la tercera es cuando el torque y la presión hidráulica del tornillo aumentan considerablemente.



Figura 251. Boleos de roca y bloqueo del tornillo sin fin.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

Resolución 1 (Actividades). Una vez que se tiene la certeza de que existe un bloqueo o tapón en el tornillo sin fin vertical se implementan la siguiente secuencia de actividades hasta lograr resolver la problemática.

- Se realiza la inyección de lodo bentonítico con la bomba de inyección de mortero y en puertos ubicados en las compuertas de revisión del tornillo sin fin y se realizan pruebas de giro observando la salida del material y los sensores de presión. Las propiedades del lodo bentonítico; como su viscosidad, logran lubricar los alábalas y liberar el giro del tornillo.
- Paralelo a la inyección de lodo bentonítico se realiza la inyección de aire comprimido utilizando el sistema de espumas, a una presión que no exceda la presión de la cámara de excavación.
- Con la implementación de las dos primeras actividades en ocasiones se logra retirar el tapón, en caso contrario se procede a la apertura de compuertas de inspección mediante diferenciales de 3 toneladas que sujetan el componente en mención.
- Las compuertas de inspección forman parte del diseño original de los tornillos sin fin y su función es facilitar el acceso al interior de la carcasa para poder realizar una limpieza manual, la ubicación de las compuertas se muestra en la **Figura 252**. Así mismo se compone de una guillotina o compuerta denominada bulck head que divide la cámara de excavación con el tornillo sin fin, cuando se realizan trabajos de inspección esta compuerta se cierra debido a que funciona como medida de protección, reteniendo la presión que la cámara de excavación contenga.
- Una vez abiertas las compuertas de inspección se realiza una revisión completa y se ubica el tapón procediendo a retirarlo por medios manuales.
- La limpieza por medios manuales es una actividad muy riesgosa y tardada, por lo que se debe de evitar en lo posible, la duración de esta actividad es de aproximadamente 5 días hábiles.

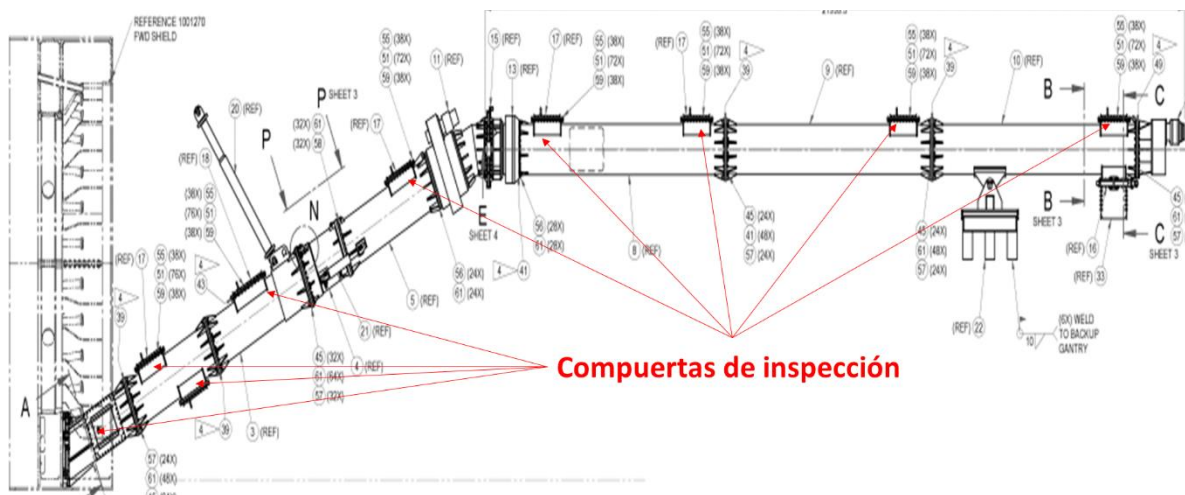


Figura 252. Tornillos de extracción de rezaga.

Resolución 2 (Adecuación de la rueda de corte). Originalmente la rueda de corte fue diseñada del tipo Spoke, es decir, se compone de una serie de ventanas que permiten el ingreso de mayor cantidad de material al interior de la cámara de excavación, sin embargo, esta característica tiene una desventaja cuando el frente de excavación se compone de roca y es debido a los fragmentos mayores a 30 centímetros generados por la acción de los cortadores. Con el objetivo de reducir el tamaño de los bloques de roca que ingresan a la cámara de excavación y por subsecuente al tonillo sin fin, se realizó la instalación de barras denominadas “Grizzly” elaboradas con placa de acero A36 de 2” de espesor y fijadas a la rueda de corte con soldadura E7018. Las **Figuras 253 y 254** muestra el detalle de las “ventanas” que componen la rueda de corte y el área de influencia que se reduce con la instalación de las barras tipo Grizzly.

Este tipo de modificación solo es eficiente en frentes del tipo Roca y Mixto, debido a que en un frente compuesto de material fino y plástico (Arcillas y limos) se corre el riesgo de generar un tapón en las ventanas de la rueda por material apelmasado, por lo que posteriormente se fueron retirando con el método arc-air hasta lograr obtener el diseño original del tipo “spoke”.

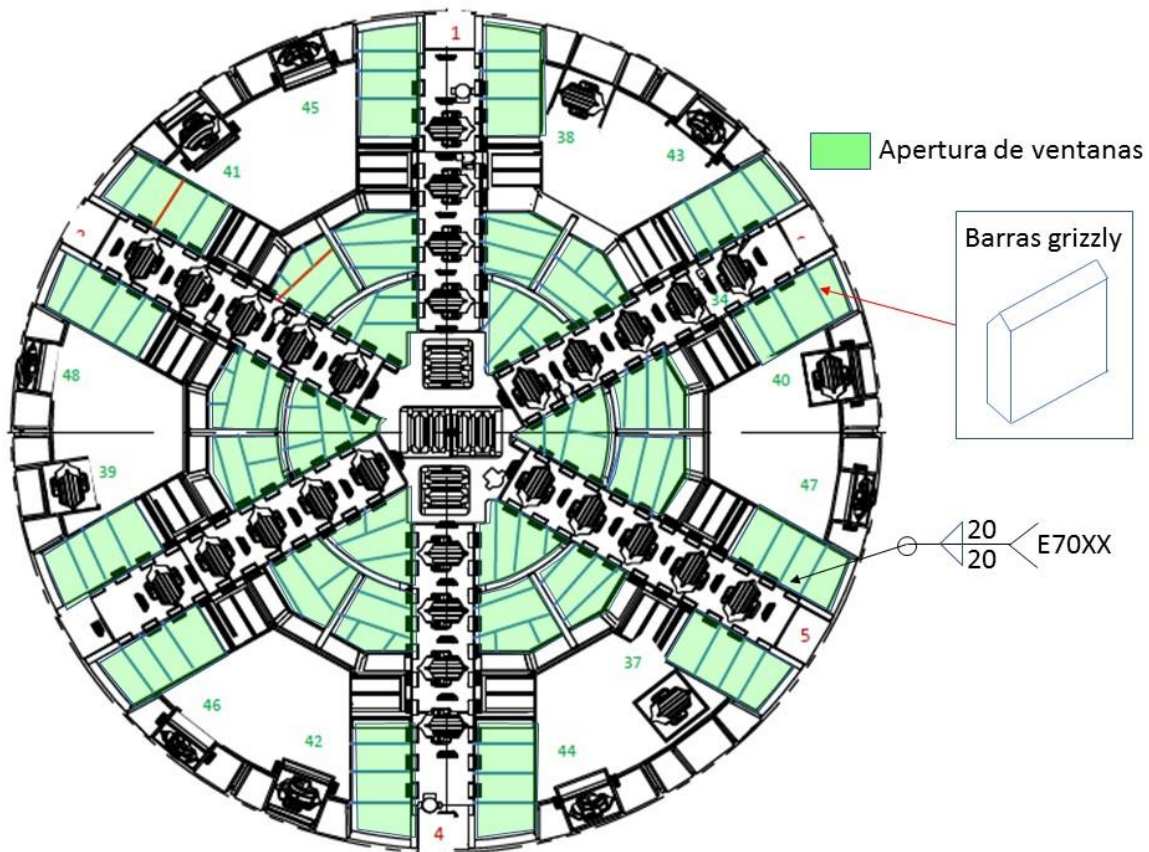


Figura 253. Barras tipo Grizzly.

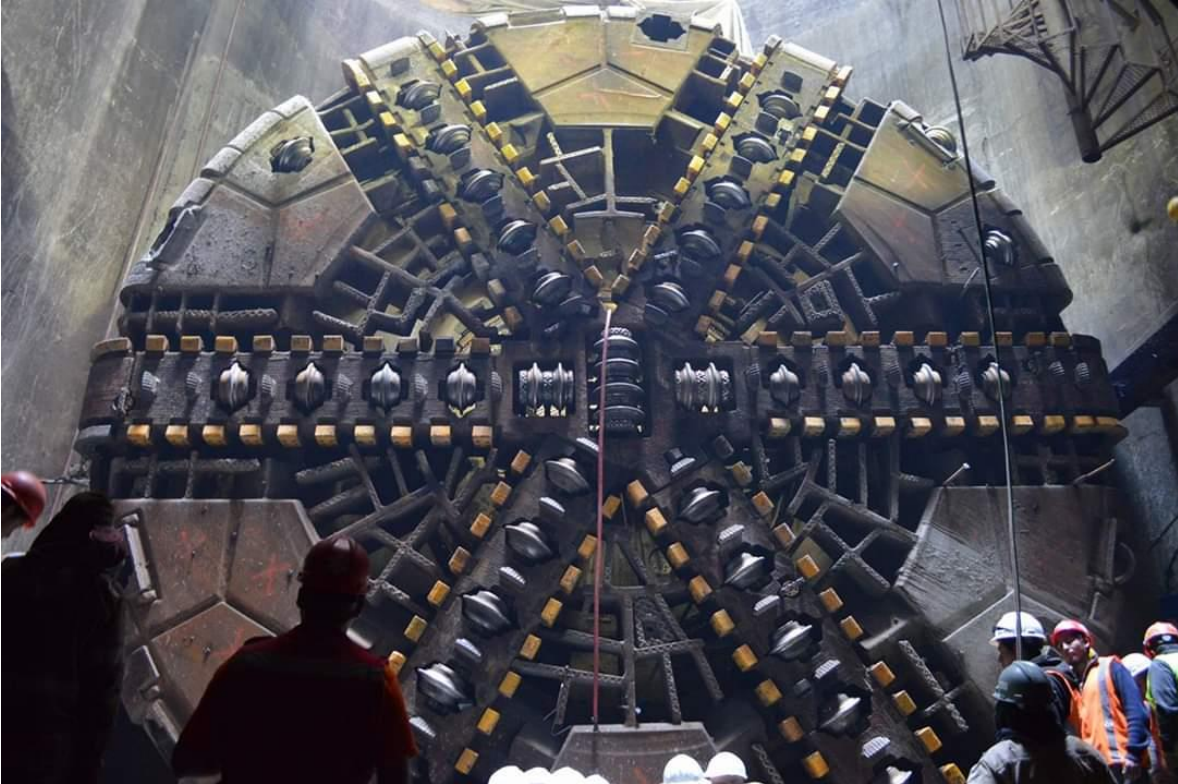


Figura 254. Barras tipo Grizzly.

Resolución 3 (Acondicionamiento de material). La homogeneidad de la rezaga generada durante la excavación en un frente del tipo MIXTO y ROCA tiene repercusiones importantes debido a la difícil extracción del material y la alta abrasividad del mismo, los fragmentos de roca en ocasiones se incrustan en el espacio que existe entre los alabes y las carcasas del tornillo sin fin generando un tapón o provocando un bloqueo en su giro. Para mitigar este problema se diseñó una mezcla de materiales finos que fue denominada “Pasta” con propiedades de adherencia al material rocoso y fluidez para fácil extracción como se muestra en la **Figura 255**.

La pasta diseñada se componía de una mezcla de lodo bentonítico con arena filler y arena de río, las arenas constituían el material fino y el lodo bentonítico aportaba la adherencia, obteniendo una mezcla heterogénea capaz de extraerse por el tornillo sin fin y disminuyendo el riesgo de generar un tapón o bloqueo.

El ciclo de fabricación y suministro es el mismo que el mortero, primeramente, se fabrica en la planta dosificadora, posteriormente se desciende a fondo de lumbrera con la bomba putzmeister para ser suministrado a la tuneladora mediante un contenedor móvil con eje helicoidal de 7 m³ de capacidad, una vez en la máquina se almacena en un contenedor fijo y se inyecta a la cámara de excavación utilizando bombas peristálticas, para realizar este ciclo fue necesario incorporar un nuevo tren de suministros (locomotora y vaca).

La dosificación empleada para la fabricación de la pasta fue:

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

DOSIFICACIÓN X 1.00 m ³				
MATERIAL	CANTIDAD DE MATERIAL UTILIZADA EN LA ELABORACIÓN DE MEZCLA	DENSIDAD RELATIVA	CANTIDADES DE MEZCLA	PROPORCIÓN
	A	B	C=A/(B*1000)	%
ARENA DE RÍO	326.025 Kg	2.47 ton/m ³	0.13199 m ³	13.20%
ARENA FILLER	760.72 Kg	2.25 ton/m ³	0.33810 m ³	33.81%
LODO BENTONITICO (175 kg de bentonita sódica x 1000 litros de agua)	567.00Kg	1.07 ton/m ³	0.52991 m ³	52.99%
			1.00000 m ³	100.00%

La cantidad total inyectada se calculó en 30 m³ por anillo excavado, inyectado de forma parcial 2 m³ a cada 100 milímetros de avance, de esta manera se mantiene la cámara de excavación entre un 50% y un 75% de rezaga logrando trabajar con el principio de EPB (Balance de presión de tierra). El cálculo de la cantidad de pasta inyectada depende de los parámetros de excavación y el más importante para cuidar el estado de los discos de corte en excavación en roca y/o suelos mixtos es la penetración. En la excavación de este tipo de terreno en el tramo 3, se mantuvo especial cuidado de que la penetración con la que se excavara fuera de máximo 5 mm/rpm. Para lo anterior, la velocidad de empuje a se debe de mantener en el orden de 10 mm/min, con una velocidad de giro de la rueda de corte de 2.47 rpm.



Figura 255. Accionamiento de material con “pasta”.

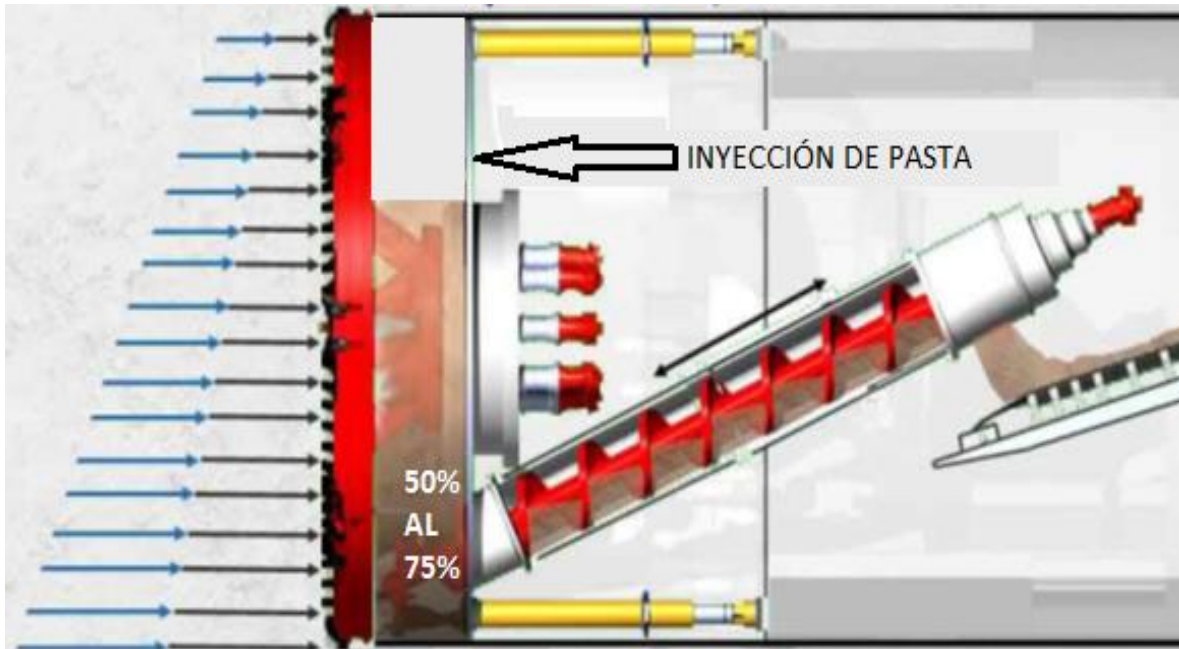


Figura 256. Inyección al frente de la “pasta”.

Resolución 4 (Adecuación al tornillo sin fin). Debido a los constantes bloqueos de los dos tornillos de Arquímedes que componían la tuneladora, los bajos rendimientos obtenidos con este sistema de rezaga y las condiciones geológicas conocidas para la excavación del subtramo de L11-L12, se realizaron reuniones técnicas para elaborar un plan que permitiera mayor conocimiento de estas condiciones para llegar a un diseño del sistema de rezaga de la máquina tuneladora que permitiera hacer frente a esas condiciones de una manera más eficiente. Derivado de esto, se llegó a la conclusión de fabricar un único tornillo con motorización y eje, con mayor protección al desgaste, con mejoras para la inspección y mantenimiento del mismo y con puertos de inyección necesarios para el acondicionamiento de la rezaga en caso de ser necesario. Así mismo se tomó la decisión de reemplazar el tornillo horizontal por un elemento de rezaga tipo banda transportadora como lo muestra la **Figura 257**.

Estas modificaciones a la TBM “Hidalgo” se llevaron a cabo durante el paso de la misma en la lumbrera L11, puesto que era necesario contar con el espacio suficiente para la instalación del nuevo tornillo en una sola pieza, evitando que cualquier unión soldada pueda presentar problemas de alineamiento y estructurales durante la excavación.

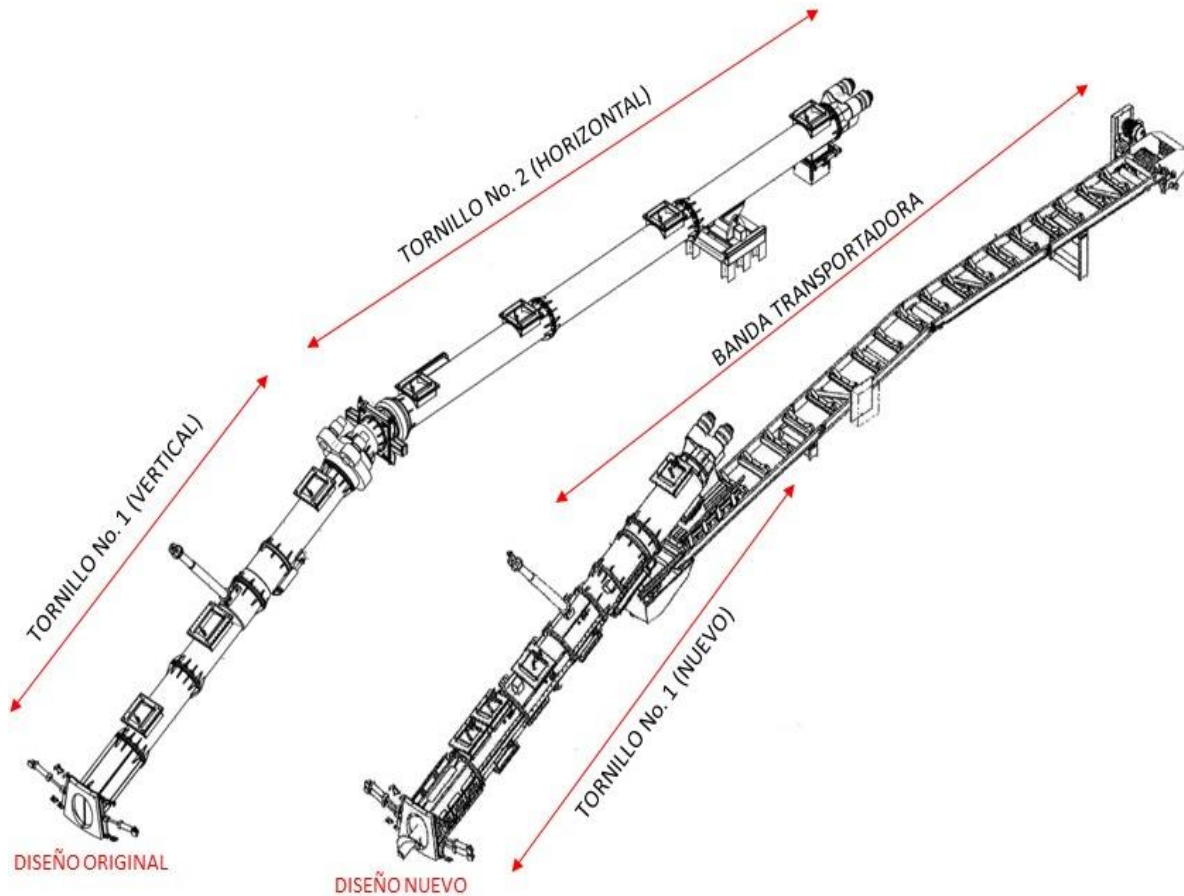


Figura 257. Cambio de sistema de extracción de rezaga.

El tornillo nuevo, mostrado en la **Figura 258**, se diseñó con aditamentos necesarios (puertos de inyección) para la inclusión de productos que daban tratamiento al material en su interior, necesarios para lograr que el material de rezaga tuviera una condición óptima para su transporte. Se le aumentaron el número de compuertas que daban la posibilidad de inspeccionar cada una de sus zonas sin problemas y de una manera más expedita, permitiendo así, verificar de manera más constante su estado físico y previniendo cualquier problemática mayor, así mismo se le acondicionó un sistema de telescopía que permitía introducir el cuerpo del tornillo hasta 50 centímetros dentro de la cámara de excavación, esto en caso de que se presentara un tapón en la compuerta del mamparo (bulkhead).

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

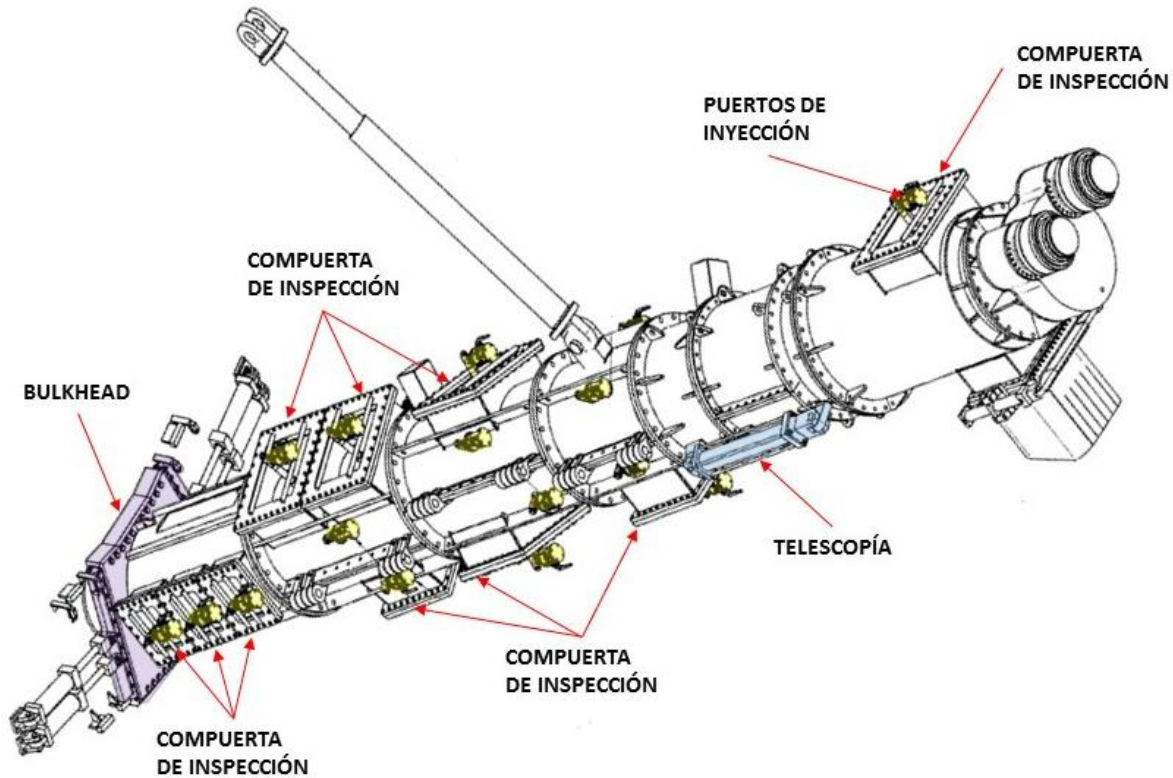


Figura 258. Diseño de nuevo tornillo sin fin.

Impacto en avance de excavación. La duración de las actividades no previstas realizadas para lograr liberar los constantes bloqueos del tornillo sin fin se refleja en un bajo rendimiento de producción. De los rendimientos de excavación obtenidos en los tres tipos de frente conciliados del tramo 3, el frente del tipo “Roca” fue el más bajo y es debido primordialmente a los problemas enfrentados por el funcionamiento de los tornillos sin fin para la extracción del material rezagado.

De una longitud total de 902.097 metros o 601 anillos; el subtramo L10-L11 es el único subtramo que se compone de una sección de frente completo del tipo “Roca”. En la **Figura 259** se presentan los días de incidencia, en donde se observa que representan un 53% de la duración total de excavación.

No. De anillo		Total parcial	Periodo de excavación		Total [Días calendario]	DIAS DE INCIDENCIA	Tipo de material
DE	A		DE	A			
A119	A213	95 anillos	16/04/2012	19/06/2012	65	2	ROCA
A885	A975	91 anillos	04/10/2012	25/11/2012	53	40	ROCA
A1043	A1065	23 anillos	14/02/2013	11/03/2013	26	0	ROCA
A1389	A1780	392 anillos	15/10/2013	30/11/2014	412	251	ROCA
		601 anillos			556	293	

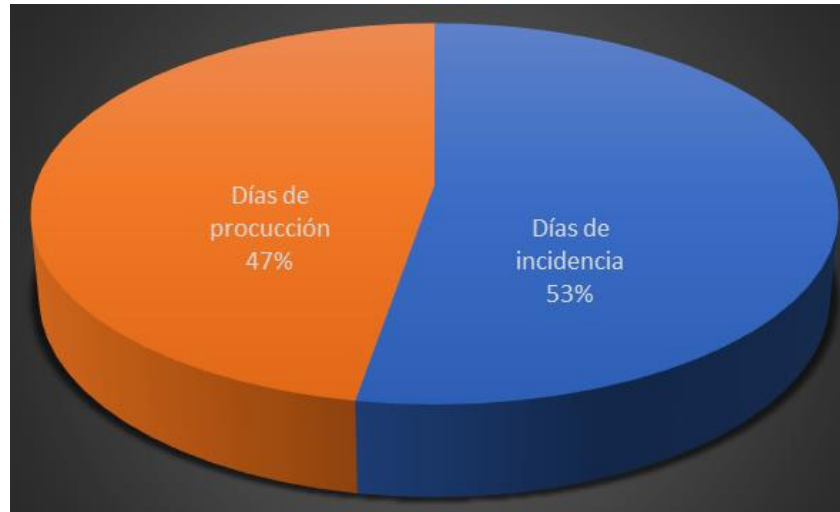


Figura 259. Comparación días de producción contra días de incidencias.

IV.4.2 Incidencias por operación (Rueda de corte).

La importancia de conocer lo más preciso posible el perfil geológico y analizar el comportamiento de los parámetros de excavación radica en programar las medidas necesarias para evitar algún incidente mayor. Los parámetros de operación de una tuneladora se manejan de manera distinta en los tres diferentes tipos de frente. En la transición de un frente del tipo Mixto a un frente del tipo Roca los parámetros son más estrictos debido a que la composición del material puede cambiar drásticamente, para ello el operador de la tuneladora debe observar y analizar el comportamiento de la fuerza de empuje que ejerce la máquina y el valor del torque de la rueda de corte cuidando siempre no sobrepasar los valores establecidos para cada tipo de material.

El perfil geológico del tramo 3, en particular el del subtramo L10-L11, se compone de dos transiciones de frente Mixto a frente Roca. En la **Figura 260** se muestra una pequeña sección del perfil geológico en mención, en ella se observan las dos transiciones compuestas de roca basáltica en la parte superior y limo arenoso en la parte inferior.

