



Parte II · La línea de conducción del TEO

14

Excavación y maquinaria del túnel

Seis tuneladoras, siete frentes y una roca que nadie esperaba

Entre 2009 y 2019, seis tuneladoras de presión de tierra abrieron 62 km de túnel bajo el Valle de México, del lodo lacustre al basalto. Su ciclo cabe en una frase: excavar, sacar la tierra, armar un anillo, rellenar el hueco, repetir. Lo que cambió en cada metro fue el terreno, y el mejor registro de lo que hizo ese terreno a una máquina es el tramo 3.



Figura 14.105. Tuneladora Hidalgo antes de ingresar al portal de la lumbrera

Este capítulo describe cómo se excavó el TEO: por qué se eligieron escudos EPB (*Earth Pressure Balance*), cómo se repartió la obra en seis tramos, cómo fue el ciclo real de una tuneladora, qué ocurrió en cada tramo y qué se midió en el revestimiento. Los métodos generales de excavación y el principio de funcionamiento de un escudo están en el capítulo 5; aquí no se repiten. El tramo 3 y la máquina Robbins "Hidalgo" son los mejor documentados y sirven de referencia para el ciclo de excavación. La maquinaria se reúne al final del capítulo (sección 14.14).

01

La excavación del TEO de un vistazo

En el TEO coexisten dos excavaciones distintas: los pozos verticales (lumbreras y portales), que se abren desde la superficie con muros y bombeo, y el túnel horizontal, que se abre bajo tierra con tuneladoras. Solo se excavó con métodos convencionales donde hubo que armar la máquina, en las galerías de

montaje (sección 14.6). No se usó perforación y voladura en el túnel; la única roca que se rompió en el frente fue un bloque de basalto que detuvo a la tuneladora del tramo 3 y que se fracturó con un agente expansivo no explosivo.

La tabla compara las dos excavaciones con los datos de la obra.

TABLA 14.1. COMPARACIÓN ENTRE LA EXCAVACIÓN SUPERFICIAL (LUMBRERAS, PORTALES Y ZANJAS) Y LA SUBTERRÁNEA (TÚNEL) EN EL TEO

ASPECTO	EXCAVACIÓN SUPERFICIAL Y VERTICAL (LUMBRERAS, PORTALES, ZANJAS)	EXCAVACIÓN SUBTERRÁNEA (TÚNEL)
Geometría	Pozos cilíndricos de 12 m (paso) y 16 m (montaje) de diámetro; profundidades de 25 a 150 m	Túnel circular de 8.70 m (Herrenknecht) u 8.93 m (Robbins) de diámetro de excavación; 7.0 m terminado
Método	Muro Milán con hidrofresa, método convencional con marcos metálicos y concreto lanzado, o método mixto	Tuneladora EPB con colocación simultánea de anillos de dovelas
Sostenimiento	Brocal, muro Milán, marcos metálicos a cada 0.65 a 1.0 m, concreto lanzado, muro secundario colado en sitio, losa de fondo	Revestimiento primario de dovelas (35 cm en tramos 1-2, 40 cm en tramos 3-6) y secundario de concreto armado colado en sitio
Control del agua	Bombeo perimetral con pozos de abatimiento	Presión de tierra en la cámara del escudo, mortero en el espacio anular, juntas de estanqueidad, grasa en los cepillos
Equipo dominante	Hidrofresa, almeja, excavadoras, grúas, planta de lodo bentonítico	Escudo EPB, back up de 7 gantries, bandas transportadoras, trenes con locomotora, grúa pórtico de 200 t
Extracción de material	Almeja, botes izados por grúa	Tornillo sinfín, banda horizontal y banda vertical de cangilones
Ritmo típico	Depende de la profundidad y del método de cada lumbrera	2.69 m/día general y 6.71 m/día efectivo en el subtramo L10-L11
Riesgo principal	Falla de fondo por subpresión, entrada de agua en juntas de paneles	Inestabilidad del frente, bloqueo del tornillo, desgaste de herramientas, entrada de agua por los cepillos

Por qué en el TEO se eligieron escudos EPB

LA DECISIÓN Y SU JUSTIFICACIÓN

La selección del equipo resultó de estudios geológicos, geotécnicos, hidrogeológicos, de trazo, de longitud, de plazo y de entorno, y los tiempos del proyecto y el suelo de cada tramo pedían escudos EPB.

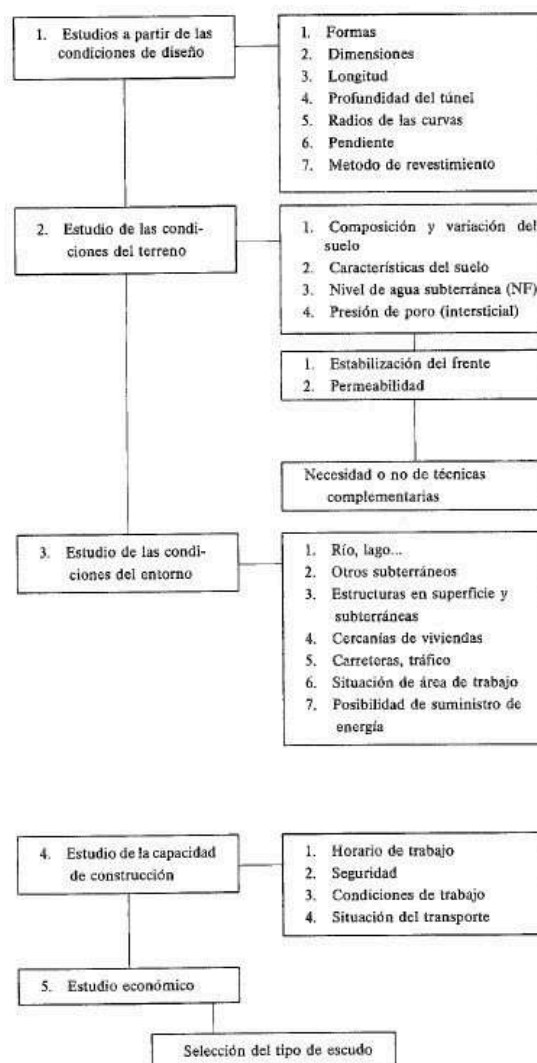


Figura 14.1. Estudios considerados para establecer las condiciones de diseño y seleccionar el tipo

La razón geotécnica es directa: el túnel atraviesa sobre todo arcilla y arena y, por la profundidad, la excavación ocurre bajo el nivel freático. Para el tramo 3 se esperaban arcillas y arenas con el nivel freático por encima del eje del túnel, lo que genera una presión hidráulica en el frente que la máquina debe equilibrar con el material alojado en la cámara.

ALTERNATIVAS DESCARTADAS Y POR QUÉ

TABLA 14.2. ALTERNATIVAS DE MÉTODO DE EXCAVACIÓN DEL TÚNEL Y RAZONES DE SU DESCARTE O ADOPCIÓN EN EL TEO

ALTERNATIVA	VENTAJA PRINCIPAL	RAZÓN POR LA QUE NO SE ELIGIÓ (O SE ELIGIÓ)
Métodos convencionales con ademe (sección completa o media sección)	Equipo sencillo y barato	El suelo lacustre de baja cohesión no se sostiene el tiempo suficiente para colocar el ademe
Escudo abierto con aire comprimido	Experiencia previa en el Drenaje Profundo	Presiones mayores a 1.3 kg/cm ² dañan al personal y alargan la descompresión; bajo rendimiento
Perforación y voladura	Eficaz en roca sana	La mayor parte del trazo es suelo blando bajo el nivel freático; vibraciones y riesgo de inundación (inferencia)
Topo o doble escudo para roca	Alto rendimiento en roca	No soportan el frente en suelo blando ni la presión de agua
Escudo de lodos (hidroescudo)	Excelente en arenas y gravas con agua	Requiere planta separadora de lodos en superficie y tuberías de bombeo; se recomienda para condiciones como cruces bajo ríos
Escudo EPB (elegido)	Usa la tierra como sostén; sin planta de lodos; alto rendimiento y bajo impacto ambiental	Adecuado para arcillas y arenas bajo el nivel freático, con acondicionamiento de espuma; las máquinas de los tramos con roca (Robbins) se diseñaron con herramientas intercambiables para frente mixto

LA PRESIÓN DE FRENTE EN LA HIDALGO

En la Hidalgo, la presión máxima en modo estático era de 10 bar y durante la excavación de 5 bar. El tornillo regulaba la presión del frente y sensores distribuidos en el mamparo la medían. Las presiones frontales de diseño se calcularon con el mecanismo de falla

simplificado del Dr. Tamez, que analiza el equilibrio de una cuña de suelo delante del frente y en la periferia de la cavidad. En los suelos cohesivo-friccionantes del tramo (limos arenosos y arcillas limosas) el cálculo dio presiones negativas: el frente era estable sin presión frontal.

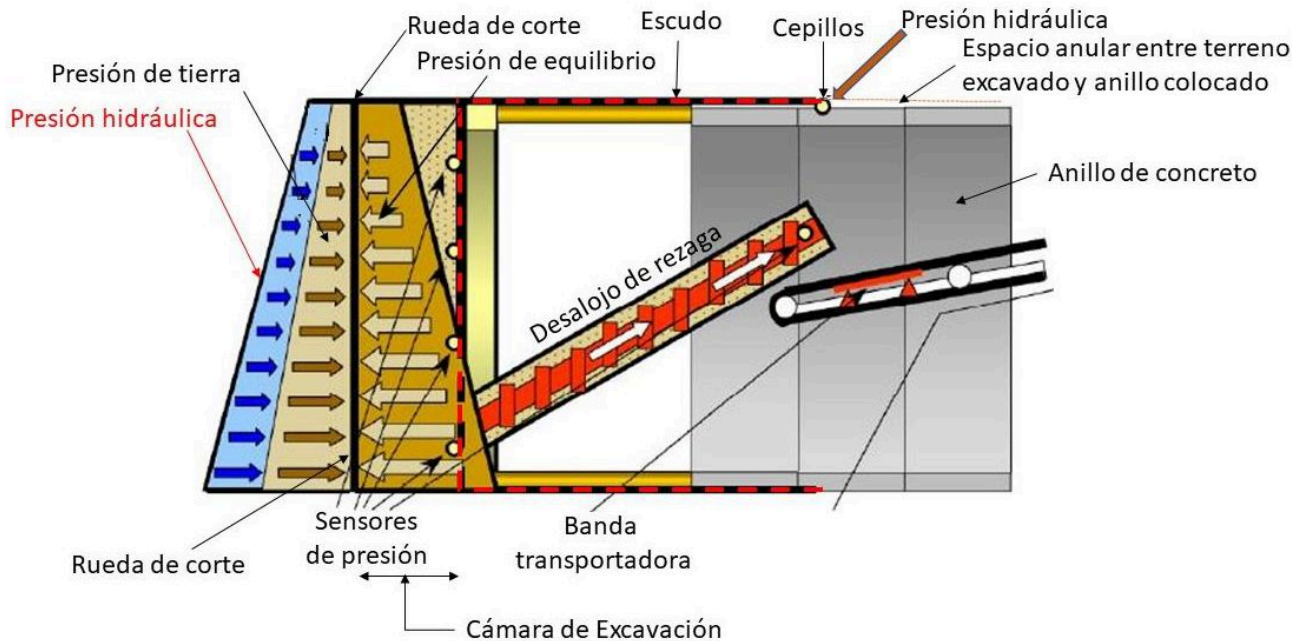


Figura 14.2. Funcionamiento de la TBM EPB

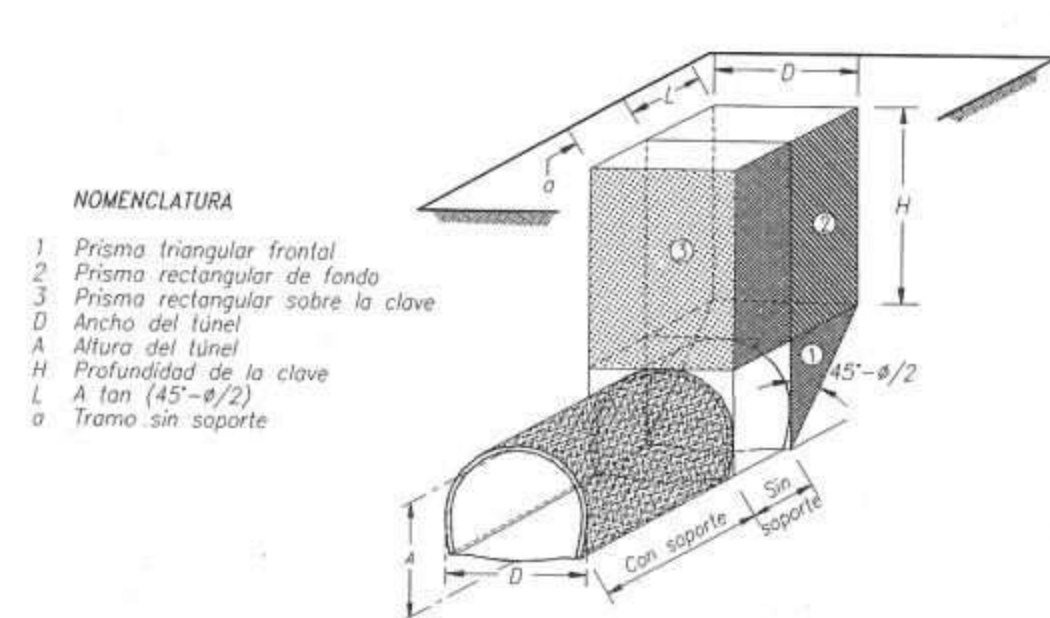


Figura 14.3. Equilibrio del mecanismo de falla simplificado del frente

03

Procedimiento de excavación por tramo (tramos I a 6)

DIVISIÓN DEL TÚNEL Y REPARTO DE MÁQUINAS

Para cumplir el programa de obra, la Conagua dividió el túnel en seis tramos y los atacó al mismo tiempo, uno con cada tuneladora. Tres máquinas son Herrenknecht (Alemania) y tres Robbins (Estados Unidos). Las alemanas excavan 8.7 m de diámetro y las estadounidenses 8.93 m; pesan unas 600 t y llegan a 92 m de longitud. Los fundamentos de cada tipo de escudo están en el capítulo 5; aquí se documenta cómo se aplicaron en el TEO.

El perfil oficial muestra por qué no servía una sola máquina para todo. De sur a norte el túnel baja de 23 m de profundidad en la L-0 a unos 150 m en la L-20 y vuelve a unos 23 m en el portal de salida, y el terreno pasa de arcillas blandas a basalto y boleos.

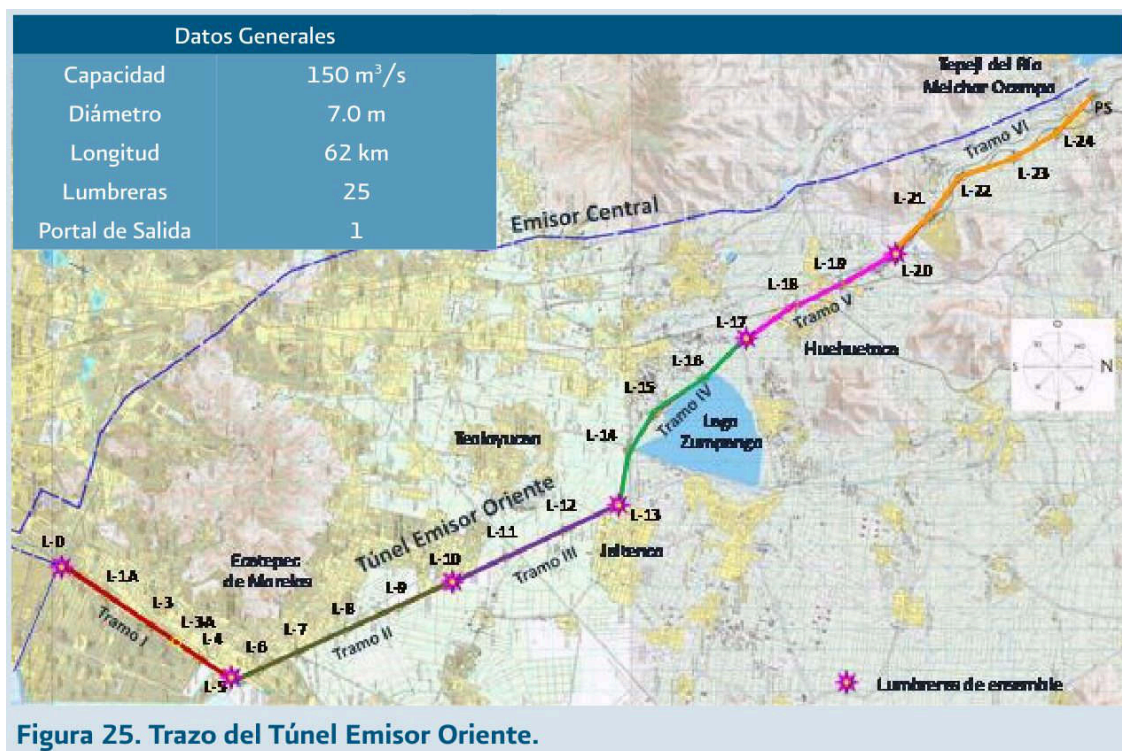


Figura 14.4. Perfil longitudinal del TEO por tramos y máquinas



Figura 14.5. Trazo del TEO y localización de los tramos entre el estado

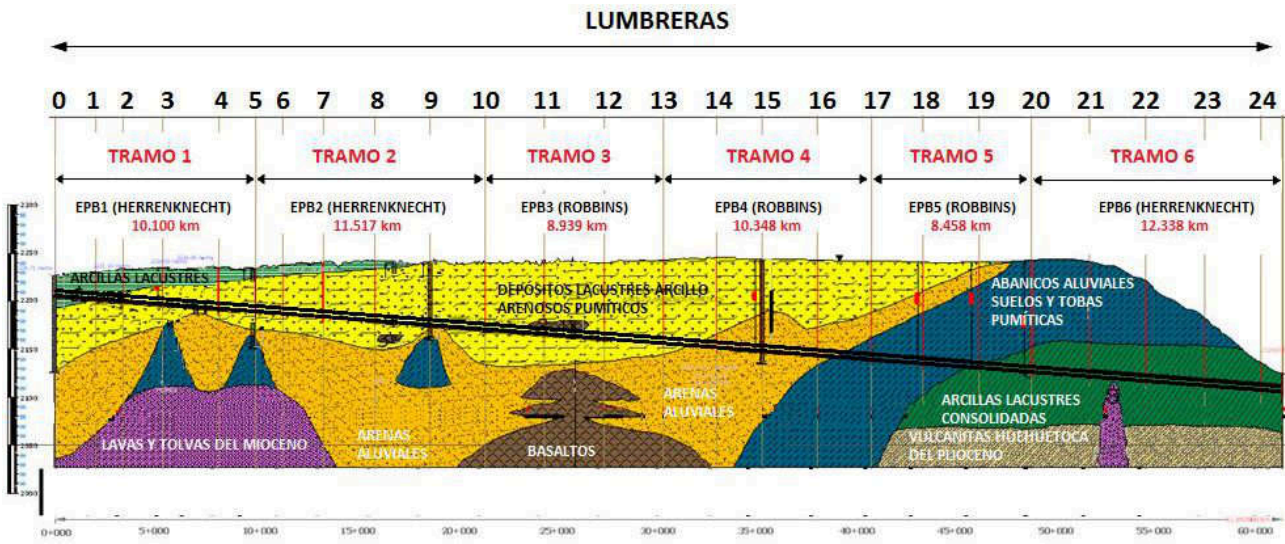


Figura 14.6. Perfil geológico utilizado para el diseño de las tuneladoras, con los seis

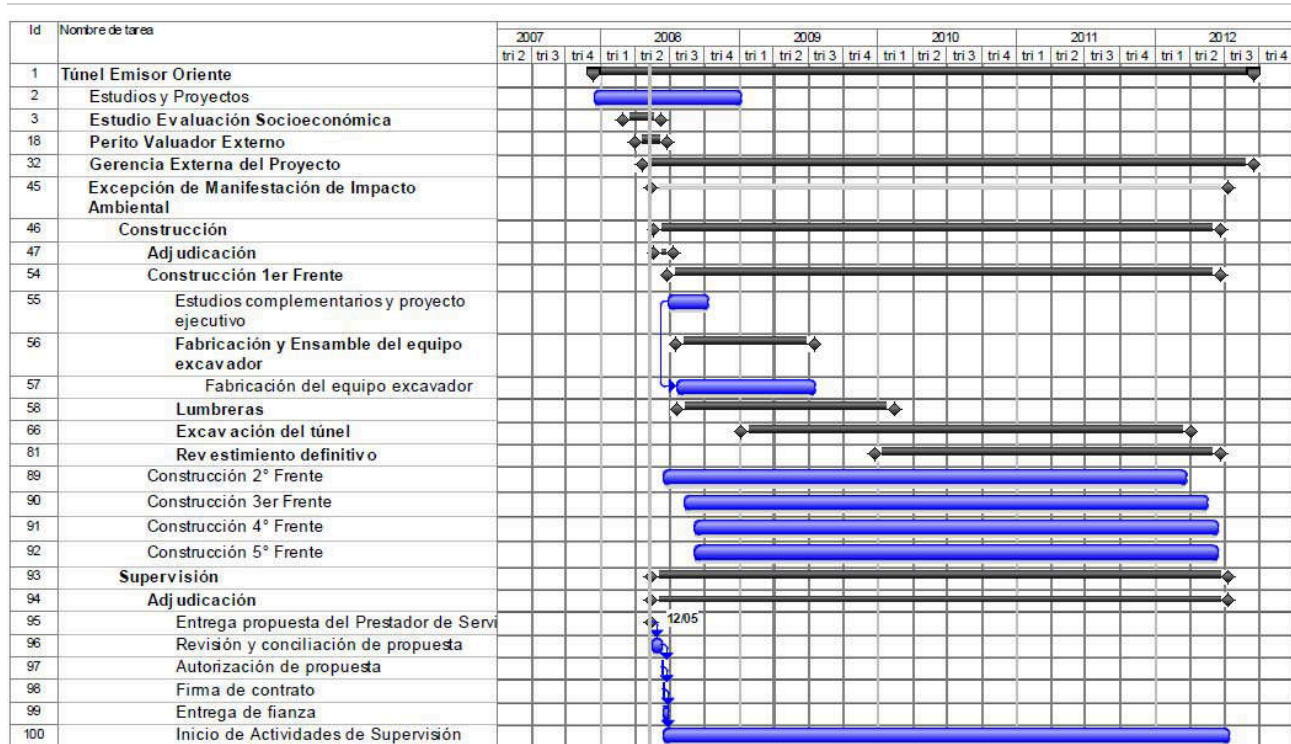


Figura 14.7. Programa de obra general del TEO

TABLA 14.3. TRAMOS, MÁQUINAS Y LONGITUDES DEL TEO

TRAMO	LUMBRERAS	LONGITUD (KM)	MÁQUINA Y TERRENO PREVISTO
1	L0 a L5	10.1	EPB Herrenknecht (subtramo 1A, de L0 a L3A) y Robbins "Morelos" (subtramo 1B, de L5 a L3A); suelo blando (arcillas lacustres)
2	L5 a L10	11.6	EPB Herrenknecht; arcillas y arenas
3	L10 a L13	9.2	EPB Robbins "Hidalgo"; suelo, basalto y frente mixto
4	L13 a L17	10.2	EPB Robbins; frente mixto (roca, arcillas, arenas)
5	L17 a L20	8.6	EPB Robbins S-209 "Morelos" (L20 a L18, 5.45 km) y EPB Herrenknecht S-519 (L17 a L18, 3.28 km)
6	L20 a portal de salida	12.2	EPB Herrenknecht; limos compactos, gravas y boleas, formación Taxhimay

Siete frentes, no seis. El tramo 1-B lo excavó la máquina prevista para el tramo 5. En 2011 se desvió agua hacia el lote 1 para evitar una inundación, la máquina que trabajaba ahí necesitó una reparación larga, y la Robbins pensada para el lote 5 se instaló en el lote 1 y avanzó en sentido contrario, con una lumbrera intermedia, porque la L-20 aún no

estaba lista. La decisión y sus fechas se detallan en la sección 14.3.4. El tramo 5, además, se cerró con dos máquinas, una Robbins desde la L-20 y una Herrenknecht desde la L-17, para ganar tiempo.

SUELOS ENCONTRADOS Y CONDICIONES POR TRAMO

El trazo se agrupa en tres zonas: lacustre del Valle de México, sedimentos mixtos de transición y abanicos aluviales duros con lavas de la sierra de Nochistongo. Con cada tramo hacia el norte sube la cobertura, sube la presión del agua y aparece la roca.