Durante el paso de las dos transiciones se observaron variaciones significativas en los parámetros de excavación (Fuerza de empuje y torque de la rueda) que ocasionaron un paro prolongado en dos puntos en específico; en el anillo No.1015 y anillo No.1294.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

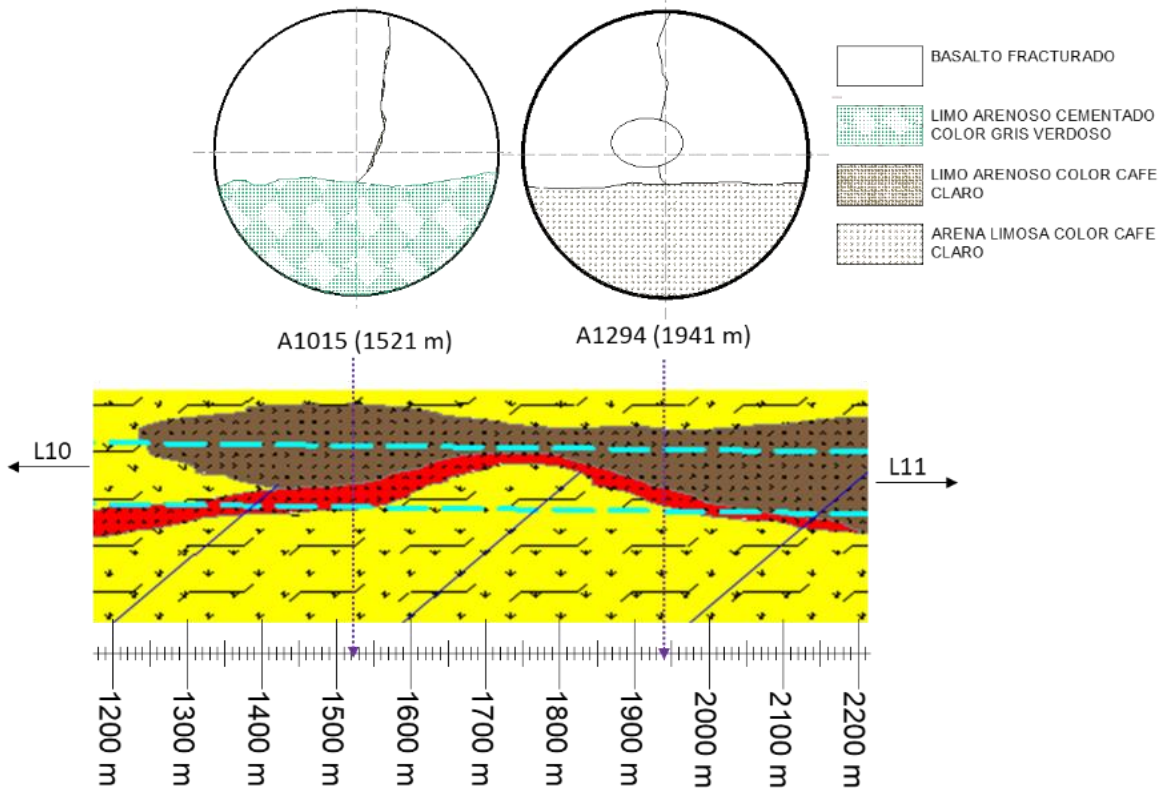


Figura 260. Transiciones en perfil geológico del subtramo L10-L11.

Las **Figuras 261 y 262** muestran de manera gráfica el registro de los valores máximos de la fuerza de empuje y el torque de la rueda de corte obtenidos durante la excavación de los anillos subsecuentes a la última intervención atmosférica realizada (mantenimiento) hasta el anillo en donde se presentó el valor máximo que ocasiono un paro prolongado.

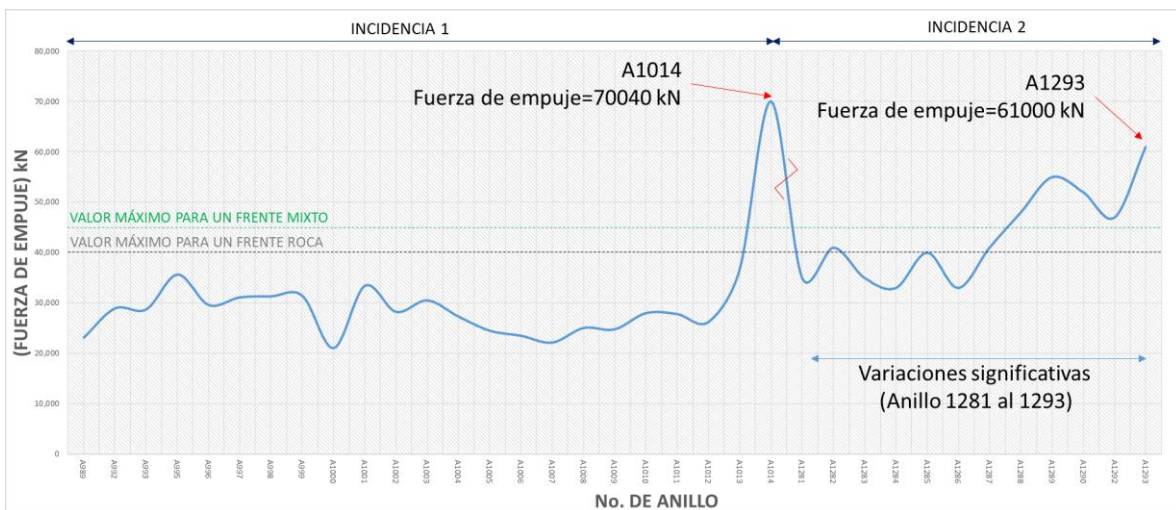


Figura 261. Registro de la fuerza de empuje durante el paso de las transiciones.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

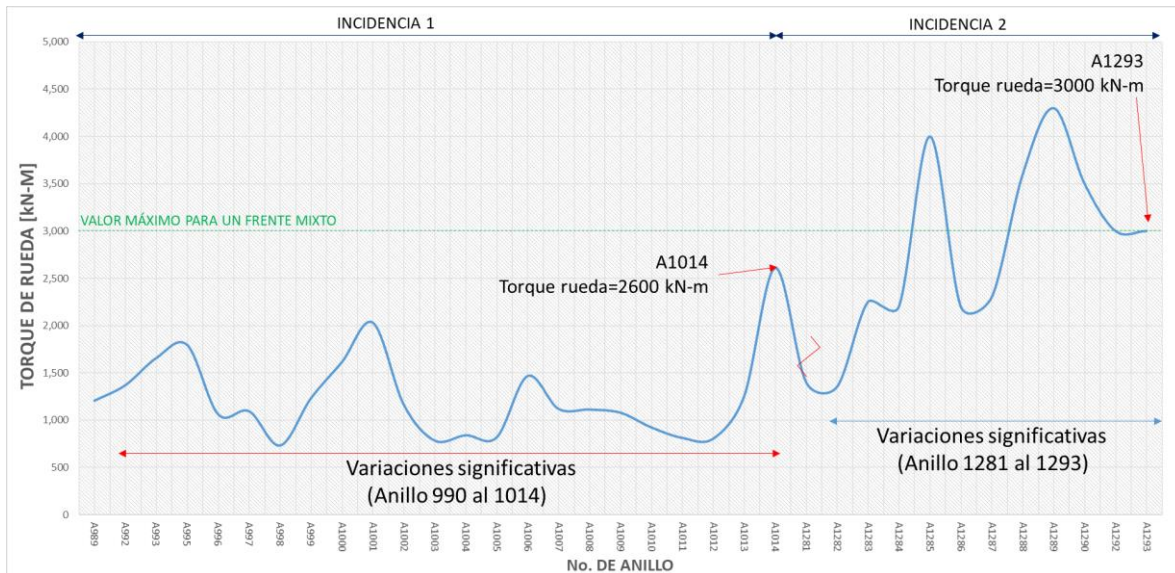


Figura 262. Registro del torque de la rueda de corte durante el paso de las transiciones.

Problemática 2 (Anillo 1014). El ultimo mantenimiento realizado a la rueda de corte antes de ocurrida la incidencia fue en el anillo No.989 por lo que las gráficas anteriores inician un anillo subsecuente a este hasta llegar al anillo No.1014, los valores máximos de fuerza de empuje se mantuvieron muy similares teniendo un promedio de 28 000 kN, un valor aceptable para el tipo de frente, a excepción del anillo No. 1014 alcanzando los 70 040 kN y sobrepasando los 45 000 kN permisibles. El torque de la rueda de corte presento variaciones significativas del orden de 2000 kN-m sin embargo se encontraban dentro de los valores permisibles.

Es de resaltar la composición y heterogeneidad del frente de excavación, compuesto por basalto masivo con fracturas naturales rellenas de un limo arenoso color café claro, observándose también limo arenoso cementado. Se observan también intercalaciones de riolita fracturada color rojo. Materiales que en su conjunto forman un frente de excavación complejo y altamente abrasivo. Cabe resaltar que la sección de basalto se encuentra en la parte superior y aumenta conforme avanza la longitud del túnel.

Durante la excavación del anillo No. 1014 se decide suspender el avance debido a que la fuerza de empuje rebasó el valor máximo permisible, dando la pauta a realizar la intervención atmosférica para la revisión y mantenimiento de la rueda de corte.

Durante la intervención se observaron daños (golpes y desprendimientos) de soldaduras y cuerpos de los discos centrales (Housing). La figura XX muestra el desprendimiento de las barras mezcladoras triangulares ubicadas en el mamparo de la tuneladora, también se muestra un importante desgaste en la parte perimetral de la rueda de corte y al interior de la cámara de excavación (escudo A

superior e inferior). Las **Figuras 263** y **264** muestran el daño presentado en un cortador central y en el interior de la cámara de excavación. Estas observaciones derivaron en un paro prolongado para el análisis de las posibles causas y la programación de las reparaciones pertinentes.



Figura 263. Daño presentado en un cortador central.



Figura 264. Daño presentado en cámara de excavación.

A continuación, se enlistan los posibles escenarios que causaron los daños antes mencionados y que conllevaron a realizar actividades de reparación no previstas.

- Uno de los factores que implicaron los daños presentados es la composición y heterogeneidad del frente de excavación compuesto por basalto masivo lo cual seguramente aunado al porcentaje importante de fragmentos de roca basáltica fracturada y a la abrasividad del material excavado, que, al impactar constantemente con los cortadores y los mezcladores, propiciaron la fatiga de los mismos ocasionando su desprendimiento.
- Los diversos bloqueos en el giro de los discos de corte debido a la entrada de material en su interior, propicio esfuerzos atípicos en y alrededor de los mismos, teniendo como consecuencia la fatiga y desprendimiento de ellos en la rueda de corte.

Resolución 5 (Acciones y Reparaciones). Inicialmente se realizó la extracción de los discos centrales dobles dañados (1/3; 2/4; 5/7; 6/8) utilizando equipo de oxicorte y arc-air, así como el retiro (corte) de los housing desprendidos con el objetivo de dejar completamente vacío el espacio reservado para estos elementos en la rueda de corte y posteriormente realizar una inspección minuciosa. De igual manera se realizó el retiro de dos barras mezcladoras mediante la utilización de equipo de corte (arc-air).

Una vez retiradas las partes mencionadas se realizó una revisión minuciosa al cuerpo de la rueda de corte por el método de partículas magnéticas como se muestra en la **Figura 265**. La inspección mediante partículas magnéticas es un método de ensayo no destructivo utilizado tanto para el control superficial como sub superficial, esta técnica se utiliza en materiales ferromagnéticos permitiendo detectar grietas y otras discontinuidades tanto superficiales como próximas a la superficie. La aplicación del ensayo de Partículas Magnéticas consiste básicamente en magnetizar la pieza a inspeccionar, aplicar las partículas magnéticas (polvo fino de limaduras de hierro) y evaluar las indicaciones producidas por la agrupación de las partículas en ciertos puntos. Los resultados de la inspección arrojaron solamente pequeñas discontinuidades en las soldaduras de las barras mezcladoras y housing centrales (Fisuras).

Los trabajos de reparación de la rueda consistieron en:

- Inicialmente se retiraron los 4 discos centrales (dobles) y housing dañados mediante el método de oxicorte y arc-air procurando dejar intactas las placas que conforman el cuerpo de la rueda de corte.
- De manera externa se fabricaron housing nuevos que posteriormente serian instalados, para su fabricación se utilizaron plantillas y placa de acero A36.
- Se realizó la instalación de los housing nuevos previo biselado de placas base y con la aplicación de soldadura E7018.
- Posteriormente se realizó la colocación de barras mezcladoras nuevas en la rueda de corte mediante la aplicación de soldadura E7018 y cartabones.

- Finalmente se realizó la colocación de cordones en de soldadura antidesgaste (E6006) en forma de rombo y punto en la periferia del escudo.



Figura 265. Inspección por partículas magnéticas.

Problemática 3 (Anillo 1293). Una vez finalizadas las reparaciones de la primera incidencia se reiniciaron las actividades de excavación hasta llegar al anillo No. 1280 en donde se realizó el mantenimiento a la rueda de corte antes de ocurrida la incidencia 2.

Las gráficas de la Figura 261 y 262 parten del anillo No. 1281 y llegan al anillo No. 1293 indicando los valores máximos de fuerza de empuje y torque de la rueda de corte, si se observa de manera analítica, existen variaciones significativas de los dos parámetros; la fuerza de empuje presenta un pico de hasta 40000 kN y el torque de hasta 4500 kN-m por lo cual se esperaría que el operador de la tuneladora realizara un análisis del comportamiento y tomara acciones pertinentes para evitar un daño en el equipo excavador, sin embargo, se puede deducir que una de las decisiones que ocasionaron la segunda incidencia fue no haber realizado una inspección a la rueda de corte cuando los valores del torque variaron de manera significativa.

Al igual que la incidencia anterior la composición del frente de excavación es de basalto masivo con fracturas naturales rellenas de limo arenoso color café claro, observándose también arena limosa cementada. Materiales que en su conjunto forman un frente de excavación heterogéneo, complejo y altamente abrasivo.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO




Al inicio de la excavación del anillo No. 1294 se decide suspender el avance debido a que la fuerza de empuje rebasó el valor máximo permisible, alcanzando hasta 61000 kN y dando la pauta a realizar una intervención atmosférica para la revisión y mantenimiento de la rueda de corte.

Durante la intervención se observaron daños considerables en los cuatro discos centrales (del 01 al 08), 6 discos contiguos (del 09 al 14) y 2 discos frontales (26 y 28) la mayoría de ellos con el aro roto y con desgaste, aunado a ello se observó un considerable desgaste de hasta 50 milímetros en el cuerpo central de la rueda de corte como se observa en la **Figura 266**, posteriormente se realizó una inspección mediante partículas magnéticas para identificar posibles agrietamientos en soldaduras de todos los housing encontrado fisuras en los housing No. 1-3, 2-4, 6-8, 9 y 11 indicados en la **Figura 267 y 268**.



Figura 266. Desgaste en rueda de corte.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

Posición	Cortador	Housing	Simbología
1-3	Dañado (Aro roto)	Dañado (Fisura)	 CORTADOR DAÑADO  HOUSING DAÑADO  ZONA DAÑADA DEL CUERPO DE LA RUEDA
2-4	Dañado (Aro roto)	Dañado (Fisura)	
6-8	Dañado (Aro roto)	Dañado (Fisura)	
9	Dañado (Aro roto)	Dañado (Fisura)	
10	Dañado (Sin Aro)	Aceptable	
11	Dañado (Aro roto)	Dañado (Fisura)	
12	Dañado (Aro roto)	Aceptable	
13	Desgaste	Aceptable	
14	Desgaste	Aceptable	
26	Desgaste	Aceptable	
28	Dañado (Aro roto)	Aceptable	

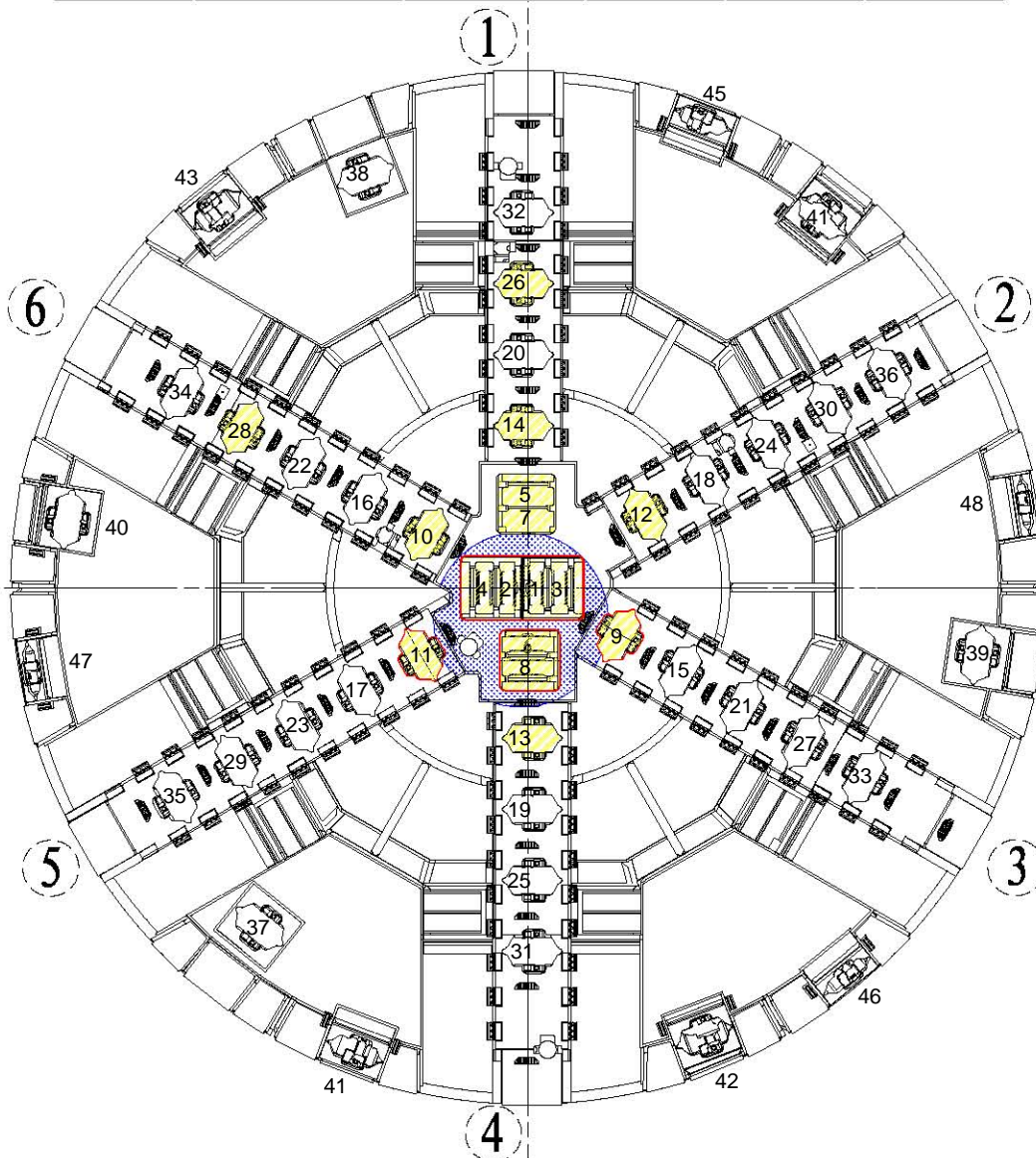


Figura 267. Mapeo de daños.



Figura 268. Resultados de la inspección por partículas magnéticas.

Los posibles escenarios que causaron la segunda incidencia se enlistan a continuación:

- Al igual que la incidencia anterior, uno de los factores que implicaron los daños en la rueda es la composición y heterogeneidad del frente de excavación compuesto por basalto masivo y arena limosa, material que en conjunto forman un frente altamente abrasivo. Durante la inspección detallada de la rueda de corte y la composición del frente de excavación se encontró una formación rocosa (bomba piroclástica) de 3 metros de diámetro aproximadamente con un índice de dureza RQD del 100% (Muy bueno) obtenida de muestras de perforación (sondajes) diamantina. La **Figura 269** ilustra las dimensiones y ubicación de la roca piroclástica en el plano de la rueda de corte, así mismo muestra que los daños que se presentaron coinciden con la zona en donde se ubica la roca. De esta manera se puede deducir que un factor causante de la segunda incidencia

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

fue la presencia de una bomba piroclástica de dureza RQD igual a 100%, ubicada justo en el centro del eje de excavación causando daños colaterales.

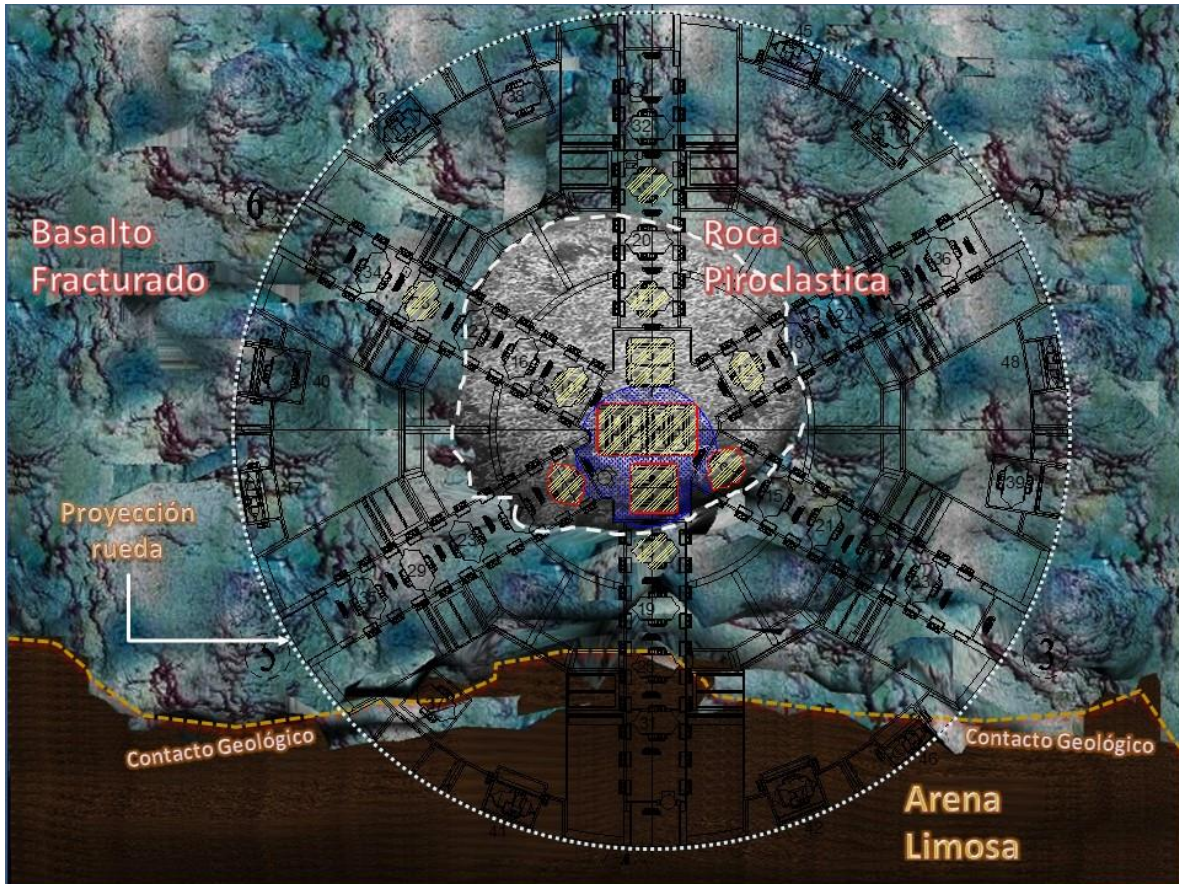


Figura 269. Roca basáltica piroclástica.

- Otro fundamento teórico es al análisis del comportamiento de los parámetros de excavación durante la excavación de este subtramo y específicamente del anillo No.1281 al anillo No.1293 en donde se presentaron variaciones considerables para este tipo de frente, si se analizan las gráficas de la **Figura 270** se obtiene que en dos ocasiones se sobrepasaron los valores máximos permisibles para el tipo de frente, por lo que una vez alcanzado el primer máximo se debería de haber detenido el avance de la excavación para inspeccionar la herramienta de corte.
- Adicionalmente al fundamento anterior el perfil geológico marca una transición de frente Mixto a frente Roca por lo que los valores permisibles de los parámetros de excavación son más estrictos.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

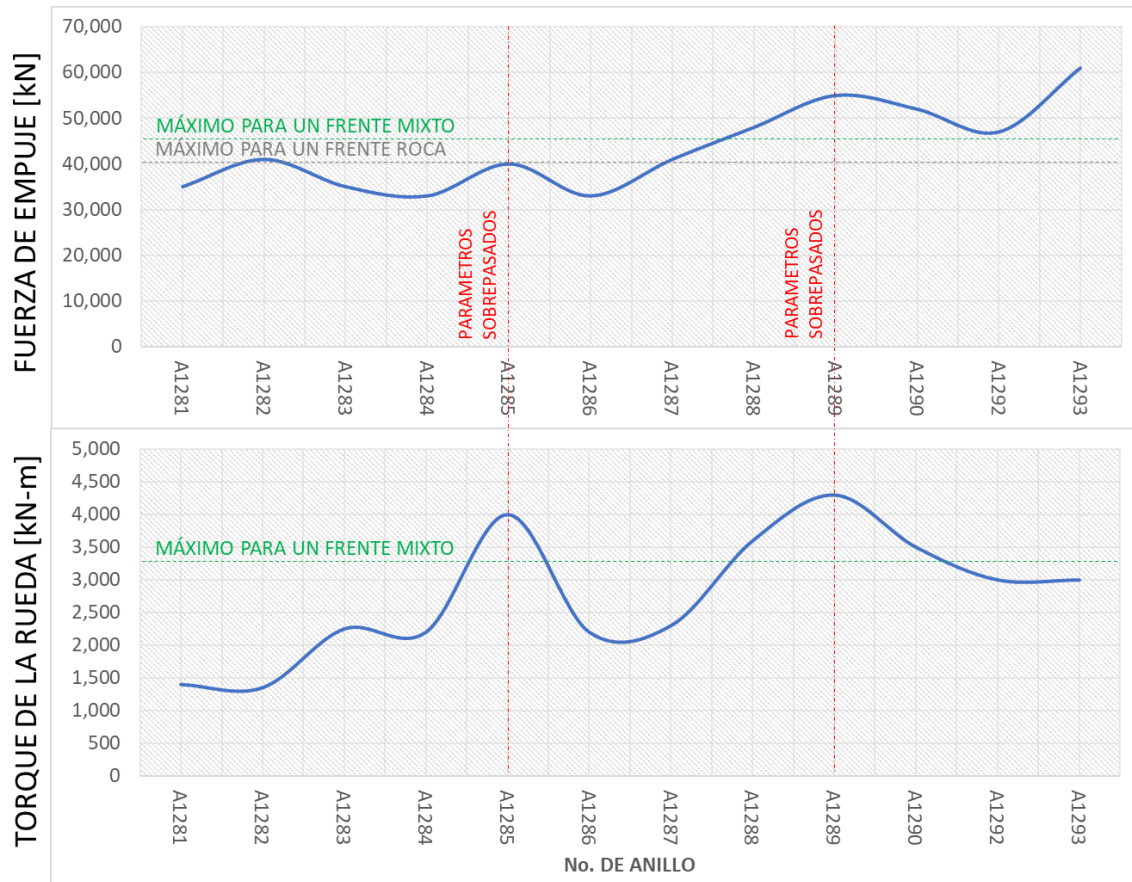


Figura 270. Parámetros de excavación sobrepasados.

Resolución 6 (Acciones y Reparaciones). Inicialmente se realizó la extracción de los discos centrales dobles 1-3, 2-4, 5-7 y 6-8, así como los discos frontales 9, 10, 11, 12, 13, 14, 26 y 28, por medios manuales y utilizando equipo de oxicorte y arc-air. Posteriormente se realizó una inspección por el método de partículas magnéticas para identificar las discontinuidades (Fisuras) en todos los housing de la rueda de corte, se encontraron un total de 5 housing que presentaban fisuras significativas (No.1-3, 2-4, 6-8, 9 y 11).

Los trabajos de reparación consistieron en:

- Una vez identificados los housing dañados se procedió al retiro de los mismos mediante oxicorte y arc-air procurando guardar la integridad del cuerpo de la rueda.
- Previo a los trabajos de reparación de la zona desgastada de la rueda de corte, se realizaron trabajos de demolición parcial en la roca piroclástica con el objetivo de generar espacio suficiente para la aplicación de soldadura en la parte frontal. El procedimiento de demolición fue a base de creación de barrenos de 1¼" con equipo neumático e hidráulico como lo muestra la **Figura 271** y con la aplicación de un agente expansivo no

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

expansivo (DEXPAN) para fracturación de la roca, posteriormente se realizó la limpieza de escombros por medios manuales.

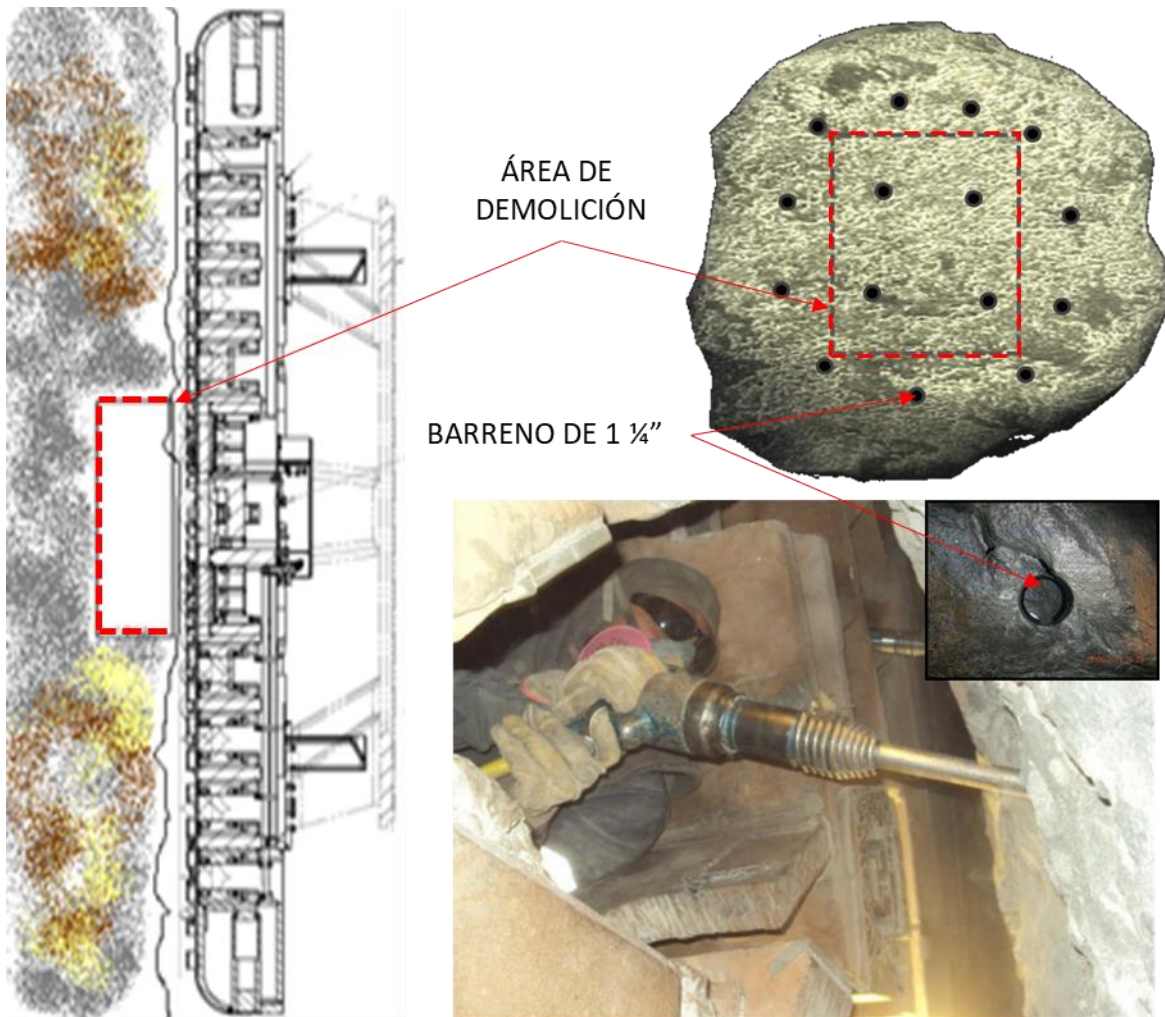


Figura 271. Demolición del frente rocoso.

- El cuerpo de la rueda de corte se compone de placas tipo Hardox unidas por soldadura, estas placas se diseñaron de manera geométrica para soportar los esfuerzos actuantes en el frente de excavación y para alojar todos los housing de los cortadores. El desgaste observado en la rueda alcanzó su blindaje frontal y 3 placas tipo hardox que componen el cuerpo principal como se indica en la **Figura 272**. Por lo cual fue necesario sustituir estos elementos con el objetivo de conservar íntegramente la estructura de la rueda.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

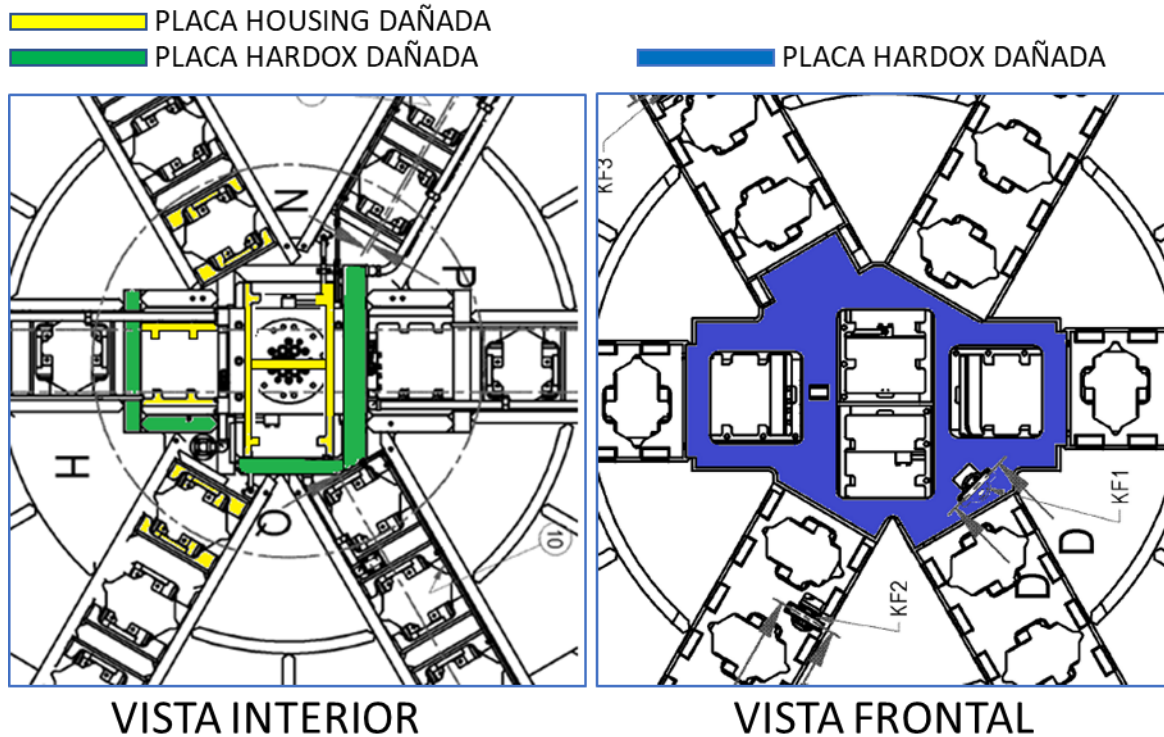


Figura 272. Placas hardox reemplazadas.

- Identificadas las partes dañadas se procedió a su retiro a base de oxicorte y arc-air.
- De manera externa se fabricaron housing nuevos y placas hardox, para su abricación se utilizaron plantillas y levantamientos topográficos.
- Una vez fabricadas las placas nuevas y finalizados los trabajos de retiro de las placas dañadas, se procedió primeramente a la colocación de placas hardox a base de soldadura E7018.
- Posteriormente se realizó la instalación de los housing nuevos previo biselado de placas base y con la aplicación de soldadura E7018.

Impacto en el avance de la excavación. La duración de las actividades no previstas realizadas para la reparación de la rueda de corte en dos ocasiones fue de un total de 68 días calendario. En la **Figura 273** se presentan los días de incidencia en comparación con los días de producción, en donde se observa que representan un 6% de la duración total de excavación para este tipo de frente. Cabe mencionar que estas incidencias solo ocurrieron en el subtramo L10-L11.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

No. De anillo		Total parcial	Periodo de excavación		Total [Días calendario]	Dias de incidencia	Tipo de material
DE	A		DE	A			
A61	A118	58 Anillos	17/03/2012	15/04/2012	30		MIXTO
A214	A258	45 Anillos	20/06/2012	03/07/2012	14		MIXTO
A737	A884	148 Anillos	29/08/2012	03/10/2012	36		MIXTO
A976	A1042	67 Anillos	26/11/2012	13/02/2013	80	40	MIXTO
A1066	A1388	323 Anillos	12/03/2013	14/10/2013	217	28	MIXTO
A1781	A2072	292 Anillos	01/12/2014	21/04/2015	142		MIXTO
		2072 Anillos			1189	68	

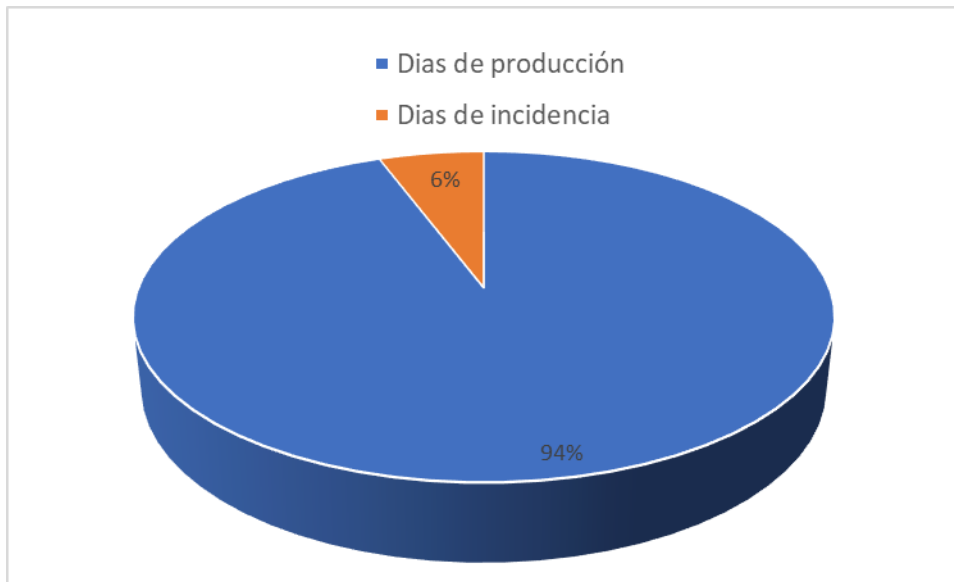


Figura 273. Relación de días de incidencia con días de producción.

IV.4.3 Incidencias por funcionamiento (Cambio de cepillos).

El principio básico de funcionamiento de una tuneladora tipo EPB es su capacidad de equilibrar las presiones que el terreno ejerce durante la construcción del túnel, aunado a que por medio de una serie de mecanismos o sellos impide el ingreso de material o agua a su interior conservando de esta manera su integridad y la de los trabajadores, de ahí su nombre de “escudo”, sin embargo, esta característica tiene una enorme desventaja debido a que el funcionamiento de estos sellos depende directamente de su vida útil y la condiciones del frente.

Otro factor causante de retrasos y paros prolongados durante la excavación del tramo 3 del TEO, es el daño presentado en los sellos ubicados en el faldón de la tuneladora denominados “cepillos”, la función de estos es impedir el ingreso de mortero inyectado para el relleno de espacio anular generado entre el terreno y la dovela, así mismo impide el ingreso de agua y material fino al interior de la tuneladora.

El sistema de sellos del faldón de la TBM Robbins Hidalgo está compuesto por 3 líneas de cepillos formando dos cámaras para inyección de grasa entre éstas,

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

como así lo muestra la **Figura 274**; a su vez, cuenta con ocho puertos de inyección en el perímetro para cada una de las cámaras. El sistema de inyección de grasa para sello de cola, se compone de una bomba neumática que lleva la grasa a un distribuidor que inyecta a ocho líneas, cuatro frontales y cuatro traseras, y a otro distribuidor que divide la inyección a otras ocho líneas; el sensor de presión de grasa está ubicado a la entrada del primer distribuidor lo que no nos permite conocer la presión de inyección real de cada línea a la salida en las cámaras. A su vez, el sensor de presión de inyección de mortero se encuentra ubicado a la salida de las bombas de pistón, mucho antes de las seis líneas de depósito en el espacio anular.

La presión de la inyección de grasa es un factor de suma importancia ya que nos permite evitar el ingreso del mortero a estos elementos, por lo tanto, se debe considerar que la presión de la primera debe superar a la segunda. La incertidumbre entre el conocimiento de ambas presiones representa un riesgo de deterioro de los sellos por el posible ingreso del mortero en estos.

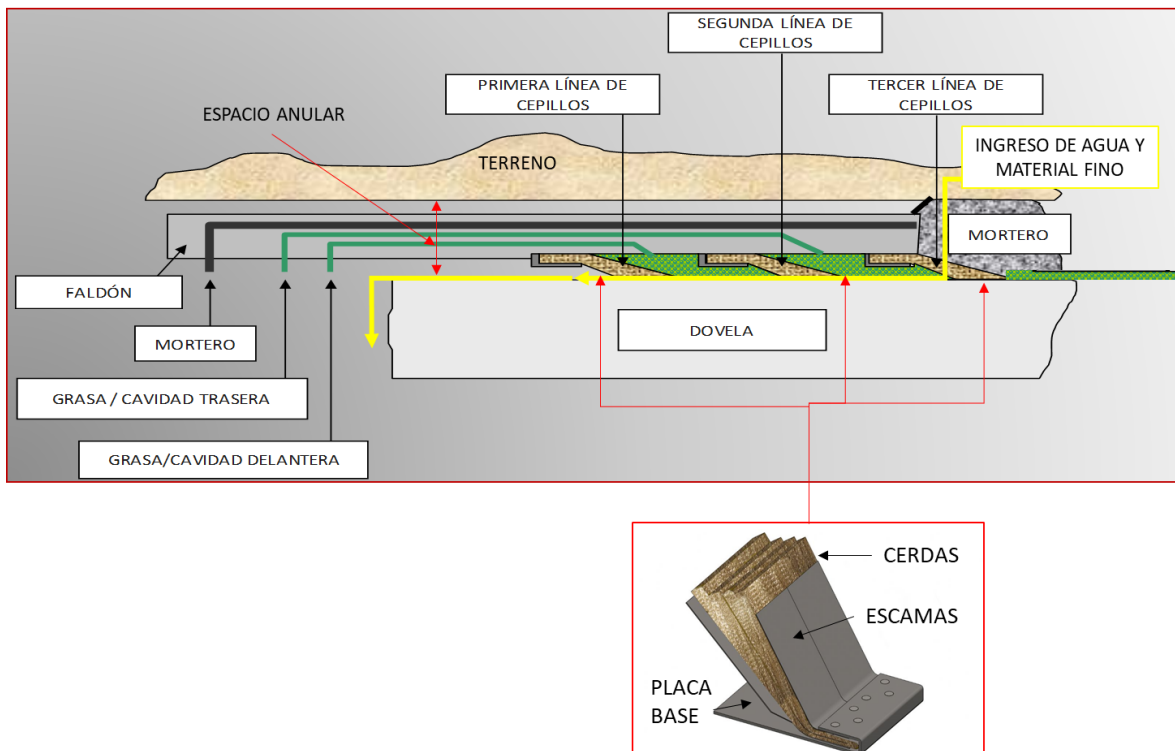


Figura 274. Cepillos del faldón de la tuneladora.

El desgaste paulatino de los cepillos se debe a diversos factores que ocasionan la pérdida de sus cerdas y por consiguiente su función, estos factores son principalmente; un mal control de inyección de grasa y mortero (presión de inyección y consumo), la presencia de frentes mixtos induce una tendencia a la desalineación del escudo por su inercia natural de comportamiento hacia los materiales blandos implicando un desvío recurrente que provoca la disminución del GAP (espacio entre el faldón y la dovela) probando un arrastre de los cepillos,

otro efecto es la vibración que se genera en el escudo cuando está excavando un frente roca-suelo, así mismo las zonas de alta permeabilidad y presiones hidrostáticas considerables el flujo de agua origina que el mortero destinado al relleno del espacio anular se degrade, incrementando su fluidez y ocasionado paulatinamente su ingreso a la zona de cepillos.

Los problemas que derivan del desgaste de estos elementos afectan directamente al rendimiento de la excavación debido a que generan retrasos principalmente por la acumulación de material y agua que ingresa por el faldón de la máquina, deteniendo la actividad de montaje del anillo por trabajos de limpieza, además de que la falla de los sellos de cola impide que la TBM aplique la presión EPB adecuada y por lo tanto no pueda contener el flujo de agua, poniendo en riesgo de inundación la máquina y el túnel.

Los cepillos de la tuneladora Hidalgo del tramo 3 del TEO fueron diseñados para una vida útil de hasta 3 kilómetros de excavación, por lo cual durante el paso de lumbrera es necesario su reemplazo. Los materiales encontrados en todo el tramo 3 tienen una permeabilidad de media a alta con una presión hidrostática del orden de 2.0 a 2.5 bares y con un nivel freático de 10 a 25 metros por encima de la clave del túnel, ocasionado flujos de agua constantes en el mismo.

Es posible controlar momentáneamente el flujo de agua y material de suelo que ingresa por el faldón, por medio de inyecciones extraordinarias de mortero o espuma de poliuretano, el cual funciona como un sello temporal durante la colocación de un anillo, sin embargo, esto tiene una desventaja debido a que una vez iniciada la excavación es necesario realizar un nuevo sello el cual se refleja directamente en el costo de la obra. Cuando el flujo de agua y material de suelo alcanza a llegar a los 70 lps, es prácticamente imposible controlarlo, por lo que la mejor solución es realizar un cambio de cepillos, tomando en consideración el riesgo que esto implica. Como anteriormente se menciona el cambio de cepillos antes de pasar por una lumbrera de mantenimiento es más complejo debido al riesgo que esto conlleva. Cabe destacar que durante la excavación del tramo 3 del TEO fue necesario realizar el cambio de cepillos en sus tres subtramos que lo conforman.

Una vez que el equipo operativo (Mano de obra) identifica un posible daño en los cepillos mediante la observación, se programan una serie de trabajos preliminares que ayudaran durante el proceso, estos trabajos se pueden realizar de manera simultánea al ciclo de excavación.

Construcción de estación de bombeo. El objetivo de construir una estación de bombeo es minimizar el flujo y las aportaciones agua hacia la zona de donde se encuentra la tuneladora, es decir, abatir el nivel freático, para tal actividad se realizó la construcción de un total de 12 pozos de bombeo que rodearon la máquina como se muestra en la **Figura 275**, estos pozos son equipados con bombas de tazonas de 58 H.P. que en conjunto son capaces de extraer un gasto

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

promedio de 200 lps a una profundidad aproximada de 110 metros, el procedimiento constructivo es similar al realizado durante la construcción de las lumbreras.

Cuando el sistema está totalmente construido se enciende mínimo 3 días antes de iniciar el retiro de cepillos para obtener el nivel dinámico de aguas freáticas, el cual debe estar por debajo del nivel de la tuneladora. Todo el sistema permanece encendido y monitoreado hasta que concluyen las actividades en la TBM y posteriormente son desequipados y rellenados con una mezcla de agua, arena, bentonita y cemento.

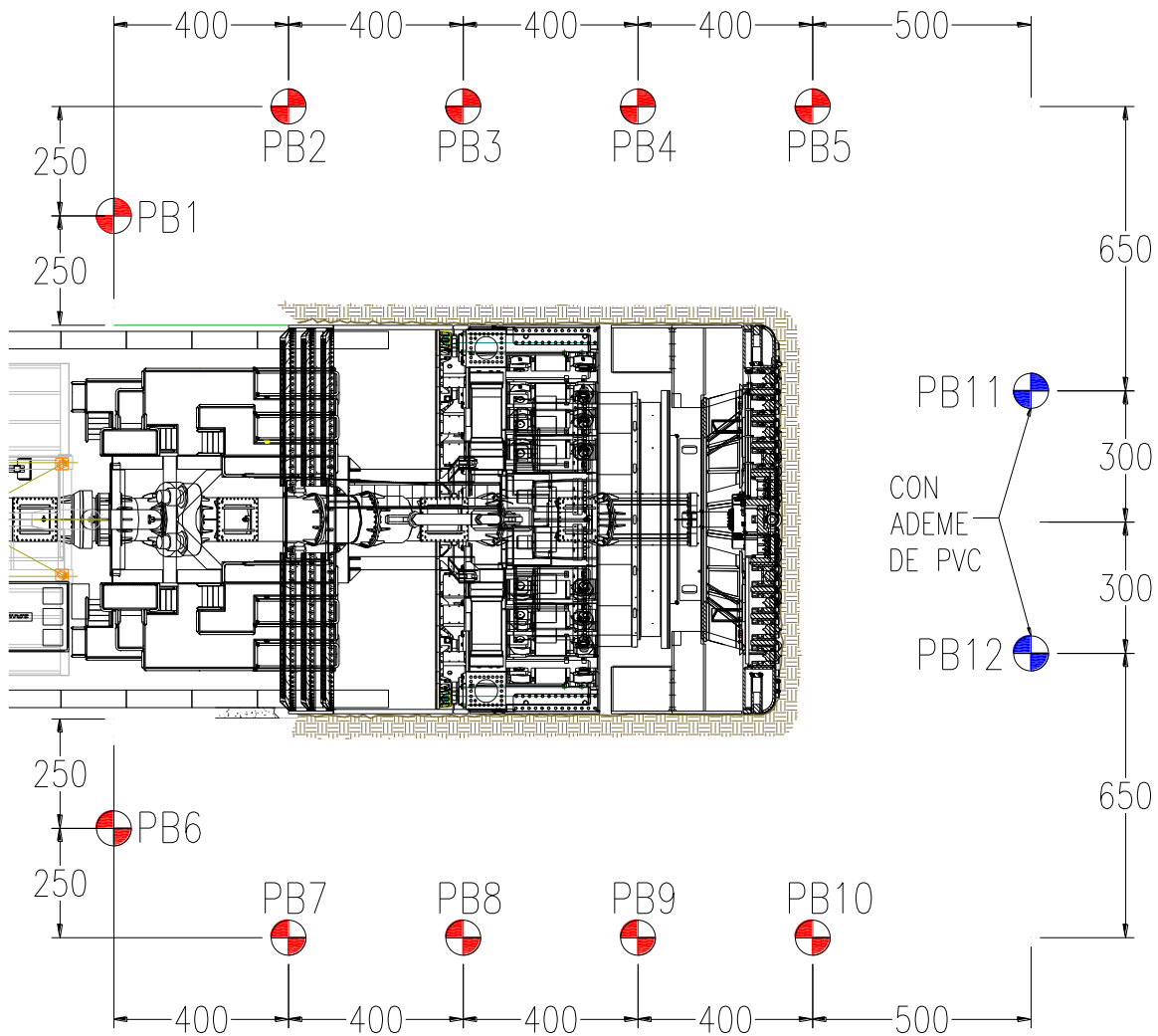


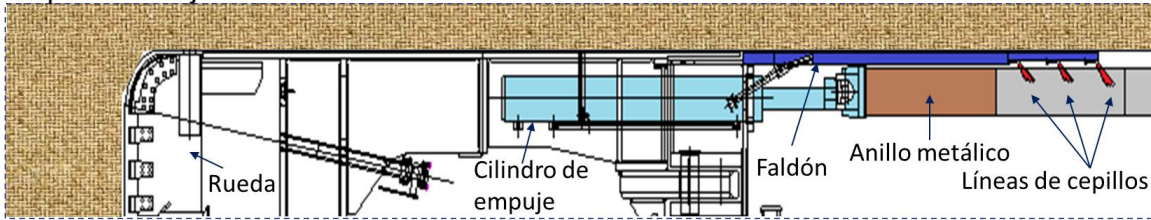
Figura 275. Estación de bombeo realizada en subtramo L11-L12.

Preparación del anillo metálico. Las líneas de cepillos comúnmente están en contacto con el último-penúltimo anillo colocado por lo cual siempre permanecen ocultas durante el proceso de excavación como lo muestra la Figura 274. La metodología utilizada para descubrir las líneas de cepillos dentro del túnel es mediante la instalación de un anillo capaz de ser “desmontable” una vez que los

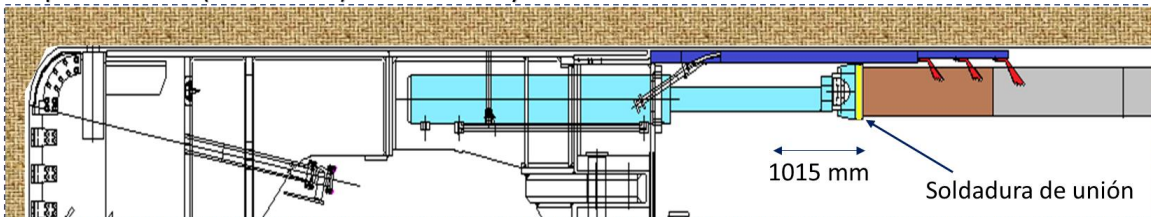
PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

cepillos estén en contacto con él, para ello se utiliza un anillo de acero que es temporalmente unido a la base de los cilindros de empuje (Pads), esto con el objetivo de que al poder retraer los cilindros muevan todas las dovelas del anillo montado, el método en mención se observa en la **Figura 276**. Utilizando este método solo es posible reemplazar las dos primeras líneas de cepillos debido a que la tercera se encuentra en contacto con el terreno, así mismo debido a que en combinación con un sello anular obstruye la entrada de material o agua y salvaguarda la integridad de la máquina y el personal.

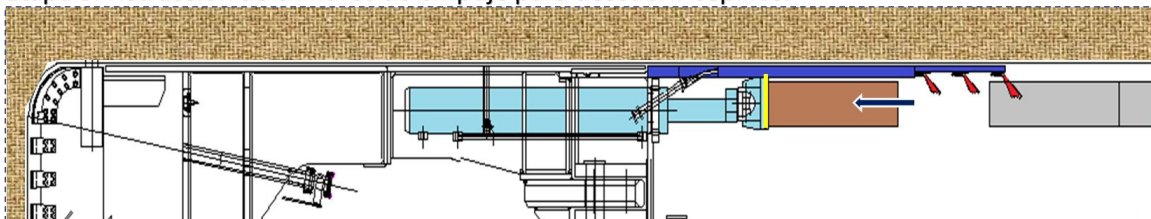
Etapa 1. Montaje de anillo metálico.



Etapa 2. Avance (Excavación) de 1015 mm y soldadura de unión.



Etapa 3. Retracción de cilindros de empuje para descubrir cepillos.



Etapa 4. Extensión de cilindros de empuje y retiro de soldadura de unión.

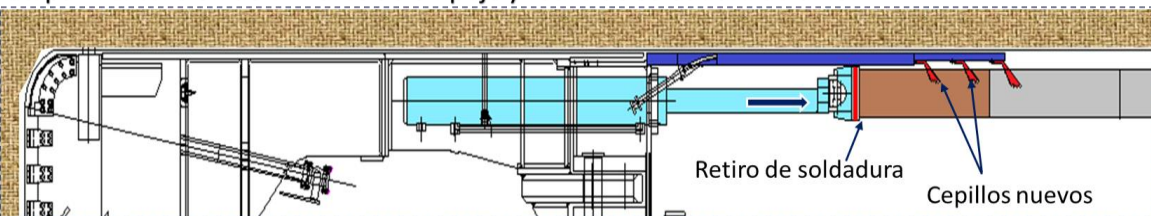


Figura 276. Metodología utilizada para el cambio de cepillos.