TABLA 14.4. PARÁMETROS GEOTÉCNICOS REPRESENTATIVOS POR TRAMO

PARÁMETRO	T1	T2	T3	T4	T5	T6
Suelo esperado	Arcillas lacustres y limos	Arenas limosas y arcillas pumíticas	Limos arenosos, tobas y basalto	Limos compactos y arcillas arenosas	Arcillas, limos, arenas y fragmentos de roca	Limos compactos, gravas y boleos
Cobertura sobre el túnel (m)	15 a 40	40 a 65	65 a 80	80 a 105	105 a 135	10 a 135
Presión hidráulica potencial (bar)	0.0 a 1.6	0.0 a 1.9	0.5 a 3.5	3.5 a 5.5	3.5 a 7.5	5.0 a 6.5
Abrasividad Cerchar (CAI)	no aplica	no aplica	2.9 a 4.2	no aplica	no aplica	0.7 a 1.5

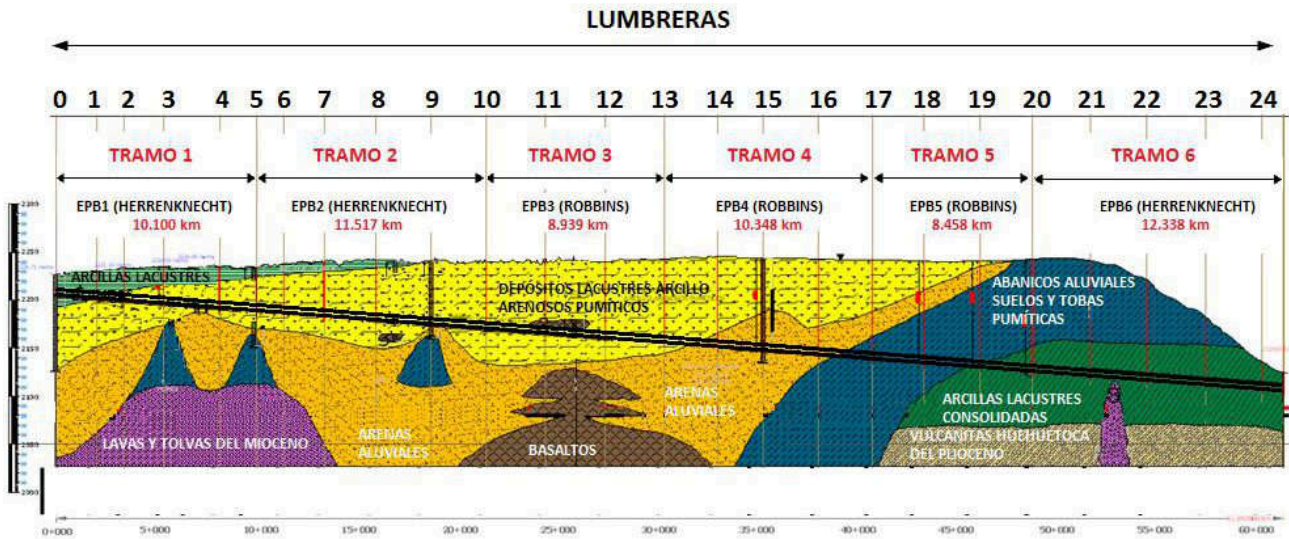


Figura 14.8. Terreno, cobertura y presión hidráulica esperados por tramo

Esa progresión explica el reparto. Las máquinas de los tramos 1, 2 y 6 son EPB para suelo. Las de los tramos 3, 4 y 5 llevan herramientas intercambiables: rippers donde hay arcilla, discos donde aparece la roca.

DATOS DE LAS MÁQUINAS

La Tabla 14.5 reúne las características principales de las tres familias de máquinas; la ficha técnica de cada tuneladora está en la sección 14.14.2 y la Tabla 14.7 compara las decisiones por tramo.

TABLA 14.5. CARACTERÍSTICAS DE LAS TUNELADORAS DEL TEO

MÁQUINA	DIÁMETRO DE EXCAVACIÓN	POTENCIA	TORQUE	EMPUJE
Herrenknecht S-497 y S-498 (lotes 1 y 2)	8,700 mm	1,600 kW	6,613 kN·m	73,187 kN
Robbins (lotes 3, 4 y 5)	8.93 m	1,900 kW	17,900 kN·m	84,000 kN
Herrenknecht S-519 (lote 6 y subtramo 5b)	8.74 m (8,890 mm en la ficha del fabricante)	2,080 kW	10,251 kN·m	62,437 kN

Dato técnico: las Robbins llevan cortadores de disco de 17 pulgadas, intercambiables con rastras (*rippers*), y excavan 8,910 mm con cabeza para suelo y 8,930 mm con cabeza para roca. Montan dos tornillos de 900 mm, uno de cinta y uno de eje, porque se diseñaron para presiones de hasta 10 bar, y bandas continuas de 762 mm, 3,200 m y 900 t/h. Herrenknecht presentó la primera máquina en Schwanau en febrero de 2009; la última de sus máquinas llegó a su lumbrera de destino en marzo de 2019, dos meses antes de que la Robbins del lote 4 terminara la excavación del túnel. Las tesis dan para la S-209 un torque de 14,916 kN·m y potencias distintas para las Herrenknecht; la tabla usa los datos del fabricante y de Conagua.

TRAMO 1 (LO A L5, HERRENKNECHT)

Es el tramo con más suelo blando: arcillas de muy blandas a blandas con lentes de arena. El escudo se armó en el fondo de la L0 con umbilicales: se bajan rueda y escudo y se alimentan desde superficie con mangueras y cables mientras se instalan los carros del back up. La rezaga fue por bombeo en tuberías de la L0 a la L3A, porque la arcilla se

maneja como fluido viscoso; para aliviar a las bombas se proyectaron pozos de rezaga interlumbrreras. Las entradas y salidas se mejoraron con jet grouting, inyecciones y pilas de suelo-cemento de 120 y 60 cm de diámetro y 51 m de longitud en L1A, L3 y L4. La lumbrera L3A se añadió después del proyecto ejecutivo para agilizar el tramo. En febrero de 2012 la S-497 llevaba 4.6 km excavados, con ciclos de 30 a 40 minutos para avanzar 1.5 m y armar el anillo.

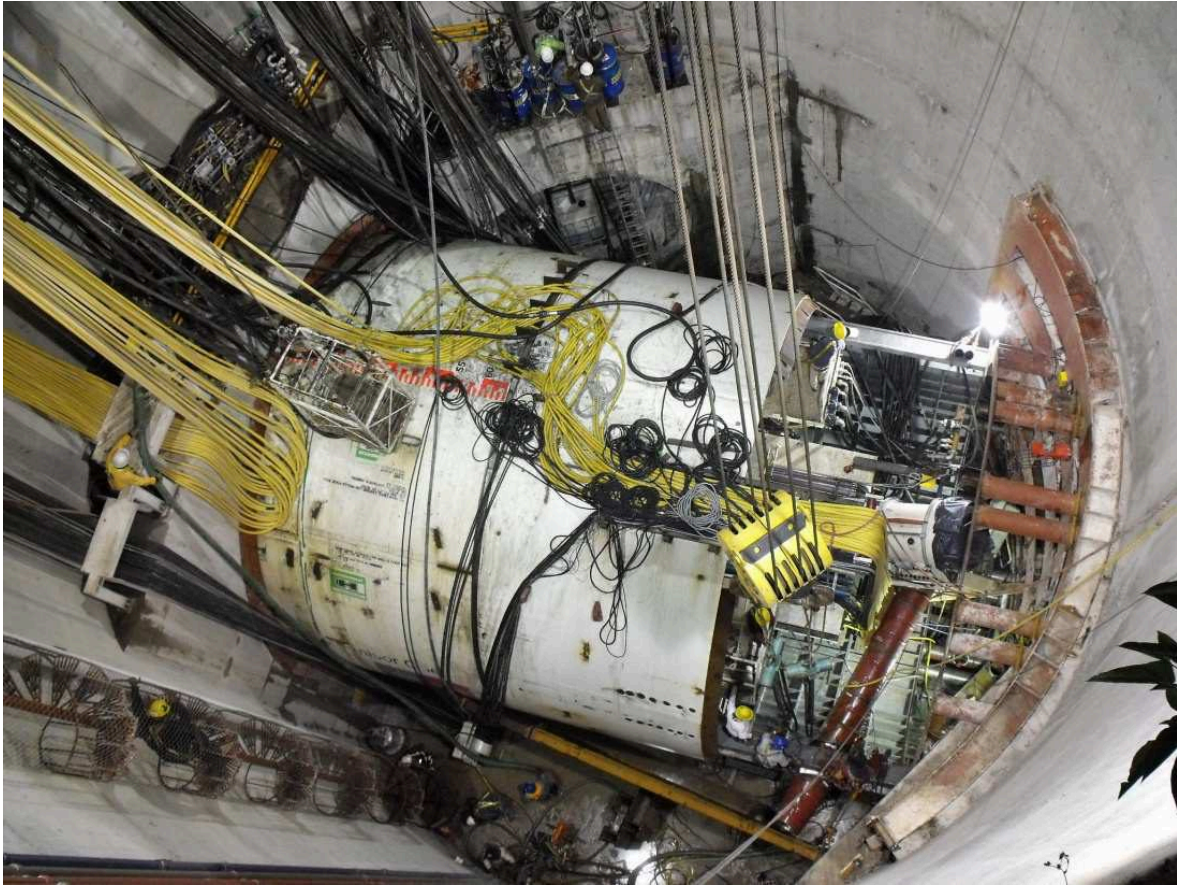


Figura 14.9. Máquina Herrenknecht armada en el fondo de la lumbrera L-00

En el arranque desde la L1A (cadenamientos 1+013.85 a 1+090.25) el criterio de presión de cámara es:

$$P_c = K_A \sigma'_v + u_w + 20$$

En febrero de 2012 la S-497 llevaba 4.6 km excavados, con ciclos de 30 a 40 minutos para avanzar 1.5 m y armar el anillo

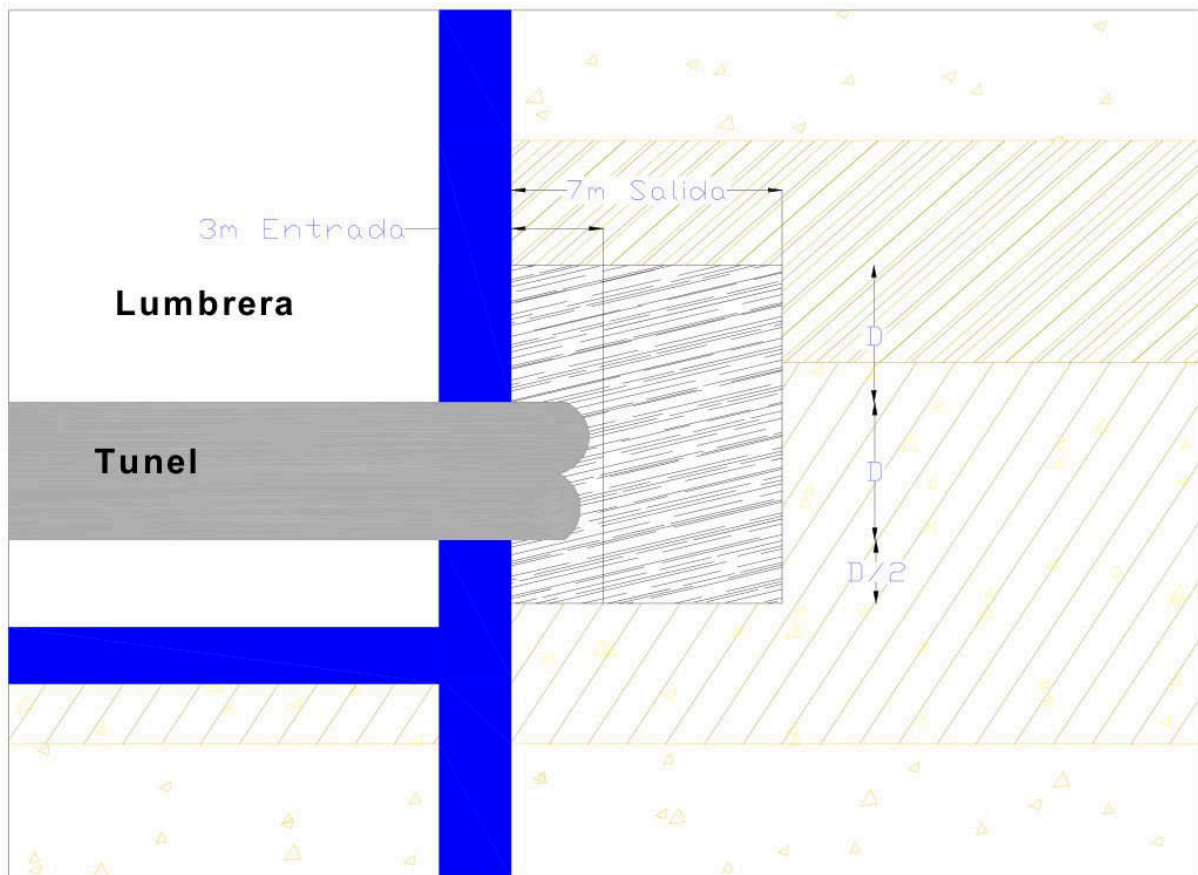


Figura 14.10. Esquema de la zona de mejoramiento del terreno en la entrada

donde P_c es la presión en la cámara (kPa), K_A es el coeficiente de empuje activo (adimensional), σ'_v es el esfuerzo vertical efectivo (kPa) y u_w es la presión del agua (kPa). En el ejemplo, la presión teórica era 1.8 bar con tolerancia de ± 0.2 bar, controlada en el sensor P1. Tras una parada la presión subió de 1.9 a 2.3 bar, y se recomendó reanudar con no menos de 2.5 bar. Se recomienda cámara llena al menos al 80 % y densidades aparentes de 1.4 a 1.8 t/m³.

La aceleración del tramo 1 la relata el superintendente de construcción del consorcio COMISSA. Según su artículo, el TEO se inició el 13 de agosto de 2008, antes de la firma del contrato, y se inauguró el 23 de diciembre de 2019. El tramo 1 mide casi 10 km, de la L0 a la L5, y exigió construir las lumbreras 1A, 3, 3A y 4, con profundidades a la rasante del túnel de 23 a 49 m. La L0 y la L5, por sus mayores dimensiones, fueron lumbreras de acceso de las tuneladoras; la 1A, la 3 y la 4 fueron de paso, y la 3A, de extracción de ambas máquinas. El trazo corre casi todo paralelo al Gran Canal del Desagüe y en algunas zonas lo cruza por debajo. Los suelos son arcillas blandas, plásticas y muy compresibles, con lentes de arena, bajo el nivel freático, y para mantener estable el frente y reducir las deformaciones en superficie se usaron escudos de presión de tierra balanceada: la HK497, con rezaga por bombas de pistones, y la Robbins "Morelos", con banda transportadora.

La HK497 comenzó a excavar desde la L0 el 10 de noviembre de 2009. Cuando terminó el proyecto ejecutivo, y con él la planeación de toda la obra, llevaba 231 m, y la tormenta del 3 y 4 de febrero de 2010 inundó ese avance y dañó de forma importante a la máquina; la reparación tardó casi 160 días y la excavación se reanudó el 4 de agosto de 2010. El mismo día de la inundación, la HK498 llevaba casi 340 m del tramo 2 desde la L5. Entre el 4 de febrero y el 4 de agosto pasan 181 días (cálculo propio); los "casi 160 días" son el tiempo de reparación, y el resto sería el tiempo previo para desaguar y preparar la reparación (inferencia).

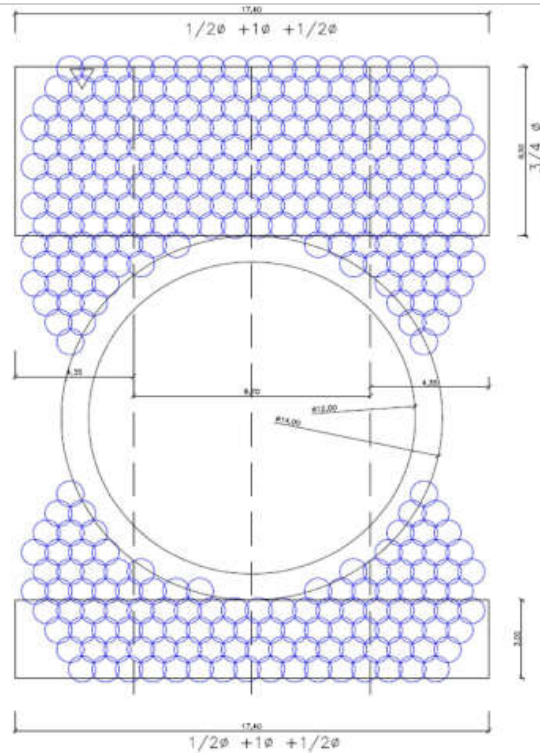


Figura 14.11. Arreglo en planta del mejoramiento con jet grouting

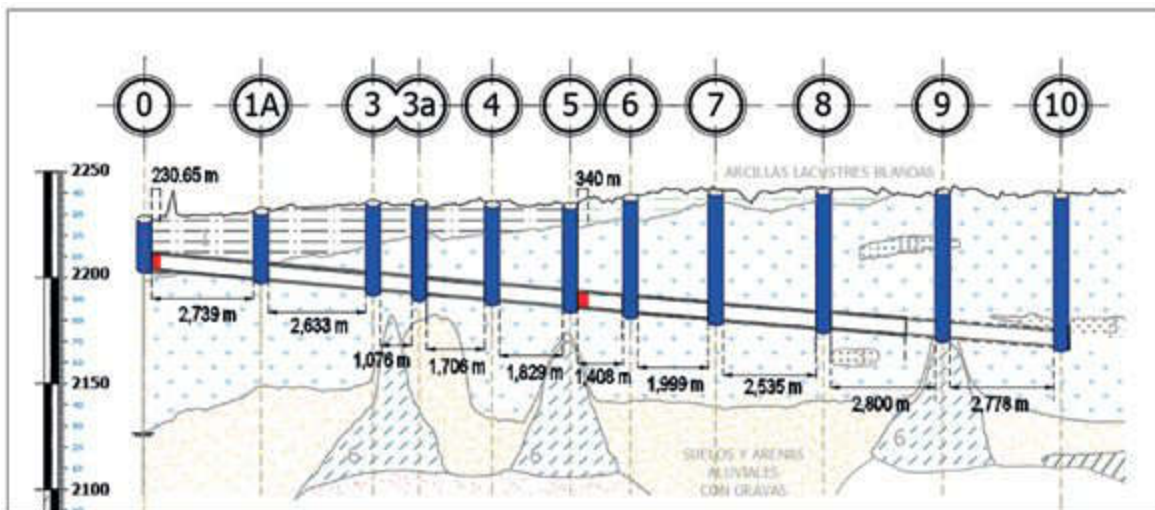


Figura 14.12. Avance de las tuneladoras HK497 y HK498 el 4 de febrero de 2010



Figura 14.13. Inundación del 4 de febrero de 2010 en el oriente de la Ciudad de México



Figura 14.14. Descenso de la tuneladora HK497 al fondo de la lumbrera O

Después del proyecto ejecutivo se detectaron condiciones geotécnicas distintas y más adversas que las de la ingeniería básica, que hacían imposible cumplir el plazo original de la obra. Por eso la Conagua decidió, el 26 de noviembre de 2010, acelerar el tramo 1 para ponerlo en operación cuanto antes y reducir el riesgo de una gran inundación en el oriente del área metropolitana mientras se construía el resto. Fue necesario proyectar una planta de bombeo junto a la L5 que pasara el agua del tramo 1 al Gran Canal del Desagüe. Las acciones fueron:

1. Abrir dos frentes de excavación simultáneos, uno de la L0 hacia la L3A y otro de la L5 hacia la L3A.
2. Construir la L3A para extraer las dos tuneladoras, que se encontrarían en ella.
3. Construir ocho pozos de rezaga a lo largo del túnel para acortar los tramos de bombeo del material excavado; después se usaron para suministrar el concreto del revestimiento definitivo.
4. Abrir frentes de revestimiento: finalmente dos, de la L0 a la L4 y de la L5 a la L4. Se preparó una tercera cimbra, que no hizo falta usar.
5. Construir la planta de bombeo El Caracol, de 40 m³/s, conectada a la L5.
6. Construir una estructura de compuertas en la L5 para contener el agua del tramo 1 mientras seguía la obra.

7. Proyectar y construir captaciones a lo largo del tramo para desaguar los colectores vecinos.

El subtramo 1A (L0 a L3A) ya llevaba 231 m, y el 1B (L5 a L3A) lo excavó la Robbins "Morelos", que empezó el 18 de julio de 2011 y que estaba disponible porque la lumbrera 20, donde debía iniciar el tramo 5, aún se construía. Las lumbreras del tramo se hicieron con tableros de muro Milán como soporte inicial y concreto hidráulico deslizado como revestimiento definitivo, y el terreno del fondo y de los portales de entrada y salida se mejoró con jet grouting. En el subtramo 1A, la rezaga exigió acondicionar el terreno para darle la plasticidad y la lubricación que permitieran bombearlo, y los puntos delicados fueron la presión del frente, la presión de grasa en los cepillos de cola (que garantiza el volumen y la presión de la inyección del espacio anular) y el alineamiento de la máquina y del endovelado respecto del faldón. Se llevó control estricto de convergencias, con un plan de mitigación en dos pasos: primero inyecciones en los anillos y, si la deformación seguía, marcos de acero como apuntalamiento. Los puntos más difíciles fueron el contacto entre suelos blandos y firmes y los cruces bajo el Gran Canal del Desagüe, por el poco techo de terreno.

El subtramo 1B exigió más espacio porque la "Morelos" tiene mayor diámetro y rezaga con banda. Mientras se montaba, la excavación del tramo 2 de la L5 a la L6, ya iniciada, se detuvo varios meses. Para armar la máquina en la L5 se excavó a mano un pretúnel de 4.5 m y, antes del montaje, se simulaban las maniobras en modelos BIM. Los primeros 150 m se rezagaron por bombeo y después por banda, y con un casete de banda vertical instalado desde superficie se rezagó por banda una longitud de 3,556 m de la L5 a la L3A, con dos reforzadores ("booster drives") cada 1,150 m. Para manejar las dovelas de los primeros 150 m, donde no había espacio en la lumbrera, se almacenaron en el tramo 2 ya construido y se llevaban en camión al erector.



Figura 14.15. Sistema de rezaga con casete de banda vertical en la lumbrera 10

La excavación del subtramo 1A terminó el 19 de diciembre de 2012 y la del 1B, el 1 de octubre de 2012. Los avances medios, después de la inundación, fueron de 7.2 m por día en el 1A y de 8.1 m por día en el 1B, con un máximo de 35.1 m en un día, el 7 de agosto de 2012, en el 1B. Las fechas son coherentes con las distancias: con los cadenamientos del perfil que publica el propio artículo (L3A en 6+487, L5 en 10+054), el 1A tenía por excavar $6,487 - 231 = 6,256$ m, que a 7.2 m por día son 869 días desde el 4 de agosto de 2010, es decir, hasta el 20 de diciembre de 2012; y el 1B, $10,054 - 6,487 = 3,567$ m, que a 8.1 m por día son 440 días desde el 18 de julio de 2011, es decir, hasta el 30 de septiembre de 2012 (cálculo propio). El revestimiento se colocó con una cimbra metálica de 45 m, con colados continuos por bombeo a larga distancia aprovechando los pozos de rezaga, una planta central de concreto y hielo en la mezcla para controlar el calor de hidratación; el colado empezó el 12 de enero de 2012 y terminó el 5 de mayo de 2013.

El 13 de junio de 2013 se puso en operación este primer tramo de unos 10 km, bombeando el agua del oriente del Valle de México hacia el Gran Canal del Desagüe. Según el superintendente de la constructora, usar dos tuneladoras redujo casi un año el plazo del tramo, y la operación temprana adelantó casi seis años y medio la eliminación del riesgo de inundación en la zona oriente. Entre el 13 de junio de 2013 y la

inauguración del 23 de diciembre de 2019 pasan seis años y medio (cálculo propio), de modo que la cifra equivale al tiempo que el túnel completo tardó en llegar. La aceleración fue una decisión de riesgo más que de ingeniería: se aceptó construir una planta de bombeo y una estructura de compuertas provisionales, y detener varios meses el tramo 2, a cambio de contar con una descarga operativa en el oriente. El balance de tiempo y de riesgo evitado resulta favorable, aunque la fuente es la constructora y la cifra de "casi un año" es una estimación del autor.