Las desventajas que existen para el montaje de un anillo de acero son; el tiempo y el costo de su fabricación, por lo cual una alternativa fue adecuar un anillo de concreto con placa metálica en su cara lateral y cara inferior como lo muestra la **Figura 277**, gracias a esta alternativa se evitaron retrasos para la ejecución de los trabajos.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

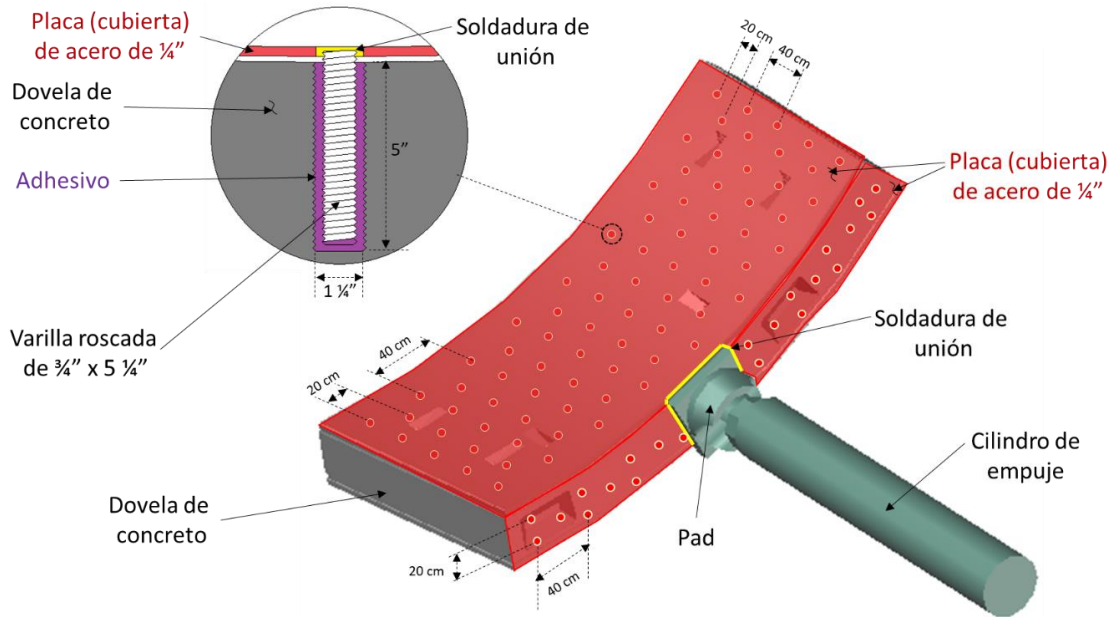


Figura 277. Recubrimiento metálico de dovelas.

El proceso de revestimiento de acero de las ocho dovelas que conforman el anillo de concreto se divide en 5 etapas mostrada en la **Figura 278**; en la primera etapa se selecciona un anillo al azar y se trazan puntos en la cara inferior y lateral de cada una de las dovelas, se distribuyen simétricamente en toda el área puntos equidistantes a una distancia de 20 centímetros para asegurar un buen recubrimiento. En la segunda etapa se utiliza un equipo extractor de corazones (Hilti DD 150) con broca corona diamantada de $1 \frac{1}{4}$ " para realizar barrenos de $1 \frac{1}{4}$ " x 5" en los puntos marcados, obteniendo así un total de 60 barrenos en la cara inferior y 26 en la cara lateral de las dovelas A1, A2, A3, A4 y A5, 51 barrenos en la cara inferior y 21 en la cara lateral de las dovelas B y C, 17 barrenos en la cara inferior y 11 en la cara lateral de la dovela K, esta actividad se realiza con el debido cuidado de no tocar el acero estructural de la dovela. La tercera etapa consiste en realizar limpieza de todos los barrenos con aire comprimido y agua, posteriormente se introduce un adhesivo epóxico (Hilti HIT-HY 200R 500/1/WH) y una varilla roscada de $\frac{3}{4}$ " x $5 \frac{1}{4}$ " que servirá de unión entre la placa y la dovela. el adhesivo tiene un tiempo de reacción de aproximadamente 5 minutos. En la cuarta etapa se realizan trabajos de unión entre la placa de acero A36 de $\frac{1}{4}$ " de espesor previamente seccionada y la varilla roscada, el proceso utilizado es a base de electrodo y soldadura E7018. Finalmente, en la quinta etapa. se realiza el esmerilado de los botones de soldadura excedentes y se posiciona para su suministro.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO



Figura 278. Proceso de recubrimiento metálico de dovelas.

Montaje de anillo metálico. Finalizados los trabajos de adecuación del anillo de concreto, se realiza su suministro y montaje en la posición U1, por cuestiones de seguridad la posición de montaje debe ser estrictamente con la dovela “K” en la parte superior como se muestra en **Figura 279**, esta posición permite que las

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

dovelas de menor tamaño y peso queden en la parte superior haciendo menos riesgoso el movimiento de retracción para descubrir las líneas de cepillos.

Una vez montado el “anillo metálico” se le aplica soldadura de unión E7018 a cada segmento de dovela con sus pads correspondientes como se ilustra en la **Figura 280**, y se instalan estructuras de soporte en forma de marco en la parte superior del gantrie puente a base de vigueta de acero I RECTANGULAR (IPR) de 203 milímetros por 15 kg/m, así mismo se instalan grapas metálicas elaboradas con perfil canal C de 4” por 50 centímetros entre las dovelas de los cinco anillos posteriores al “anillo metálico”, el objetivo de la instalación de estos elementos es por seguridad estructural del túnel y seguridad del personal.

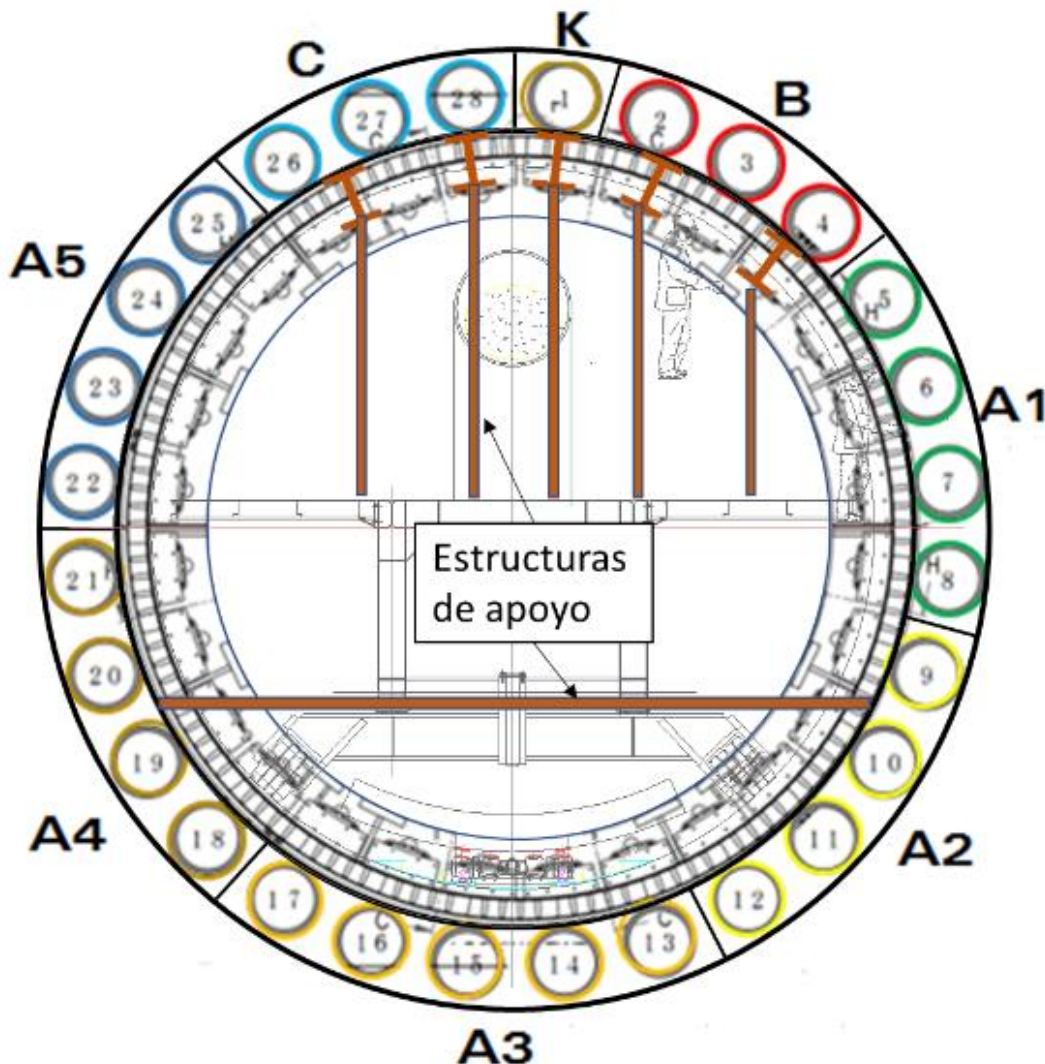


Figura 279. Posición de montaje del anillo metálico.



Figura 280. Aplicación de soldadura de unión con pads.



Figura 281. Marco metálico.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

Construcción de sello anular. Previo a la retracción del anillo metálico se debe revisar la estanqueidad de al menos diez anillos posteriores, para ello se perfora el taco sofrasar de 5 dovelas de cada anillo y se observa el material que se encuentra presente, se esperaría que fuese mortero en proceso de fraguado, sin embargo cuando se observa salida de agua o material fino se procede a realizar trabajos de reinyección de lechada (mezcla de agua con cemento) procurando no sobrepasar la presión máxima de inyección (1 bar) y hasta lograr el llenado completo del espacio anular.

Se debe garantizar la estanqueidad en la zona del faldón de la tuneladora, por lo cual se realiza la inyección de espuma de poliuretano mono componente alrededor del penúltimo anillo colocado generando de esta manera un sello impermeable como lo muestra la **Figura 282**. La inyección se realiza con una bomba graco bulldog de aire comprimido.

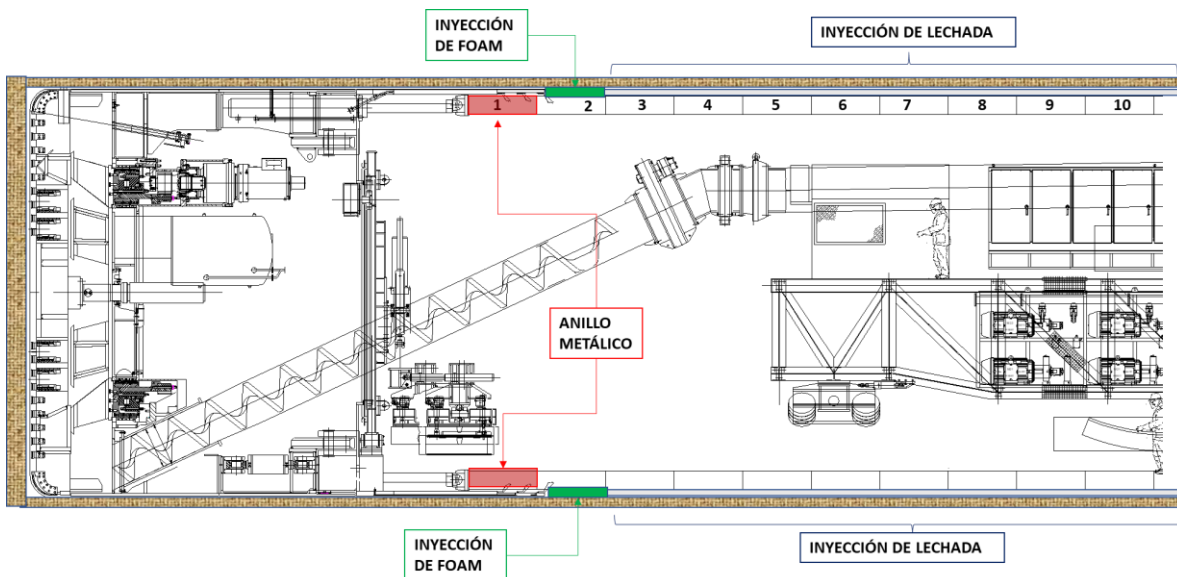


Figura 282. Sello impermeable realizado con espuma de poliuretano.

Proceso de reemplazo de cepillos. Finalizado los trabajos preliminares se prosigue con el reemplazo de los cepillos dañados de la tuneladora, el proceso de reemplazo se realiza de manera seccionada, es decir; sección por sección y siguiendo la secuencia A3-A2-A4 (Primera sección), A1-A5 (Segunda sección) y B-C-K (Tercera sección) como así lo indica la **Figura 283**. Las actividades ejecutadas por cada segmento de dovela son las mismas descritas en la sección "IV.3.4 Paso por lumbrera. **Cambio de cepillos**" del presente trabajo y que de manera resumida son; retracción de dovelas, retiro de cepillos desgastados, colocación de cepillos nuevos, prueba de calidad, empaquetamiento y posicionamiento de dovela.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

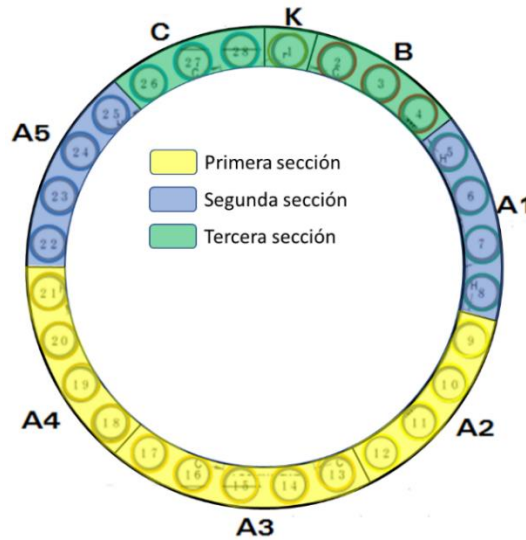


Figura 283. Secuencia de reemplazo de cepillos.

Reinicio de excavación. Cuando la última dovela es posicionada en su lugar se concluyen las actividades referentes al cambio de cepillos, se retiran las estructuras de apoyo y los cepillos usados, se realiza el suministro de insumos y se reinicia nuevamente con el ciclo de excavación.

Impacto en el avance de la excavación. La duración de las actividades no previstas realizadas para el cambio de cepillos es de un total de 17 días calendario. Durante la excavación del tramo 3 del TEO se realizaron un total de 5 cambios, de los cuales 3 fueron durante el proceso de excavación de los subtramos y 2 durante el paso de las lumbreras L11 y L12. En la tabla anexa se muestra la vida útil de los cepillos de la tuneladora Hidalgo en los diferentes tipos de frente, observando de menor rendimiento el tipo Mixto.

Subtramo	ANILLO		Vida útil	Tipo de frente PREDOMINANTE	Fecha de ejecución		Duración de actividades
	DE	A			DE	A	
L10-L11	A1	A1341	2011.50 m	ROCA	27/08/2013	17/09/2013	22 días
L11-L12	A1	A725	1087.50 m	MIXTO	08/07/2016	23/07/2016	16 días
L12-L13	A1	A1211	1816.50 m	SUELO	02/11/2017	22/11/2017	21 días
Vida útil promedio			1638.50 m				

La función de los cepillos es de mucha importancia debido a que impiden la entrada de mortero, agua y material del terreno durante el avance de la excavación, y mantienen el principio de EPB, el daño de estos elementos representa un bajo rendimiento en el avance de la excavación por los tiempos de limpieza que se requiere para el montaje de un anillo (de 30 a 90 minutos) y por el riesgo que prevalece de inundación, por lo que su reemplazo es completamente indispensable. Las **Figuras 284 y 285** muestran la problemática causada por el daño en los cepillos.



Figura 284. Salida de mortero en zona de cepillos.



Figura 285. Salida de agua en zona de cepillos.

IV.4.4 Incidencias de menor impacto.

Durante el proceso de excavación existen algunas incidencias menores que en ocasiones retrasan el ciclo de producción debido al tiempo que se ocupa para resolverlas, algunas de estos retrasos son causadas por error humano y otros por problemas de funcionamiento que toda máquina tiene, incluyendo la tuneladora, a continuación, se enlistan y describen todas las incidencias menores que se presentaron durante la excavación del tamo 3 del TEO.

Incidencias mecánicas de la tuneladora. La tuneladora al ser una máquina con sistemas mecánicos, hidráulicos y eléctricos tiene en ocasiones fallas de sus componentes causadas por un mal mantenimiento, por un desgaste paulatino o por un mal uso, lo cual es en esencia una pérdida de tiempo y dinero. Las fallas más comunes de la tuneladora son; fallas en sus bombas de inyección de grasa, de mortero y espuma, ruptura de mangueras de aceite y aire, fallas de funcionamiento del erector, mesa de dovelas y grúa viajera. En la **Figura 286** se muestra las consecuencias de una falla del erector durante el montaje del anillo de concreto, en esta ocasión la bomba de vacío que succiona la dovela no funciona de manera correcta dejando caer la dovela.



Figura 286. Caída de dovela por falla en erector.

Incidencias por sistema de bandas. Uno de las desventajas del uso de bandas transportadores para la extracción de la rezaga son los trabajos de mantenimiento que requiere y las fallas mecánicas que en ocasiones presenta. El avance de la excavación también depende del buen funcionamiento de su sistema de extracción y al igual que sus demás componentes la banda transportadora es de vital importancia para la tuneladora, debido a que no es posible continuar el ciclo de excavación si no está en buenas condiciones.

Los problemas más comunes del sistema de bandas son; daños en sus rodamientos (rodillos) por desgaste, daños en los elementos que componen su estructura (Vigas, columnas, tensores), fallas en las chumaceras de los rodamientos, desalineamiento de sus cintas elastométricas (Horizontal y de cangilones) como el mostrado en la **Figura 287**, alto amperaje (paro automático) en su sistema electromecánico por sobrecarga de material o alta tensión.



Figura 287. Desalineamiento de banda horizontal.

Incidencias por logística. Este tipo de incidencias se entienden como retraso en el suministro de los insumos para el avance de la excavación y dependen principalmente del funcionamiento de la maquinaria secundaria (locomotora, grúas, máquinas de carga) y la capacidad de razonamiento del personal (Cabos, operadores de maquinaria pesada, ingenieros).

Los ejemplos más comunes de este tipo de incidencias que se presentaron son; demoras en el suministro de mortero, insumos y anillos por baja eficiencia de la

planta productora, por descarrilamiento de locomotoras, por mala operación y averías mecánicas de la maquinaria, fraguado de mortero por mala fabricación, mala planeación de logística, averías en el sistema de tránsito (vía central). En la **Figura 288** se muestra la caída de un anillo de concreto mientras se realizaban maniobras de izaje y descenso a fondo de lumbrera, las causas fueron por un mal mantenimiento a grúa pórtico.



Figura 288. Caída de anillo durante su descenso a fondo de lumbrera.

Incidencias por acondicionamiento de material. El acondicionamiento depende de, entre otros factores, la operación de la tuneladora, el buen funcionamiento del sistema de inyección de espuma y las características del frente de excavación. Después de un paro prolongado por intervención o cualquier incidencia mayor, es aceptable considerar que el ritmo de avance es más lento debido a que se busca generar el acondicionamiento óptimo del material rezagado para su desalojo, es en esta parte en donde entra la capacidad del operador y el ingeniero de turno.

Las consecuencias de un mal acondicionamiento de material son; bajo rendimiento en la colocación de anillos debido a actividades de limpieza, derrame de material en el sistema de bandas principalmente en zona de la tuneladora y el fondo de lumbrera, como lo muestra la **Figura 289**.



Figura 289. Caída de rezaga en fondo de lumbrera por mal acondicionamiento.

Incidencias por exteriores. Se entiende como incidencias por exteriores las ocasionadas por actividades ajenas a la obra pero que afectan directamente al proceso de excavación como son la falta de suministro de energía eléctrica, los retrasos en actividades subcontratadas como el acarreo de rezaga, retraso en proveedores.

Impacto en el avance de la excavación. En la **Figura 290** se muestra de manera gráfica la distribución diaria del tiempo efectivo (excavación-colocación), el tiempo no efectivo y la producción de anillos durante el mes de noviembre de 2017. El tiempo efectivo representa el lapso de tiempo utilizado para excavar y colocar anillos, el tiempo inefectivo engloba todas las actividades complementarias que afectan directamente al avance de producción (Intervenciones atmosféricas, empalmes de banda, empalmes de cable de 13 200 volts e incidencias). Cabe mencionar que durante la construcción del tramo 3 del TEO la producción de excavación fue diaria; es decir; se laboraron los 7 días de la semana, por el modo de trabajar de la empresa constructora.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

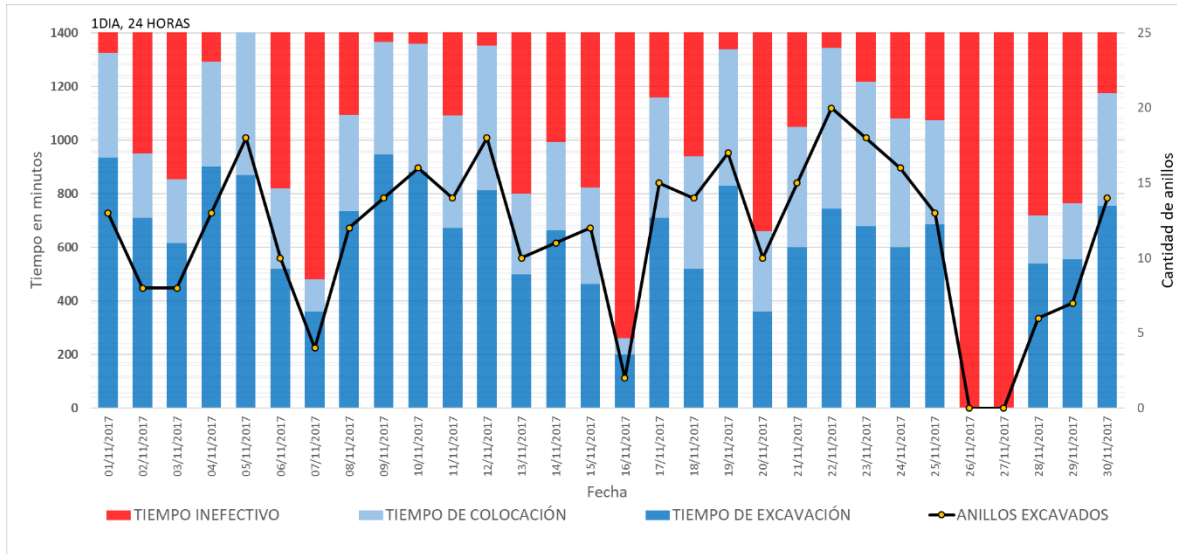


Figura 290. Distribución diaria del tiempo durante la excavación.

De la gráfica anterior se desprende la **Figura 291**, en esta figura se representan en cantidades porcentuales el tiempo que cada actividad ocupa durante un mes de producción.

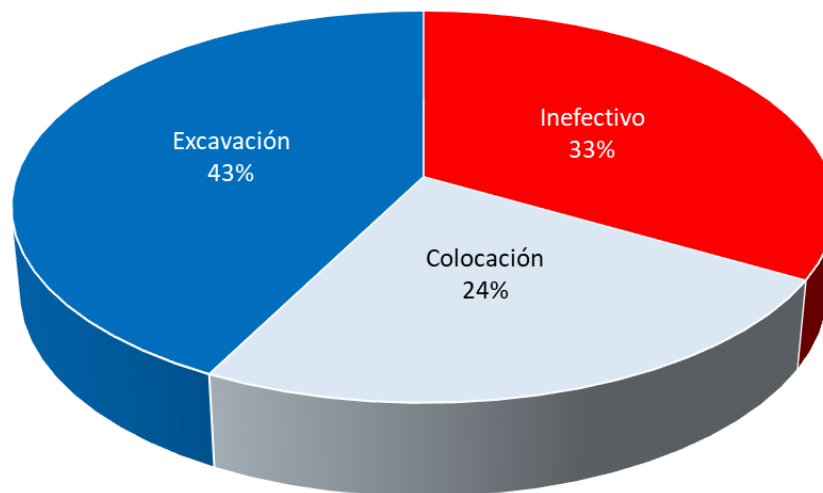


Figura 291. Comparación de tiempos.

Ahora bien, debido a que el tiempo total inefectivo engloba todas las actividades complementarias, entre ellas las incidencias de menor impacto, es necesario indicar como influyen estas incidencias durante el proceso de excavación. Por lo cual, la **Figura 292** muestra el análisis completo del tiempo inefectivo, demostrando que las incidencias menores de mayor alcance ocurren por fallas mecánicas de la tuneladora y el sistema de bandas.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

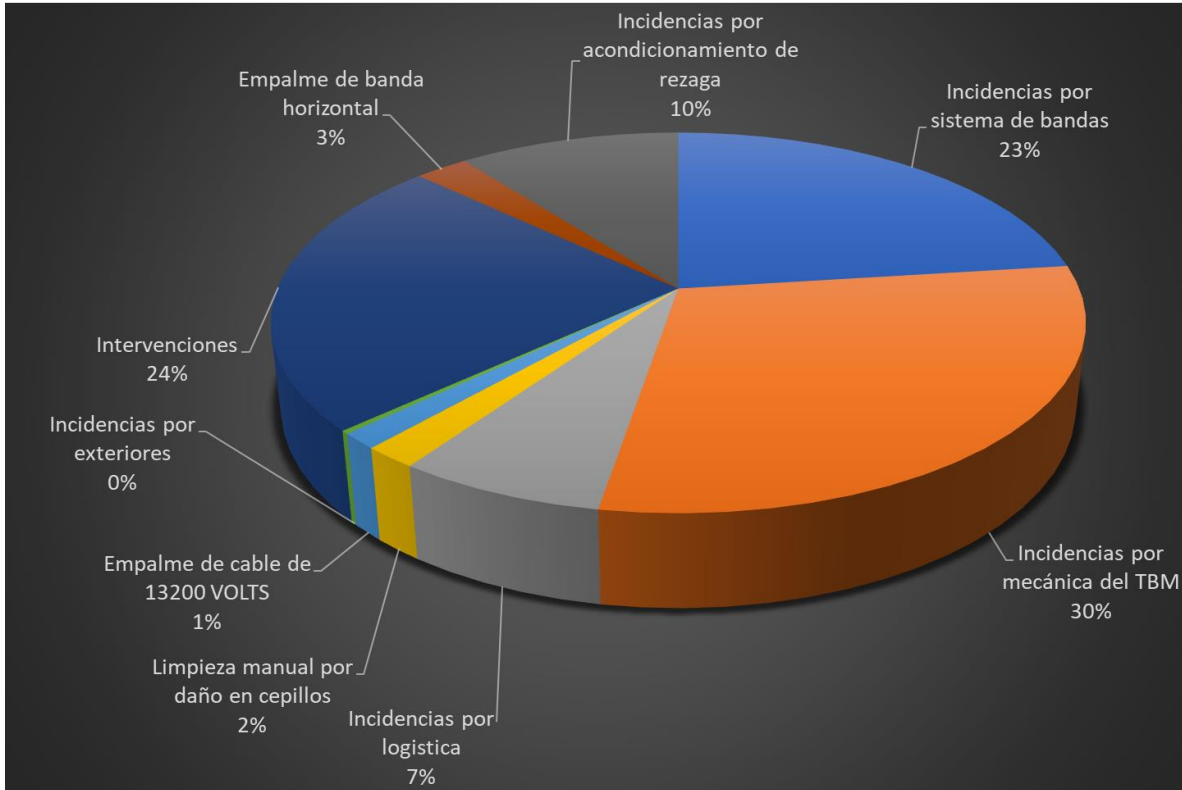


Figura 292. Porcentaje de incidencias ocurridas.

IV.5. Análisis costo producción.

Como cualquier otra obra los costos directos representan un punto medular de un presupuesto, ya que en la mayoría de los casos reflejan importes de un 70% del precio de venta. El precio total de una obra como el túnel emisor oriente depende en gran medida de un buen análisis de sus rendimientos de excavación, por lo cual en este subcapítulo se calculará y se realizará un análisis comparativo del costo aproximado por metro de avance para los tres tipos de material.

El siguiente análisis integra el costo por materiales, costo por mano de obra, costo por maquinaria y equipo, y el costo por auxiliares del proceso de excavación, sin embargo, no considera otras actividades ejecutadas como la construcción de lumbreras, reparaciones mayores, paso de lumbreras, intervenciones hiperbáricas o instalaciones preliminares, debido a que su objetivo es demostrar específicamente la diferencia de costos de producción del proceso de excavación utilizando una tuneladora Robbins tipo EPB en los tres tipos de frente definidos "Suelo", "Mixto" y "Roca".

IV.5.1 Costo directo por materiales.

Definición. El costo directo por materiales se refiere a toda aquella inversión necesaria para comprar o producir los elementos necesarios para que la excavación se ejecute correctamente cumpliendo con normas de calidad y especificaciones que solicite la CONAGUA. Los materiales se clasificaron como insumos (permanentes), instalaciones en túnel (temporales) y complementarios.

Insumos. Los insumos son materiales permanentes no recuperables que la tuneladora ocupa para su funcionamiento, su consumo y se componen por:

- Los materiales utilizados para el revestimiento de dovelas, descrito y especificado en la sección "IV.1.2 Ciclo de suministro y colocación de anillos" del presente capítulo.
- Los materiales utilizados para la fabricación de mortero se encuentran descritos en la sección "IV.1.3 Ciclo de suministro e inyección de mortero" del presente capítulo. Por detalles de fabricación en obra se utiliza 7.0 m³ como valor real.
- El consumo de grasa de cola para por anillo excavado, especificado en el inciso "VI.1.4 Inyeccion de grasa (Cepillos)" del presente capítulo.
- El consumo de otro tipo de grasas, las utilizadas son para el rodamiento de la rueda de corte (outer-inner) denominadas grasa de rodamiento SHELL GADUS y grasa de grafito, su consumo promedio es de 32 kg/anillo.

El cálculo del costo se obtiene multiplicando la cantidad de material utilizado por su precio de adquisición. La **Figura 293** resume las cantidades y precios obtenidos del proyecto ejecutivo de cada tipo de material que se utiliza por anillo excavado y montado.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

No.	Descripción	Unidad	Costo [M.N.]	Cantidad por anillo [1.5 m]	Importe [M.N.]
Material para revestimiento de dovelas y montaje					
MAT01	Anillo de concreto reforzado f' c=500 kg/cm2	Pieza	\$ 98,801.57	1.00000	\$ 98,801.57
MAT02	Kit de junta de estanqueidad (A1-A5, B,C y k)	Juego	\$ 2,405.70	1.00000	\$ 2,405.70
MAT03	Fieltro Bituminoso	Pieza	\$ 101.58	28.00000	\$ 2,844.24
MAT04	Sello hidroexpansivo	Metro	\$ 16.00	77.62000	\$ 1,241.92
MAT05	Fibracell tipo I (placas de fibra dura)	Pieza	\$ 15.35	14.00000	\$ 214.90
MAT06	Fibracell tipo II (placas de fibra dura)	Pieza	\$ 17.81	2.00000	\$ 35.62
MAT07	Fibracell tipo III (placas de fibra dura)	Pieza	\$ 19.92	12.00000	\$ 239.04
MAT08	Fibracell tipo IV (placas de fibra dura)	Pieza	\$ 10.14	1.00000	\$ 10.14
MAT09	Pegamento Kleber (juntas de estanqueidad)	Kilogramo	\$ 99.52	1.50000	\$ 149.28
MAT10	Pegamento Resistol 5000 (placas de fibra dura)	Litro	\$ 61.00	1.50000	\$ 91.50
MAT11	Tornillo dovelero	Pieza	\$ 41.19	30.00000	\$ 1,235.70
MAT12	Arandela	Pieza	\$ 6.00	30.00000	\$ 180.00
Mortero para relleno de espacio anular					
MAT13	Bentonita Sódica tipo Bentonil-CV15	Kg	\$ 4.40	156.33333	\$ 687.87
MAT14	Agua potable	M3	\$ 54.00	0.89333	\$ 48.24
MAT15	Cemento CPC 40RS	Kilogramo	\$ 1.33	1400.00000	\$ 1,862.00
MAT16	Arena de rio	M3	\$ 238.00	2.88167	\$ 685.84
MAT17	Arena Filler	M3	\$ 208.00	2.62500	\$ 546.00
MAT18	Aditivo acelerante SIGUNIT PC	Litro	\$ 19.72	112.00000	\$ 2,208.64
MAT19	Aditivo superabsorbente Sika Foam TBM	Kilogramo	\$ 83.52	3.50000	\$ 292.32
Grasas					
MAT20	Grasa BASF TSG6 (Cola)	Kilogramo	\$ 36.48	81.81000	\$ 2,984.12
MAT21	Grasa SHELL GADUS (outer e inner)	Kilogramo	\$ 43.92	32.00000	\$ 1,405.44
MAT22	Grasa NOTMET BS1 (grafito)	Kilogramo	\$ 78.67	16.00000	\$ 1,258.72

Total \$ 119,428.80

Figura 293. Costo por insumos.

Instalaciones en túnel. El material por instalaciones en túnel comprende todos aquellos que son instalados provisionalmente conforme avanza la tuneladora en su ciclo de excavación, en algunos casos son recuperables y se subdividen en:

- Material para extensión del sistema de enfriamiento, especificado en la sección “IV.1.5 Sistema de enfriamiento (Agua fría, caliente y residual)” del presente capitulo.
- Material para extensión del sistema de ventilación, especificado en la sección “VI.1.6 Sistema de ventilación” del presente capitulo.
- Material para tránsito de locomotora y personal, especificado en la sección “IV.1.2 Ciclo de suministro y colocación de anillos” del presente capitulo.
- Material para tránsito de gantries de TBM durante la etapa de excavación.
- Material para el suministro de energía eléctrica, especificado en la sección “IV.1.7 Energía eléctrica” del presente trabajo.

El cálculo del costo se obtiene multiplicando la cantidad de material utilizado por su precio de adquisición. La **Figura 294** resume las cantidades y precios obtenidos del proyecto ejecutivo de cada tipo de material que se utiliza por anillo excavado y montado.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

No.	Descripción	Unidad	Costo [M.N.]	Cantidad por anillo [1.5 m]	Importe [M.N.]
Sistema de ventilación					
MAT23	Manga de lona de polietileno de 1.61 mØ por 100m de largo	Pieza	\$ 61,000.00	0.01500	\$ 915.00
MAT24	Placa de sujeción	Pieza	\$ 80.00	0.50000	\$ 40.00
MAT25	Cable de acero desnudo de 5/16"	Metro	\$ 39.19	1.50000	\$ 58.79
Sistema de enfriamiento					
MAT26	Tubería cédula 40 de 6" x 6.1 m con muesca	Pieza	\$ 1,600.00	0.75000	\$ 1,200.00
MAT27	Tubería cédula 40 de 4" x 6.1 m con muesca	Pieza	\$ 1,165.00	0.50000	\$ 582.50
MAT28	Cople de rígido para tubería de 6"	Pieza	\$ 483.64	0.75000	\$ 362.73
MAT29	Cople de rígido para tubería de 4"	Pieza	\$ 256.00	0.50000	\$ 128.00
MAT30	Soporte para tubería	Pieza	\$ 130.00	0.50000	\$ 65.00
MAT31	Válvula de esfera de 4" (1 a cada 300 m)	Pieza	\$ 4,345.00	0.00500	\$ 21.73
MAT32	Válvula de esfera de 1" (2 a cada 300 m)	Pieza	\$ 219.30	0.01000	\$ 2.19
MAT33	Niple de 1" (1 a cada 300 m)	Pieza	\$ 7.00	0.00500	\$ 0.04
MAT34	Soldadura 7018 de 1/8"	Kilogramo	\$ 28.40	0.00050	\$ 0.01
MAT35	Manguera de 1" de 200 psi (20 m a cada 300 m)	Metro	\$ 53.06	0.10000	\$ 5.31
MAT36	Conexión tipo garra de 1" (2 a cada 300 m)	Pieza	\$ 40.00	0.01000	\$ 0.40
MAT37	Abrazadera sin fin de 1" (2 a cada 300 m)	Pieza	\$ 15.28	0.01000	\$ 0.15
Material para tránsito de locomotora y personal (Vías)					
MAT38	Durmiente de madera para riel	Pieza	\$ 396.00	0.52500	\$ 207.90
MAT39	Riel de 60 Lb/yarda (9.1 m de largo)	Metro	\$ 500.00	1.05000	\$ 525.00
MAT40	Placa de sujeción para tornillo tirafondo	Metro	\$ 36.25	8.40000	\$ 304.50
MAT41	Tornillo tirafondo	Pieza	\$ 42.50	6.00000	\$ 255.00
MAT42	Planchuela para riel de 60 lb/yarda	Pieza	\$ 342.90	0.10950	\$ 37.55
MAT43	Tornillo tipo coche de 3/4" con seguro (para planchuela)	Pieza	\$ 1.23	1.20000	\$ 1.48
MAT44	Broca AV de 1/2" (para colocación de tornillos tirafondo)	Pieza	\$ 650.00	0.00200	\$ 1.30
MAT45	Tablón de madera de 1.5" x 12" x 10 ft	Pieza	\$ 266.80	1.00000	\$ 266.80
MAT46	Clavo para madera de 4"	Kilogramo	\$ 17.42	0.15000	\$ 2.61
MAT47	Cambio california (X)	Pieza	\$ 60,000.00	0.00020	\$ 11.70
MAT48	Cambio california (Y)	Pieza	\$ 1,000,000.00	0.00045	\$ 450.00
Material para tránsito de gantries de TBM en túnel					
MAT49	Varilla de 3/4" (para fijar huaraches)	Kilogramo	\$ 9.20	1.80000	\$ 16.56
MAT50	Placa de soporte para riel de 90 Lb/yarda	Pieza	\$ 13.50	4.00000	\$ 54.00
MAT51	Broca Hilti 3/4" (para barrenar y fijar huaraches)	Pieza	\$ 629.00	0.02000	\$ 12.58
MAT52	Soldadura 7018 de 1/8"	Kilogramo	\$ 28.40	0.10000	\$ 2.84
Material para suministro de energía eléctrica					
MAT53	Soportes para cableado (1 cada 4 anillos)	Pieza	\$ 75.00	0.25000	\$ 18.75
MAT54	Gabinete para lámpara de 2 x 74 con balastra (1 cada 5 anillos)	Pieza	\$ 16.00	0.20000	\$ 3.20
MAT55	Tubo fluorescente de 74 W (1 cada 5 anillos)	Pieza	\$ 16.00	0.20000	\$ 3.20
MAT56	Cable para energía de escudo 3X4/0 (13200 volts)	Pieza	\$ 90.00	2.00000	\$ 180.00
MAT57	Cable para iluminación de tunel 1/0 AWG IHW (440 volts)	Pieza	\$ 954.52	0.75000	\$ 715.89
Total					\$ 6,452.70

Figura 294. Costo por instalaciones en túnel.

Complementarios. Los materiales complementarios son todos aquellos cuyo consumo varía considerablemente por el tipo de frente excavado, se subdividen en:

- El material utilizado para el tratamiento del terreno el cual se especifica en la sección "IV.1.1 Ciclo de excavación". En el caso de un frente tipo ROCA se considera la inyección de una mezcla denominada "pasta" indicada y sustentada en la sección "IV.4.1 Incidencias por operación (Tornillo sin fin)" del presente capítulo.
- El costo por mantenimiento de la TBM y su sistema de bandas, que engloba todas las refacciones o reparaciones menores realizadas durante el

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

proceso de excavación, estos valores fueron obtenidos en base a un porcentaje del valor adquisitivo del equipo.

- Herramientas de corte utilizadas por metro de excavación y tipo de frente, estos valores se especifican en la sección “IV.3.1 Intervención atmosférica” del presente capítulo.

El cálculo del costo se obtiene multiplicando la cantidad de material utilizado por su precio de adquisición. Las **Figuras 295, 296 y 297** resumen las cantidades y precios obtenidos del proyecto ejecutivo de cada tipo de material que se utiliza por anillo excavado y montado.

No.	Descripción	Unidad	Costo [M.N.]	Cantidad por anillo [1.5 m]	Importe [M.N.]
Tratamiento de terreno					
MAT58	Agente espumante	Litro	\$ 20.77	150.00000	\$ 3,115.50
MAT59	Agua para generación de espumas	M3	\$ 54.00	5.00000	\$ 270.00
Mantenimiento preventivo					
MAT65	Mantenimiento Equipo de rezaga en frente SUELO y MIXTO	Metro	\$ 1,261.90	1.50000	\$ 1,892.85
MAT66	Mantenimiento TBM Hidalgo en frente SUELO y MIXTO	Metro	\$ 4,800.96	1.50000	\$ 7,201.44
Mantenimiento rueda de corte (Intervención)					
MAT67	Disco cortador Robbins de 17" nuevo	Pieza	\$ 55,766.66	0.05099	\$ 2,843.26
MAT68	Juego de scrappers pérféricos y frontales	Pieza	\$ 14,376.58	0.00101	\$ 14.45
Total					\$ 15,337.50

Figura 295. Costo por materiales complementarios para un frente del tipo “Suelo”.

No.	Descripción	Unidad	Costo [M.N.]	Cantidad por anillo [1.5 m]	Importe [M.N.]
Tratamiento de terreno					
MAT58	Agente espumante	Litro	\$ 20.77	150.00000	\$ 3,115.50
MAT59	Agua para generación de espumas	M3	\$ 54.00	5.00000	\$ 270.00
Mantenimiento preventivo					
MAT65	Mantenimiento Equipo de rezaga en frente SUELO y MIXTO	Metro	\$ 1,261.90	1.50000	\$ 1,892.85
MAT66	Mantenimiento TBM Hidalgo en frente SUELO y MIXTO	Metro	\$ 4,800.96	1.50000	\$ 7,201.44
Mantenimiento rueda de corte (Intervención)					
MAT67	Disco cortador Robbins de 17" nuevo	Pieza	\$ 55,766.66	0.23223	\$ 12,950.69
MAT68	Juego de scrappers pérféricos y frontales	Pieza	\$ 14,376.58	0.00101	\$ 14.45
Total					\$ 25,444.93

Figura 296. Costo por materiales complementarios para un frente del tipo “Mixto”.

**PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE
(TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO**

No.	Descripción	Unidad	Costo [M.N.]	Cantidad por anillo [1.5 m]	Importe [M.N.]
Tratamiento de terreno					
MAT58	Agente espumante	Litro	\$ 20.77	600.00000	\$ 12,462.00
MAT59	Agua para generación de espumas	M3	\$ 54.00	20.00000	\$ 1,080.00
MAT60	Agua para pasta	M3	\$ 54.00	15.89730	\$ 858.45
MAT61	Bentonita Sódica tipo PCS para pasta	Kilogramo	\$ 2.10	2782.02750	\$ 5,842.26
MAT62	Arena filler para pasta	M3	\$ 208.00	10.14300	\$ 2,109.74
MAT63	Arena de rio para pasta	M3	\$ 238.00	3.95970	\$ 942.41
Mantenimiento preventivo					
MAT64	Mantenimiento Equipo de rezaga en frente ROCA	Metro	\$ 5,739.30	1.50000	\$ 8,608.95
MAT65	Mantenimiento TBM Hidalgo en frente ROCA	Metro	\$ 20,465.90	1.50000	\$ 30,698.85
Mantenimiento rueda de corte (Intervención)					
MAT67	Disco cortador Robbins de 17" nuevo	Pieza	\$ 55,766.66	0.57933	\$ 32,307.30
MAT68	Juego de scrappers péricos y frontales	Pieza	\$ 14,376.58	0.00101	\$ 14.45
Total					\$ 94,924.41

Figura 297. Costo por materiales complementarios para un frente del tipo "Roca".

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

IV.5.2 Costo directo por mano de obra.

Definición. El costo directo por mano de obra se integra por las cuadrillas de personal que conforma el frente de obra dividiéndose en cuadrilla de superficie, cuadrilla de fondo de lumbrera, cuadrilla de TBM y complementarios. La **Figura 298** muestra el organigrama ocupado durante la excavación del tramo 3 del TEO.

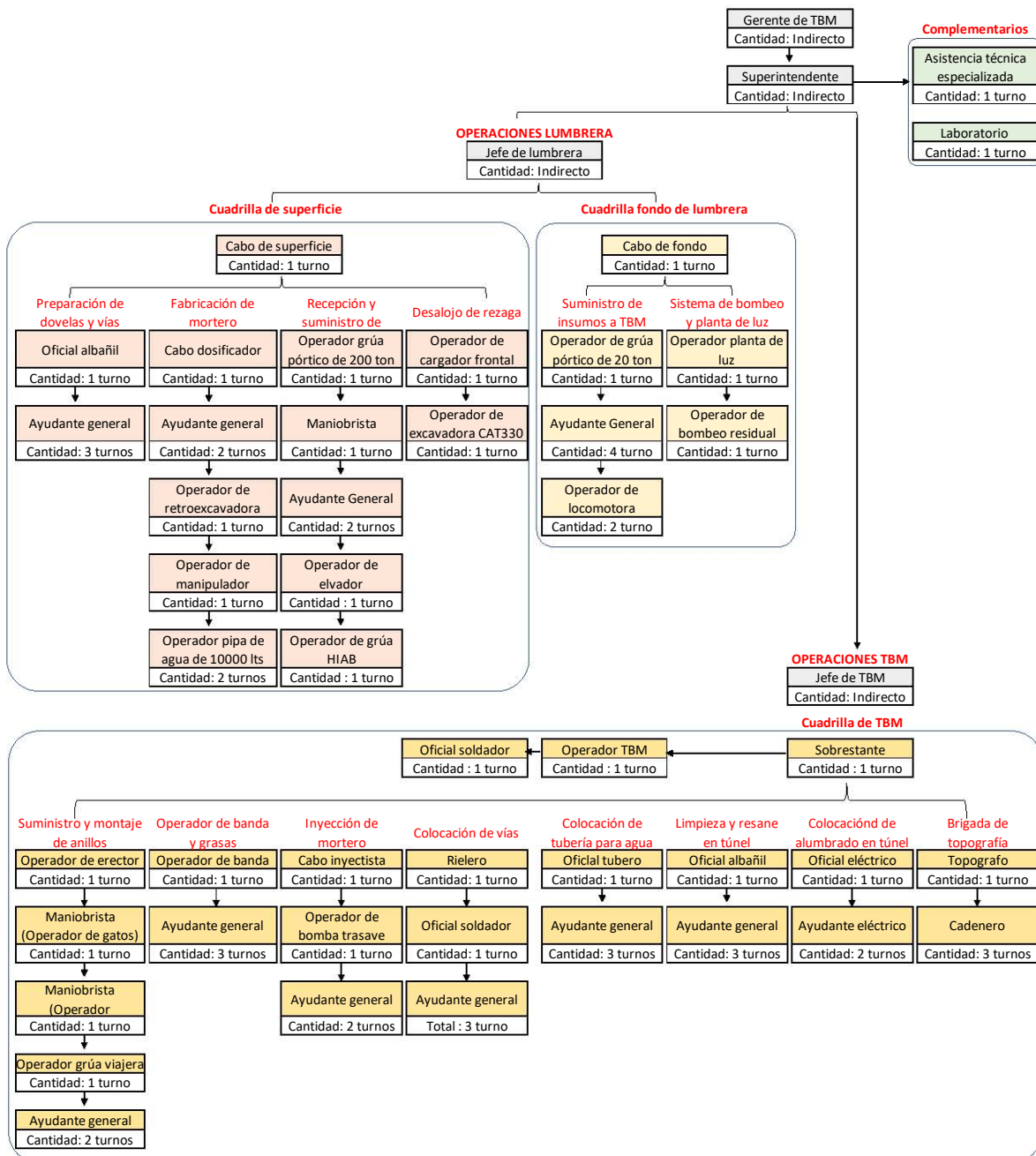


Figura 298. Organigrama.

**PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE
(TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO**

Cuadrilla de superficie. Es la encargada de la recepción, preparación y descenso a fondo de lumbrera de todos los materiales utilizados en la obra, para su posterior traslado a la tuneladora, así mismo se encarga del desalojo de la rezaga producto de la excavación. El costo se obtiene multiplicando el salario real (ya con la integración del fator de salario real) por la cantidad de turnos necesarios de 8 horas como así lo muestra la **Figura 299**.

No.	Descripción	Unidad	Cantidad	Salario real [M.N.]	Total [M.N.]
MN01	Cabo de oficios	Turno	1.00	\$ 779.15	\$ 779.15
Preparación de dovelas y vías					
MN02	Oficial albañil	Turno	1.00	\$ 500.57	\$ 500.57
MN03	Ayudante General	Turno	3.00	\$ 366.19	\$ 1,098.57
Fabricación de mortero					
MN04	Cabo de oficios	Turno	1.00	\$ 779.15	\$ 779.15
MN05	Ayudante General	Turno	2.00	\$ 366.19	\$ 732.38
MN06	Operador de retroexcavadora	Turno	1.00	\$ 877.90	\$ 877.90
MN07	Operador de manipulador	Turno	1.00	\$ 451.22	\$ 451.22
MN08	Operador pipa de agua	Turno	2.00	\$ 603.17	\$ 1,206.34
Suministro de insumos					
MN09	Operador de grúa especializado	Turno	1.00	\$ 836.64	\$ 836.64
MN10	Maniobrista	Turno	1.00	\$ 581.18	\$ 581.18
MN11	Ayudante General	Turno	2.00	\$ 366.19	\$ 732.38
MN12	Operador de elevador	Turno	1.00	\$ 443.25	\$ 443.25
MN13	Operador de grúa HIAB	Turno	1.00	\$ 408.76	\$ 408.76
Desalojo de rezaga					
MN14	Operador de cargador	Turno	1.00	\$ 538.00	\$ 538.00
MN15	Operador de excavadora	Turno	1.00	\$ 779.12	\$ 779.12
Subtotal					\$ 10,744.61
Herramienta menor 3%mo					\$ 322.34
Equipo de seguridad 2%mo					\$ 214.89
Total					\$ 11,281.84

Figura 299. Cuadrilla de superficie.

Cuadrilla de fondo de lumbrera. Es la encargada de la recepción y correcta logística de traslado de todos los materiales suministrados a la tuneladora, de igual manera se encarga del desalojo de aguas residuales producto de filtraciones o proveniente de la TBM. La **Figura 300** resume el cálculo de su costo.

No.	Descripción	Unidad	Cantidad	Salario real [M.N.]	Total [M.N.]
MN16	Cabo de oficios	Turno	1.00	\$ 779.15	\$ 779.15
Suministro de insumos					
MN17	Maniobrista	Turno	1.00	\$ 581.18	\$ 581.18
MN18	Ayudante General	Turno	4.00	\$ 366.19	\$ 1,464.76
MN19	Operador de locomotora	Turno	2.00	\$ 672.73	\$ 1,345.46
Bombeo y planta de luz					
MN20	Operador de planta luz	Turno	1.00	\$ 606.32	\$ 606.32
MN21	Operador de bomba	Turno	1.00	\$ 502.33	\$ 502.33
Subtotal					\$ 5,279.20
Herramienta menor 3%mo					\$ 158.38
Equipo de seguridad 2%mo					\$ 105.58
Total					\$ 5,543.16

Figura 300. Cuadrilla de fondo de lumbrera.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

Cuadrilla de TBM. Es la encargada de la recepción y colocación de todos los materiales que la tuneladora ocupa durante el proceso de excavación, así mismo es la encargada de la correcta operación de los principales componentes de la máquina, una parte de esta cuadrilla realiza el habilitado de las instalaciones provisionales del túnel. La **Figura 301** resume el cálculo del costo de esta cuadrilla.

No.	Descripción	Unidad	Cantidad	Salario real [M.N.]	Total [M.N.]
MN22	Operador de tuneladora	Turno	1.00	\$ 780.87	\$ 780.87
MN23	Sobrestante	Turno	1.00	\$ 1,071.98	\$ 1,071.98
MN24	Oficial soldador	Turno	1.00	\$ 570.57	\$ 570.57
Colocación de anillos					
MN25	Operador de erector	Turno	1.00	\$ 1,071.98	\$ 1,071.98
MN26	Maniobrista	Turno	2.00	\$ 581.18	\$ 1,162.36
MN27	Operador grúa viajera	Turno	1.00	\$ 836.64	\$ 836.64
MN28	Ayudante General	Turno	2.00	\$ 366.19	\$ 732.38
Tail pice y grasas					
MN29	Operador de banda	Turno	1.00	\$ 502.33	\$ 502.33
MN30	Ayudante General	Turno	3.00	\$ 366.19	\$ 1,098.57
Inyección de mortero					
MN31	Inyectista	Turno	1.00	\$ 604.52	\$ 604.52
MN32	Operador de bomba	Turno	1.00	\$ 502.33	\$ 502.33
MN33	Ayudante General	Turno	2.00	\$ 366.19	\$ 732.38
Colocación de vías					
MN34	Rielero	Turno	1.00	\$ 582.48	\$ 582.48
MN35	Oficial soldador	Turno	1.00	\$ 570.57	\$ 570.57
MN36	Ayudante General	Turno	3.00	\$ 366.19	\$ 1,098.57
Colocación de tubería					
MN37	Oficial tubero	Turno	1.00	\$ 901.32	\$ 901.32
MN38	Ayudante General	Turno	3.00	\$ 366.19	\$ 1,098.57
Limpieza y resane túnel					
MN39	Oficial albañil	Turno	1.00	\$ 500.57	\$ 500.57
MN40	Ayudante General	Turno	3.00	\$ 366.19	\$ 1,098.57
Energía y alumbrado túnel					
MN41	Oficial eléctrico	Turno	1.00	\$ 779.10	\$ 779.10
MN42	Ayudante General	Turno	1.00	\$ 366.19	\$ 366.19
Brigada de topografía					
MN43	Topografo	Turno	1.00	\$ 779.10	\$ 779.10
MN44	Cadenero	Turno	1.00	\$ 366.19	\$ 366.19

Subtotal \$ 17,808.14
Herramienta menor 3%mo \$ 534.24
Equipo de seguridad 2%mo \$ 356.16
Total \$ 18,698.55

Figura 301. Cuadrilla de TBM.

Complementarios. El costo extraordinario de mano de obra denominado “complementarios” engloba la inversión realizada por una asistencia técnica del fabricante de tuneladora y por los trabajos de laboratorio. Su valor depende directamente del precio de venta del proveedor, en la **Figura 302** se resume el cálculo de este costo.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

No.	Descripción	Unidad	Cantidad	Costo [M.N.]	Total [M.N.]
MN45	Asistencia técnica Robbins	Turno	1.00	\$ 22,826.87	\$ 22,826.87
MN46	Laboratorio	Turno	1.00	\$ 1,850.98	\$ 1,850.98
Total					\$ 24,677.85

Figura 302. Costo por complementarios.

IV.5.3 Costo por maquinaria y equipo.

Definición. Este costo directo se deriva del uso de maquinaria y equipo que auxilian a las cuadrillas de trabajo para la correcta ejecución de sus actividades. De igual modo que la mano de obra, el costo está integrado por tres áreas; superficie, fondo de lumbrera y TBM.

Maquinaria y equipo en superficie. Es todo aquel equipo o máquina que sirve de apoyo para realizar las actividades de la cuadrilla de superficie, por ejemplo, la planta dosificadora, los equipos de carga, la grúa pórtico, etc. Su cálculo se realiza multiplicando el costo horario por la cantidad necesaria como así se muestra en la **Figura 303.**

No.	Descripción	Unidad	Cantidad	Costo horario	Total [M.N.]
Preparación de dovelas y vías					
MAQ01	Sierra circular	HR	1.00	\$ 18.86	\$ 18.86
MAQ02	Taladro HILTI TE30	HR	1.00	\$ 15.02	\$ 15.02
Fabricación de mortero					
MAQ03	Planta dosificadora Odisa	HR	1.00	\$ 165.84	\$ 165.84
MAQ04	Cilo para cemento de 30 ton	HR	2.00	\$ 5.68	\$ 11.36
MAQ05	Mezclador de lodo bentonítico de 10 m3	HR	1.00	\$ 149.31	\$ 149.31
MAQ06	Bomba para concreto Putzmeister	HR	1.00	\$ 313.19	\$ 313.19
MAQ07	Bomba centrifuga de 5 H.P	HR	1.00	\$ 12.40	\$ 12.40
MAQ08	Retroexcavadora con cargador	HR	1.00	\$ 162.83	\$ 162.83
MAQ09	Manipulador telescopico JCV	HR	1.00	\$ 223.36	\$ 223.36
MAQ10	Camión pipa de 10000 litros	HR	1.00	\$ 224.01	\$ 224.01
Suministro de insumos					
MAQ11	Grúa pórtico de 200 ton	HR	1.00	\$ 1,728.36	\$ 1,728.36
MAQ12	Elevador	HR	1.00	\$ 182.54	\$ 182.54
MAQ13	Grúa sobre camión HIAB de 6 toneladas	HR	1.00	\$ 296.14	\$ 296.14
MAQ14	Camioneta estacas 3500 kg	HR	1.00	\$ 173.60	\$ 173.60
Desalajo de rezaga					
MAQ15	Cargador Frontal CAT	HR	1.00	\$ 579.54	\$ 579.54
MAQ16	Excavadora CAT330	HR	1.00	\$ 348.81	\$ 348.81
MAQ17	Barredora remolcable SWEGA	HR	1.00	\$ 50.10	\$ 50.10
Sistema de ventilación					
MAQ18	Ventilador axial de 36"	HR	2.00	\$ 12.26	\$ 24.52
Sistema de enfriamiento					
MAQ19	Torre de enfriamiento	HR	1.00	\$ 12.26	\$ 12.26
MAQ20	Tanque remolque para agua	HR	2.00	\$ 29.70	\$ 59.40
MAQ21	Bomba sumergible FLYGT de 50 H.P.	HR	1.00	\$ 30.12	\$ 30.12
MAQ22	Compresor Atlas copco de 11 BAR	HR	1.00	\$ 276.90	\$ 276.90
MAQ23	Tanque de aire comprimido	HR	1.00	\$ 15.46	\$ 15.46
Total					\$ 5,073.93

Figura 303. Costo de maquinaria y equipo en superficie.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

Maquinaria y equipo en fondo de lumbrera. Es todo aquel equipo o máquina que sirve de apoyo para realizar las actividades de la cuadrilla de fondo de lumbrera, por ejemplo, las locomotoras, los carros transportadores, las bombas para el desalojo de agua residual, etc. Su cálculo se resume en la **Figura 304**.