TRAMO 2 (L5 A L10, HERRENKNECHT)

Cruza arenas limosas y arcillas pumíticas con presiones de hasta 1.9 bar (Tabla 14.4). La rezaga fue por bombeo de la L5 a la L10 y, de la L3A a la L5, banda horizontal con bombeo vertical. Se esperaba el efecto de la consolidación regional por bombeo de acuíferos sobre el revestimiento definitivo. Los anillos de los tramos 1 y 2 son de 6 dovelas más la de cierre, de 35 cm. A febrero de 2012 la S-498 llevaba 0.6 km.

TRAMO 3 (L10 A L13, ROBBINS "HIDALGO")

Es el tramo mejor documentado y se detalla en las secciones siguientes. Excavó en tres subtramos: L10-L11, L11-L12 y L12-L13. Los primeros 150 m se excavaron en fase provisoria (pre-túnel con la máquina incompleta, rezaga en botes de 10 y 20 m³ y ciclos de 1.0 m). Después se bajaron los gantries faltantes para la fase definitiva con bandas. El diámetro aparece como 8.88 m al inicio y 8.93 m en el cálculo de mortero; se usa 8.93 m.

TRAMO 4 (L13 A L17, ROBBINS)

Frente mixto a gran profundidad, con presiones de 3.5 a 5.5 bar (Tabla 14.4). Es el lote de 10.2 km de la L-17 a la L-13, que la tuneladora Robbins empezó en la L-17: se puso en marcha en agosto de 2012 con el puente y los gantries todavía en superficie, a los 150 m ya estaba completa dentro del túnel en octubre y un mes después corría la banda continua. A los 405 m, la presencia de roca, scrapers y partes de las barras mezcladoras en la rezaga obligó a abrir la cámara con 3.5 bar, y el 2 de junio de 2013 se hizo la primera intervención hiperbárica en México con una EPB. Hasta 2014 se contaron 97 intervenciones en más de 100 días para cambiar herramientas, con presiones de hasta

3.05 bar, cuadrillas de tres personas, 85 min de trabajo y 130 min de descompresión, y un avance de 1,411 m entre la L-17 y la L-16 en 2013. Con el tiempo se pasó a intervenir a presión atmosférica: en total hubo unas 50 intervenciones hiperbáricas y bombeo de hasta 180 L/s cada vez que se abría la cámara. La máquina rompió en la L-13 el 23 de mayo de 2019, con un mejor día de 30 m y un mejor mes de 528 m; el mejor turno de 12 h, de 22.5 m, ya se había reportado en 2014. Como promedio, 10,200 m entre agosto de 2012 y mayo de 2019 son unos 125 m al mes (cálculo propio).

La empresa Lytsa, que ejecutó las intervenciones hiperbáricas, las documentó con detalle. La primera se hizo en el intertramo de la L-17 a la L-16, en el anillo 311 (cadenamiento 40+494.94), con la Robbins conocida como "La Corregidora"; la excavación de ese intertramo llevaba 491.57 m, el 20 % de su longitud. Duró 96 etapas, del 4 al 27 de junio de 2013, y la presión máxima a la que se expuso a los trabajadores fue de 3 bar, que con la corrección por altitud pasaron a 3.98 bar. Se trabajó en revisión y limpieza de la rueda de corte, revisión y cambio de scrapers y discos y limpieza del tornillo sin fin.

En esta modalidad el trabajador respira aire o mezcla de gases que le llega de un compresor de aire respirable por un umbilical, con lo que el suministro es ilimitado, hay comunicación permanente con el supervisor, se controla la presión y se conserva la estabilidad del cake. Como guía de descompresión se usan las tablas del manual de buceo de la Marina de los Estados Unidos, que es la referencia que se emplea en México y en Estados Unidos para túneles. Por esa guía y por la NOM-014-STPS-2000, 3.47 bar es la presión máxima permisible para respirar aire, y entre 3.47 y 6 bar hay que usar mezcla de gases. La cédula usada fue la de 130 pies de agua de mar (PAM) de la tabla 9.9 de la Marina, con corrección por la altitud de 2,240 msnm. La corrección convierte la presión medida a una presión equivalente al nivel del mar:

$$P_{eq} = P_{man} \frac{P_0}{P_{alt}}$$

donde P_{eq} es la presión equivalente al nivel del mar (bar), P_{man} es la presión manométrica en la cámara (bar), P_0 es la presión atmosférica al nivel del mar, 1.013 bar, y P_{alt} es la presión atmosférica a 2,240 msnm (bar). Con $P_{alt} \approx 0.771$ bar en atmósfera estándar (cálculo propio):

$$P_{eq} = 3 \times \frac{1.013}{0.771} \approx 3.94 \text{ bar}$$

cifra cercana a los 3.98 bar del reporte.

Para trabajar con la cámara a presión se forma un cake de lodo bentonítico en el frente. Primero se drena parte del agua de la cámara por las dos válvulas superiores para bajar un poco la presión hidráulica y se avanza sin extraer material por los tornillos hasta llenar la cámara lo más posible. Sin girar la rueda se pone en marcha el tornillo, se extrae material y se inyecta bentonita al frente, avanzando uno o dos anillos hasta llegar a la presión deseada más 0.4 bar de sobrepresión; luego se retrae la rueda y se gira 20 minutos a 0.5 rpm. Se baja la presión de aire y se vigila al menos 15 minutos que no haya pérdidas importantes. Si todo está bien se vacía la cámara hasta por debajo de la compuerta del mamparo, comprobando que las tres presiones P1, P2 y P3 coincidan, y se permite el acceso; si hay anomalías se aborta y se vuelve a llenar con bentonita. La presión de referencia del sistema Samson es P1 más 0.2 bar. Para mantener estable la presión, el aire que se fuga por el suelo debe quedar en un rango adecuado, por lo que se equipó a La Corregidora con tres compresores Atlas Copco de 331 litros por segundo a 9 bar. Cada turno de trabajo estuvo formado por un camarista, un jefe de equipo hiperbárico, un mecánico hiperbárico, dos técnicos hiperbáricos y el equipo médico, y no se trabaja con personal dentro de la cámara mientras gira la rueda o el tornillo.

Durante la intervención se compararon tres combinaciones de tiempo de trabajo y de descompresión con la cédula de 130 PAM, que se resumen en la Tabla 14.6.

TABLA 14.6. TIEMPOS DE TRABAJO Y DE DESCOMPRESIÓN EN LA PRIMERA INTERVENCIÓN HIPERBÁRICA DEL TRAMO 4

PRUEBA	TIEMPO DE TRABAJO EN LA CÁMARA (MIN)	TIEMPO DE DESCOMPRESIÓN DE HASTA (MIN)	DESCOMPRESIÓN ENTRE TRABAJO
1	88	200	2.27
2	78	174	2.23
3	69	141	2.04

Al acortar el trabajo de 88 a 69 minutos, la descompresión bajó de 200 a 141 minutos. Para cada hora de trabajo se necesitaba más de dos de descompresión, de modo que la presión, más que el trabajo mismo, fijaba el tiempo de cada turno.

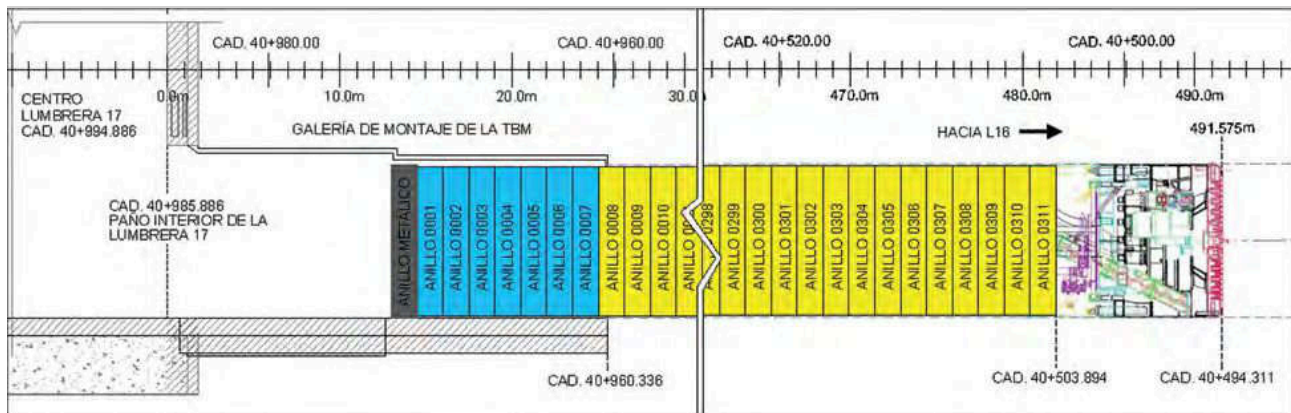


Figura 14.16. Avance de la tuneladora en el intertramo L-17 a L-16 al momento de la primera intervención

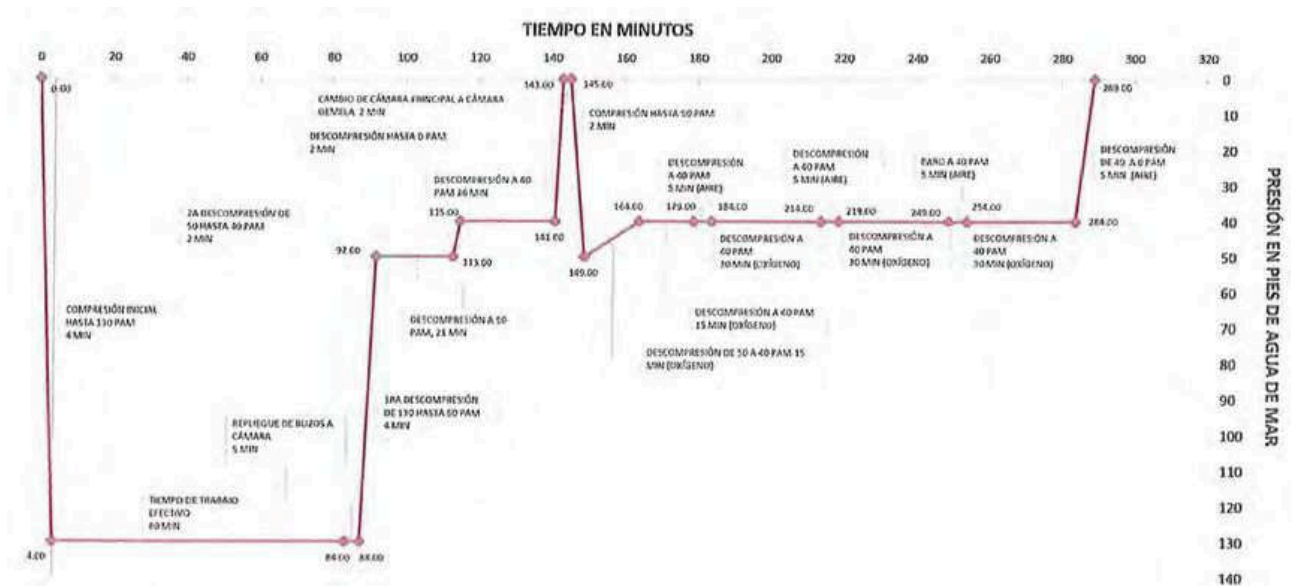


Figura 14.17. Perfil de compresión y descompresión de la primera prueba, de 88 minutos de trabajo

Las conclusiones de la intervención coinciden con la experiencia de otros túneles: el buceo con saturación de gas mixto es la metodología de intervención hiperbárica más eficiente desde el punto de vista de la seguridad de la descompresión; se necesitan supervisión médica hiperbárica y cámaras de tratamiento en el sitio; y las tablas de descompresión deben revisarse a detalle por expertos. Para evitar las intervenciones recomiendan considerar con cuidado los datos geológicos, geotécnicos e hidrogeológicos, los aditivos al material excavado y la alineación de la excavación, además de bombear el agua y controlar las aguas subterráneas para que no entren a la cámara. En la práctica, una

intervención a 3 bar se cuenta en jornadas de más de tres horas entre trabajo y descompresión, con una cuadrilla especializada, y cada apertura evitable de la cámara vale en tiempo y en seguridad.



Figura 14.18. Perfil de compresión y descompresión de la tercera prueba, de 69 minutos de trabajo



Figura 14.19. Rueda de corte de la tuneladora con la posición y el tamaño de los cortadores



Figura 14.20. Salida del personal de la cámara hiperbárica después de la descompresión

TRAMO 5 (L17 A L20, DOS MÁQUINAS)

Se dividió en el subtramo 5a (L20 hacia L18, 5.45 km, Robbins S-209) y el 5b (L17 hacia L18, 3.28 km, Herrenknecht S-519) para acortar el plazo. Ocho sondeos selectivos entre la L17 y la L20 mostraron que el terreno no se parecía del todo al proyecto ejecutivo. En el SS-03, la presión piezométrica medida era unos 16 m de columna de agua mayor a la prevista; en los SS-04 a SS-06 era entre 25 y 30 m menor. Los resultados de herramientas están en la sección 14.10. La máquina de ese tramo rompió el 28 de febrero de 2019, lanzada desde la lumbrera de 150 m, la más profunda de México, con una cámara de montaje de 28 m y una esclusa de personal de 7 bar; que esa misma tuneladora había excavado antes 3.9 km del tramo 1B en 15 meses, en arcillas con contenido de agua de hasta 400 %, y que logró 592.5 m en un mes. El subtramo 5a se menciona con 6 km en la nota del fabricante y con 5.45 km en la tesis; el cálculo de consumo de herramientas usa los de la tesis.

TRAMO 6 (L20 AL PORTAL DE SALIDA, HERRENKNECHT)

El más largo (12.2 km) atraviesa la formación lacustre Taxhimay, de arcillas y limos consolidados e impermeables. Se anticipaba avance sin dificultades de agua, salvo en conglomerados y boleos de la base de los abanicos aluviales. Se usaron espumas para acondicionar los limos compactos. En febrero de 2012 la S-519 llevaba 2.8 km, con ciclos de 30 a 40 minutos para avanzar 1.5 m y armar el anillo, y en este tramo se construyó la galería de montaje de la L-21A (sección 14.6).

TABLA 14.7. DECISIONES DE EXCAVACIÓN POR TRAMO, RAZÓN Y ALTERNATIVA DESCARTADA

DECISIÓN	RAZÓN	ALTERNATIVA DESCARTADA
Seis tramos simultáneos (siete frentes con el 1B)	Plazos de obra muy restringidos	Un solo frente de 62 km
EPB de suelo en tramos 1, 2 y 6	Arcillas y limos lacustres blandos	Escudo de lodos con planta separadora
EPB con herramientas intercambiables en 3 a 5	Frente de suelo, mixto y roca basáltica	Topo de roca (no sostiene frente con agua)
Rezaga por bombeo en tramos 1 y 2	Arcilla manejable como fluido	Banda transportadora
Banda en tramos 3 a 6	Tramos largos y mayor volumen	Trenes con botes
Galería de montaje en lumbreras profundas	Profundidad y presión hidrostática	Ensamble con umbilicales

04

Excavación de lumbreras y portales

Una lumbrera es un pozo vertical que se sostiene mientras se excava. Las lumbreras del TEO se construyeron con tres procedimientos: muro Milán en toda la profundidad, excavación convencional con marcos y concreto lanzado en toda la profundidad, y muro Milán arriba con excavación convencional

abajo. La L-00 ya existía (lumbrera "flotada"). El tramo 1 se hizo casi todo con muro Milán por su poca profundidad; la L-16, L-17, L-22, L-23 y L-24 solo con método convencional, y la mayoría restante con método mixto.

El muro Milán del TEO es de concreto armado de 0.80 a 1.20 m de espesor, colado en zanja con lodo bentonítico. En la L-18, L-19 y L-20, donde el terreno es duro, se usó una hidrofresa que corta suelos y roca de hasta 100 kg/cm², llega a unos 120 m y se desvía como máximo 0.3 %. Los paneles primarios miden 1.20 m por 2.80 m.

Para excavar en seco hay que bajar la presión del agua con pozos de 17½" y ademe de 12", con bombas de 10 a 135 HP. El caso extremo fue la L-12: 14 pozos con 580 L/s totales. En el tramo 3 se mejoraron los portales con barrenos de 2" cada 0.40 m e inyección de lechada agua/cemento 0.5 con 24 L/m³ de acelerante, a no más de 0.5 kg/cm² sobre la presión de poro. Después se demolió el muro primario y se lanzaron 15 cm de concreto f'c = 350 kg/cm². El detalle de las lumbreras está en el capítulo 15.

Los 580 L/s de la L-12 equivalen a unos 2,100 m³ por hora, más de 50,000 m³ al día de agua que había que sacar, conducir y descargar sin inundar a nadie, todo para sostener un pozo de 16 m de diámetro. En las lumbreras el agua pesa más que el concreto, y el control de los niveles de bombeo exige tanta atención como el armado.



Figura 14.21. Hidrofresa trabajando en la lumbrera L-19

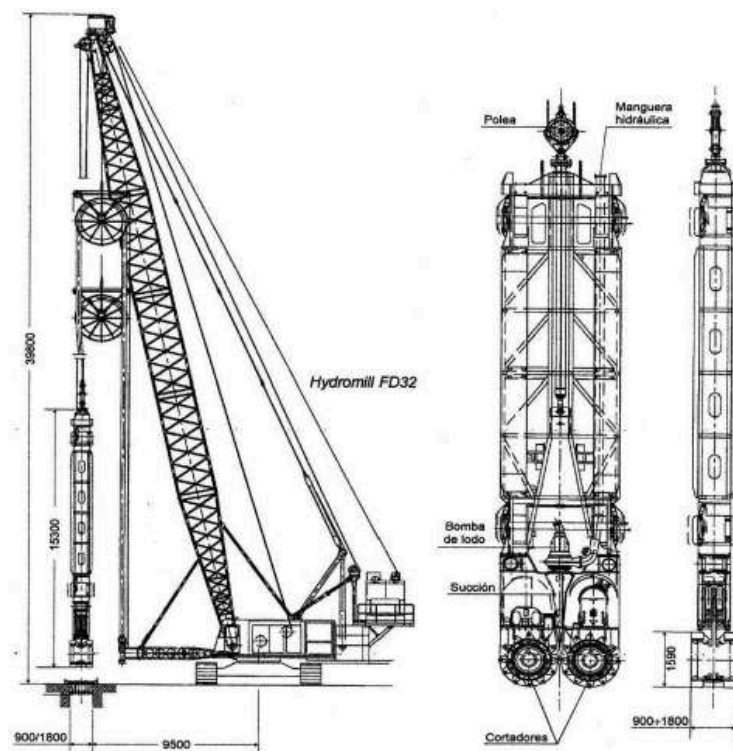


Figura 14.22. Esquema de la hidrofresa usada para el muro Milán de grandes profundidades



Figura 14.23. Detalle del cortador de la hidrofresa

05

Ciclo de excavación y colocación de anillos en el TEO

Los fundamentos del EPB están en el capítulo 5. Aquí se describe el ciclo real del tramo 3 con la Hidalgo, el mejor registro público del ciclo completo.

EXCAVACIÓN

La rueda es tipo *spoke*, con 45 % de abertura y 48 alojamientos para herramientas (8 periféricos, 32 frontales y 4 dobles centrales). Lleva además 188 scrapers (60 periféricos) y 44 knife bits. En los primeros 100 m del tramo se usaron rippers para suelo, y al aparecer fragmentos de roca se cambiaron por discos. Otra parte de la tesis precisa que los rippers se usaron en los primeros 150 m.

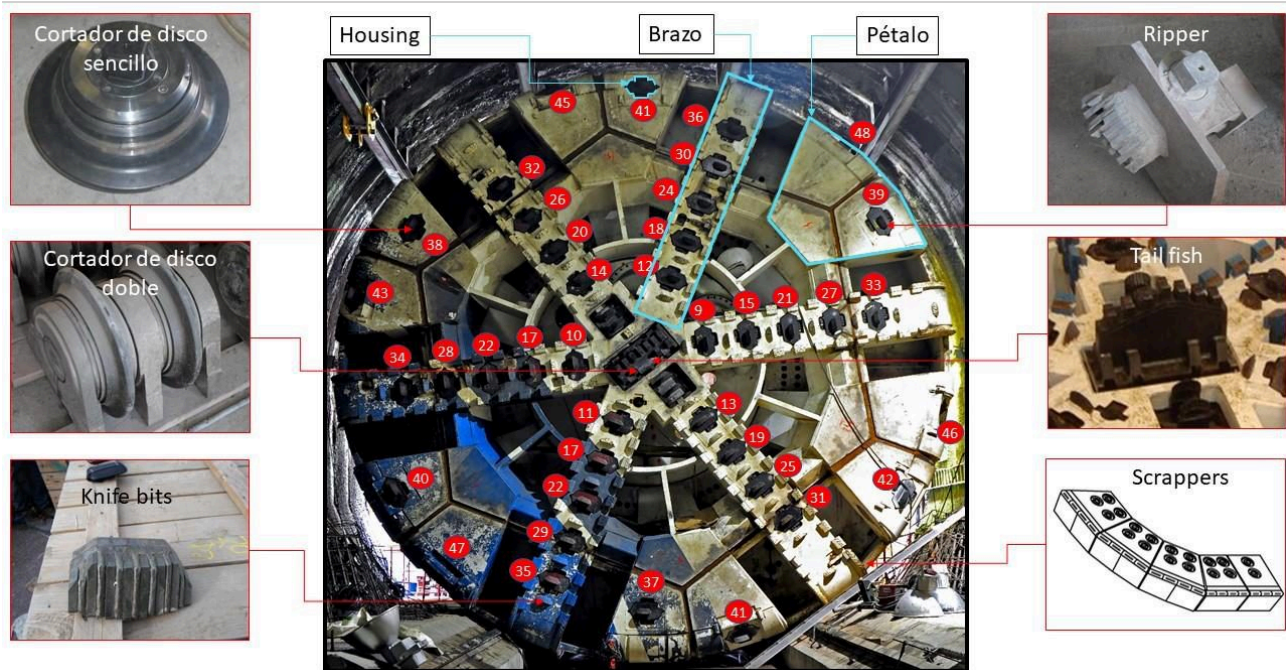


Figura 14.24. Herramientas de la rueda de corte de la tuneladora "Hidalgo"

Cada 1.5 m de avance se saca un volumen teórico:

$$V_e = \frac{\pi}{4} D^2 L = \frac{\pi}{4} (8.93)^2 (1.5) = 93.9 \text{ m}^3$$

donde V_e es el volumen teórico excavado por anillo (m^3), D es el diámetro de excavación (m) y L es la longitud del anillo (m).

Con espuma y grasa la obra tomó 100 m^3 como promedio, lo que da a un dique de $2,000 \text{ m}^3$ capacidad para 20 anillos. Para las velocidades máximas de avance hay dos tablas distintas: 80, 20 y 45 mm/min para suelo, mixto y roca, y 29, 14 y 18 mm/min en la clasificación de rendimientos; la primera corresponde, al parecer, a la velocidad máxima de la máquina y la segunda a la de operación. El tiempo de excavar un anillo es de 18.75 min en suelo, 75 min en mixto y 33.33 min en roca.

El fabricante garantizaba 20 min de excavación y 20 min de montaje por anillo, un ciclo teórico mínimo de 40 min y, con 20 h útiles, 30 anillos por día. La expectativa de proyecto fue más conservadora: 400 m al mes.

TABLA 14.8. PARÁMETROS DEL CICLO DE EXCAVACIÓN DEL TRAMO 3

PARÁMETRO	VALOR
Longitud de anillo	1.5 m (1.5031 m con juntas)
Volumen teórico excavado por anillo	93.94 m ³ (promedio de obra 100 m ³)
Tornillo sin fin	500 m ³ /h, 19.2 rpm, torque máximo 117 kN·m, 14 álabes (0.5 bar cada uno)
Banda de rezaga	tela de 762 mm de ancho, 250 kg/s, motor 160 kW, 183 m/min
Banda vertical de cangilones	1 o 2 motores de 300 kW, 162 m/min
Presión del frente	estática máx. 10 bar; en excavación 5 bar
Empuje máximo permisible	65,000 kN
Torque máximo permisible	6,000 kN·m
Camiones de acarreo	16 m ³ con cargador frontal

SUMINISTRO Y MONTAJE DEL ANILLO

Mientras la máquina excava, la cuadrilla de superficie prepara el siguiente anillo. El anillo universal tiene 8 piezas (cinco A, una B, una C y la llave K), conicidad de 50 mm y permite radios mínimos de 250 m. El tramo 3 es prácticamente recto salvo los últimos 300 m (L12 a L13). Pesa unas 34 a 35 t (dovelas A de 5 t, B y C de 4.5 t y K de 1 t). Un tractocamión de 40 t lo lleva de la planta a la lumbrera y una grúa pórtico de 200 t lo descarga en unos 15 min. Antes de bajarlo se le adhieren a mano juntas de estanqueidad, junta Tok de 1×1 cm (75 m por anillo), placas de fibra dura de 3 mm y fieltro bituminoso. La grúa lo baja con pinza Acimex de 50 t en unos 10 min. En el fondo, la grúa de 15 t lo acomoda en carros doveleros en el orden A3, A2, A4, A1, A5, B, C, K. Una locomotora de 18 km/h lleva el tren a la máquina en unos 20 min para el tramo más largo, de 3 km.