No.	Descripción	Unidad	Cantidad	Costo horario	Total [M.N.]
Suministro de insumos					
MAQ24	Grúa pórtico de 50 ton	HR	1.00	\$ 450.75	\$ 450.75
MAQ25	Locomotora	HR	2.00	\$ 578.31	\$ 1,156.62
MAQ26	Carro transportador de mortero	HR	2.00	\$ 73.23	\$ 146.46
MAQ27	Carro transportador de dovelas	HR	6.00	\$ 73.23	\$ 439.38
Bombeo y planta de luz					
MAQ28	Generador Eléctrico 750 kw (Reserva)	HR	1.00	\$ 235.92	\$ 235.92
MAQ29	Bomba sumergible FLYGT de 140 H.P.	HR	2.00	\$ 44.36	\$ 88.72
				Total	\$ 2,517.85

Figura 304. Costo de maquinaria y equipo de fondo de lumbrera.

Maquinaria y equipo en TBM. Es todo aquel equipo o máquina que sirve de apoyo para realizar las actividades de la cuadrilla de TBM, y que es independiente del equipo excavador, por ejemplo, las bombas para el desalojo de agua residual, plantas de soldar, equipos de corte, etc. Su cálculo se resume en la **Figura 305**.

No.	Descripción	Unidad	Cantidad	Costo horario	Total [M.N.]
MAQ30	Planta de soldar LINCON ELECTRIC DC-600	HR	1.00	\$ 341.36	\$ 341.36
MAQ31	Equipo de corte (oxígeno-acetileno)	HR	1.00	\$ 57.34	\$ 57.34
MAQ32	Pulidora esmeriladora	HR	1.00	\$ 12.55	\$ 12.55
Colocación de tubería					
MAQ33	Bomba sumergible FLYGT de 50 H.P.	HR	1.00	\$ 30.12	\$ 30.12
Colocación de anillos					
MAQ34	Bomba sumergible para lodos 10 H.P	HR	1.00	\$ 43.41	\$ 43.41
MAQ35	Pistola neumática	HR	1.00	\$ 12.55	\$ 12.55
MAQ36	Planta de soldar LINCON ELECTRIC DC-600	HR	1.00	\$ 341.36	\$ 341.36
MAQ37	Equipo de corte (oxígeno-acetileno)	HR	1.00	\$ 57.34	\$ 57.34
MAQ38	Pulidora esmeriladora	HR	1.00	\$ 12.55	\$ 12.55
MAQ39	Estación total SET 610	HR	1.00	\$ 14.16	\$ 14.16
Colocación de vías					
MAQ40	Sierra circular	HR	1.00	\$ 18.86	\$ 18.86
MAQ41	Taladro HILTI TE30	HR	1.00	\$ 15.02	\$ 15.02
				Total	\$ 956.62

Figura 305. Costo de maquinaria y equipo en TBM.

IV.5.4 Costo por auxiliares.

Los costos por auxiliares corresponden al costo por servicios externos o subcontratos, estos dependen directamente del precio establecido por el proveedor y la frecuencia de uso, los utilizados durante la excavación del tramo 3 del TEO se enlistan en la **Figura 306**.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

No.	Descripción	Unidad	Cantidad	Costo	Frecuencia
AUX01	Empalme para extensión de banda horizontal	Servicio	1.00	\$ 54,450.00	Un servicio por cada 200 m de excavación
AUX02	Acarreo de anillo de concreto en tractocamión	Servicio	1.00	\$ 5,320.00	Un servicio por anillo excavado
AUX03	Acarreo de material producto de la excavación en camión de 16 m3	Servicio	1.00	\$ 850.00	6 servicios por anillo excavado
AUX04	Energía eléctrica mediante acometida para sistema de bandas	kw/hora	1.00	\$ 1.10	1846 kw por hora de excavación
AUX05	Energía eléctrica mediante acometida para escudo	kw/hora	1.00	\$ 1.10	2652 kw por hora de excavación
AUX06	Consumo de energía eléctrica alumbrado y equipos auxiliares	kw/hora	1.00	\$ 1.10	150 kw por hora de excavación

Figura 306. Costo por auxiliares.

IV.5.5 *Matriz de costo directo por metro de excavación en base a rendimientos efectivos obtenidos para cada tipo de frente.*

A continuación, se realizará la integración de una matriz de costo por metro de excavación considerando el tipo de frente y utilizando los costos unitarios ya conocidos. Cabe destacar que estos costos unitarios se obtuvieron en diferentes unidades, es decir; los materiales se calcularon por anillos, la mano de obra se calculó por turnos y la maquinaria y equipo por horas, por lo cual es necesario expresar las cantidades de la matriz en relación a sus respectivas unidades.

Frente tipo “Suelo”. La **Figura 307** representa la matriz de costo directo para este tipo de frente y el cálculo de sus cantidades se obtiene de la siguiente manera:

Para los materiales (C_{mat}):

$$C_{mat} = \frac{1 \text{ anillo}}{1.5 \text{ m}} = 0.66667 \frac{\text{anillos}}{\text{m}}$$

Para la maquinaria y equipo (C_{maq}):

- Utilizado el rendimiento de excavación o Res obtenido de la sección “IV.2.4 Rendimientos generales por tipo de material.

$$Res = 12.45 \frac{\text{m}}{\text{dia}} = \frac{12.45 \text{ m}}{24 \text{ horas}} = 0.51875 \frac{\text{m}}{\text{hora}}$$

- Sobre esta base se obtiene la cantidad de tiempo efectivo por metro de excavación que será utilizado en el costo de maquinaria y equipo;

$$C_{maq} = \frac{1}{0.51875 \frac{\text{m}}{\text{hora}}} = 1.92771 \frac{\text{hora}}{\text{m}}$$

Para la mano de obra (C_{mo}):

- Debido a que se expresa en turnos que equivalen a 8 horas de trabajo, la cantidad se calcula de siguiente manera;

$$C_{mo} = \frac{1.92771 \frac{\text{hora}}{\text{m}}}{8 \frac{\text{hora}}{\text{turno}}} = 0.24096 \frac{\text{turno}}{\text{m}}$$

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

ANÁLISIS COSTO PRODUCCIÓN					
EXCSUELO	Costo de excavación por metro lineal en un frente del tipo SUELO con máquina tuneladora tipo EPB y sistema de bandas para extracción de rezaga propiedad de la CONAGUA				Unidad : metro
Clave	Descripción	Unidad	Cantidad	Costo	Importe
Materiales					
<i>Cmat</i>					
INSUM	Insumos	Anillo	0.66667	\$ 119,428.80	\$ 79,619.60
INSTALTU	Instalaciones en túnel	Anillo	0.66667	\$ 6,452.70	\$ 4,301.82
COMATSUE	Complementarios	Anillo	0.66667	\$ 15,337.50	\$ 10,225.05
Suma de materiales					\$ 94,146.47
Mano de obra					
<i>Cmo</i>					
CUASUPER	Cuadrilla de superficie	Turno	0.24096	\$ 11,281.84	\$ 2,718.47
CUAFON	Cuadrilla de fondo de lumbrera	Turno	0.24096	\$ 5,543.16	\$ 1,335.68
CUATBM	Cuadrilla de TBM	Turno	0.24096	\$ 18,698.55	\$ 4,505.60
CUACOM	Complementarios	Turno	0.24096	\$ 24,677.85	\$ 5,946.37
Suma de mano de obra					\$ 14,506.13
Maquinaria y equipo					
<i>Cmaq</i>					
MAQSUP	Maquinaria y equipo superficie	Hora	1.92771	\$ 5,073.93	\$ 9,781.07
MAQFON	Maquinaria y equipo fondo de lumbrera	Hora	1.92771	\$ 2,517.85	\$ 4,853.68
MAQTMB	Maquinaria y equipo TBM	Hora	1.92771	\$ 0,956.62	\$ 1,844.09
Suma de mano de obra					\$ 16,478.84
Auxiliares					
AUX01	Empalme para extensión de banda horizontal	Servicio	0.00333	\$ 54,450.00	\$ 0,181.32
AUX02	Acarreo de anillo de concreto en tractocamión	Servicio	0.66667	\$ 5,320.00	\$ 3,546.68
AUX03	Acarreo de material producto de la excavación en camión de 16 m3	Servicio	4.00000	\$ 850.00	\$ 3,400.00
AUX04	Energía mediante acometida para sistema de bandas	kw/hra	1846.00000	\$ 1.10	\$ 2,030.60
AUX05	Energía mediante acometida para escudo	kw/hra	2652.00000	\$ 1.10	\$ 2,917.20
AUX06	Consumo de energía eléctrica alumbrado y equipos auxiliares	kw/hra	150.00000	\$ 1.10	\$ 0,165.00
Suma de auxiliares					\$ 12,240.80
Costo directo por metro excavado					\$ 137,372.24

Figura 307. Costo directo de excavación en un frente del tipo Suelo.

Frente tipo “Mixto”. La **Figura 308** representa la matriz de costo directo para este tipo de frente y sus cantidades se deducen de la siguiente manera:

Para los materiales (Cmat):

$$Cmat = \frac{1 \text{ anillo}}{1.5 \text{ m}} = 0.66667 \frac{\text{anillos}}{\text{m}}$$

Para la maquinaria y equipo (Cmaq):

$$Rem = 6.941 \frac{\text{m}}{\text{dia}} = \frac{6.941 \text{ m}}{24 \text{ horas}} = 0.28921 \frac{\text{m}}{\text{hora}}$$

- Sobre esta base se obtiene la cantidad de tiempo efectivo por metro de excavación que será utilizado en el costo de maquinaria y equipo;

$$Cmaq = \frac{1}{0.28921 \frac{\text{m}}{\text{hora}}} = 3.45769 \frac{\text{hora}}{\text{m}}$$

Para la mano de obra (Cmo):

$$Cmo = \frac{3.45769 \frac{\text{hora}}{\text{m}}}{8 \frac{\text{hora}}{\text{turno}}} = 0.43221 \frac{\text{turno}}{\text{m}}$$

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

ANÁLISIS COSTO PRODUCCIÓN					
EXCMIXTO	Costo de excavación por metro lineal en un frente del tipo MIXTO con máquina tuneladora tipo EPB y sistema de bandas para extracción de rezaga propiedad de la CONAGUA				Unidad : metro
Clave	Descripción	Unidad	Cantidad	Costo	Importe
Materiales					
			<i>Cmat</i>		
INSUM	Insumos	Anillo	0.66667	\$ 119,428.80	\$ 79,619.60
INSTALTU	Instalaciones en túnel	Anillo	0.66667	\$ 6,452.70	\$ 4,301.82
COMATMIX	Complementarios	Anillo	0.66667	\$ 25,444.93	\$ 16,963.37
Suma de materiales					\$ 100,884.79
Mano de obra					
			<i>Cmo</i>		
CUASUPER	Cuadrilla de superficie	Turno	0.43221	\$ 11,281.84	\$ 4,876.12
CUAFON	Cuadrilla de fondo de lumbrera	Turno	0.43221	\$ 5,543.16	\$ 2,395.81
CUATBM	Cuadrilla de TBM	Turno	0.43221	\$ 18,698.55	\$ 8,081.70
CUACOM	Complementarios	Turno	0.43221	\$ 24,677.85	\$ 10,666.01
Suma de mano de obra					\$ 26,019.65
Maquinaria y equipo					
			<i>Cmaq</i>		
MAQSUP	Maquinaria y equipo superficie	Hora	3.45769	\$ 5,073.93	\$ 17,544.08
MAQFON	Maquinaria y equipo fondo de lumbrera	Hora	3.45769	\$ 2,517.85	\$ 8,705.94
MAQTMB	Maquinaria y equipo TBM	Hora	3.45769	\$ 956.62	\$ 3,307.70
Suma de mano de obra					\$ 29,557.72
Auxiliares					
AUX01	Empalme para extensión de banda horizontal	Servicio	0.00333	\$ 54,450.00	\$ 0,181.32
AUX02	Acarreo de anillo de concreto en tractocamión	Servicio	0.66667	\$ 5,320.00	\$ 3,546.68
AUX03	Acarreo de material producto de la excavación en camión de 16 m3	Servicio	4.00000	\$ 850.00	\$ 3,400.00
AUX04	Energía mediante acometida para sistema de bandas	kw/hra	1846.00000	\$ 1.10	\$ 2,030.60
AUX05	Energía mediante acometida para escudo	kw/hra	2652.00000	\$ 1.10	\$ 2,917.20
AUX06	Consumo de energía eléctrica alumbrado y equipos auxiliares	kw/hra	150.00000	\$ 1.10	\$ 0,165.00
Suma de auxiliares					\$ 12,240.80
Costo directo por metro excavado					\$ 168,702.95

Figura 308. Costo directo de excavación en un frente del tipo Mixto.

Frente tipo “Mixto”. La **Figura 309** representa la matriz de costo directo para este tipo de frente y sus cantidades se deducen de la siguiente manera:

Para los materiales (Cmat):

$$Cmat = \frac{1 \text{ anillo}}{1.5 \text{ m}} = 0.66667 \frac{\text{anillos}}{\text{m}}$$

Para la maquinaria y equipo (Cmaq):

$$Rer = 4.850 \frac{\text{m}}{\text{día}} = \frac{4.850 \text{ m}}{24 \text{ horas}} = 0.20208 \frac{\text{m}}{\text{hora}}$$

- Sobre esta base se obtiene la cantidad de tiempo efectivo por metro de excavación que será utilizado en el costo de maquinaria y equipo;

$$Cmaq = \frac{1}{0.20208 \frac{\text{m}}{\text{hora}}} = 4.94853 \frac{\text{hora}}{\text{m}}$$

Para la mano de obra (Cmo):

$$Cmo = \frac{4.94853 \frac{\text{hora}}{\text{m}}}{8 \frac{\text{hora}}{\text{turno}}} = 0.61856 \frac{\text{turno}}{\text{m}}$$

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

ANÁLISIS COSTO PRODUCCIÓN					
EXCROCA	Costo de excavación por metro lineal en un frente del tipo ROCA con máquina tuneladora tipo EPB y sistema de bandas para extracción de rezaga propiedad de la CONAGUA				Unidad : metro
Clave	Descripción	Unidad	Cantidad	Costo	Importe
Materiales		<i>Cmat</i>			
INSUM	Insumos	Anillo	0.66667	\$ 119,428.80	\$ 79,619.60
INSTALTU	Instalaciones en túnel	Anillo	0.66667	\$ 6,452.70	\$ 4,301.82
COMATROC	Complementarios	Anillo	0.66667	\$ 94,924.41	\$ 63,283.26
Suma de materiales					\$ 147,204.67
Mano de obra		<i>Cmo</i>			
CUASUPER	Cuadrilla de superficie	Turno	0.61856	\$ 11,281.84	\$ 6,978.50
CUAFON	Cuadrilla de fondo de lumbrera	Turno	0.61856	\$ 5,543.16	\$ 3,428.78
CUATBM	Cuadrilla de TBM	Turno	0.61856	\$ 18,698.55	\$ 11,566.17
CUACOM	Complementarios	Turno	0.61856	\$ 24,677.85	\$ 15,264.73
Suma de mano de obra					\$ 37,238.18
Maquinaria y equipo		<i>Cmaq</i>			
MAQSUP	Maquinaria y equipo superficie	Hora	4.94853	\$ 5,073.93	\$ 25,108.49
MAQFON	Maquinaria y equipo fondo de lumbrera	Hora	4.94853	\$ 2,517.85	\$ 12,459.66
MAQTMB	Maquinaria y equipo TBM	Hora	4.94853	\$ 956.62	\$ 4,733.86
Suma de mano de obra					\$ 42,302.01
Auxiliares					
AUX01	Empalme para extensión de banda horizontal	Servicio	0.00333	\$ 54,450.00	\$ 0,181.32
AUX02	Acarreo de anillo de concreto en tractocamión	Servicio	0.66670	\$ 5,320.00	\$ 3,546.84
AUX03	Acarreo de material producto de la excavación en camión de 16 m3	Servicio	4.00000	\$ 850.00	\$ 3,400.00
AUX04	Energía mediante acometida para sistema de bandas	kw/hra	1846.00000	\$ 1.10	\$ 2,030.60
AUX05	Energía mediante acometida para escudo	kw/hra	2652.00000	\$ 1.10	\$ 2,917.20
AUX06	Consumo de energía eléctrica alumbrado y equipos auxiliares	kw/hra	150.00000	\$ 1.10	\$ 0,165.00
Suma de auxiliares					\$ 12,240.96
Costo directo por metro excavado					\$ 238,985.83

Figura 309. Costo directo de excavación en un frente del tipo Roca.

De acuerdo con los valores obtenidos y la **Figura 310**, el costo por excavación en un frente rocoso es más elevado dado que los rendimientos de ejecución son menores, por lo cual se puede deducir que el costo de construcción de una obra como el TEO depende en gran medida de las condiciones del terreno.

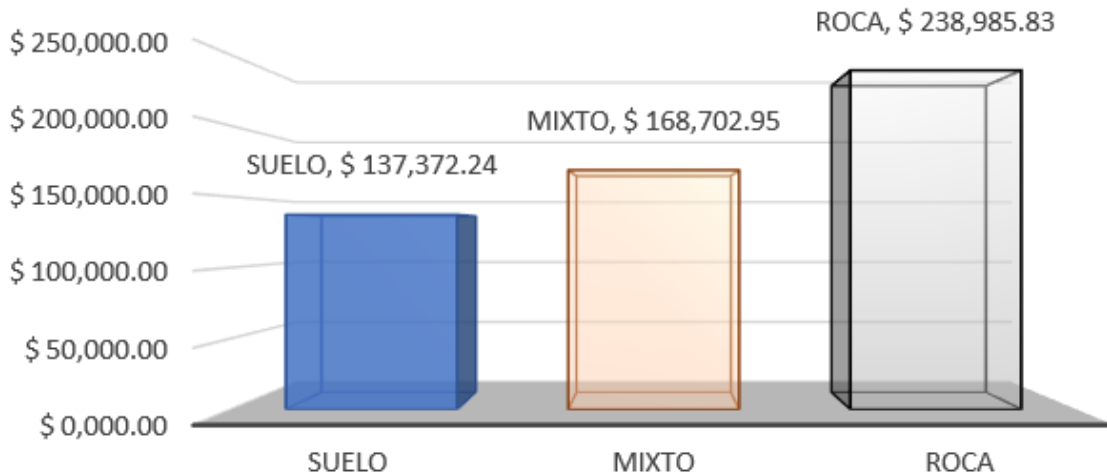


Figura 310. Costos directos por tipo de frente.

IV.6 Control de calidad y supervisión.

El control de calidad en obra es un proceso de supervisión utilizado cumplir los requisitos normativos y de proyecto, asegurando que durante el proceso de construcción se cumplan las especificaciones del proyecto y unas adecuadas condiciones de calidad. En este capítulo se describirán los principales procedimientos que aseguraron un buen control de calidad y supervisión para la ejecución de los trabajos durante el proceso de excavación.

IV.6.1 Calidad del anillo.

Recepción. Durante la recepción del anillo en el patio de maniobras, se debe verificar el estado de cada una de las dovelas debido a que en ocasiones durante su traslado pueden sufrir daños considerables, como son; despostillamientos y fracturas, estas observaciones se registran en un formato de recepción y se evalúan para considerar su rechazo, la **Figura 311** muestra un daño por fractura en una dovela que fue rechazada el momento de recibirla en lumbrera.



Figura 311. Daño por fractura en dovela.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

Reparación. Existen diferentes factores que inducen al daño de dovelas durante la colocación de los anillos de concreto, algunas sufren despostillamientos por el choque entre ellas al momento de ser posicionadas, aunque están diseñadas para soportar la fuerza de empuje de la máquina en ocasiones se despostillan en zonas donde no existe acero de refuerzo, la supervisión de obra junto con la empresa constructora concilia las zonas que serán reparadas. El proceso de reparación, también denominado resane, consiste en la preparación y aplicación de un epóxico reparador para concretos, las imágenes de la **Figura 312** muestran la preparación de la pasta y reparaciones realizadas en diferentes dovelas.



Figura 312. Resane de dovelas.

Filtraciones. El revestimiento primario del túnel emisor oriente está compuesto por anillos de concretos prefabricados y complementados con sellos de neopreno que en conjunto evitan el ingreso de agua o material al interior del túnel en su etapa inicial, además de contar con una capa de mortero inyectada durante la excavación, asegurar la estanqueidad del revestimiento primario es de vital importancia debido a que evita retrasos e inconvenientes durante la construcción del revestimiento definitivo.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

Las filtraciones de agua en el túnel son un indicador de una mala estanqueidad del revestimiento primario causados por diferentes factores como son; mala inyección de mortero, mala colocación de sellos en las dovelas, mal montaje del anillo de concreto o alto flujo de agua causado por la permeabilidad del terreno.

Para mitigar el ingreso de agua se realizan trabajos de reinyección de mortero o lechada (agua con cemento) por los el taco sofrasar de las dovelas conocidos comúnmente como ombligos.

El proceso de reinyección se describe a continuación:

- Primeramente, se posiciona en el taco sofrasar un tornillo metálico adicionado con una válvula de 2" que servirá como regulador del flujo de material que se inyecte o salga.
- Posteriormente se perfora el ombligo de la dovela usando un taladro Hilti TE70 o similar adicionado con una broca de 3/4" por 21", se observa el tipo de material que sale (agua, mortero o material del terreno) como se muestra en la **Figura 313**.

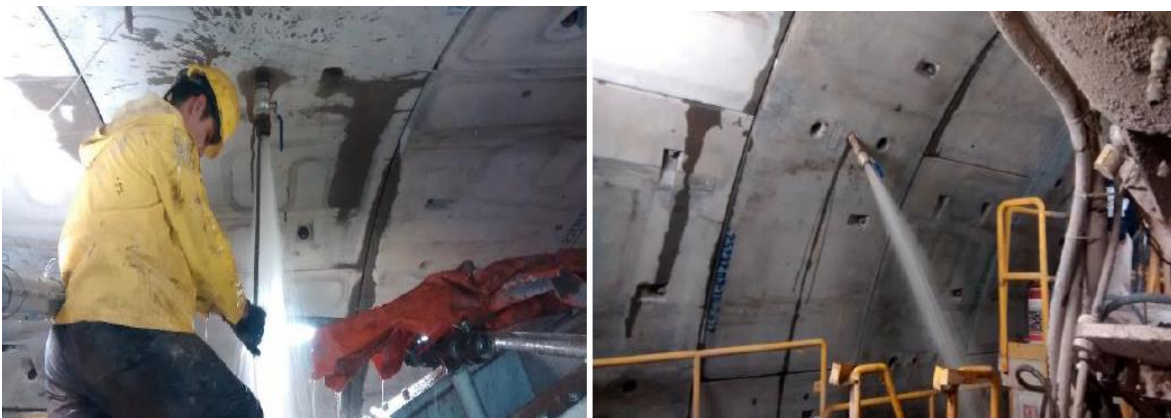


Figura 313. Monitoreo de salida de material por perforación de ombligo de la dovela.

- Si se logra identificar la presencia de mortero en proceso de fraguado, se monitorean otras dovelas de la misma zona, en caso contrario se procede a realizar la reinyección de mortero o lechada con una bomba tipo HANNY como la observada en la **Figura 314**, apoyada con un contenedor de mortero y procurando que la presión de inyección no sobrepase 1 bar, con el objetivo de evitar fractura miento de la dovela.
- El proceso de reinyección finaliza cuando se logran mitigar las filtraciones o cuando ya no sea posible reinyectar por la sobrepresión.



Figura 314. Reinyección en túnel.

Monitoreo del anillo. Después de montado el anillo de concreto, su monitoreo es de vital importancia para conocer el estado de deformación provocada por el terreno y poder verificar si existe una posible falla estructural que arriesgue no solo la integridad del proyecto sino también la integridad del personal, es por eso que durante la etapa de excavación se monitorea la deformación o convergencia de una serie de anillos ya colocados mediante la aplicación dos sistemas conocidos como convencional (mediciones con Estación Total) y automatizado (mediante tiltmeters). La deformación máxima no debe sobrepasar el 0.05% del diámetro del túnel.

Método convencional. La medición de convergencia por el método convencional tiene como objetivo medir la variación de la longitud que hay entre dos puntos. En consecuencia, los desplazamientos que se pueden determinar entre estos dos puntos son desplazamientos relativos, su aplicación básica es para tener una idea de la magnitud de los desplazamientos globales (o deformaciones globales) que se producen en el interior del túnel. Este método se realiza a través de la instalación de seis puntos de control en cada anillo por monitorear con la distribución que se muestra en el diagrama de la **Figura 315** y utilizando una Estación total.

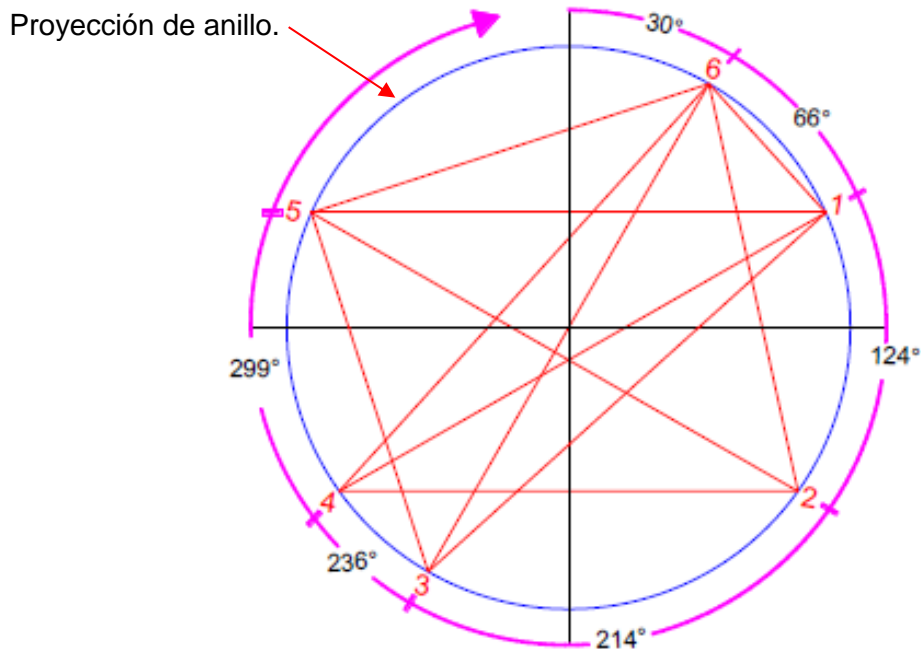


Figura 315. Método convencional para monitoreo de convergencias.

El procedimiento a seguir es el siguiente:

- Ubicación e instalación de las referencias topográficas de acuerdo al diagrama.
- Toma de lectura base “lectura cero” mediante la estación total de la distancia entre cada una de las referencias determinando las longitudes iniciales.
- Inicio del monitoreo de convergencias en los puntos establecidos de acuerdo a la frecuencia conciliada.
- Procesamiento de información
- Presentación de resultados

De las mediciones realizadas se obtienen coordenadas de cada una de las referencias marcadas, estas coordenadas se procesan con la misma estación total, la cual, trae integrado el programa de cálculo de distancia mediante coordenadas, el cual se basa en la fórmula que a continuación se muestra:

$$d = \sqrt{(X_2 - X_1)^2 + (Y_2 - Y_1)^2}$$

Una vez conciliados las distancias en campo se procede a realizar la captura de datos en los formatos establecidos, los cuales, incluyen las gráficas correspondientes a las diferencias que se van presentando entre la lectura inicial y las subsecuentes. La frecuencia de monitoreo se estará ajustando dependiendo del comportamiento que se tenga, esto con el objetivo de realizar mediciones innecesarias que puedan llegar a inferir en la claridad que debe mantenerse en la información.

Método automatizado. Es un sistema que registra desplazamientos entre las juntas de cada dovela de forma autónoma y con mayor precisión al método convencional. Su funcionamiento se basa en la medición de las variaciones registradas por los sensores denominados Tiltmeters, las cuales se almacenan en un aparato de análisis denominado Datalogger y posteriormente se procesan mediante un software especializado.

El principio de operación de los tiltmeters considera que la dovela de concreto armado trabaja como cuerpo rígido; por lo cual el desplazamiento angular registrado se traduce mediante algoritmos matemáticos en “deformaciones del anillo completo” como se muestra en la **Figura 316**. La instalación de cada tiltmeter debe de estar centrado tanto longitudinal como transversalmente en cada dovela, esto con el objetivo de obtener mayor precisión en los datos obtenidos para el resultado que se obtiene en las deformaciones, sin embargo, existen algunas interferencias en la TBM las cuales complica el centrado puntual de cada instrumento en las dovelas.