Figura 14.25. Patio de almacenamiento de dovelas en la lumbrera



Figura 14.26. Descarga de una plataforma de dovelas con la grúa pórtico

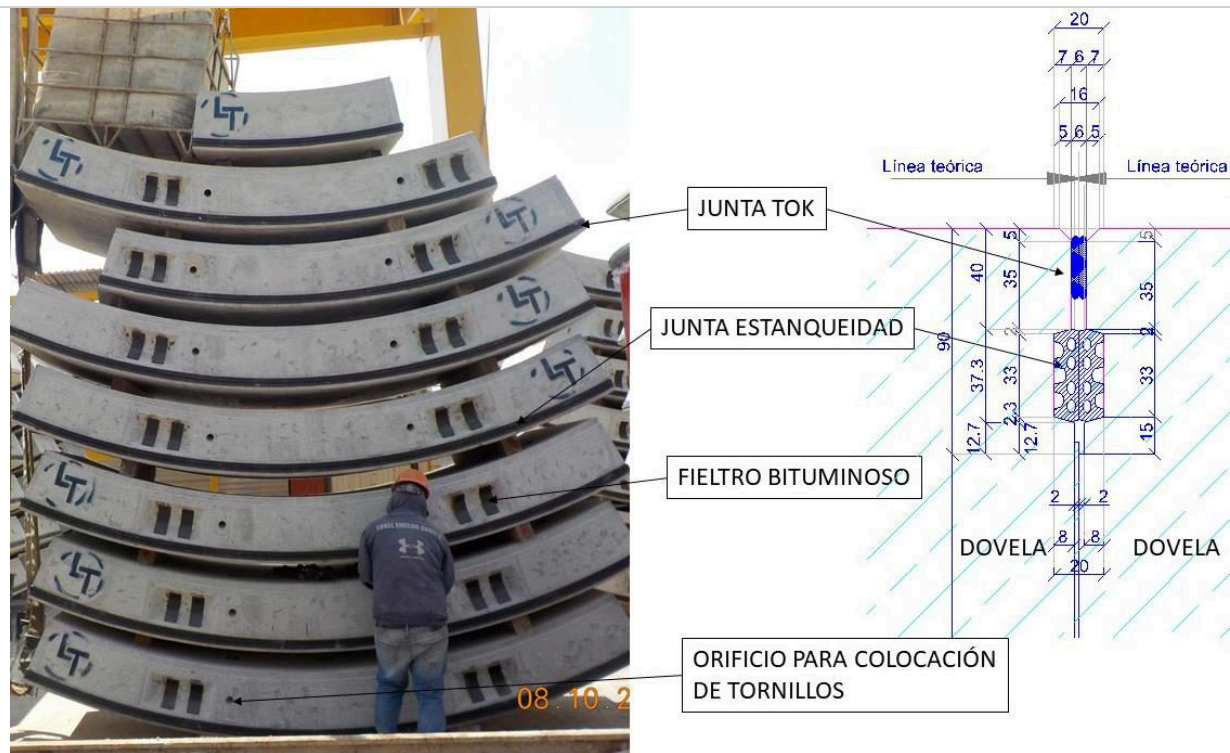


Figura 14.27. Juntas de estanqueidad, Tok, placas de fibra dura y fieltro bituminoso

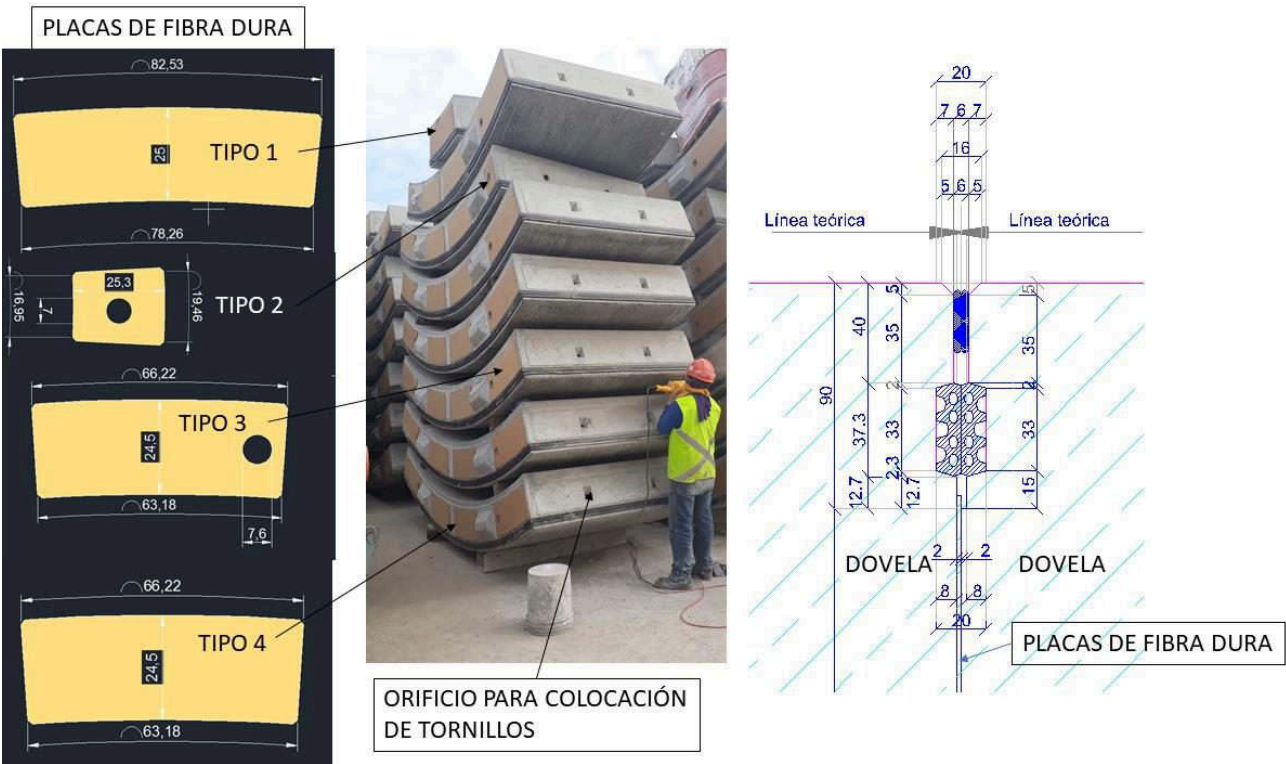


Figura 14.28. Detalle de placas de fibra dura y orificios para tornillos

En el frente, el erector toma las dovelas por succión y gira 220° desde su posición inicial entre los gatos 14 y 15. Por eso la secuencia A3, A2, A4, A1, A5, B, C, K es fija, y A3 siempre queda opuesta a la llave K. El sistema de guiado propone, entre 14 posiciones posibles, la que mejor mantiene la alineación. Las tolerancias son 1 cm en la cara interna y 5 mm entre dovelas. El montaje tarda unos 20 min como mínimo, pero el ciclo completo se estimó en 1 h 20 min contra 30 min de excavación en suelo. Para que la máquina nunca esperara el anillo se instalaron cambios "california" y un tren adicional, de modo que siempre haya un anillo en la mesa, otro en el túnel y otro en el fondo de la lumbrera. Los tornillos de montaje son provisionales y se retiran cuando la máquina se aleja.



Figura 14.29. Descenso de dovelas al fondo de la lumbrera con la grúa pórtico



Figura 14.30. Carros doveleros con dovelas en el fondo de lumbrera

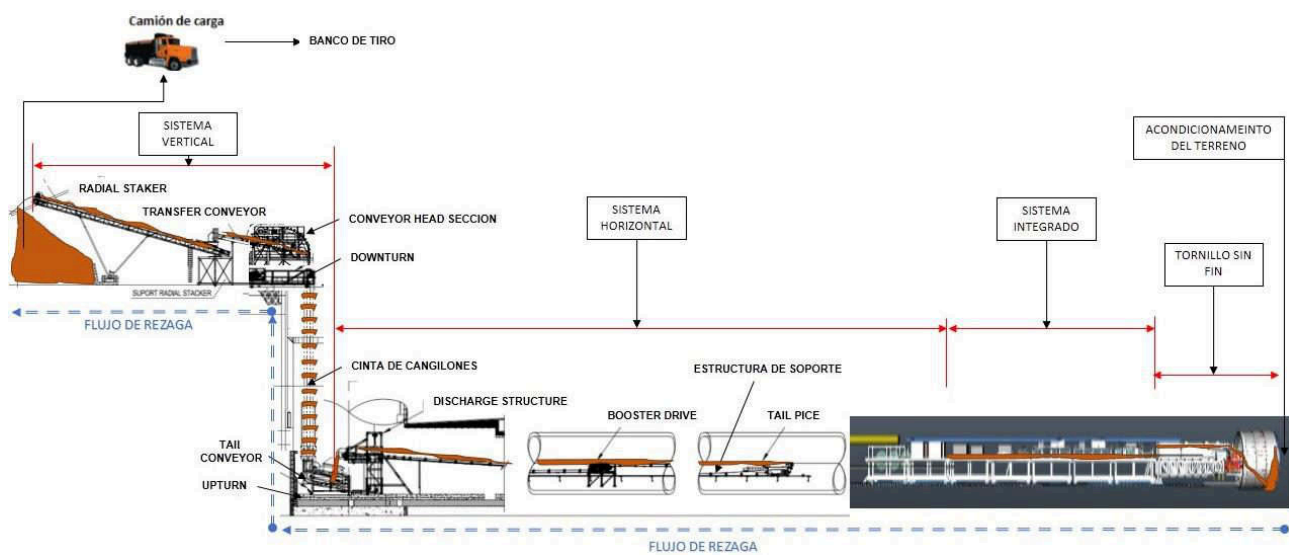


Figura 14.31. Ciclo de un anillo

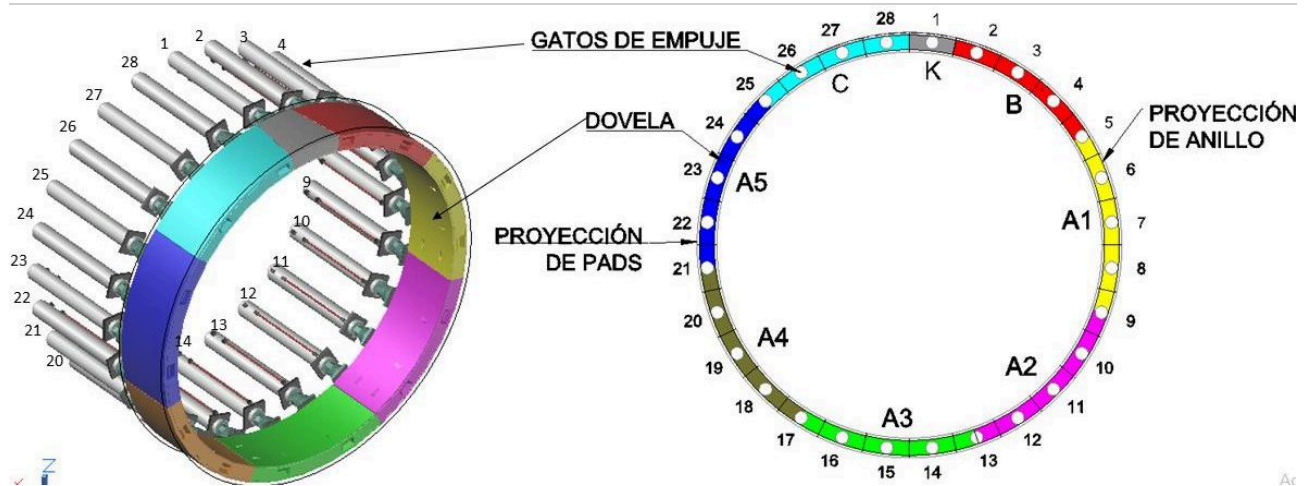


Figura 14.32. Geometría de la secuencia del anillo

En L10-L11 los valores son comparables: 30 min de excavación en suelo (50 mm/min) y 30 min de colocación del anillo de 7 dovelas más llave, con las dos locomotoras de servicio y una de emergencia.

Dato técnico: el anillo es el sostén primario del túnel y se fabricó en tres plantas: la primera produjo los anillos de los tramos 1-A y 2, la segunda los de los tramos 1-B, 3 y 4, y la tercera los de los tramos 5 y 6. Los tramos 1 y 2 usan anillo de 35 cm, con 6 piezas más una de cierre, 1.5 m de ancho y 29 t. Los cuatro últimos, anillo de 40 cm con 7 piezas más una de cierre, 1.5 m y 34 t. Al salir la máquina de cada tramo se arma y cuela en sitio un revestimiento secundario del mismo espesor. El diseño estructural de las dovelas se dividió en nueve subtramos y el del revestimiento definitivo en trece. El detalle está en el capítulo 16.

GUIADO TOPOGRÁFICO DE LA TUNELADORA

La Hidalgo se guió con un sistema automatizado que le muestra al operador la posición y la dirección de la rueda de corte. El programa, llamado TBM3, calcula la posición con tres datos: la medición permanente de dos prismas motorizados con una estación total motorizada, la inclinación y el giro que da un inclinómetro de dos ejes instalado en la máquina, y la carrera de los cilindros de empuje y de articulación.

La estación total motorizada, con su fuente de energía y su radio, se fija a un soporte en el hastial o en el revestimiento del túnel, junto con el prisma de referencia; el ordenador industrial, el multiplexor y un radio módem van en la cabina del operador. La instalación se hizo entre el fabricante de la máquina y el del sistema de guiado. La topografía de la obra entrega el eje del túnel y las coordenadas de la estación total y del prisma de referencia, y antes de entrar al túnel se mide la máquina para relacionar su eje con las coordenadas locales de los prismas, con origen en el centro de la rueda de corte.

En la dirección de excavación se definen tres ejes: horizontal (derecha positiva), longitudinal (negativo detrás de la rueda) y vertical (positivo sobre el eje de la TBM). Los valores del prisma 1, el más cercano a la rueda, y del prisma 2 se capturan una vez y no se modifican mientras los prismas no se muevan. Con la medición continua de los prismas y del inclinómetro, el programa pasa las coordenadas locales a globales y luego al eje del túnel; si se añaden las carreras de los gatos, también calcula la posición del faldón y de los anillos ya montados.

La pantalla muestra la tendencia horizontal y vertical, la dirección del norte, el eje de proyecto en rojo, la trayectoria predicha en azul, lo ya excavado en verde, la distancia al origen y las desviaciones horizontal y vertical; la ventana de tiempos se pone roja si en los últimos tres minutos no hubo una posición válida. Si el operador mantiene la desviación y el giro cerca de cero, la traza es la mejor posible.

Para corregir la trayectoria, la Hidalgo tiene una articulación que desvía hasta 2° a izquierda y derecha y 0.5° hacia arriba, con radio mínimo de 200 m y 16 cilindros independientes de 3,000 kN. Sirve para seguir curvas de proyecto y, si hace falta, para corregir una desviación grande. La precisión importa porque el espesor del revestimiento definitivo, de unos 35 cm, depende de la geometría de la excavación y de las desviaciones del guiado.

Dato técnico: el radio mínimo de 200 m es el de la articulación de la Hidalgo; el fabricante habla de curvas de 700 m de radio mínimo para el diseño de su máquina del lote 4. El primero se refiere a la articulación y el segundo al radio de diseño de la máquina; el trazo del tramo 3 es casi recto salvo los últimos 300 m, por lo que la articulación se usó sobre todo para corregir desviaciones.

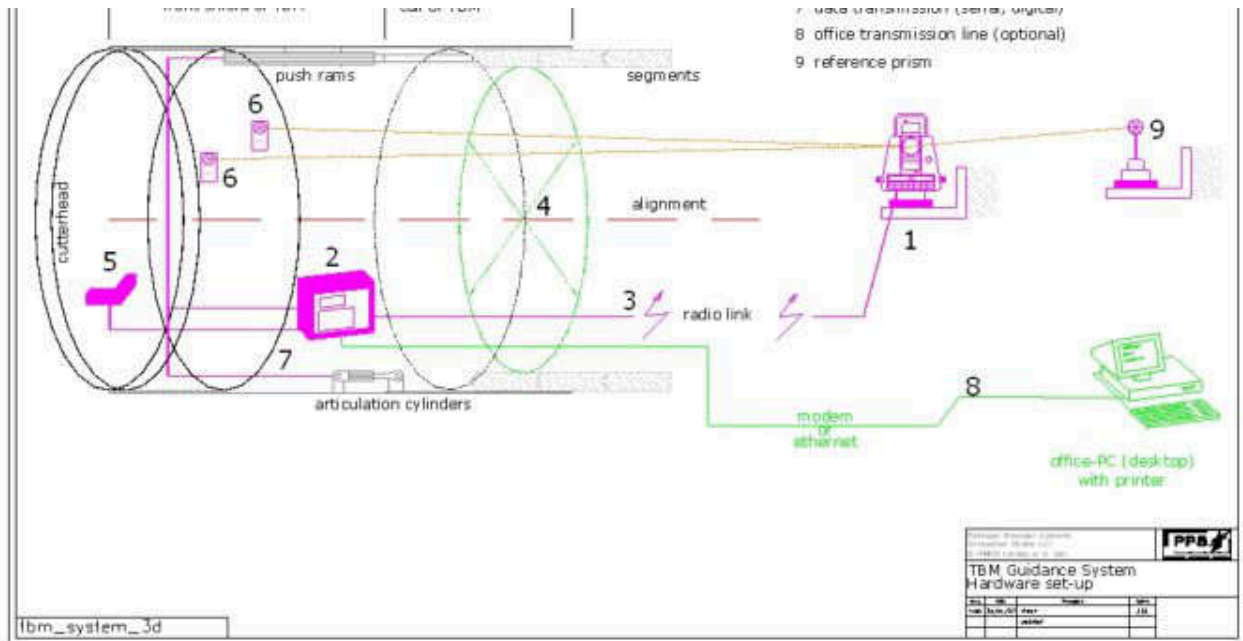


Figura 98. Representación gráfica del sistema automatizado de guiado en la tuneladora (Prismas, Estación total, Inclinómetro y pantalla del ordenador).

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

Figura 14.33. Sistema automatizado de guiado

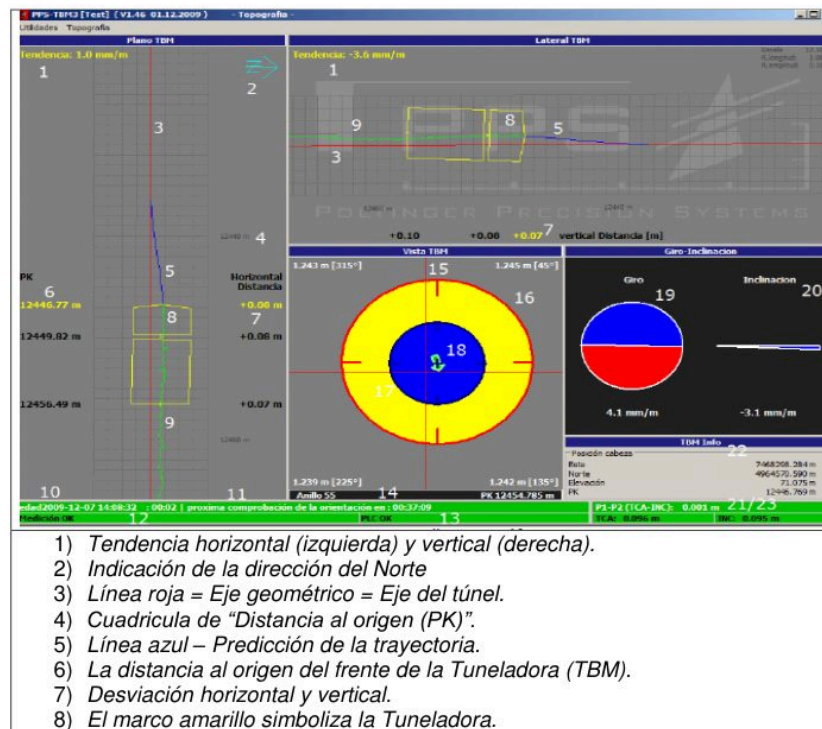


Figura 14.34. Pantalla del sistema de guiado de la tuneladora

06

Galerías de montaje y arranque de las máquinas

POR QUÉ HIZO FALTA UNA GALERÍA

Armar una máquina de 95 m en el fondo de un pozo no es trivial. Las Herrenknecht de los tramos 1 y 2 se armaron con umbilicales, sin galería. Para las Robbins se requirió una galería de montaje por la geometría de la máquina y la profundidad de las lumbreras, y también se construyó una en la L-21A del tramo 6. La razón técnica es hidráulica: con presiones piezométricas mayores a 4 o 5 bar no se puede iniciar con un solo tornillo sinfín. Hacen falta dos, y en el fondo de la lumbrera no caben (p. 51; figuras 19 y 20 de esa tesis). Para la L-21A (110 m de profundidad) se comparan las dos alternativas.

TABLA 14.9. COMPARACIÓN DE MÉTODOS DE ARRANQUE EN L-21A

ASPECTO	UMBILICALES	GALERÍA DE MONTAJE
Riesgo	Cables y mangueras colgando 110 m; riesgo de fallas eléctricas y para el personal	No hay manejo de cables ni tuberías largas
Energía	Caídas de voltaje estimadas hasta 15 %	Operación normal desde el inicio
Tiempo	La TBM debe perforar 70 a 100 m antes de retirar los umbilicales, con operación lenta	Permite ensamblar escudo y puente juntos y preparar de inmediato las bandas
Costo y plazo	Líneas de alta presión costosas	La galería, aunque es túnel convencional, alarga el plazo por su construcción por etapas
Decisión	Descartado	Elegido

GEOMETRÍA Y SUELO EN L-21A

La galería es un túnel de herradura de 28 m. Los primeros 13 m (sección mayor, 12 m × 12 m) alojan la estructura de reacción y los 14 m restantes (sección menor, 11 m de altura y 10 m de ancho) alojan el cuerpo de la TBM. El perfil de la L-21A tiene limos, arenas limosas, tobas y arcillas hasta 103 m, fragmentos de basalto de 103 a 110 m y basalto de 110 a 140 m. Las resistencias típicas van de una cohesión de 95 kPa en la costra superficial a 350 a 1,085 kPa en los estratos profundos.



Figura 14.35. Galería de montaje en construcción con marcos metálicos y concreto lanzado

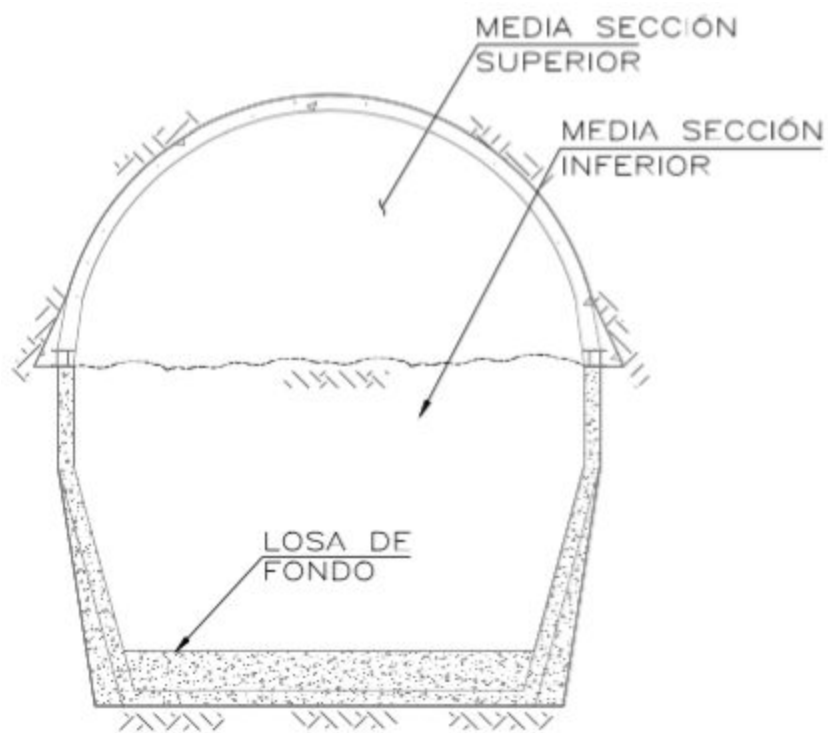


Figura 14.36. Sección de la galería



Figura 14.37. Relleno compactado del fondo de la lumbrera antes de la media sección

PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO POR ETAPAS

Los trabajos previos son: muro secundario con el hueco de la galería sin colar, emportalamiento, trazo del eje, plataforma, pozos de bombeo profundos y primera etapa de la bóveda paraguas de tubos metálicos para evitar caídos en la clave. Antes de demoler el muro primario se preconfina el frente con anclas de fibra de vidrio (barrenar, equipar, inyectar lechada). Las 20 etapas son:

1. Verificar topográficamente el trazo y la elevación.
2. Rellenar el fondo de la lumbrera con grava arena limosa al 90 % Proctor estándar.
3. Demoler con martillo hidráulico el muro primario de la media sección superior y cortar los marcos.
4. Excavar "coyoterías" laterales para alojar vigas rastra.
5. Colocar las vigas rastra.
6. Excavar la longitud del primer marco.
7. Colocar el primer marco metálico.
8. Excavar la media sección superior con maquinaria convencional y manual y rezagar.
9. Colocar marcos metálicos apoyados en las rastras, con tensores y cuñas, instalar drenes de PVC y lanzar concreto entre marcos.

0. Repetir el ciclo, con nuevas coyoterías al agotar la longitud de rastra.
11. Proteger el frente con 10 cm de concreto lanzado.
- 12 a 18. Media sección inferior (banqueo): retirar relleno, demoler muro, colocar patas y tornapuntas, excavar banco y lanzar concreto.
19. Proteger el frente con 10 cm de concreto lanzado y anclas de fibra de vidrio, con talud 0.125:1.
20. Armar y colar la losa de fondo.

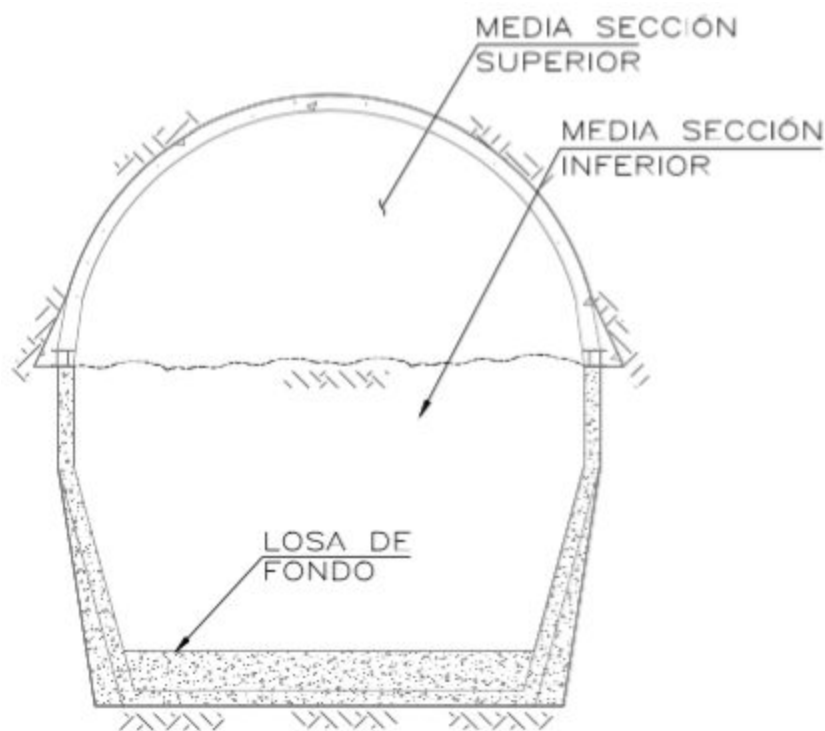


Figura 14.38. Construcción de la galería de montaje de la lumbrera L-21A



Figura 14.39. Demolición del revestimiento primario de la lumbrera para abrir la galería

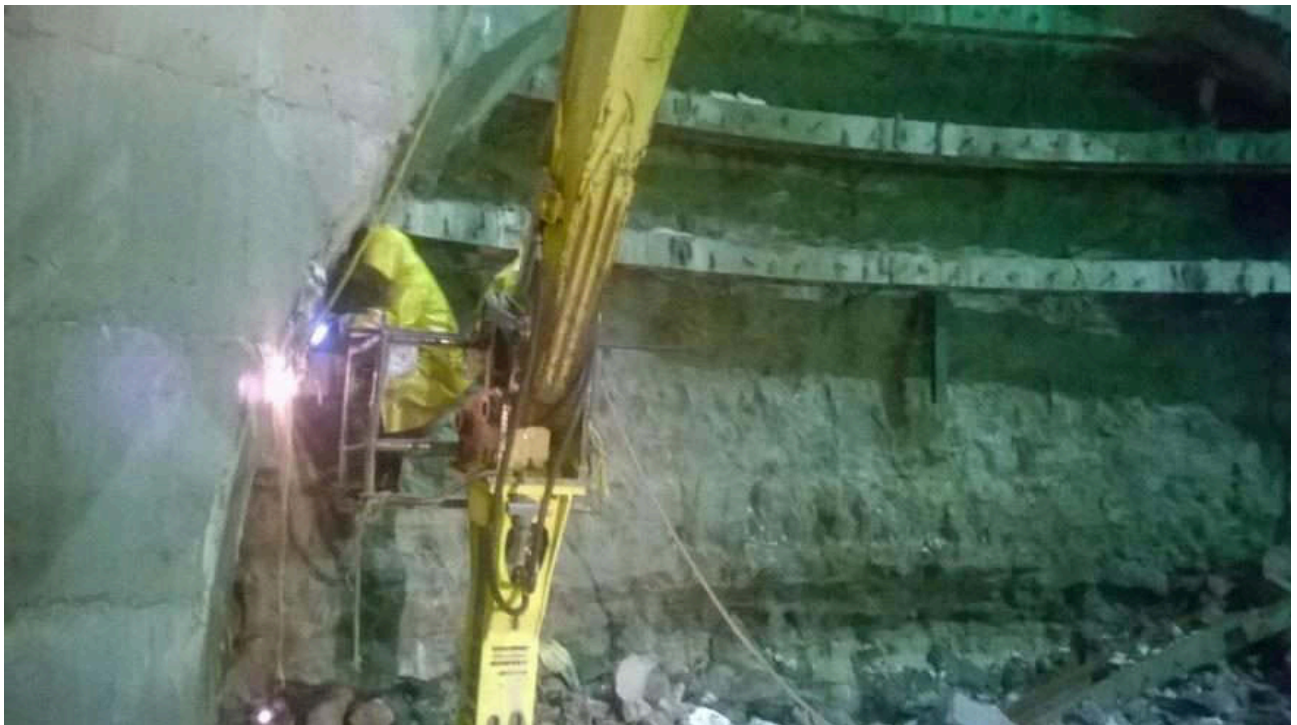


Figura 14.40. Excavación de las coyoterías laterales para las vigas rastra



Figura 14.41. Vigas rastra en las coyoterías



Figura 14.42. Excavación para el primer marco metálico



Figura 14.43. Almacén de marcos metálicos



Figura 14.44. Excavación de la media sección superior



Figura 14.45. Tensores entre marcos metálicos



Figura 14.46. Lanzado de concreto entre marcos



Figura 14.47. Etapas subsecuentes de excavación y revestimiento



Figura 14.48. Demolición del revestimiento primario de la media sección inferior

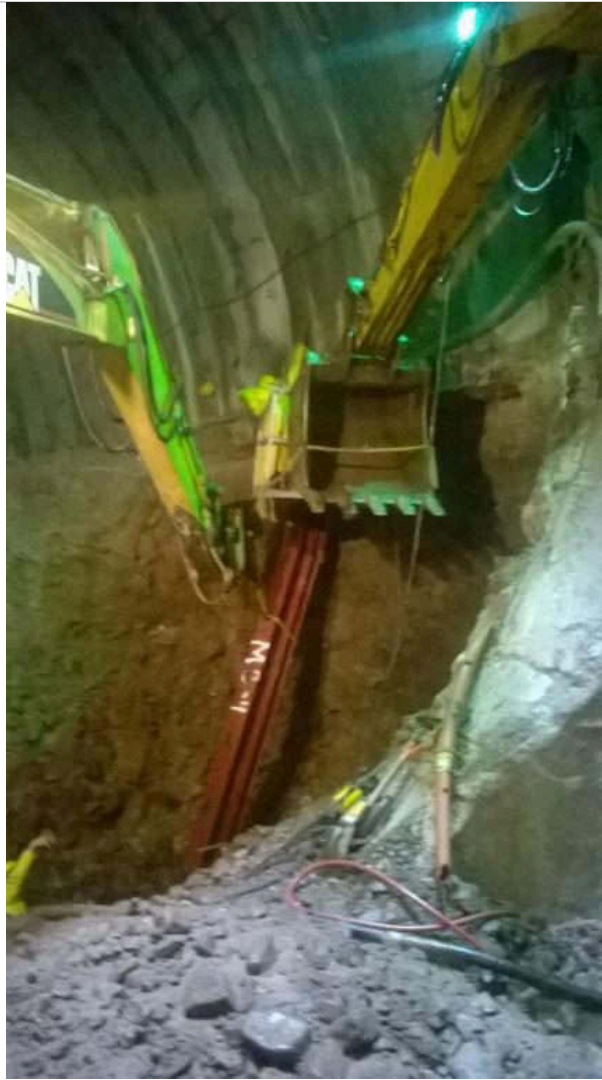


Figura 14.49. Colocación de patas de los marcos metálicos

ENSAMBLE DE LA MÁQUINA

Una grúa de 800 t baja los cuatro cuerpos del escudo (rueda, media superior, media inferior y cola). La TBM se desliza sobre una cuna de concreto con riel embebido hasta apoyarse en la estructura de reacción. Después se bajan los carros 2 a 5 (14, 12, 12 y 13 m) con tablero de control, inyección de lechada, enfriamiento, compresores, bandas y ventilación. Se monta un primer anillo apoyado en ménsulas de 8.60 m de diámetro cada metro, y los anillos 4 y 5 llevan una ventana de acceso para troquelar entre dovelas y galería; el espacio se rellena con gavilla de 3/8". El equipo completo mide unos 95 m, aunque otra parte de la misma tesis menciona 150 m para el equipo con tren de apoyo; se usan los 95 m del equipo completo.

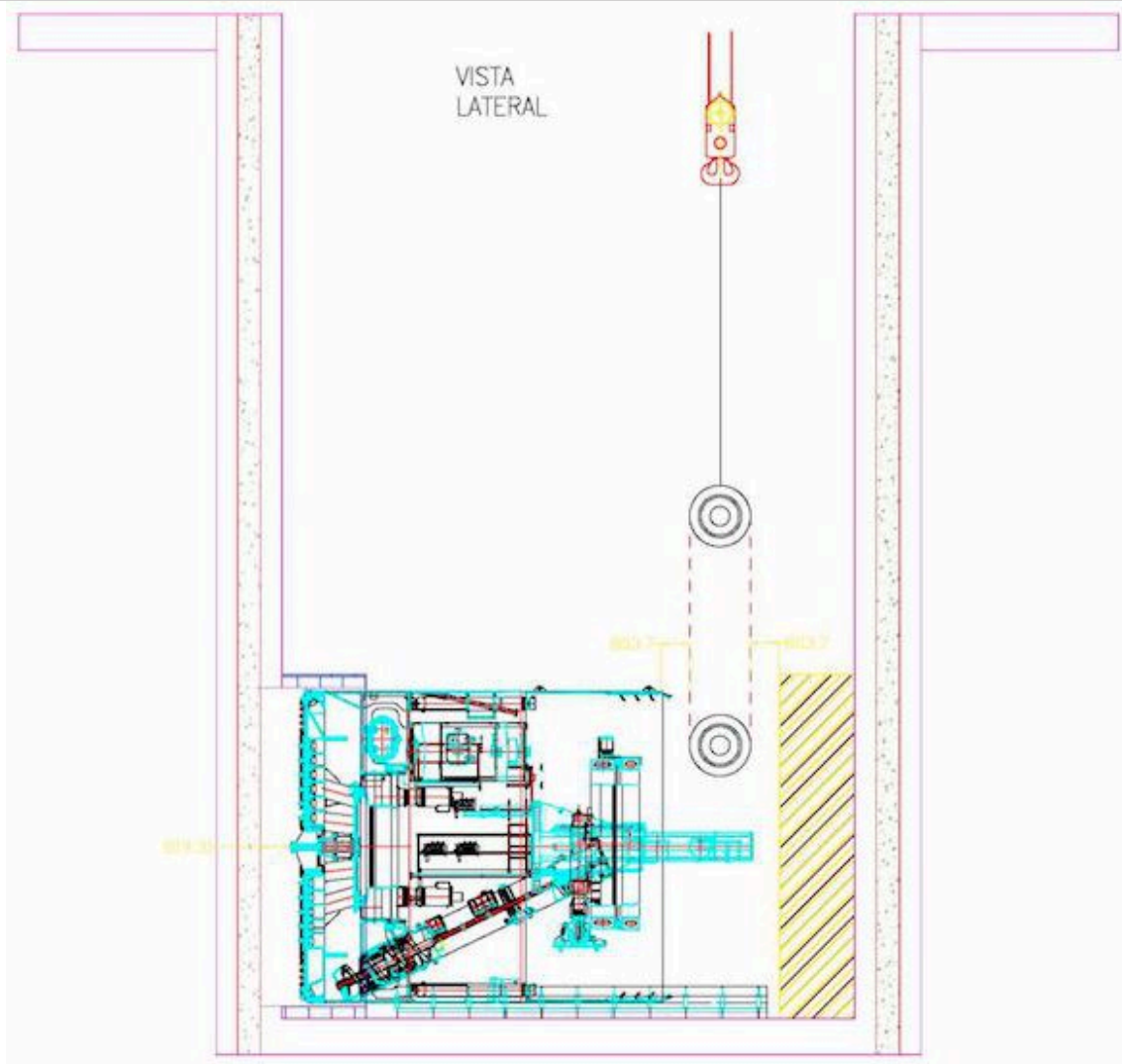


Figura 14.50. Bajada de la cabeza de corte y del tornillo sin fin

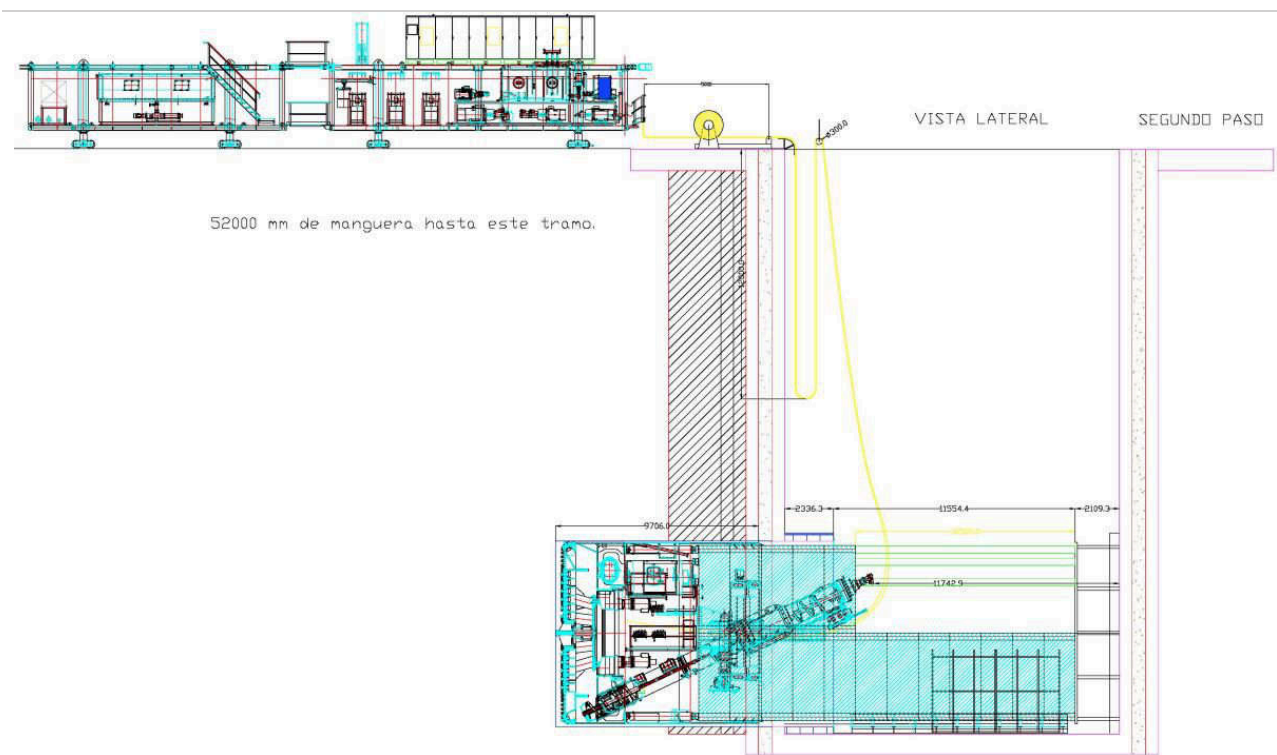


Figura 14.51. Conexión por umbilicales entre la cabeza y los carros 1 y 2

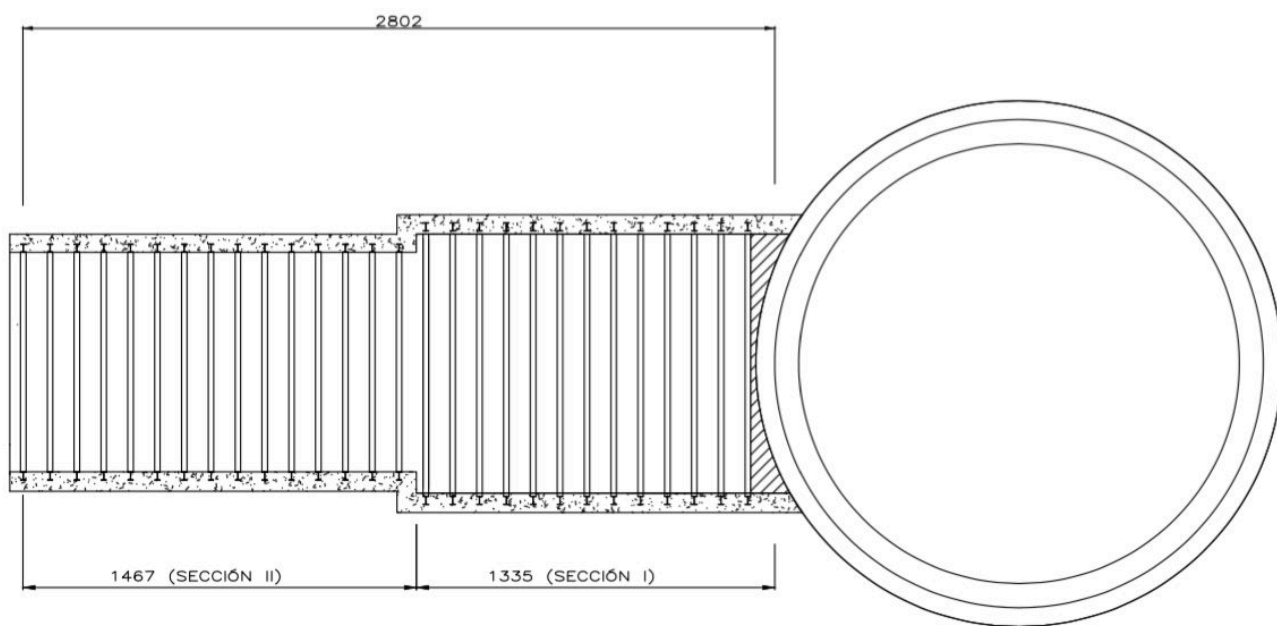


Figura 14.52. Seccionamiento de la galería de montaje

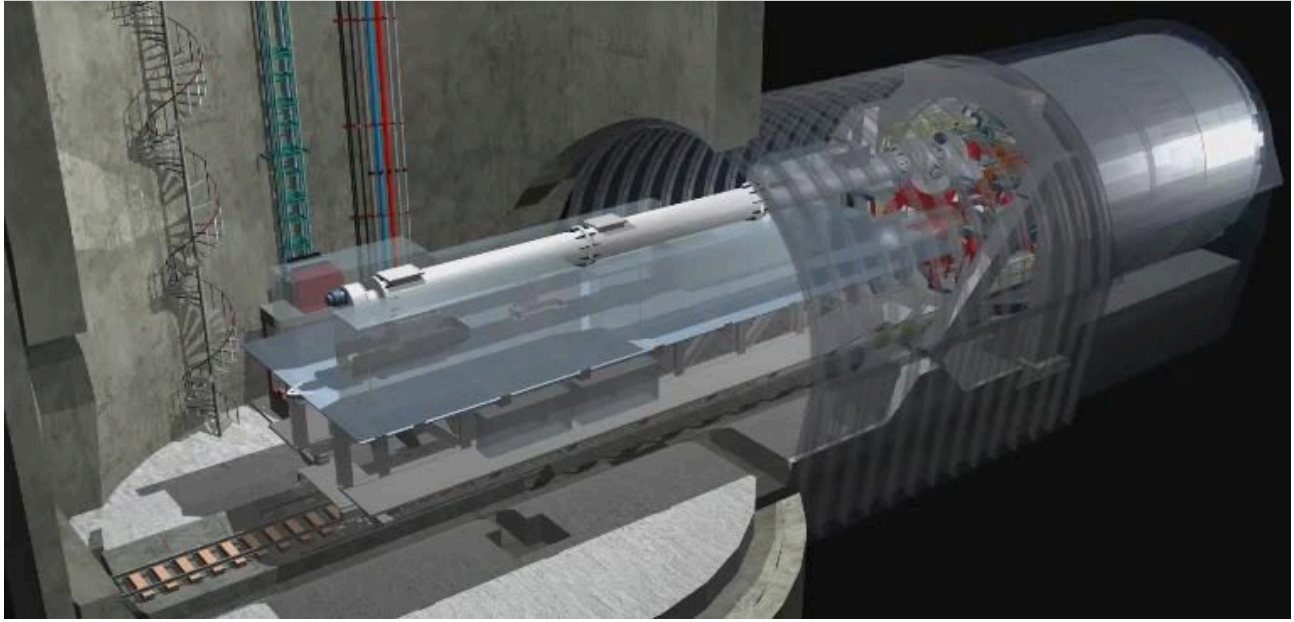


Figura 14.53. Modelo de la TBM ensamblada en el fondo de la lumbrera

En el tramo 3 el montaje se hizo en dos fases: provisoria, con escudos A y B, rueda de corte, 10 motores y tornillo No. 1, excavando un pre-túnel de 150 m; y definitiva, con los 75 m de gantries y otros 75 m de sistema de bandas. Cada gantry mide $10.30 \times 6.30 \times 3.90$ m.

07

Inyección del espacio anular y de grasa de cola

Detrás de la rueda queda un hueco de unos 16 cm entre el terreno y el anillo. El mortero lo llena para controlar asentamientos, evitar que el anillo flote y sellar contra infiltraciones. El volumen anular por anillo es:

$$V_a = \frac{\pi}{4} (D_e^2 - D_a^2) L = \frac{\pi}{4} (8.93^2 - 8.60^2) (1.5) = 4.54 \times 1.5 = 6.8 \text{ m}^3$$

donde V_a es el volumen del espacio anular por anillo (m^3), D_e es el diámetro de excavación (m), D_a es el diámetro exterior del anillo (m) y L es la longitud del anillo (m). Es un cálculo propio: un texto usa 8.62 m, pero los 58.088 m^2 corresponden a 8.60 m, valor que confirma Ramos (2013, p. 49) con 6.82 m^3 .

TABLA 14.10. DOSIFICACIÓN DEL MORTERO DE INYECCIÓN DEL TRAMO 3 (POR M³)

COMPONENTE	CANTIDAD
Cemento CPC40RS	200 kg
Arena de río	1,016.8 kg
Arena filler	843.75 kg
Bentonita sódica (Bentonil CV15)	22.33 kg
Agua potable	127.6 L
Acelerante Sigunit PC	16 L
Aditivo superabsorbente Sika Foam TBM	0.5 kg

El mortero debe alcanzar 2 MPa de resistencia a compresión como mínimo, ser inerte o semi-inerte y bombeable. Se fabrica en 15 min en una planta ODISA 2000 (2 silos de 35 t, mezclador de 4 m³), baja por tubería de 4" con bomba Putzmeister KOV 1050 DUO y se lleva a la TBM en una "vaca de mortero" de 8.5 m³. La presión de inyección se fija a partir de la del frente:

$$P_i = P_f + P_t + 1$$

donde P_i es la presión de inyección (bar), P_f es la presión del frente (bar) y P_t son las pérdidas en la tubería (bar). Se inyecta por 4 puertos por bomba en la periferia del faldón.