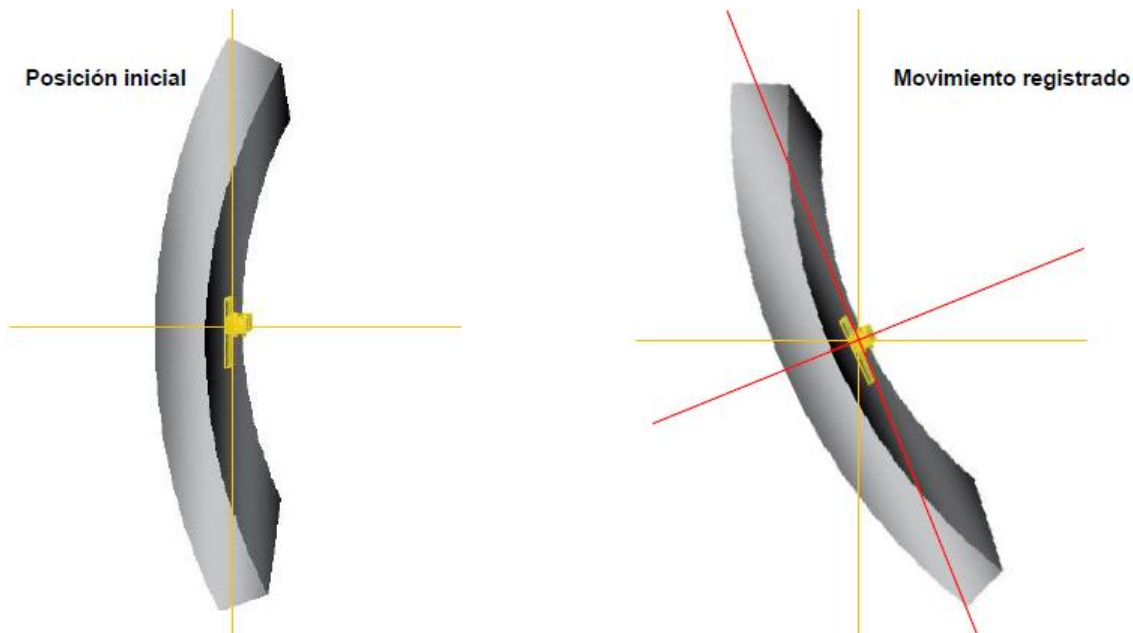


Figura 316. Movimientos registrados en el anillo.

Es importante informar que el sistema está diseñado para determinar las deformaciones tempranas del anillo, situación que con procedimientos topográficos convencionales no es posible monitorear debido a las interferencias con los grantries de la tuneladora. Debido a lo anterior, se monitorean las deformaciones con este sistema durante el paso de la tuneladora, por lo que el corte de la información obtenida y su desinstalación se realizan una vez que pasen todos los carros de la TBM. La **Figura 317** muestra la representación gráfica de los datos obtenidos por este sistema antes de su desinstalación.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

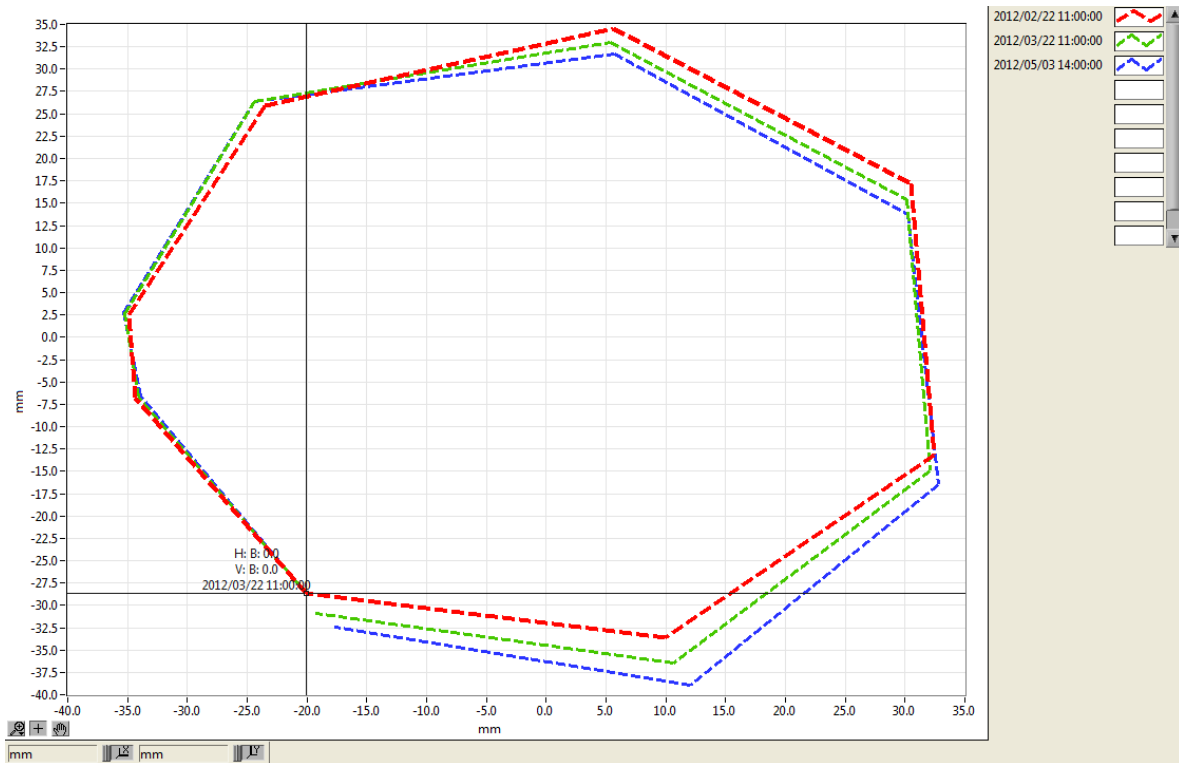


Figura 317. Grafica de convergencias.

De manera general, se observó que la mayor deformación se presenta cuando el anillo sale del faldón del escudo, las deformaciones son mayores en zona de la cubeta o rasante a comparación de la zona de la clave. Las deformaciones promedio estuvieron en el orden de 0.001 m. La mayor deformación por lo tanto ocurre durante el paso de los carros de la máquina tuneladora por el anillo instrumentado, posterior a su paso las velocidades disminuyen considerablemente.

IV.6.2 Calidad del mortero.

El mortero tiene como finalidad rellenar el espacio anular existente entre el terreno excavado y el anillo colocado, por lo cual tiene una función estructural, su fabricación se realiza en obra y se transporta en un contenedor móvil hasta la tuneladora como se explica en la sección “IV.1.3 Ciclo de suministro e inyección de mortero” del presente trabajo, estas características de logística obligan a cumplir con ciertas propiedades en su diseño y control de calidad.

El diseño del mortero utilizado en el tramo 3 del TEO fue diseñado con las siguientes propiedades:

- Inerte para una permanencia de hasta máximo 5 horas. Este mortero inerte o semi-inerte se logra con baja cantidad de cemento, dando la seguridad de permanencia en caso de paradas inesperadas o mala operación del sistema.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

- Resistencia a la compresión ≥ 0.5 MPa medido a 90 días. Con baja cantidad de cemento, se logra esta resistencia. Esta propiedad permite unificar y fijar los anillos de dovelas entre ellos, gracias a la presencia del mortero. También permite no tener infiltraciones de agua.
- Bombeable, con un revenimiento de 18 a 20 centímetros.
- Para cumplir estas características es necesario realizarle una serie de pruebas de laboratorio, desde los materiales utilizados para su fabricación (arenas, cemento, agua, bentonita y aditivos) hasta al mortero ya fabricado y colocado. Existen tres tipos de pruebas que se utilizaron; las de laboratorio externo, las de laboratorio en obra y las de campo.

Pruebas de laboratorio externas. Estas pruebas se realizan por un laboratorio registrado ante el Sistema Nacional de Acreditamiento de Laboratorios de Pruebas, para su realización se toman muestras en obra y dependiendo de la norma aplicable mostrada en la **Figura 318** se realiza su análisis físico o químico.

Normas aplicables a materiales					
Descripción	Cantidad por m3	Inspección o prueba	Norma reguladora	Soportes	Frecuencia
Cemento (CPC40RS)	200.00 kg	Físico-químicas	NMX-C-414	Estudios físicos	Mensual por parte del proveedor
				Estudios químicos	Cada tercer mes por laboratorio externo
Arena filler	843.75 kg	Físico	NMX-C-073 y NMX-C-030	Estudios físicos	Mensual por laboratorio externo
		Peso volumétrico	NMX-C-164 y NMX-C-071		
		Absorción	NMX-C-165, NMX-C-111		
		Densidad	NMX-C-077 y NMX-C-075		
		Pérdida por lavado	NMX-C-084 y NMX-C-166		
		Granulometría	NMX-C-170 y NMX-C-410		
Reactividad potencial	NMX-C-171	Estudios de prueba	Inicio de obra o cambio de banco		
Arena de río	1016.82 kg	Físico	NMX-C-073 y NMX-C-030	Estudios físicos	Mensual por laboratorio externo
		Peso volumétrico	NMX-C-164 y NMX-C-071		
		Absorción	NMX-C-165 y NMX-C-111		
		Densidad	NMX-C-077 y NMX-C-075		
		Pérdida por lavado	NMX-C-084 y NMX-C-166		
		Granulometría	NMX-C-170 y NMX-C-410		
Reactividad potencial	NMX-C-171	Estudios de prueba	Inicio de obra o cambio de banco		
Aditivo superabsorbente Sika Foam TBM	0.50 kg	Calidad	NMX-C-494	Certificado	Mensual por laboratorio externo
Aditivo Sigunit PC (Acelerante de fraguado)	16.00 litros	Calidad	NMX-C-494	Certificado	Por lote del proveedor
Bentonita Sódica tipo Bentonil CV15	22.33 kg	Calidad	ISO 13500	Certificado	Por lote del proveedor
Agua potable	127.60 litros	Físico-químicas	NMX-C-122	Certificado	Mensual por laboratorio externo

Figura 318. Normas aplicables a los materiales utilizados para la fabricación de mortero.

Pruebas de laboratorio en obra. Estas pruebas consisten en la determinación de las propiedades físicas del lodo bentónico y el mortero fabricado como son el revenimiento, el filtrado, la densidad y la resistencia a la compresión, en la **Figura**

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

319 se muestran las normas aplicables para cada prueba y posteriormente su descripción.

Descripción	Inspección o prueba	Norma reguladora	Soportes	Valores de prueba	Frecuencia
Mortero fabricado	Revenimiento (Cono de Abrams)	NMX-C-155 y NMX-C-156	Informe de muestreo	Máximo 28 cm	Cada 28 m3 de mortero fabricado
	Densidad (Balanza de Baroid)			≥ 1.6	
	Filtración (Prensa API)			110 cc	
	Tiempo de fraguado (Aparato de vicat)			5 horas	
	Resistencia (Prensa)	NMX-C-156	Informe de ensayos	≥ 0.5 Mpa	Cada 28 m3 de mortero fabricado, ensaye a los 12 horas 1 día , 3 días, 7 días, 28 días y 90 días.
Lodo bentonítico	Viscosidad Marsh	NMX-L-144	Informe de ensayos	de 40 a 65 segundos	Una vez por turno o cada 40 m3

Figura 319. Normas aplicables mortero fabricado.

Revenimiento. Es la prueba que se le realiza al mortero para determinar de manera indirecta su consistencia y garantizar que sea lo suficientemente fluida para su trabajabilidad y uso. La prueba consiste en llenar de mortero un cono truncado de 30 centímetros de altura, como se muestra en la **Figura 320**, el llenado se hace en 3 capas, varillando cada capa con 25 golpes, una vez que se enrasa el cono con la misma varilla, se levanta verticalmente el molde y se mide la diferencia de altura entre el cono de mortero abatido y la altura del molde, la diferencia en centímetros es el revenimiento inicial.



Figura 320. Prueba de revenimiento.

Densidad. La densidad del mortero se define como su cantidad de masa en un determinado volumen, está directamente relacionada con la de sus materiales componentes, así como con su contenido en aire. La densidad del mortero fresco

se determina mediante la utilización de un aparato denominado Balanza de Baroid mostrada en la **Figura 321**, el cual se compone de un vaso para el mortero de volumen fijo con una tapa en un extremo de una barra graduada y un contrapeso en el otro extremo. Una pesa deslizante puede ser movida a lo largo de la barra y una burbuja indica cuando la barra está a nivel. La lectura de densidad se toma en el punto donde la pesa deslizante está posicionada en la barra cuando está a nivel.



Figura 321. Obtención de la densidad del mortero.

Filtrado. La prueba consiste en determinar la pérdida de fluida y la velocidad a la cual se fuerza el mortero a través de un papel filtro bajo ciertas condiciones de tiempo, temperatura y presión, para obtener la cantidad de filtrado se utiliza un aparato denominado prensa API, como el mostrado en la **Figura 22**, compuesto por un vaso de volumen fijo que es sometido a una presión de gas interna. La prueba se realiza a la temperatura ambiente y a una presión de 100 psi (690 KPa) usando CO₂, y los resultados se registran como número de mililitros perdidos en 30 minutos.



Figura 322. Prueba de filtrado.

Tiempo de fraguado. Es el tiempo durante el cual un mortero posee la suficiente trabajabilidad para ser utilizado sin adición posterior de agua con el fin de contrarrestar los efectos de endurecimiento por el principio del fraguado. Para la obtención del tiempo de fraguado se utiliza el aparato de Vicat. El aparato consiste

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

en un vástago móvil de uso dual (sonda Tetmajer o aguja Vicat). El vástago puede fijarse en cualquier posición por medio de un tornillo de sujeción. Un índice se desliza sobre una escala graduada en milímetros solidaria con el soporte, marcando la consistencia.

Resistencia a la compresión. Para obtener la resistencia a la compresión se elaboran 12 muestras de mortero en forma de cubo con una serie de probetas de dimensiones 5x5x5 centímetros, como las mostradas en la **Figura 323**, estos cubos son reservados para ser sometidos a ensayos de compresión axial por una prensa mecánica, los ensayos se realizan a dependiendo de la edad del mortero (12 horas, 1 día, 3 días, 7 días, 28 días o 90 días).



Figura 323. Muestras de mortero realizadas para la prueba de compresión.



Figura 324. Prueba de compresión del mortero.

Viscosidad Marsh. Esta prueba se realiza para evaluar la fluidez con el tiempo del lodo bentonítico utilizado para la fabricación del mortero, para su realización se utiliza un cono de Marsh que consiste en un recipiente metálico tronco-cónico invertido con una apertura de 8 milímetros en su base y un recipiente cilíndrico de 200 ml como los observados en la **Figura 325**, con estos elementos se determina el tiempo que tarda en fluir 200 ml a través del cono.



Figura 325. Prueba de viscosidad Marsh.

Pruebas de campo. Este tipo de pruebas se realiza monitoreando el estado del mortero ya inyectado, para ello se utiliza un taladro con la capacidad de perforar el obliquo de la dovela, por ejemplo, un HILTI TE70 o similar, un muestreador metálico con punta elaborado con un tubo de 1" de diámetro por 60 centímetros de largo, y un tapón de lynamid para el orificio de la dovela. El proceso es perforar el ombligo, ingresar y retirar el muestreador, medir y observar la muestra, y tapar el orificio. La frecuencia de monitoreo depende de la supervisión de obra u observando las filtraciones presentadas en el túnel. Como se observa la **Figura 326** el espesor de la muestra de mortero debe ser de aproximadamente 31 centímetros, en caso de que solo exista la presencia material del terreno o agua, se deben de realizar trabajos de reinyección.

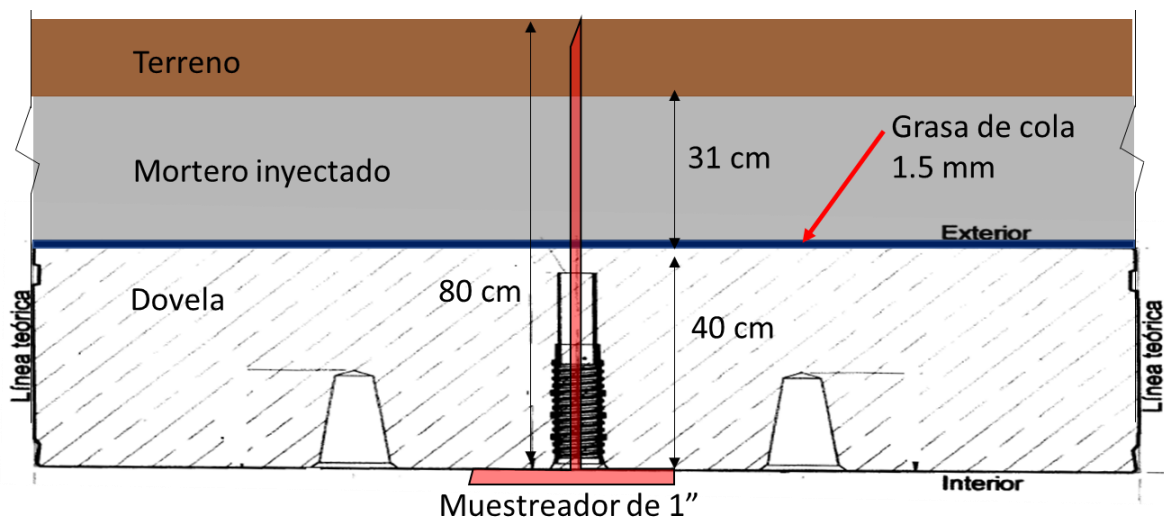


Figura 326. Obtención de muestras de mortero ya inyectado.

IV.6.2 Supervisión y calidad en Túnel.

Limpieza en túnel. Una de las grandes desventajas de la utilización de un sistema de extracción de rezaga para el proceso de excavación es la acumulación de material fino en todo el túnel debido a problemas de acondicionamiento o delineamiento de las cintras transportadoras, este problema es causante de múltiples incidentes como descarrilamientos de locomotora, bloqueos para el ingreso de insumos, probabilidad de accidentes laborales, acumulación de aguas residuales y riesgo inminente de inundación. Para evitar estos inconvenientes es necesario la implementación de una cuadrilla de limpieza durante todo el proceso que dura la excavación como se aprecia en la **Figura 327**.



Figura 327. Labores de limpieza en túnel.

Seguridad en túnel. Aun prestando la máxima atención y cuidado, en todos los trabajos de ingeniería civil, y muy en particular en las obras subterráneas, es muy difícil prever al cien por ciento, accidentes laborales dado el riesgo que este tipo de obras supone. De ahí la gran importancia de la prevención de accidentes, así como la puesta a punto de un riguroso control de todo el proceso constructivo estableciendo procedimientos eficaces en relación con la seguridad e higiene en el trabajo.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

Durante la construcción de un túnel, el empleo de tuneladoras mejora la seguridad, sin embargo, esto no significa que se esté exento de riesgos; aun con las T.B.M., una construcción de túneles es una obra dinámica, en la que siempre ocurren imprevistos., sin olvidar que el trabajo se desarrolla bajo tierra (ambiente subterráneo) y que, además, existe desplazamiento a medida que se avanza en la excavación. Es por ello que, durante la ejecución de la obra y a su terminación, se pueden presentar numerosos riesgos.

Por lo que, en el estudio del terreno se deben tener en cuenta factores como:

- Posibilidad de asentamientos del terreno que puedan suponer un colapso del túnel.
- Posibilidad de presencia de agua que pueda suponer problemas en la excavación, tales como inundaciones como la observada en la **Figura 328**.
- Bloqueo de la tuneladora en el terreno.
- Presencia de gases.
- Posibilidad de que se produzca un incendio. Este riesgo se incrementa en túneles de gran longitud, y puede disminuir, sobre todo si se van construyendo a la vez las necesarias vías de emergencia.

La construcción de túneles requiere de supervisión de personas competentes y con experiencia, capaces de organizar y responder en caso de que se presente una falla recurrente durante el proceso de excavación. El personal debe de usar además de casco y zapatos de seguridad, botas y ropas impermeables, protectores para la vista, respiratorios y auditivos principalmente en la tuneladora. El uso de los elementos de protección personal (casco, zapatos de seguridad, botas, ropa impermeable, chaqueta o arnés reflectante, lámpara de seguridad, etc.) previene de los riesgos efectivos a que están expuestos los trabajadores.



Figura 328. Riego de inundación en túnel.

Plan de acción de emergencias contra incendios. Muchos de los materiales utilizados durante el proceso de excavación son propensos a generar un incendio por lo que son denominados combustibles. El combustible son todos los materiales a base hidrocarburos, cartones y embalajes en túnel (hendiduras y acabado) así como los humos, la fuente de energía pueden ser un arco eléctrico, una llama de pote de escape, un cigarrillo, un soplete o una chispa resultante de una fricción.

Por lo cual el túnel debe estar equipado con:

- Línea de suministro de agua contra incendios conforme a las exigencias de los bomberos (DN80, 60 m³/h, Presión 7 bares).
- Medidas de alerta.
- Dispositivos contra incendio (extintores, cortina de agua)
- Medidas de protección (mascaras – equipo de salvamento)
- Personal con la capacitación para el uso de las máscaras de equipo de salvamento

Factores de aminorado en caso de incendio:

- Cables eléctricos consumibles auto extingüibles no conductores de flama
- Locomotoras equipadas de un sistema manual de extinción de los fuegos, incorporado en el punto caliente.
- Manga de ventilación ignífuga.

Factores agravantes en caso de incendio:

En caso de incendio en el túnel, la envoltura puede encenderse por la subida de temperatura e impedir la salida del aire exterior y recíprocamente el soplado del aire en el túnel puede activar el incendio y favorecer la subida de la temperatura en el conjunto del túnel por un efecto de cierre (punto de incendio hacia el desglose).

La tuneladora puede considerarse con un espacio confinado debido a que la aspiración directamente al frente de trabajo hace circular el aire o el humo a partir de la lumbrera. El paro de actividades se convierte en un acto prioritario en caso de incendio y por consiguiente es necesario evacuar hacia el exterior.

Acciones que se implementan:

- Inicio de una alerta
- Intervención inmediata del personal lo más cerca posible del fuego
- Paro inmediato de actividades.
- El jefe da la alerta de puesto para el puesto de guardia (utilizando el teléfono rojo).
- Todo el personal retransmite la alerta en la máquina con el fin de evacuar la zona.
- Puesta en seguridad del frente para evitar un sobre accidente.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

- Parada de los componentes eléctricos de la tuneladora y locomotoras (eventualmente).
- Equipamiento del conjunto del personal con las máscaras equipos de salvamento, aplicación de las consignas, repliegue del conjunto del personal hacia la lumbrera.
- El personal más cercano a una salida da la alerta de incendio y aplica prioritariamente los medios convenientes ante los fuegos nacientes para intentar evitar su progresión.
- El jefe de puesto organiza el repliegue en seguridad del personal y el censo
- En caso de evacuación por el túnel, aplicar las consignas, circular en el punto más bajo, equiparse de una máscara equipo de salvamento o protegerse la boca y la nariz.

Plan de acción de emergencias contra inundación. Existen muchos factores que contribuyen a un riesgo de inundación, por ejemplo, las condiciones del frente, el fallo del sistema de bombeo, acumulación de agua producto de filtraciones en túnel por mal monitoreo.

Por lo cual el túnel debe estar equipado con:

- Comunicación alámbrica e inalámbrica (radios) con personal de superficie.
- Medidas de alerta.
- Paros de emergencia en toda la máquina.
- Medidas de protección (mascaras – equipo de salvamento)
- Personal con la capacitación para el uso de las máscaras de equipo de salvamento.

Factores de aminorado en caso de inundación:

- Bombas de desalojo de agua residual hacia la lumbrera y superficie.
- Locomotoras para transporte de personal.

Factores agravantes en caso de incendio:

En caso de inundación en el túnel, el riesgo eléctrico prevalece por lo que el paro de actividades se convierte en un acto prioritario y por consiguiente es necesario evacuar hacia el exterior.

Acciones que se implementan:

- Inicio de una alerta
- Intervención inmediata del personal lo más cerca posible del aumento del tirante de agua.
- Paro inmediato de actividades.
- El jefe da la alerta de puesto para el puesto de guardia (utilizando el teléfono rojo).
- Todo el personal retransmite la alerta en la máquina con el fin de evacuar la zona.

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

- Puesta en seguridad del frente para evitar un sobre accidente.
- Parada de los componentes eléctricos de la tuneladora y locomotoras (eventualmente).
- El jefe de puesto organiza el repliegue en seguridad del personal y el censo
- En caso de evacuación por el túnel, aplicar las consignas, circular en el punto más alto y evitar contacto con fuentes eléctricas.

V. Conclusiones.

El uso de nuevas tecnologías para la construcción de túneles representa una gran ventaja en comparación a los métodos tradicionales, debido a que se pueden alcanzar rendimientos cada vez más significativos. En una obra de gran magnitud y con características como las del Túnel Emisor Oriente, la utilización de máquinas tuneladoras demostró ser la mejor elección debido a la eficiencia de estas, misma que depende en gran medida del tipo de terreno encontrado y de la buena utilización de sus componentes.

El proceso de excavación con este tipo de máquinas conlleva actividades muy específicas e importantes, tales como; la inspección periódica de sus herramientas de corte y fundamentalmente la planeación de: la logística para el suministro de sus materiales e insumos, su mantenimiento correctivo durante el paso de lumbreras y las actividades preliminares a su salida en lumbrera.

La máquina utilizada en el tramo 3 del TEO fue diseñada del tipo EPB (Earth Pressure Balance) con el objetivo de atacar tres tipos de frente que se identificaron en este tramo; el frente Suelo, compuesto principalmente por arcillas, limos y arenas; el frente Roca, compuesto de basaltos y el frente Mixto, compuesto por una combinación de ambos; además de que el nivel de aguas freáticas se encontraba por encima del eje de túnel de diseño. Con las características conocidas del terreno y las características de diseño de la máquina se logró alcanzar un rendimiento máximo de 20 anillos/día (30 metros/día) en un frente Suelo, 15 anillos/día (22.5 metros/día) en un frente del tipo Mixto y 10 anillos/día (15 metros/día) en frente del tipo Roca.

Aun conociendo el tipo de frente y el diseño de la tuneladora, la excavación del tramo 3 se enfrentó a una serie de imprevistos relacionados principalmente con el funcionamiento de la máquina; algunos de ellos con un alto riesgo, a tal grado de considerar cancelar este frente de producción, debido a que una vez iniciado el proceso de excavación es prácticamente imposible retirar la tuneladora de su posición actual e ingresar una nueva, por lo cual solo existen dos opciones; considerar un nuevo frente de ataque o realizar las reparaciones pertinentes del equipo in situ. Los imprevistos más significativos fueron los daños presentados en la rueda de corte y el tornillo sin fin, provocados estos por la abrasividad del terreno y también el perfil de capacidad técnica del equipo humano de operación, lo que derivó, conjuntamente, a que se reflejaran periodos de paros prolongados de hasta 3 meses y rendimientos de hasta 1 anillo/día (1.5 m/día). La toma de decisiones y buena reacción del personal encargado del proyecto lograron que este frente continuara su proceso de excavación, implementando procedimientos innovadores para las reparaciones que la tuneladora necesitaba.

Al igual que cualquier proceso constructivo, el proceso de excavación tuvo imprevistos menores relacionados con fallos en la logística y fallas mecánicas de

PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO

los equipos auxiliares que, a pesar de no provocar paros tan prolongados, también influyeron en los rendimientos diarios y en costo de producción.

Los costos de producción del tramo 3 están indudablemente vinculados al rendimiento alcanzado por el tipo de frente de excavación, siendo el más costoso el frente Roca debido a que el avance es más lento por el tipo de tuneladora. El cálculo del costo se basa en la función que desempeña cada una de las cuadrillas de trabajo, la correcta supervisión de actividades y un buen control de calidad, su buen desempeño se refleja en la obtención de altos rendimientos de excavación y bajos costos de producción.

Bibliografía:

- 1) Priego de los Santos, Enrique (2012). **Túneles y tuneladoras; nociones generales y topografía para su guiado**. México: Limusa.
- 2) Autores varios (1975). **Memoria de las obras del sistema de drenaje profundo del Distrito Federal**, México: Departamento del Distrito Federal.
- 3) Cornejo Álvarez, Laureano (1988). **Excavación mecánica de túneles**. España: Rueda.
- 4) Guillermo Clavellina Miller, Juan Paulín Aguirre, Ricardo Dañino Lalde, Salvador Martínez Ramírez, y André Banon (2012). **Construcción de una galería para montaje de máquina tuneladora**. 2º Simposio Internacional sobre túneles y lumbreras en suelos y roca.
- 5) Proyecto ejecutivo del Túnel Emisor Oriente, CONAGUA.
- 6) Emisor Oriente Parts Manual, The Robbins Company.

Páginas Web

- 1) <https://evaproyect.wordpress.com/author/7ermndz/>
- 2) www.cuidarelagua.cdmx.gob.mx/drenaje_principal.html
- 3) <https://civilgeeks.com/2015/07/11/apuntes-del-sistema-unificado-de-clasificacion-de-suelos-s-u-c-s/>

Lista de Figuras y sus referencias

- 1) El TEO como sistema de drenaje alternativo al Emisor Central. (Páginas Web inciso 1).
- 2) Los 5 lagos de la Cuenca del Valle de México durante la conquista. (Bibliografía inciso 2).
- 3) Sistema principal de drenaje de la Ciudad de México. (Páginas Web inciso 2).
- 4) Localización del Túnel Emisor Oriente. (Bibliografía inciso 5).
- 5) Trazo del Túnel Emisor Oriente. (Bibliografía inciso 5).
- 6) Tramos del TEO. (Bibliografía inciso 5).
- 7) Perfil geológico utilizado para el diseño de las tuneladoras. (Bibliografía inciso 5).
- 8) Programa de obra general del TEO. (Bibliografía inciso 5).
- 9) Hidrofresadora para excavación del muro Milán. (Autoría del tesista).
- 10) Excavación de núcleo y colocación de marcos metálicos para construcción de la lumbrera. (Autoría del tesista).
- 11) Características de construcción de la lumbrera L-16 por el método convencional. (Bibliografía inciso 5).
- 12) Habilitado de acero para el revestimiento definitivo de lumbrera. (Autoría del tesista).
- 13) Esquema de construcción de una lumbrera por el método mixto. (Autoría del tesista).
- 14) Esquema del revestimiento primario y secundario de los primeros 22 kilómetros de túnel. (Bibliografía inciso 5).

**PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE
(TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO**

- 15) Esquema del revestimiento primario y secundario del kilómetro 22 al portal de salida. (Bibliografía inciso 5).
- 16) Esquema básico de una maquina tuneladora del tipo EPB. (Bibliografía inciso 5).
- 17) Anillo formado por 8 dovelas de concreto. (Bibliografía inciso 5).
- 18) Proceso de fabricación de dovelas. (Bibliografía inciso 5).
- 19) Habilitado de acero de refuerzo para el revestimiento definitivo. (Autoría del tesista).
- 20) Cimbra metálica. (Autoría del tesista).
- 21) Carros Moran para transporte de concreto. (Bibliografía inciso 5).
- 22) Sondeo exploratorio mediante la Prueba de Penetración Estándar (SPT). (Autoría del tesista).
- 23) Tubo muestreador para SPT. (Autoría del tesista).
- 24) Muestras inalteradas mediante la utilización del tubo shelby. (Autoría del tesista).
- 25) División de los suelos finos y suelos gruesos. (Autoría del tesista).
- 26) Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS). (Páginas web inciso 3).
- 27) Vista aérea de la ubicación de Lumbrera L-10. (Google Maps).
- 28) Esquema estratigráfico de la Lumbrera L-10. (Bibliografía inciso 5).
- 29) Vista aérea de la ubicación de Lumbrera L-11. (Google Maps).
- 30) Esquema estratigráfico de la Lumbrera L-11. (Bibliografía inciso 5).
- 31) Vista aérea de la ubicación de Lumbrera L-12. (Google Maps).
- 32) Esquema estratigráfico de la Lumbrera L-12. (Proyecto ejecutivo del TEO).
- 33) Vista aérea de la ubicación de Lumbrera L-13. (Google Maps).
- 34) Esquema estratigráfico de la Lumbrera L-13. (Bibliografía inciso 5).
- 35) Profundidades del muro Milán, muro primario y muro secundario de lumbreras del tramo 3. (Bibliografía inciso 5).
- 36) Geometría de brocales realizados en la lumbrera L-10. (Bibliografía inciso 5).
- 37) Brocales realizados en la lumbrera L10. (Bibliografía inciso 5).
- 38) Paneles del muro Milán. (Bibliografía inciso 5).
- 39) Excavación de muro Milán y acarreo de material. (Autoría del tesista).
- 40) Acero de refuerzo utilizado para los paneles del muro Milán. (Bibliografía inciso 5).
- 41) Acero de refuerzo utilizado para los paneles del muro Milán. (Bibliografía inciso 5).
- 42) Sistema de bombeo utilizado para la construcción de la Lumbrera L10. (Autoría del tesista).
- 43) Sistema de bombeo perimetral de una Lumbrera. (Autoría del tesista).
- 44) Detalle de construcción de la trabe de coronamiento. (Bibliografía inciso 5).
- 45) Esquema de excavación de núcleo de muro Millán. (Bibliografía inciso 5).
- 46) Excavación de núcleo central del muro Millán. (Autoría del tesista).
- 47) Acarreo de material producto de la excavación de núcleo de muro Millán. (Autoría del tesista).
- 48) Esquema de excavación de núcleo central en su segunda etapa. (Bibliografía inciso 5).
- 49) Excavación de núcleo central en su segunda etapa. (Autoría del tesista).

- 50) Colocación de marcos metálicos. (Autoría del tesista).
- 51) Detalle de marcos metálicos. (Bibliografía inciso 5).
- 52) Concreto lanzado entre marcos metálicos. (Autoría del tesista).
- 53) Detalle de construcción de trabe de liga. (Bibliografía inciso 5).
- 54) Detalle de armado de muro secundario en lumbrera L10. (Bibliografía inciso 5).
- 55) Detalle de emportalamiento en lumbrera L-10. (Bibliografía inciso 5).
- 56) Habilitado de acero en muro y portales de la lumbrera. (Autoría del tesista).
- 57) Cimbra deslizante para colado de muro secundario. (Autoría del tesista).
- 58) Bacha utilizada para colado de losa de fondo. (Autoría del tesista).
- 59) Armado de losa de fondo. (Bibliografía inciso 5).
- 60) Características constructivas de las Lumbreras del tramo 3. (Autoría del tesista).
- 61) Esquema del sistema umbilical de la TBM. (Autoría del tesista).
- 62) Geometría de la Sección y Sección 2 de la galería respectivamente. (Bibliografía inciso 4).
- 63) Secciones de la galería. (Autoría del tesista).
- 64) Retiro de marcos metálicos del revestimiento primario de la lumbrera para la construcción de la galería. (Autoría del tesista).
- 65) Anclas pasivas en el frente de excavación. (Autoría del tesista).
- 66) Bóveda de elementos estructurales a base tubos metálicos de 4". (Autoría del tesista).
- 67) Esquema de la sección media superior de la galería. (Autoría del tesista).
- 68) Esquema de la sección media inferior de la galería. (Autoría del tesista).
- 69) Secuencia de excavación de la galería. (Autoría del tesista).
- 70) Colocación de los primeros marcos de la galería. (CARSO S.A. de C.V.).
- 71) Colocación de concreto lanzado entre los marcos metálicos. (Autoría del tesista).
- 72) Excavación de la sección media inferior de la galería. (Autoría del tesista).
- 73) Elemento de rigidez colocado para ligar ambos extremos de la galería. (Autoría del tesista).
- 74) Apoyos para la sección superior del revestimiento "patas de elefante". (Bibliografía inciso 4)
- 75) Galería concluida. (Autoría del tesista).
- 76) Sistema de bombeo en galería de la lumbrera L10. (Autoría del tesista).
- 77) Esquema del sistema de bombeo en galería de la lumbrera L-10. (Autoría del tesista).
- 78) Secciones de la tuneladora "Hidalgo" de tramo 3. (Bibliografía inciso 6).
- 79) Segunda sección de la galería "rellenada" con concreto lanzado. (CARSO S.A. de C.V.).
- 80) Vista de perfil de adecuaciones en galería y fondo de lumbrera. (Bibliografía inciso 5).
- 81) Adecuaciones en galería y fondo de lumbrera. (Bibliografía inciso 5).
- 82) Grúa pórtico de 200 toneladas. (Autoría del tesista).
- 83) Vista de perfil de la TBM "Hidalgo". (Bibliografía inciso 6).
- 84) Principales elementos de la máquina tuneladora. (Bibliografía inciso 5).
- 85) Proceso de ensamble del "Escudo". (Autoría del tesista).

- 86)**Proceso esquemático de ensamble del “Escudo”. (Autoría del tesista).
- 87)**Vista en 3d del puente principal ensamblado con el escudo. (Bibliografía inciso 4).
- 88)**Vista lateral y principales características del puente principal ensamblado con el escudo. (Bibliografía inciso 6).
- 89)**Vista en 3d de la estructura de reacción y el anillo metálico. (Autoría del tesista).
- 90)**Ubicación de la estructura de reacción y el anillo metálico. (Bibliografía inciso 5).
- 91)**Instalación de la estructura de reacción y el anillo metálico. (Autoría del tesista).
- 92)**Ubicación del bote de rezaga para extracción de material excavado. (Bibliografía inciso 4).
- 93)**Bote de rezaga para extracción de material excavado. Autoría del tesista).
- 94)**Back up. (Bibliografía inciso 6).
- 95)**Funcionamiento de la TBM. (Bibliografía inciso 6).
- 96)**Equilibrio del mecanismo de falla simplificado del frente. (Bibliografía inciso 5).
- 97)**Rueda de corte. (Bibliografía inciso 6).
- 98)**Representación gráfica del sistema automatizado de guiado en la tuneladora (Prismas, Estación total, Inclinómetro y pantalla del ordenador). (Bibliografía inciso 5).
- 99)**Ejes de dirección. (Bibliografía inciso 5).
- 100)** Visualización en pantalla del sistema de guiado de la tuneladora. (Bibliografía inciso 5).
- 101)** Características de la articulación de la tuneladora “Hidalgo”. (Autoría del tesista).
- 102)** Cimbra metálica. (Autoría del tesista).
- 103)** Cimbra metálica (vista lateral). (Autoría del tesista).
- 104)** Relleno de galería de montaje. (Autoría del tesista).
- 105)** Emboquillado de portal de entrada a túnel. (Autoría del tesista).
- 106)** Armado de acero de refuerzo original en el TEO, Tramo 3. (Bibliografía inciso 5).
- 107)** Habilitado de acero de refuerzo para el revestimiento definitivo. (Autoría del tesista).
- 108)** Logística de construcción del revestimiento definitivo del Tramo 3. (Autoría del tesista).
- 109)** Planta dosificadora utilizada para fabricación de concreto. (Autoría del tesista).
- 110)** Carro Moran y Auger max. (Autoría del tesista).
- 111)** Snorkel retraible para inyección de concreto. (Autoría del tesista).
- 112)** Ritmo de colado. (Bibliografía inciso 5).
- 113)** Media caña en fondo de lumbrera. (Autoría del tesista).
- 114)** Herramientas de corte. (Autoría del tesista).
- 115)** Radio de acción de los cortadores. (Bibliografía inciso 6).
- 116)** Radio de acción de los cortadores. (Bibliografía inciso 6).
- 117)** Sistema de inyección de espuma. (BASF S.A. de C.V.)

**PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE
(TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO**

- 118) Tasa de inyección FIR. (Autoría del tesista).
- 119) Tasa de expansión FIR. (Autoría del tesista).
- 120) Concentración y volumen de tensoactivo utilizado en el tramo 3 del TEO. (Autoría del tesista).
- 121) Características geométricas del tornillo sin fin N.1 y N.2. (Bibliografía inciso 6)
- 122) Sistema de bandas horizontal. (Bibliografía inciso 6).
- 123) Sistema de bandas vertical. (Bibliografía inciso 6).
- 124) Vista de instalaciones del sistema de bandas en superficie. (Bibliografía inciso 6).
- 125) Dique de rezaga. (Autoría del tesista).
- 126) Ejemplos de un frente del tipo Suelo, Mixto y Roca. (Autoría del tesista).
- 127) Ciclo de excavación. (Autoría del tesista).
- 128) Patio de maniobras. (Autoría del tesista).
- 129) Ejemplo de transporte y descarga de dovelas en Lumbrera. (Autoría del tesista).
- 130) Junta tok, junta estanqueidad y fieltro bituminoso. (Autoría del tesista).
- 131) Placas de fibra dura. (Autoría del tesista).
- 132) Descenso del anillo con pinza y con eslingas respectivamente. (Autoría del tesista).
- 133) Acomodo de dovelas sobre los carros doveleros. (Autoría del tesista).
- 134) Configuración de vías centrales y Cambio california. (Autoría del tesista).
- 135) Recepción en plataformas. (Bibliografía inciso 5).
- 136) Posición U1 de anillo. (Autoría del tesista).
- 137) Posibles posiciones posteriores de montaje de anillo. (Bibliografía inciso 5).
- 138) Posiciones de los anillos subsecuentes. (Bibliografía inciso 5).
- 139) Ciclo de colocación. (Autoría del tesista).
- 140) Efecto de flotación del anillo en el mortero de inyección. (Bibliografía inciso 5).
- 141) Planta dosificadora. (Autoría del tesista).
- 142) Bomba putzmeister. (Autoría del tesista).
- 143) Transportador helicoidal de 8.5 m3. (Autoría del tesista).
- 144) Diagrama del ciclo de suministro e inyección de mortero. (Autoría del tesista).
- 145) Esquema de inyección de grasa. (BASF S.A. de C.V.)
- 146) Chaflán formado entre dovelas. (Autoría del tesista).
- 147) Ciclo de suministro y desalojo de agua. (Autoría del tesista).
- 148) Instalación de tubería en pared de lumbrera. (Autoría del tesista).
- 149) Instalación de tubería en túnel. (Autoría del tesista).
- 150) Curvas características de las bombas utilizadas para desalojo de agua residual. (FLYGT S.A. de C.V.).
- 151) Sistema de ventilación y turbina. (Autoría del tesista).
- 152) Manga y Cassette para sistema de ventilación. (Autoría del tesista).
- 153) Turbina adicional ubicada en TBM. (ZITRON S.A. de C,V,)
- 154) Subestación eléctrica de y líneas de suministro de energía en túnel. (Autoría del tesista).

**PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE
(TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO**

- 155) Instalaciones en túnel durante el proceso de excavación. (Autoría del tesista).
- 156) Rendimiento diario de excavación del subtramo L10-L11. (Autoría del tesista).
- 157) Rendimiento efectivo del subtramo L10-L11. (Autoría del tesista).
- 158) Perfil estratigráfico del subtramo L-10-L11. (Autoría del tesista).
- 159) Conciliación del frente de excavación No. 1. (Autoría del tesista).
- 160) Conciliación del frente de excavación No. 2. (Autoría del tesista).
- 161) Conciliación del frente de excavación No. 3. (Autoría del tesista).
- 162) Conciliación del frente de excavación No. 4. (Autoría del tesista).
- 163) Conciliación del frente de excavación No. 5. (Autoría del tesista).
- 164) Conciliación del frente de excavación No. 6. (Autoría del tesista).
- 165) Conciliación del frente de excavación No. 7. (Autoría del tesista).
- 166) Conciliación del frente de excavación No. 8. (Autoría del tesista).
- 167) Conciliación del frente de excavación No. 9. (Autoría del tesista).
- 168) Conciliación del frente de excavación No. 10. (Autoría del tesista).
- 169) Conciliación del frente de excavación No. 11. (Autoría del tesista).
- 170) Conciliación del frente de excavación No. 12. (Autoría del tesista).
- 171) Conciliación del frente de excavación No. 13. (Autoría del tesista).
- 172) Conciliación del frente de excavación No. 14. (Autoría del tesista).
- 173) Material conciliado en subtramo L10-L11. (Autoría del tesista).
- 174) Material conciliado por días efectivos. (Autoría del tesista).
- 175) Porcentaje de material conciliado. (Autoría del tesista).
- 176) Rendimiento efectivo por material "SUELO". (Autoría del tesista).
- 177) Rendimiento efectivo por material "MIXTO". (Autoría del tesista).
- 178) Rendimiento efectivo por material "ROCA". (Autoría del tesista).
- 179) Rendimiento diario de excavación del subtramo L11-L12.
- 180) Rendimiento efectivo del subtramo L11-L12.
- 181) Perfil estratigráfico del subtramo L11-L12. (Bibliografía inciso 5).
- 182) Conciliación del frente de excavación No. 15. (Autoría del tesista).
- 183) Conciliación del frente de excavación No. 16. (Autoría del tesista).
- 184) Conciliación del frente de excavación No. 17. (Autoría del tesista).
- 185) Conciliación del frente de excavación No. 18. (Autoría del tesista).
- 186) Conciliación del frente de excavación No. 19. (Autoría del tesista).
- 187) Conciliación del frente de excavación No. 20. (Autoría del tesista).
- 188) Conciliación del frente de excavación No. 21. (Autoría del tesista).
- 189) Conciliación del frente de excavación No. 22. (Autoría del tesista).
- 190) Conciliación del frente de excavación No. 23. (Autoría del tesista).
- 191) Material conciliado en subtramo L11-L12. (Autoría del tesista).
- 192) Material conciliado por días efectivos. (Autoría del tesista).
- 193) Porcentaje de material conciliado. (Autoría del tesista).
- 194) Rendimiento efectivo por material "SUELO". (Autoría del tesista).
- 195) Rendimiento efectivo por material "MIXTO". (Autoría del tesista).
- 196) Rendimiento diario de excavación del subtramo L12-L13. (Autoría del tesista).
- 197) Rendimiento efectivo del subtramo L12-L13. (Autoría del tesista).

**PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE
(TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO**

- 198)** Perfil estratigráfico del subtramo L12-L13. (Bibliografía inciso 5).
- 199)** Conciliación del frente de excavación No. 24. (Autoría del tesista).
- 200)** Conciliación del frente de excavación No. 25. (Autoría del tesista).
- 201)** Rendimientos de excavación por tipo de material encontrado en el Tramo 3 del TEO. (Autoría del tesista).
- 202)** Trabajos de intervención en medio atmosféricos. (Autoría del tesista).
- 203)** Ubicación de válvulas de desfogue y sensores de presión en mamparo de TBM. (Autoría del tesista).
- 204)** Ventilador RAM FAM. (Autoría del tesista).
- 205)** Revisión y medición de desgaste de los discos cortadores. (Autoría del tesista).
- 206)** Despiece de un cortador sencillo y un cortador doble. (Autoría del tesista).
- 207)** Despiece de limpiadores o scrappers. (Autoría del tesista).
- 208)** Fuerzas actuantes en un disco cortador. (Autoría del tesista).
- 209)** Proceso de corte y limpieza del frente de excavación. (Autoría del tesista).
- 210)** Desgastes máximos permisibles de las herramientas. (Autoría del tesista).
- 211)** Levantamiento de desgastes realizado en intervención atmosférica No. 10 del subtramo L11-L12. (Autoría del tesista).
- 212)** Criterios de cambio por daños. (Autoría del tesista).
- 213)** Ingreso de material fino al interior del disco cortador. (Autoría del tesista).
- 214)** Desgastes obtenidos de los cortadores utilizados en Tramo 3. (Autoría del tesista).
- 215)** Cantidades de discos cambiados dependiendo el tipo de material. (Autoría del tesista).
- 216)** Porcentaje de cortadores cambiados dependiendo el tipo de daño. (Autoría del tesista).
- 217)** Degastes medidos por intervención. (Autoría del tesista).
- 218)** Frecuencia de intervenciones dependiendo del tipo de material. (Autoría del tesista).
- 219)** Condiciones del frente durante la excavación del anillo No. 581. (Autoría del tesista).
- 220)** Equipo principal para intervenciones hiperbárica. (Bibliografía inciso 5).
- 221)** Elaboración del cake. (Bibliografía inciso 5).
- 222)** Volumen desalojado de material. (Bibliografía inciso 5).
- 223)** Resultado durante la elaboración del cake. (Bibliografía inciso 5).
- 224)** Ecuación de presiones. (Bibliografía inciso 5).
- 225)** Tabla para estimar el tiempo máximo de trabajo en un medio hiperbárico. (Bibliografía inciso 5).
- 226)** Registro de la inmersión #4 realizada durante la intervención hiperbárica. (Bibliografía inciso 5).
- 227)** Descompresión de buzos en cámara gemela y limpieza de cámara principal. (Bibliografía inciso 5).
- 228)** Tabla de descompresión para una presión de confinamiento de 100 PAM. (Bibliografía inciso 5).
- 229)** Ciclo de inmersión hiperbárica #4. (Autoría del tesista).

- 230)** Proyección de curvas de abatimiento teóricas para un gasto de arreglo de 464 lps y 546 lps. (Bibliografía inciso 5).
- 231)** Colocación de drenes en portal. (Bibliografía inciso 5).
- 232)** Vista de perfil y frontal de la barrenación en los portales de llegada y salida para la TBM. (Bibliografía inciso 5).
- 233)** Isométrico del portal de salida y zona para demolición de revestimiento primario. (Bibliografía inciso 5).
- 234)** Isométrico de adecuación de losa de fondo de lumbrera. (Bibliografía inciso 5).
- 235)** Rueda de corte a la salida de Lumbrera 11. (Autoría del tesista).
- 236)** Blindaje frontal y perimetral de la rueda de corte de la tuneladora Hidalgo. (Autoría del tesista).
- 237)** Método de unión a solape y a rededor. (Autoría del tesista).
- 238)** Método de aplicación de soldadura para el blindaje perimetral. (Autoría del tesista).
- 239)** Proceso de reemplazo de blindaje de la rueda de corte. (Autoría del tesista).
- 240)** Ubicación de la tuneladora en la lumbrera para el cambio de cepillos. (Bibliografía inciso 5).
- 241)** Anillo metálico o carrusel fabricado para el cambio de cepillos. (Autoría del tesista).
- 242)** Procedimiento de cambio de cepillos. (Autoría del tesista).
- 243)** Tuneladora Hidalgo antes de ingresar al portal de entrada. (Autoría del tesista).
- 244)** Acondicionamiento del portal de entrada. (Autoría del tesista).
- 245)** Sello de neopreno antes y después del paso de la TBM. (Autoría del tesista).
- 246)** Túnel falso. (Autoría del tesista).
- 247)** Estructuras para el paso de la tuneladora en Lumbrera 12. (Autoría del tesista).
- 248)** Producción diaria de excavación en el tramo 3 del TEO. (Autoría del tesista).
- 249)** Producción de excavación diaria efectiva. (Autoría del tesista).
- 250)** Tornillos de extracción de rezaga. (Bibliografía inciso 5).
- 251)** Boleos de roca y bloqueo del tornillo sin fin. (Autoría del tesista).
- 252)** Tornillos de extracción de rezaga. (Bibliografía inciso 5).
- 253)** Barras tipo Grizzly. (Autoría del tesista).
- 254)** Barras tipo Grizzly. (Autoría del tesista).
- 255)** Accionamiento de material con "pasta". (Autoría del tesista).
- 256)** Inyección al frente de la "pasta". (Autoría del tesista).
- 257)** Cambio de sistema de extracción de rezaga. (Bibliografía inciso 6).
- 258)** Diseño de nuevo tornillo sin fin. (Bibliografía inciso 6).
- 259)** Comparación días de producción contra días de incidencias. (Autoría del tesista).
- 260)** Transiciones en perfil geológico del subtramo L10-L11. (Autoría del tesista).
- 261)** Registro de la fuerza de empuje durante el paso de las transiciones. (Autoría del tesista).

- 262)** Registro del torque de la rueda de corte durante el paso de las transiciones. (Autoría del tesista).
- 263)** Daño presentado en un cortador central. (Autoría del tesista).
- 264)** Daño presentado en cámara de excavación. (Autoría del tesista).
- 265)** Inspección por partículas magnéticas. (Autoría del tesista).
- 266)** Desgaste en rueda de corte. (Autoría del tesista).
- 267)** Mapeo de daños. (Autoría del tesista).
- 268)** Resultados de la inspección por partículas magnéticas. (Autoría del tesista).
- 269)** Roca basáltica piroclástica. (Autoría del tesista).
- 270)** Parámetros de excavación sobrepasados. (Autoría del tesista).
- 271)** Demolición del frente rocoso. (Autoría del tesista).
- 272)** Placas hardox reemplazadas. (Autoría del tesista).
- 273)** Relación de días de incidencia con días de producción. (Autoría del tesista).
- 274)** Cepillos del faldón de la tuneladora. (BASF S.A. de C.V).
- 275)** Estación de bombeo realizada en subtramo L11-L12. (Bibliografía inciso 5).
- 276)** Metodología utilizada para el cambio de cepillos. (Autoría del tesista).
- 277)** Recubrimiento metálico de dovelas. (Autoría del tesista).
- 278)** Proceso de recubrimiento metálico de dovelas. (Autoría del tesista).
- 279)** Posición de montaje del anillo metálico. (Autoría del tesista).
- 280)** Aplicación de soldadura de unión con pads. (Autoría del tesista).
- 281)** Marco metálico. (Autoría del tesista).
- 282)** Sello impermeable realizado con espuma de poliuretano. (Bibliografía inciso 5).
- 283)** Secuencia de reemplazo de cepillos. (Autoría del tesista).
- 284)** Salida de mortero en zona de cepillos. (Autoría del tesista).
- 285)** Salida de agua en zona de cepillos. (Autoría del tesista).
- 286)** Caída de dovela por falla en erector. (Autoría del tesista).
- 287)** Desalineamiento de banda horizontal. (Autoría del tesista).
- 288)** Caída de anillo durante su descenso a fondo de lumbrera. (Autoría del tesista).
- 289)** Caída de rezaga en fondo de lumbrera por mal acondicionamiento. (Autoría del tesista).
- 290)** Distribución diaria del tiempo durante la excavación. (Autoría del tesista).
- 291)** Comparación de tiempos. (Autoría del tesista).
- 292)** Porcentaje de incidencias ocurridas. (Autoría del tesista).
- 293)** Costo por insumos. (Autoría del tesista).
- 294)** Costo por instalaciones en túnel. (Autoría del tesista).
- 295)** Costo por materiales complementarios para un frente del tipo "Suelo". (Autoría del tesista).
- 296)** Costo por materiales complementarios para un frente del tipo "Mixto". (Autoría del tesista).
- 297)** Costo por materiales complementarios para un frente del tipo "Roca". (Autoría del tesista).
- 298)** Organigrama. (Autoría del tesista).
- 299)** Cuadrilla de superficie. (Autoría del tesista).
- 300)** Cuadrilla de fondo de lumbrera. (Autoría del tesista).

**PROCESO DE EXCAVACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE
(TEO) EN SU TRAMO 3, DE LA CIUDAD DE MÉXICO**

- 301)** Cuadrilla de TBM. (Autoría del tesista).
- 302)** Costo por complementarios. (Autoría del tesista).
- 303)** Costo de maquinaria y equipo en superficie. (Autoría del tesista).
- 304)** Costo de maquinaria y equipo de fondo de lumbrera. (Autoría del tesista).
- 305)** Costo de maquinaria y equipo en TBM. (Autoría del tesista).
- 306)** Costo por auxiliares. (Autoría del tesista).
- 307)** Costo directo de excavación en un frente del tipo Suelo. (Autoría del tesista).
- 308)** Costo directo de excavación en un frente del tipo Mixto. (Autoría del tesista).
- 309)** Costo directo de excavación en un frente del tipo Roca. (Autoría del tesista).
- 310)** Costos directos por tipo de frente. (Autoría del tesista).
- 311)** Daño por fractura en dovela. (Autoría del tesista).
- 312)** Resane de dovelas. (Autoría del tesista).
- 313)** Monitoreo de salida de material por perforación de ombligo de la dovela. (Autoría del tesista).
- 314)** Reinyección en túnel. (Autoría del tesista).
- 315)** Método convencional para monitoreo de convergencias. (Bibliografía inciso 4).
- 316)** Movimientos registrados en el anillo. (Bibliografía inciso 5).
- 317)** Grafica de convergencias. (Bibliografía inciso 5).
- 318)** Normas aplicables a los materiales utilizados para la fabricación de mortero. (Autoría del tesista).
- 319)** Normas aplicables mortero fabricado. (Autoría del tesista).
- 320)** Prueba de revenimiento. (Autoría del tesista).
- 321)** Obtención de la densidad del mortero. (Autoría del tesista).
- 322)** Prueba de filtrado. (Autoría del tesista).
- 323)** Muestras de mortero realizadas para la prueba de compresión. (Autoría del tesista).
- 324)** Prueba de compresión del mortero. (Autoría del tesista).
- 325)** Prueba de viscosidad Marsh. (Autoría del tesista).
- 326)** Obtención de muestras de mortero ya inyectado. (Autoría del tesista).
- 327)** Labores de limpieza en túnel. (Autoría del tesista).
- 328)** Riego de inundación en túnel. (Autoría del tesista).