Figura 14.54. Planta dosificadora de mortero y bentonita



Figura 14.55. Bomba de pistones Putzmeister para el mortero

Los cepillos del faldón (tres líneas, con grasa entre ellas) impiden que el mortero entre a la máquina. La grasa resiste fuego, agua y mortero (CONDAT WR89 de 1.3 t/m^3 o BASF TSG6 de 1.67 t/m^3) y debe inyectarse a 1 bar más que el mortero. El consumo teórico es de 55.5 kg por avance con 1.0 mm de espesor y 81.8 kg con 1.5 mm.



Figura 14.56. Transportador helicoidal ("vaca") de mortero de 8.5 m³

08

Acondicionamiento del terreno con espuma y polímeros

El terreno del tramo 3 no es plástico por sí mismo. Si no se acondiciona, bajan los rendimientos y se atascan la rueda y la banda. Se aplicó espuma con tres parámetros: FIR (factor de inyección, volumen de espuma como porcentaje del suelo excavado) de 42 % en suelo y hasta 190 % en mixto-roca; FER (factor de expansión de la espuma) de 8 en suelo y 9 en mixto-roca; y concentración de tensoactivo de 3 %. Se agregó polímero superabsorbente donde había

aportaciones de agua. La espuma da un material plástico, con menos bloques, mejor distribución de presión y menor permeabilidad; en casos extremos, sin química "es imposible el avance de un solo milímetro". Para frente de roca fracturada se desarrolló la "pasta" (lodo bentonítico con arena filler y de río), inyectada a razón de 30 m^3 por anillo (2 m^3 cada 100 mm de avance) con penetración máxima de 5 mm/rpm y empuje de unos 10 mm/min , y con la cámara entre 50 y 75 % llena.

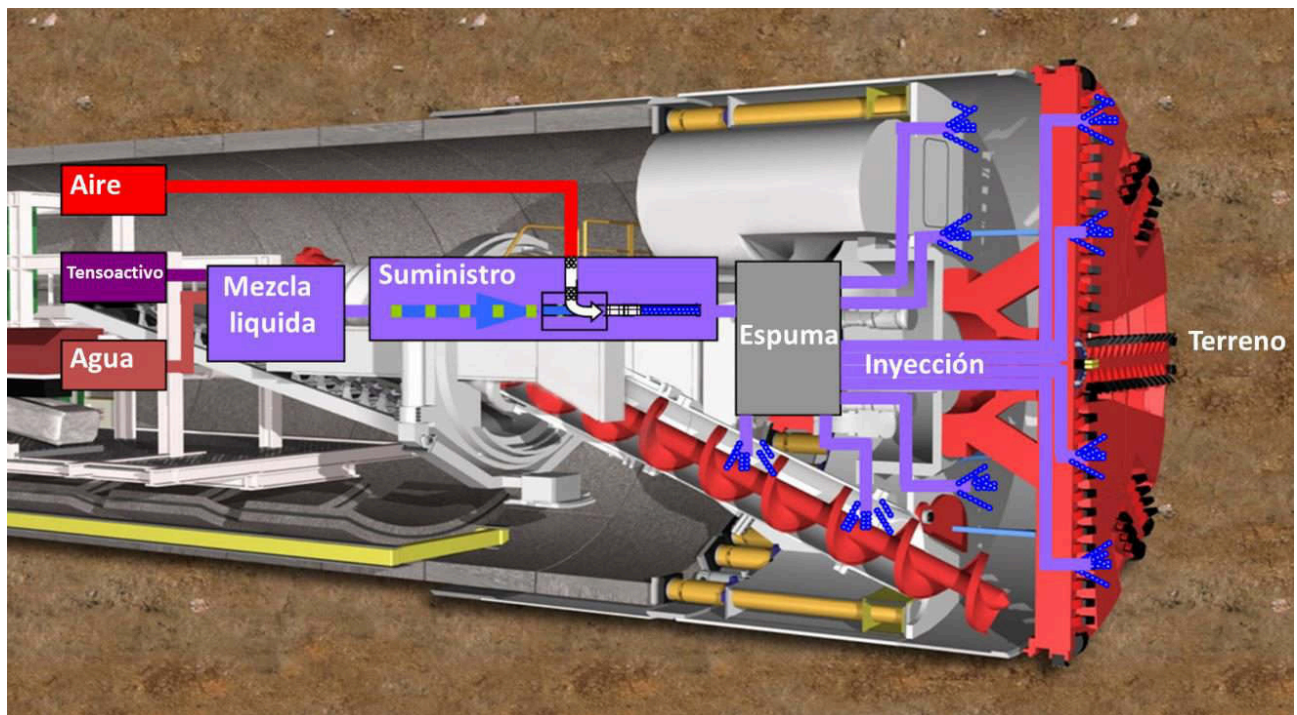


Figura 14.57. Sistema de inyección de espuma, agua y mezcla líquida a la rueda

Esquema básico de un escudo EPB:

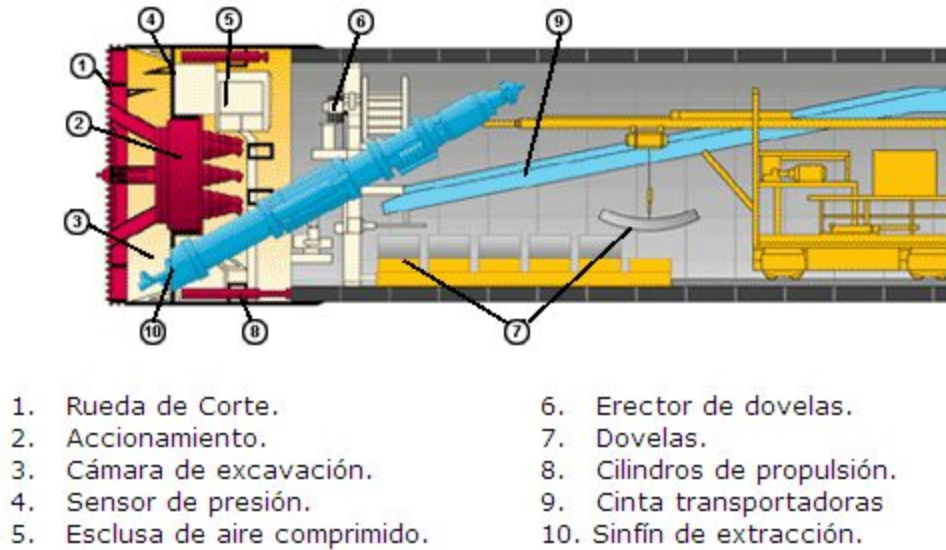


Figura 14.58. Esquema de un escudo EPB con sus 10 componentes

09

Manteo, rezaga y servicios en el túnel

DE DÓNDE VENÍA EL SISTEMA

El manteo, la elevación de la rezaga por la lumbrera hasta la superficie, ya era un problema en el Drenaje Profundo, donde se rezagaba con cargadores de descarga lateral de 2 m³ a trenes de 6 a 8 carros de 5 m³ con cambio california y skips de 5 m³ en alcancías de lumbrera. La conclusión de entonces, que si el manteo es más lento que la rezaga se acumula material y se frena la obra, sigue vigente en el TEO.

EL SISTEMA EN EL TEO

La lógica se mantuvo (túnel, fondo de lumbrera, superficie), pero con banda continua: bombeo por tuberías de la L0 a la L3A y de la L5 a la L10, banda horizontal con bombeo vertical de la L3A a la L5, y bandas horizontales y verticales de la L10 al portal de salida. En los tramos 1 y 2 la arcilla salió por bombeo porque se manejó como fluido.

En el tramo 3 el sistema tenía cuatro piezas: una banda integrada en la máquina; un sistema horizontal (impulsor intermedio o *booster drive* a 1.5 km, casetes de 400 m de banda, splice stand, winch); una banda vertical de cangilones hasta la superficie; y un apilador radial que descarga en un dique de rezaga de 2,000 m³, capacidad para 20 anillos. De ahí, camiones de 16 m³ llevan el material al banco de tiro. En la L-18 (tramo 5), el tiro lo estableció Conagua en San Miguel Jagüeyes. Los bancos de tiro se tratan en el capítulo 13.

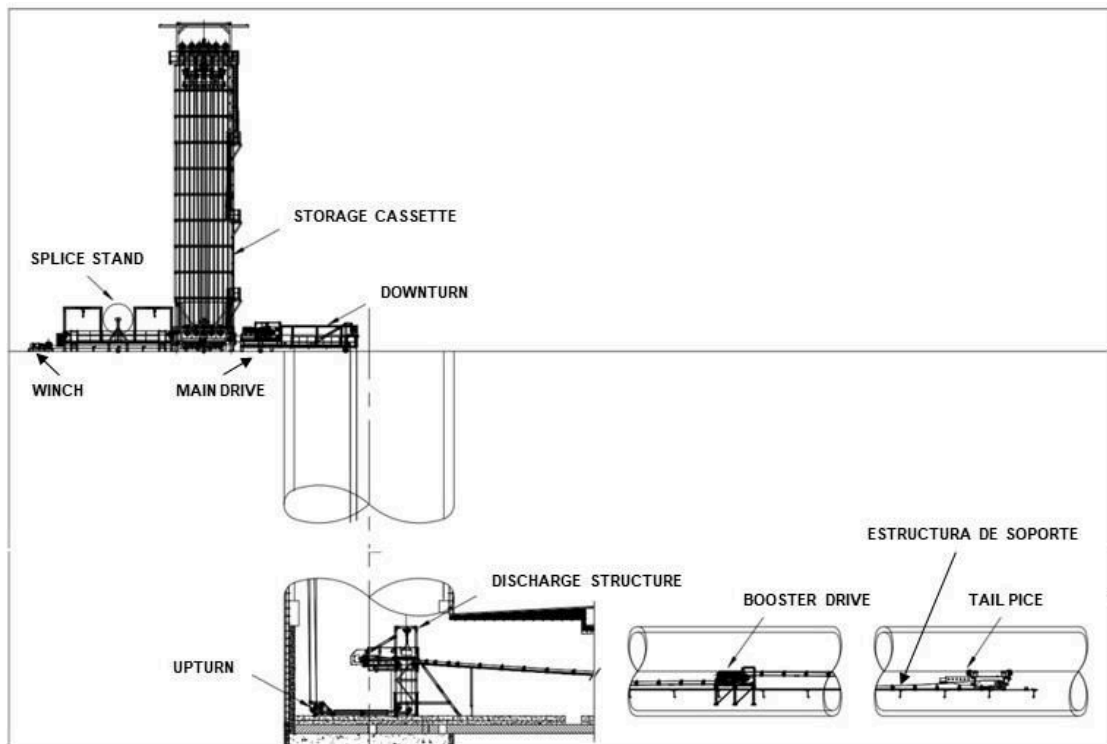


Figura 14.59. Componentes del sistema de bandas en túnel y lumbrera

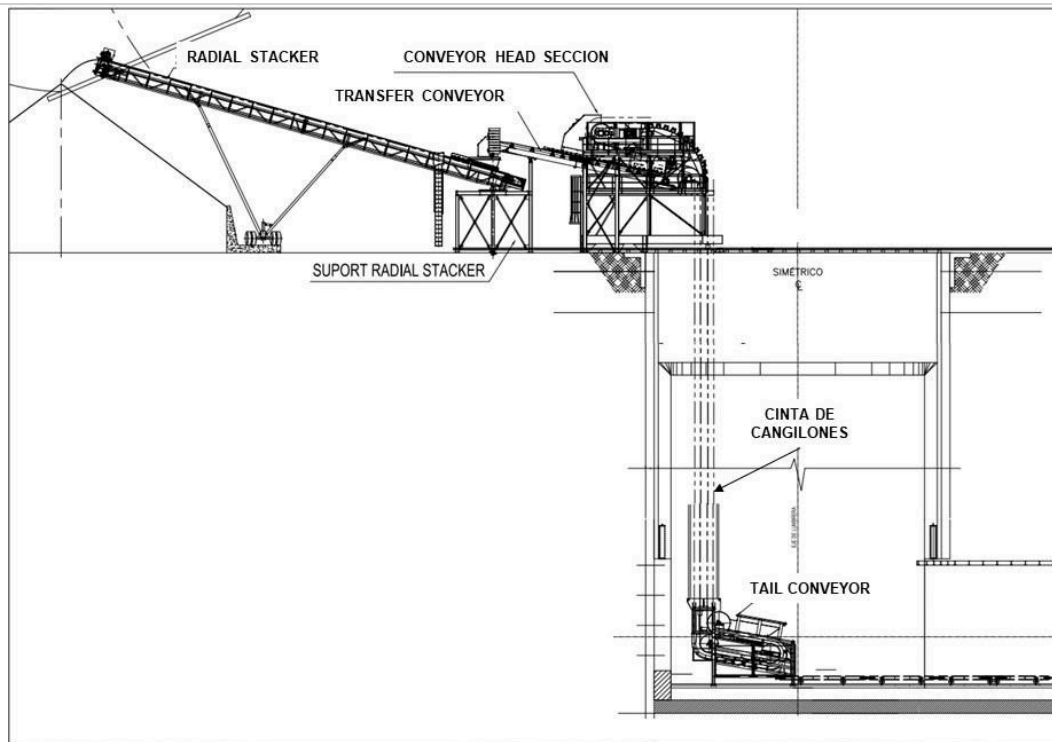


Figura 14.60. Banda vertical, unidad de transferencia y apilador radial en superficie

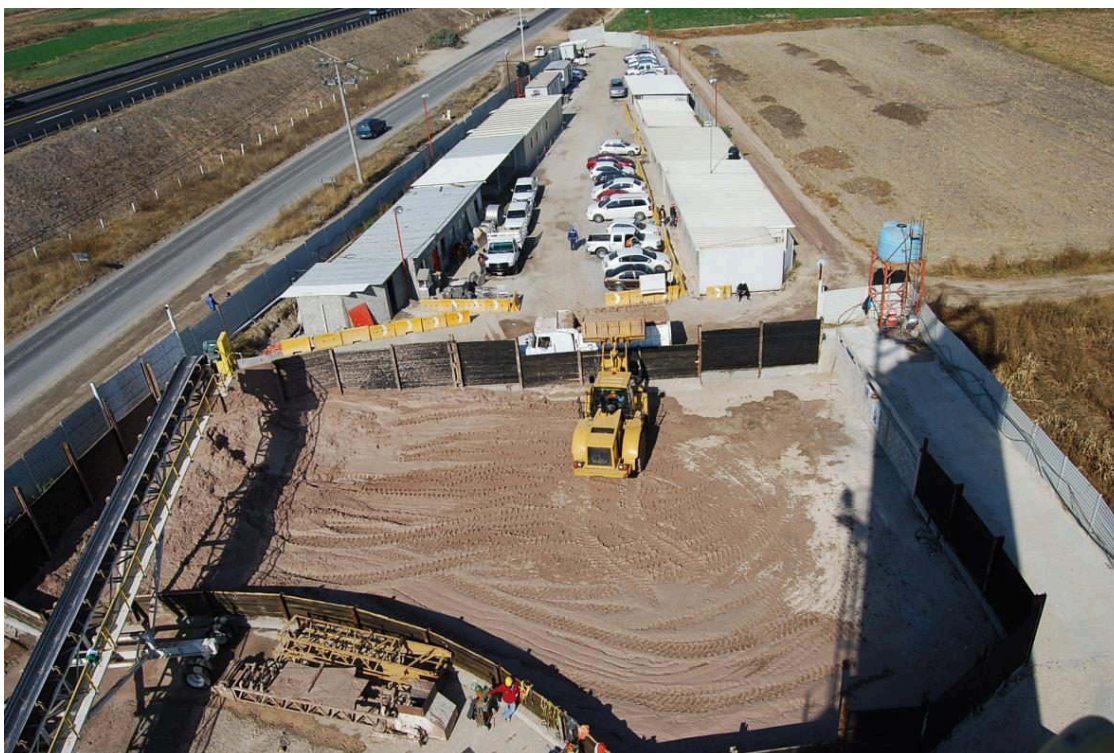


Figura 14.61. Dique de rezaga junto a la lumbrera

SERVICIOS: AGUA, VENTILACIÓN, ENERGÍA

El agua de enfriamiento corrió por una tubería victaulic de 4" (1,500 L/min, 90 m³/h) con contenedores de 34 m³, y el agua residual salió por una tubería de 6" con bombas Flygt de 58 y 140 HP y 50 L/s. La ventilación fue una turbina Zitrón de 31 m³/s en superficie, que entrega 26 m³/s en el frente a 3,500 m con manga de 1.61 m en cassettes de 100 m. La energía llegó con una acometida de 23 kV, transformadores de 1,000 y 225 kVA y cable de 13,200 V en carretes de 250 m en el back up.

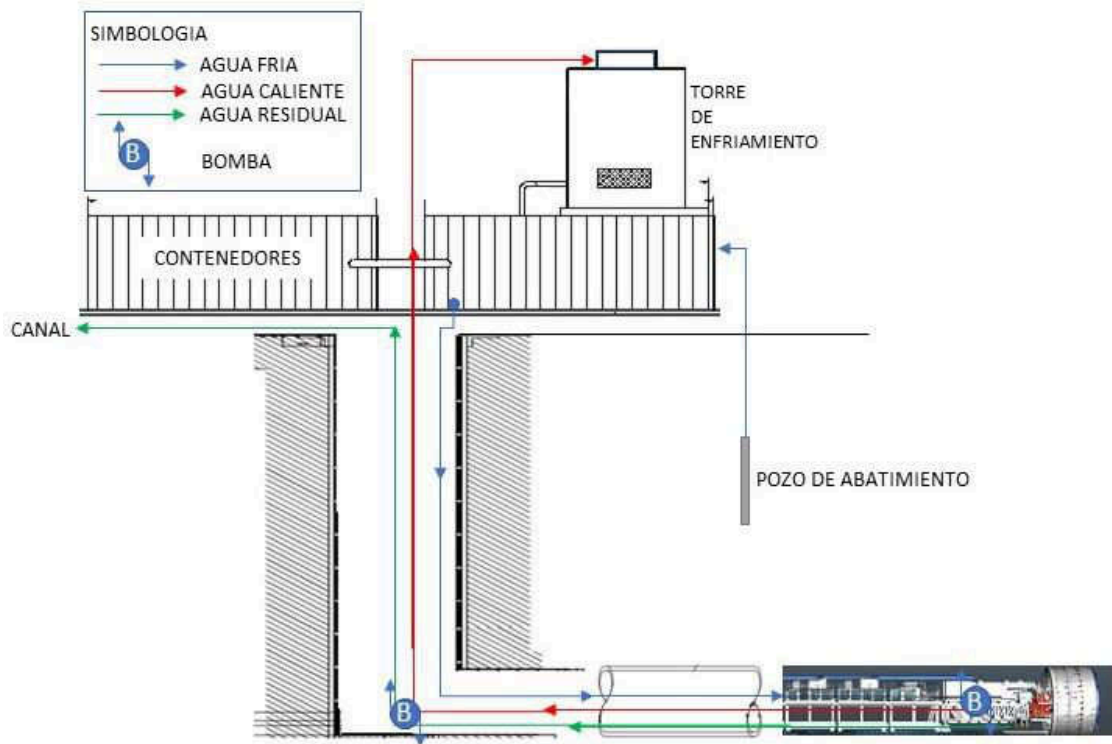


Figura 14.62. Ciclo de suministro y desalojo de agua de enfriamiento



Figura 14.63. Tuberías de enfriamiento y agua residual en el túnel

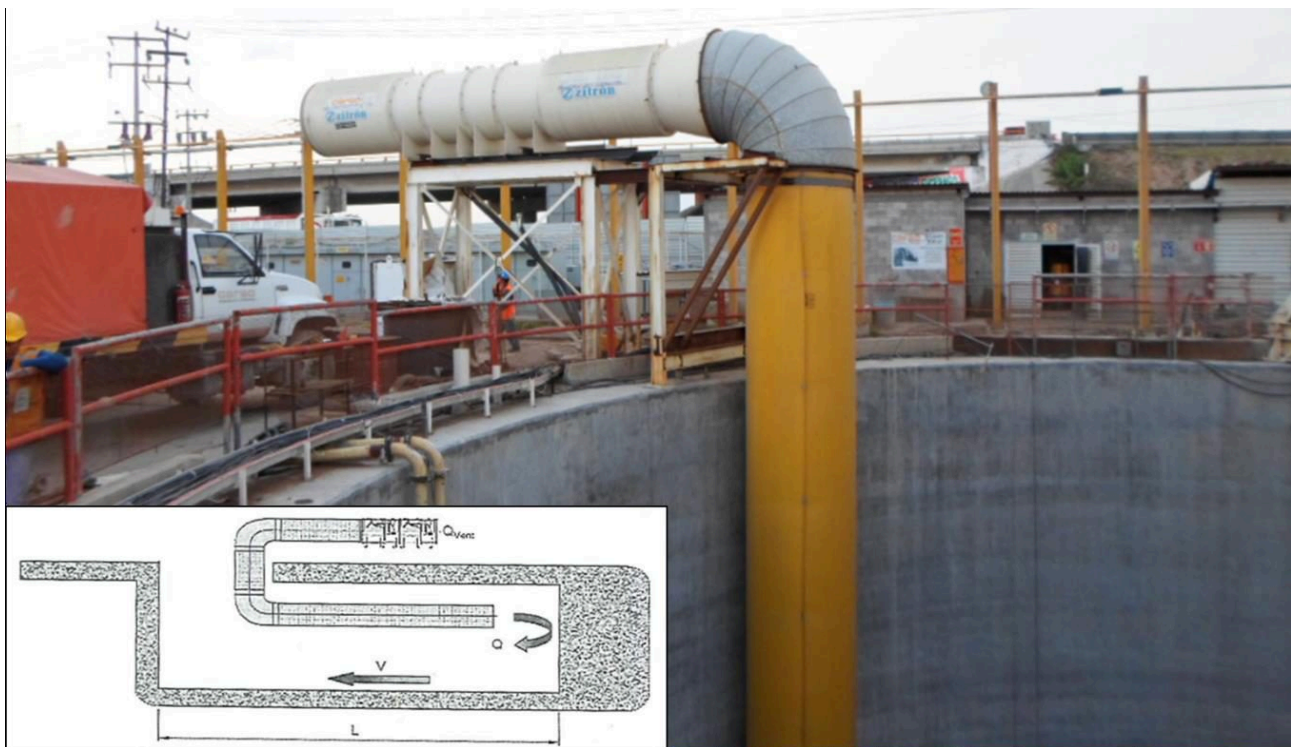


Figura 14.64. Turbina de ventilación en superficie junto a la lumbrera



Figura 14.65. Manga de ventilación y cassette en el túnel



Figura 14.66. Instalaciones en el túnel durante la excavación

Herramientas de corte: desgaste y consumo real

Para la clasificación general de herramientas y los modelos de predicción de vida útil, véase el capítulo 5. Aquí se reportan los datos reales del TEO.

TRAMO 3, MÁQUINA "HIDALGO"

La rueda llevó discos de corte de 17" con dureza MD-3/4 (52 a 54 HRC): 4 centrales dobles, 31 frontales y 9 periféricos sencillos, más 128 scrapers frontales y 60 periféricos. Se reemplazaban por desgaste del aro, con valores máximos permisibles distintos por zona y un máximo de 40 mm para scrapers. Cambiar un disco tomaba unos 30 minutos.

Sobre 6,060 anillos (9,108.63 m) hubo 259 intervenciones atmosféricas y el desgaste acumulado de los cortadores fue de 476.8 mm por km (233.7 mm en periféricos, 149.8 mm en frontales y 93.4 mm en centrales). Se cambiaron 944 piezas, es decir 103.6 por km. Por tipo de frente fueron 33.99 piezas por km en suelo, 154.82 en mixto y 386.92 en roca: la diferencia entre suelo y roca es de más de diez veces. Se usaron 6 juegos completos de scrapers en el tramo.

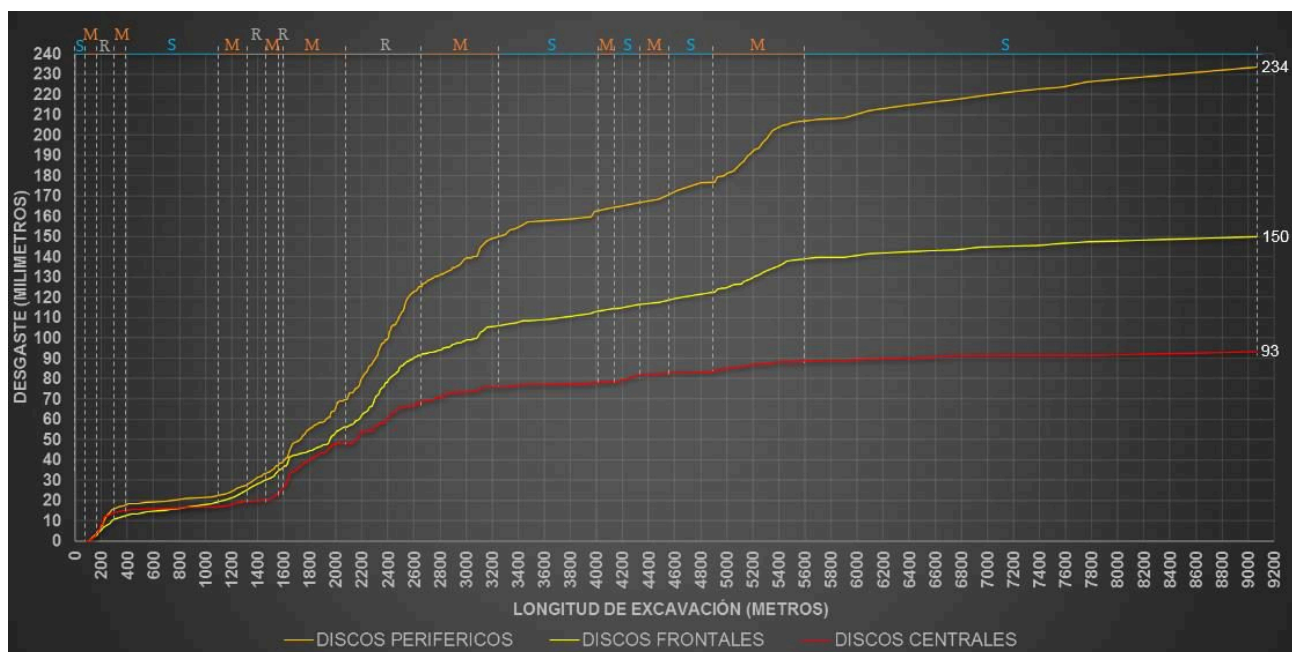


Figura 14.67. Piezas de corte cambiadas por kilómetro según el tipo de frente

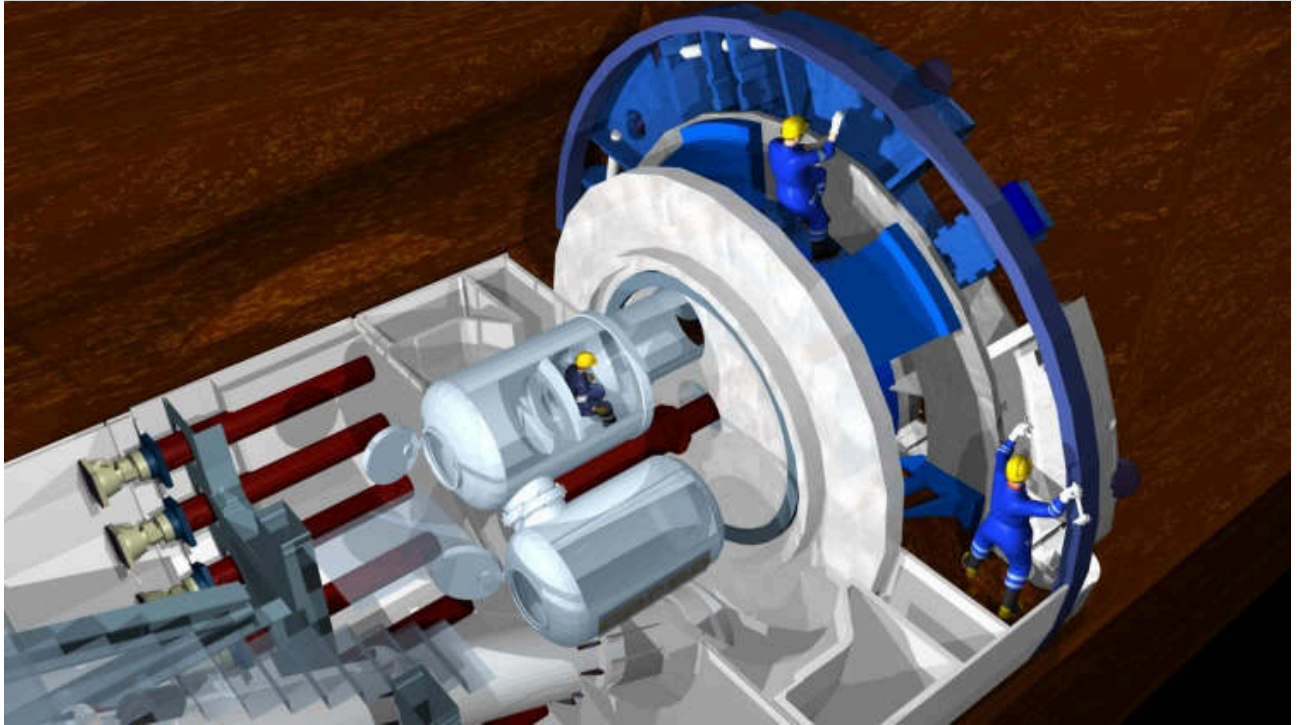


Figura 14.68. Intervención atmosférica en la rueda de corte

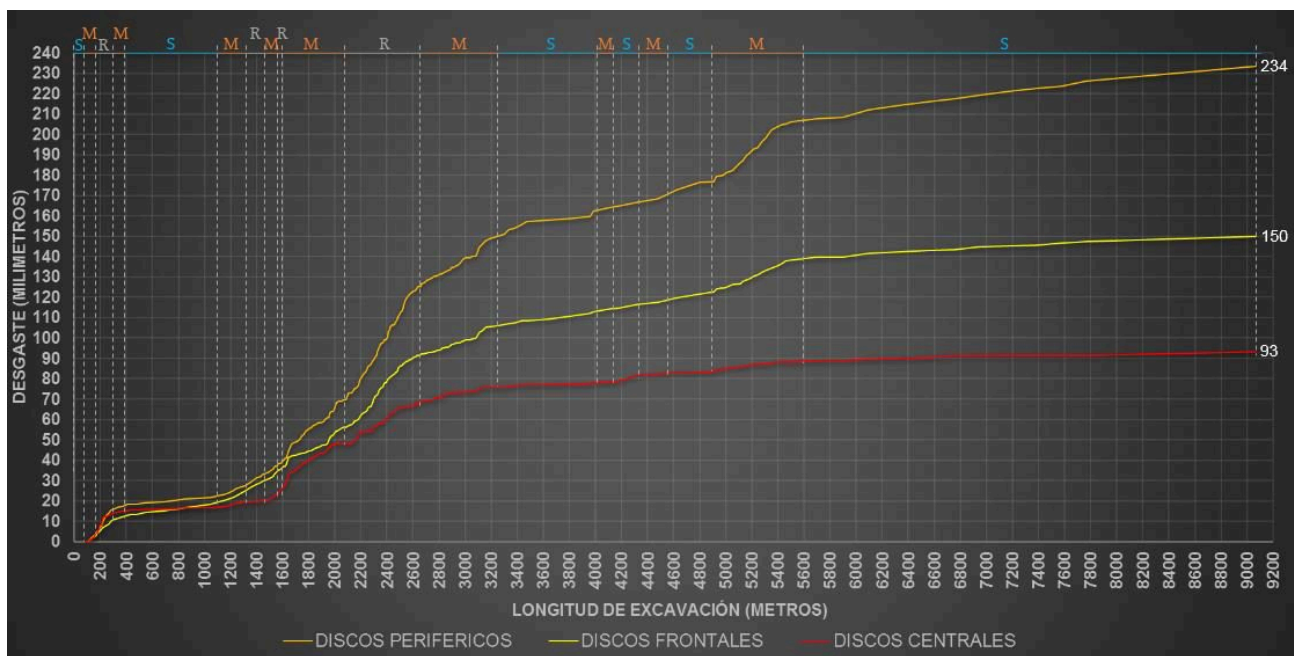


Figura 14.69. Desgastes acumulados de los cortadores del tramo 3 según su posición

TABLA 14.11. FRECUENCIA E INTERVALO DE LAS INTERVENCIONES ATMOSFÉRICAS DEL TRAMO 3

TIPO DE FRENTE	FRECUENCIA	DURACIÓN DE LA INTERVENCIÓN
Suelo	cada 116 anillos	5 h
Mixto	cada 13 anillos	12 h
Roca	cada 6 anillos	10 h

Las intervenciones se programaron en cuatro casos: inspección cada 100 anillos (prescindible si los parámetros eran normales), paros programados, empuje mayor o igual a 65,000 kN y torque mayor o igual a 6,000 kN·m. La aportación de agua en la cámara fue de 15 L/s en materiales poco permeables y de hasta 250 L/s en gravas y arenas; hasta 100 L/s se pudo intervenir a presión atmosférica. La cámara tiene 28 válvulas de 4" para desfogar.

TRAMO 5, CONSUMO REAL

TABLA 14.12. CONSUMO REAL DE HERRAMIENTAS DE CORTE EN EL TRAMO 5

TRAMO MÁQUINA	LONGITUD Y ANILLOS	INTERVENCIONES	HERRAMIENTAS PRINCIPALES USADAS	VIDA ÚTIL EN SITIO (HF TOTAL)
L17 a L18 Herrenknecht S-519	3.28 km; 2,153 anillos	30 (93 días)	225 (146 discos y 79 cinceles)	874.61 m³ por herramienta (196,787 m³ excavados)
L19 a L18 Robbins S-209	2.39 km; 1,591 anillos	27 (207 días)	368 (92 cinceles y 276 discos)	408.33 m³ por herramienta (150,264 m³)
L20 a L19 Robbins S-209	3.05 km; 2,034 anillos	sin sustituciones; desgaste mínimo	48 cinceles (rippers)	no sustituidos

En L17-L18 la rueda tenía 55 herramientas principales intercambiables, 144 scrapers frontales y 16 periféricos, y los cinceles se reemplazaron por discos hasta quedar solo discos desde la intervención 16. En L19-L18 la rueda tenía 44 herramientas, 122 scrapers frontales y 12 periféricos, y se empezó con rippers por las arcillas del inicio. En L20-L19 solo se encontraron arcillas lacustres consolidadas del Plioceno medio.

TABLA 14.13. VIDA ÚTIL EN SITIO POR ZONA GEOTÉCNICA, L17 A L18

ZONA	LONGITUD (M)	VOLUMEN (M³)	HF CINCELES (M³/CINCEL)	HF DISCOS (M³/DISCO)	HF TOTAL (M³/HERR.)
SS-01	439.20	26,349.72	287.45	416.60	371.12
SS-02	756.19	45,367.38	377.08	606.97	515.54

	LONGITUD ZONA (M)	VOLUMEN (M ³)	HF CINCELES (M ³ /CINCEL)	HF DISCOS (M ³ /DISCO)	HF TOTAL (M ³ /HERR.)
SS-03	1,447.64	86,850.70	451.17	653.97	586.83
SS-04	637.05	38,219.49	0	460.48	460.48

TABLA 14.14. VIDA ÚTIL EN SITIO POR ZONA GEOTÉCNICA, L19 A L18

ZONA	LONGITUD (M)	VOLUMEN (M ³)	HF CINCELES	HF DISCOS	HF TOTAL
SS-07	912.05	57,123.06	620.90	0	456.98
SS-06	250.37	15,680.92	0	198.49	198.49
SS-05	659.78	41,322.95	0	175.84	175.84
SS-04	576.97	36,136.68	0	495.02	495.02

La zona SS-05 (boleos, gravas y basalto masivo muy fracturado) fue la más agresiva: 175.84 m³ por disco, contra 460 a 650 m³ en las zonas de L17-L18 (cálculo propio con las tablas anteriores). El valor estimado en proyecto, unos 250 m³ en los materiales más abrasivos, queda en el orden de los 175 a 650 m³ medidos. Las herramientas cercanas al centro se desgastan menos y las periféricas más. Los modelos teóricos de vida útil se equivocaron entre 14 % y 199 %; los de menor error en L17-L18 fueron CSM modificado y Gehring modificado en SS-01 a SS-03 (-14.6 % a -35.1 % en Hf). Los tensoactivos alargan la vida de las herramientas, y conviene llevar una base de datos de causas de cambio. Hay un costo detrás: el consumo de herramientas puede ser de 20 a 30 % del costo de operación de una tuneladora.

Las Robbins traían desde el diseño cortadores con detección de desgaste, que pierden presión al llegar a su límite para avisar a la cuadrilla. Con 259 intervenciones atmosféricas y 944 piezas cambiadas en el tramo 3, y once veces más piezas por kilómetro en roca que en suelo, los datos indican que en el basalto habría convenido vigilar el desgaste de cada disco y parar según su estado, no cada cierto número de anillos.

DESGASTE DEL TORNILLO DE REZAGA EN EL TRAMO 3

El bloqueo del tornillo de rezaga en el frente mixto del tramo 3 tuvo una razón de fondo: la máquina era una EPB diseñada para trabajar en suelos con la cámara llena o semillena y presión de aire o de tierra para sostener el frente, con retiro de la rezaga por tornillo sin fin, porque se esperaban altas presiones hidrostáticas y sobre todo suelos y materiales

aluviales con poco tramo de roca. La rueda de una EPB no tiene cubetas que recojan los chips de roca; el material se acumula en la parte baja de la cámara y los primeros álabes del tornillo lo retiran. En el tramo 3 no había suelos finos ni presión de tierra en la cámara, se excavaba roca en modo abierto con muchos chips y ceniza, y eso dificultó el transporte en el tornillo. Se encontró basalto de unos 80 MPa y un índice de abrasividad Cerchar de 3, que en esa escala es muy abrasivo.

El resultado fue un desgaste excesivo que empezó en el frente y avanzó hacia atrás: la parte posterior de la rueda de corte, el borde inferior del escudo frontal, las carcassas y los álabes del tornillo y las partes de la motorización en contacto con el material. El atoramiento ocurre así: cuando se desgastan los álabes o la carcassa aumenta la luz entre ellos por la reducción del diámetro, se meten chips en ese espacio y, al juntarse muchos, acuña el tornillo y bloquean su giro en lugar de subir el material. El espacio nominal entre el hombro del álabe y la carcassa es de 8 mm al radio, y hay que cuidar que no crezca por desgaste de un lado o del otro.

Para evitarlo se probaron blindajes en álabes y carcassa. Las placas de Hardox 400 no dieron buenos resultados; las placas con revestimiento de carburo de cromo (Trimay), un material mucho más duro, sí. La solución más adecuada fue instalar "sietes" de carburo de cromo en los álabes y un recubrimiento duro hecho con pequeñas placas soldadas de manera uniforme en todo el diámetro interior de las carcassas; además se abrieron ventanas nuevas en las carcassas y se seccionaron para ampliar las zonas de inspección y reparación. El desgaste más importante se dio en los primeros metros del tornillo, donde el material entra.

Dato técnico: el fabricante reporta placas Hardox en el tornillo, con placas de desgaste removibles, como mejora posterior a los primeros problemas, y los directivos de Moldequipo informan que el Hardox 400 no funcionó bien en el tramo 3 y que lo que sí funcionó fue el carburo de cromo. Las dos cosas son compatibles: el Hardox fue el primer blindaje y el carburo de cromo, el definitivo.

Los directivos de Moldequipo, que lo dicen a título personal, recomiendan para un caso como el del tramo 3:

1. Elegir el inicio y el fin de la excavación de cada tuneladora con base en la geología y la geohidrología, y no en la distancia lineal, el derecho de vía o la disponibilidad de predios; si el presupuesto lo permite, usar máquinas distintas para geologías distintas, y si no, una equipada para la situación más crítica. Ninguna máquina será la más eficiente si debe excavar geologías muy diferentes.
2. En una EPB que debe excavar roca con frente mixto muy abrasivo, blindar con carburo de cromo álabes y carcasas, contar con doble guillotina (una abajo y otra arriba), poder abrir el tornillo longitudinalmente desde el interior de la máquina para dar mantenimiento preventivo, medir el desgaste con intervenciones programadas, por ejemplo cada 3 días, y tener puertos para inyectar aditivos.
3. Dar al tornillo eje central, el torque necesario para girar aun cargado de chips o gravas pesadas y una longitud suficiente para que los álabes entren a la cámara y jalen el material, y para manejar la presión máxima de excavación y bajarla hasta la presión atmosférica antes de descargar a la banda.
4. Equipar la banda con una tolva que almacene, bombee el agua y retire los finos que caigan, para que no se derramen sobre la zona donde se arma el anillo.
5. Evitar la entrada de roca fracturada con fragmentos mayores a la tercera parte del diámetro del tornillo, triturándolos en el frente con barras grizzly.
6. Lubricar el material de la cámara con espumas o polímeros inyectados directamente al frente para mezclarse bien, lo que también reduce el desgaste.
7. Ajustar los parámetros de operación (empuje, velocidad de la rueda y de los tornillos) a la experiencia del tramo: la velocidad de avance llegó a reducirse a 5 mm por minuto, con una rotación que evitara romper los discos por impacto, porque a más revoluciones de rueda o de tornillo, más desgaste.

El promedio de excavación más alto se logra evitando tiempos muertos por roturas, averías o reparaciones mayores; por eso se recomienda programar el mantenimiento preventivo desde la planeación y tener en la obra, antes de empezar, las refacciones de las intervenciones complejas, porque la refacción más cara es la que no se tiene en sitio. Este punto coincide con lo expuesto en la sección 14.12 sobre las refacciones. De las

recomendaciones, la primera es la de más alcance: define dónde empieza y termina cada máquina, y en el TEO ese reparto ya estaba hecho cuando se conocieron las condiciones reales (sección 14.3).

11

Rendimientos reales de excavación

TRAMO 3 POR SUBTRAMO

El rendimiento del tramo 3 se separa en tres tipos de frente, conciliados con las intervenciones atmosféricas: suelo (80 % o más de suelos finos o granulares), mixto y roca (80 % o más de basalto vesicular fracturado con RQD de 50 % o más).

TABLA 14.15. RENDIMIENTO GENERAL Y EFECTIVO DEL TRAMO 3 POR SUBTRAMO

SUBTRAMO	LONGITUD	ANILLOS	DÍAS CALENDARIO	DÍAS EFECTIVOS	REND. GENERAL	REND. EFECTIVO
L10-L11	3.114 km	2,072	1,189	464	2.69 m/día (1.74 anillos/día)	6.71 m/día (4.47 anillos/día)
L11-L12	2.815 km	1,873	717	321	3.93 m/día (2.61 anillos/día)	8.77 m/día (cálculo propio: 2,815/321)
L12-L13	3.178 km	2,115	342	209	9.30 m/día (6.18 anillos/día)	15.21 m/día (10.12 anillos/día)

TABLA 14.16. COMPOSICIÓN DEL FRENTE Y RENDIMIENTO EFECTIVO POR TIPO DE MATERIAL

SUBTRAMO	SUELO	MIXTO	ROCA	REND. EFECTIVO SUELO	REND. EFECTIVO MIXTO	REND. EFECTIVO ROCA
L10-L11	26 % (809 m)	45 % (1,404 m)	29 % (902 m)	11.55 m/día	6.75 m/día	4.85 m/día
L11-L12	57 % (1,603 m)	43 % (1,213 m)	0 %	10.61 m/día	7.13 m/día	sin roca
L12-L13	100 %	0 %	0 %	15.21 m/día	sin mixto	sin roca
Tramo 3				12.46 m/día	6.94 m/día	4.85 m/día



Figura 14.70. Rendimiento efectivo por tipo de frente en el tramo 3

La máquina alcanzó máximos de 20 anillos por día (30 m) en suelo, 15 en mixto y 10 en roca, con paros prolongados de hasta 3 meses y mínimos de 1 anillo por día. De los 2,276 días del tramo, solo 997 (44 %) tuvieron producción.

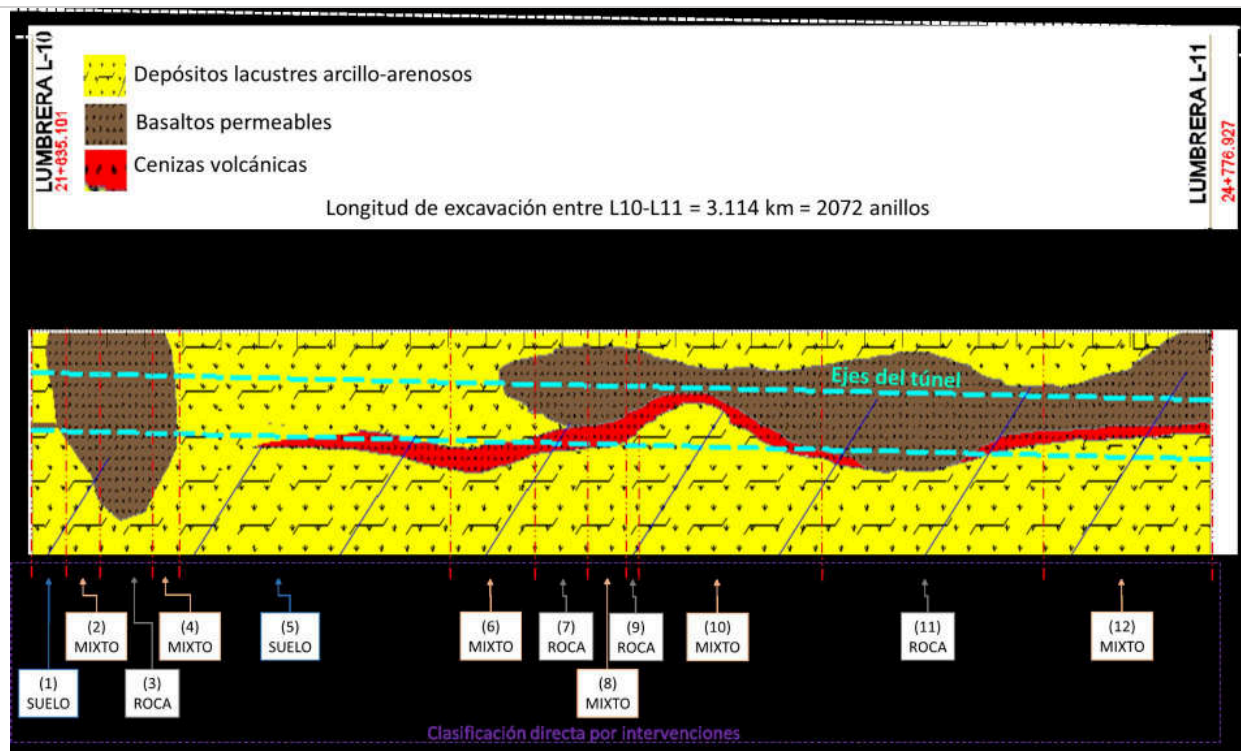


Figura 14.71. Perfil estratigráfico del subtramo L10-L11 con basaltos y limos arenosos

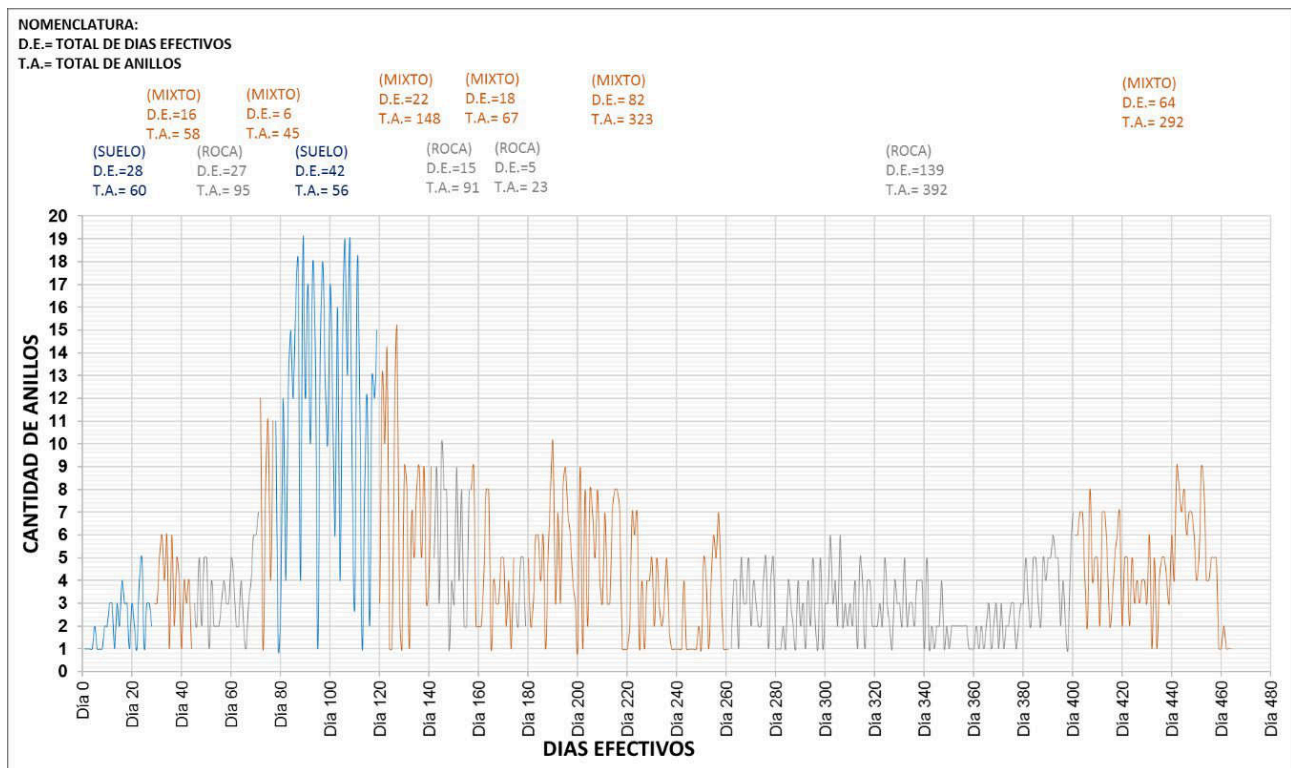


Figura 14.72. Rendimiento diario de excavación por días efectivos, L10-L11



Figura 14.73. Distribución del tipo de material en el tramo 3

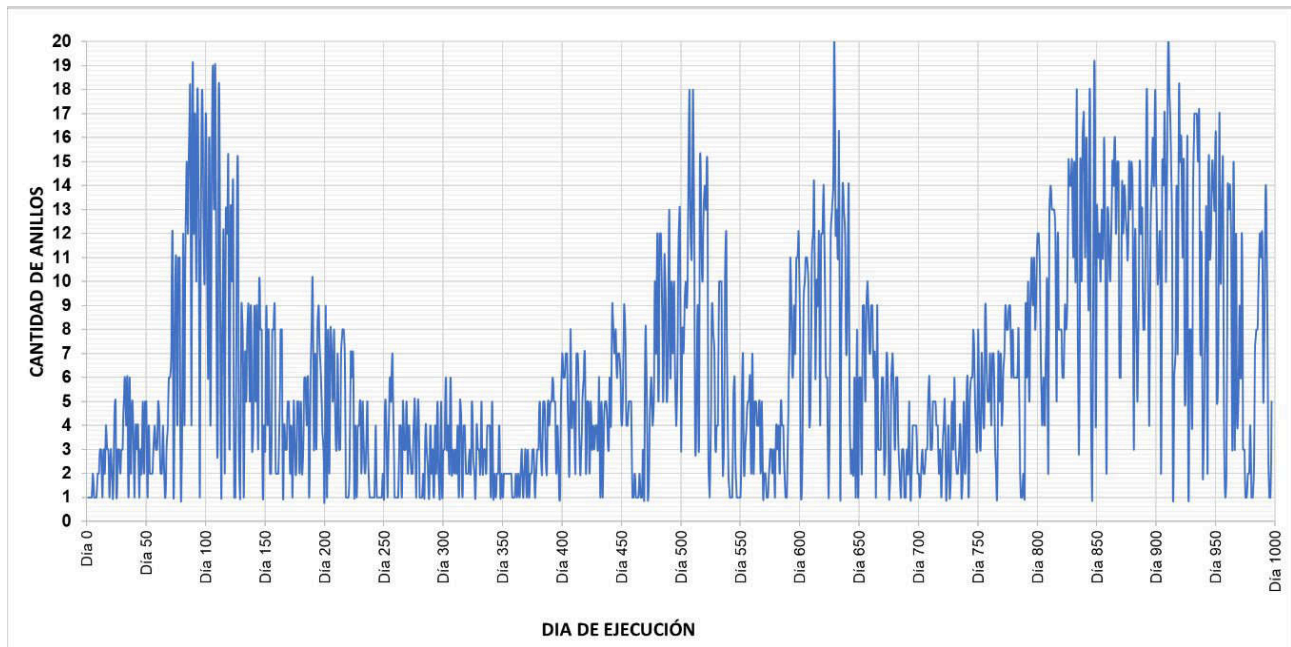


Figura 14.74. Producción diaria efectiva de anillos en el tramo 3

OTROS TRAMOS Y EXPECTATIVAS

El proyecto previó 400 m al mes por frente. En el tramo 3, el mejor rendimiento general (9.30 m/día en L12-L13, unos 280 m al mes) y el efectivo en suelo (hasta 15.2 m/día) superan esa expectativa en meses buenos, pero lo que cuenta es el promedio del tramo:

$$v = \frac{L}{t} = \frac{9108.63}{2276} = 4.0 \text{ m/día} \approx 122 \text{ m/mes}$$

donde v es el rendimiento promedio (m/día), L es la longitud excavada (m) y t es el tiempo entre el arranque y la llegada (días calendario). Es cerca de 30 % de la expectativa (cálculo propio). En el tramo 4, 10,200 m en unos 81 meses dan unos 125 m al mes, con récords de 528 m en un mes y de 30 m en un día; en el tramo 5, Robbins reporta 592.5 m en un mes. Los récords superan los 400 m al mes que se esperaban, pero fueron meses sueltos: el promedio de cada tramo anda en 120 a 125 m al mes.

12

Problemas y soluciones documentados (tramo 3)

El tramo 3 es también el que cuenta qué salió mal; las fechas de cada subtramo están en la sección 14.3.6.



Figura 14.75. Incidentes del tramo 3 entre 2012 y 2018

TABLA 14.17. INCIDENCIAS PRINCIPALES EN EL TRAMO 3 Y SU SOLUCIÓN

PROBLEMA	CAUSA	SOLUCIÓN APLICADA	EFFECTO
Bloqueos del tornillo sin fin	Boleos de roca de hasta 30 a 37 cm; abrasividad Cerchar de 2.5 a 4.5; huelgos de 7 a 25 mm	Lodo bentonítico y aire; limpieza manual de unos 5 días hábiles; barras <i>grizzly</i> en la rueda; "pasta"; sustitución de los dos tornillos por uno nuevo con banda horizontal y puertos de inyección (en L11)	53 % de los días de L10-L11 en roca fueron de incidencia

PROBLEMA	CAUSA	SOLUCIÓN APLICADA	EFFECTO
Daño a rueda en el anillo 1014	Empuje de 70,040 kN, mayor al límite que la fuente cita para ese tramo (45,000 kN, distinto del máximo de 65,000 kN de las intervenciones programadas), en frente mixto-roca	Retirar 4 discos centrales dobles y housings; soldar nuevos housing, barras mezcladoras y soldadura antidesgaste	Paro prolongado
Daño a rueda en el anillo 1293	Bomba piroclástica de unos 3 m con RQD 100 %; empuje de hasta 61,000 kN	Demoler parcialmente la roca con barrenos de 1¼" y agente expansivo DEXPAN; cambiar 3 placas Hardox y 5 housings fisurados	Las dos reparaciones sumaron 68 días calendario (6 % del tiempo)
Desgaste de cepillos del faldón	Frentes mixtos, vibración, agua a 2.0 a 2.5 bar con nivel freático de 10 a 25 m sobre la clave	5 cambios (3 en excavación y 2 en lumbreras L11 y L12), anillo metálico o recubrimiento de acero en dovelas, 12 pozos de bombeo de 200 L/s, sello con espuma de poliuretano	17 días en total
Frente con mucha agua (anillo 581)	Aportación de 250 L/s en suelo arenoso	Única intervención hiperbárica del tramo (136 inmersiones, presión de 2.03 bar, cake de lodo bentonítico)	Tiempo efectivo de 110 min por inmersión

Los dos daños a la rueda sumaron 68 días calendario, el 6 % del tiempo del tramo. El primero ocurrió con un empuje mayor al permisible en frente mixto-roca; el segundo, contra una bomba piroclástica de unos 3 m, que se fracturó con agente expansivo, sin explosivos.

Las causas combinaron la heterogeneidad del terreno con decisiones operativas: antes del segundo daño hubo picos de torque sin que se detuviera la máquina. Hubo también cambios de diseño sobre la marcha: barras *grizzly* en las ventanas de la rueda; una "pasta" de bentonita con arenas para frentes de roca, inyectada a 30 m³ por anillo; y en la L11 un tornillo único con puertos de inyección en lugar de los dos originales. Se aprovechó el paso por esa lumbrera porque ahí había espacio para armarlo.

La tuneladora fue la mejor elección pese a los daños, y los imprevistos más importantes fueron el daño de la rueda y del tornillo. La parte discutible es la operación anterior al segundo daño: hubo picos de torque sin que se detuviera la máquina, y esa es una decisión de turno, no de diseño. Con 997 días productivos sobre 2,276, parar a tiempo con un torque fuera de rango habría salido más barato que 68 días de reparación. El fabricante agrega dos causas de fondo: la autorización de un precio por cada intervención hiperbárica, que tardó al menos tres meses porque nunca se había hecho en el país, y la falta de refacciones en sitio, que alargó los paros. Son causas de contrato y de logística, no de ingeniería del frente.

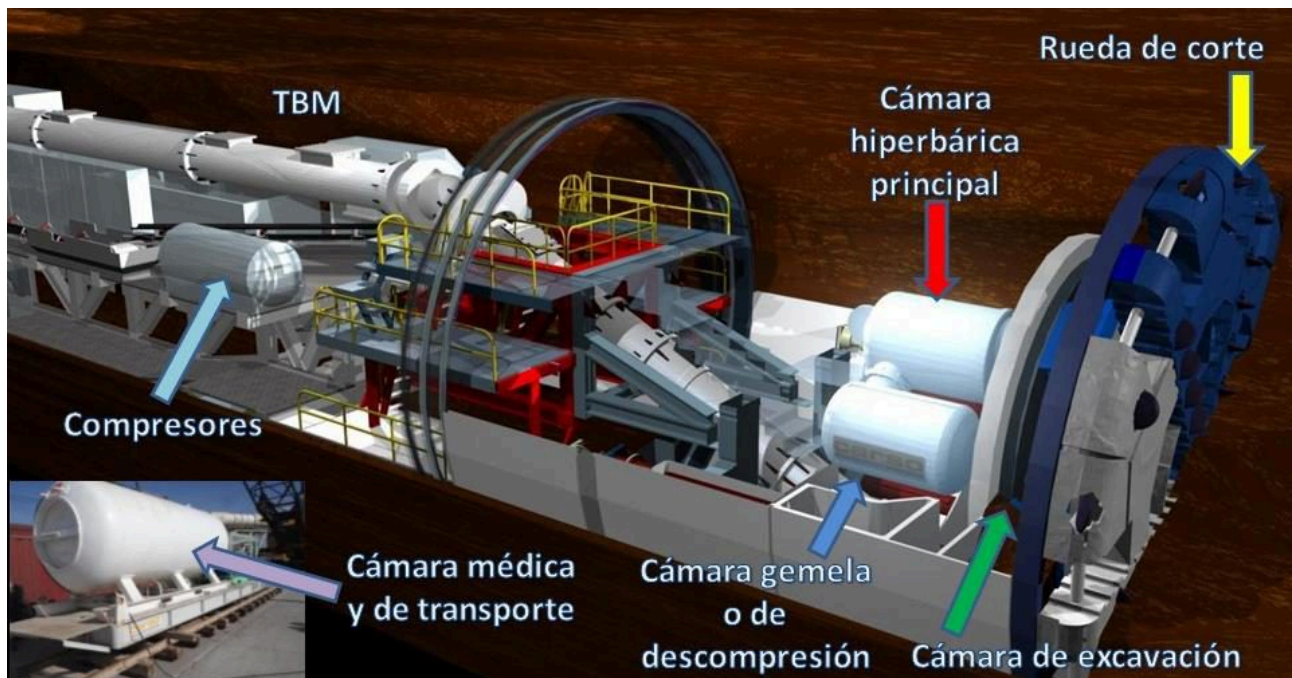


Figura 14.76. Equipo para intervenciones hiperbáricas

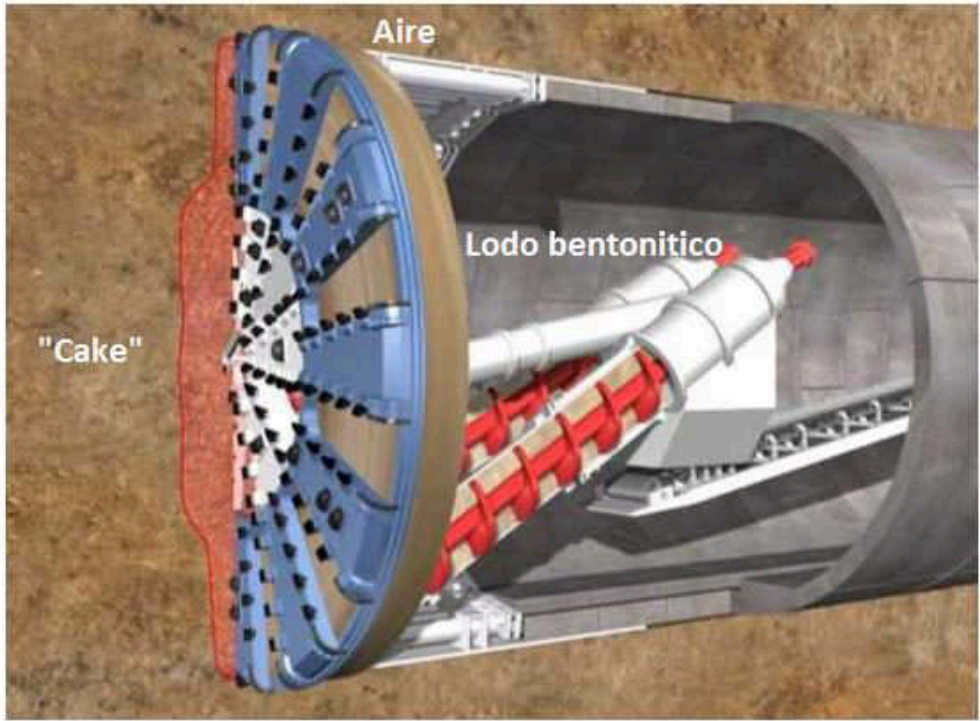


Figura 14.77. Formación del "cake" de lodo bentonítico y aire comprimido frente



Figura 14.78. Colocación de drenes de medición en el portal de lumbrera

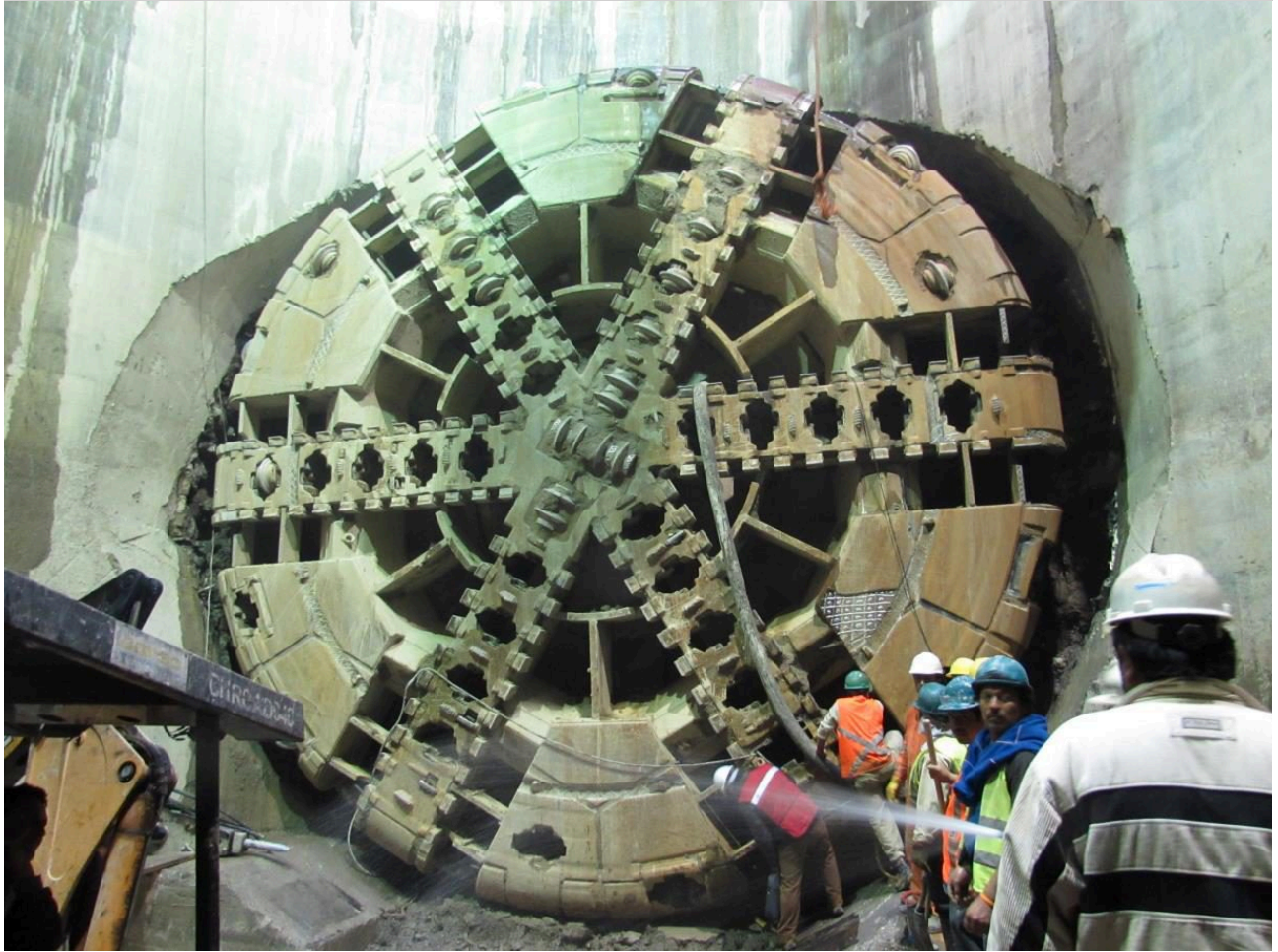


Figura 14.79. Rueda de corte a la salida de la lumbrera L11 con desgaste

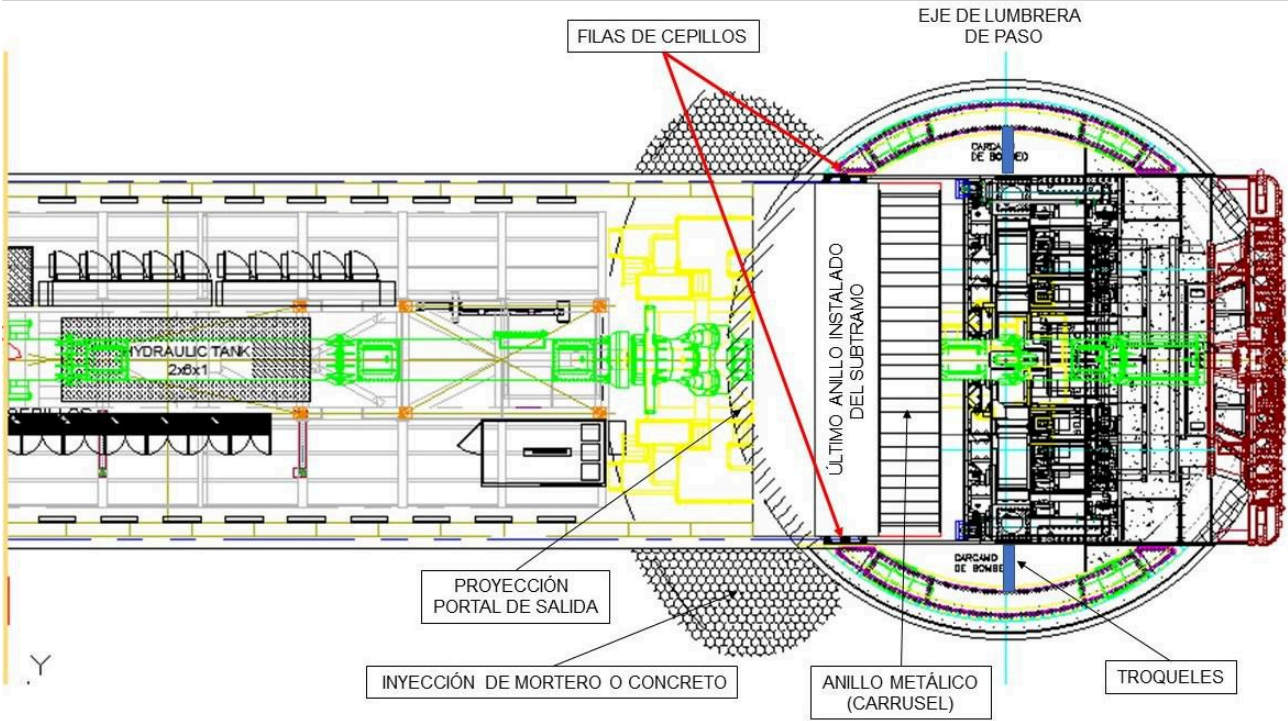


Figura 14.80. Posición de la tuneladora en la lumbrera para el cambio de cepillos

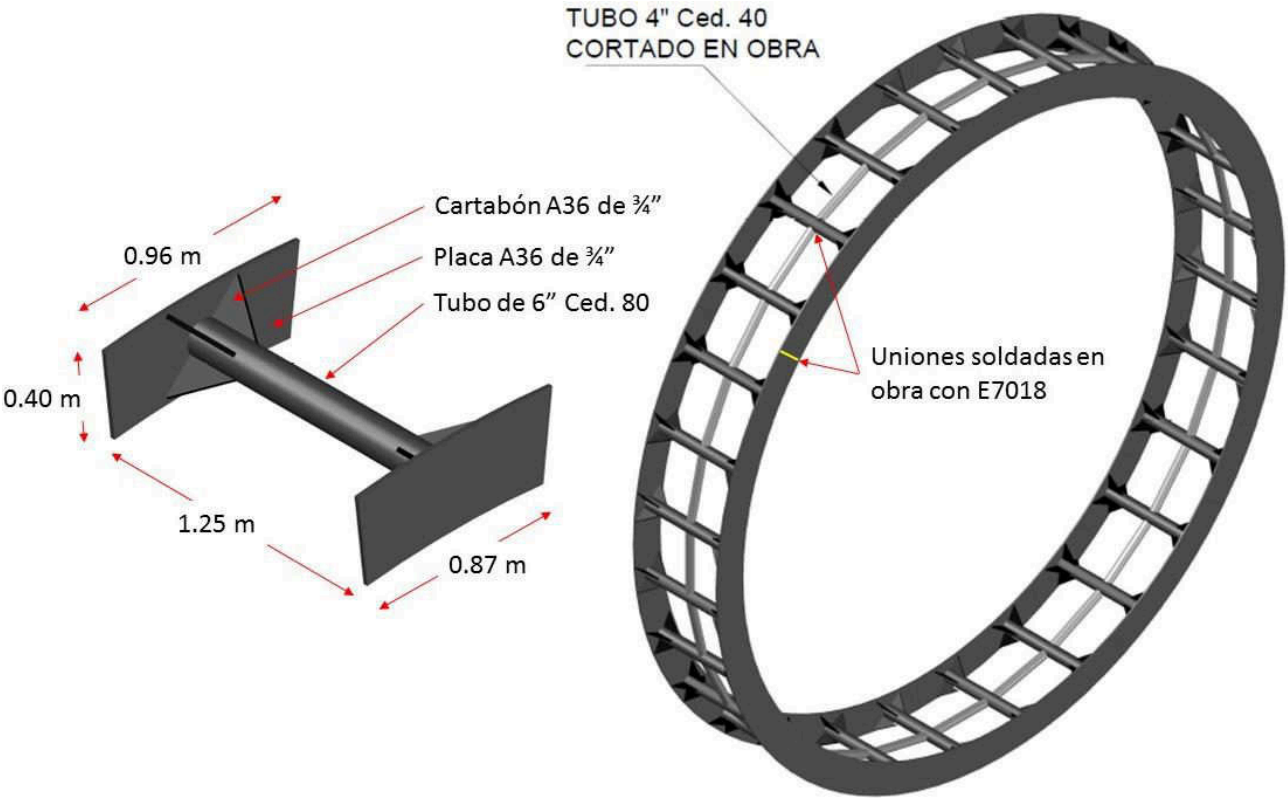


Figura 14.81. Anillo metálico o carrusel fabricado para el cambio de cepillos



Figura 14.82. Boleos de roca que bloquearon el tornillo sin fin

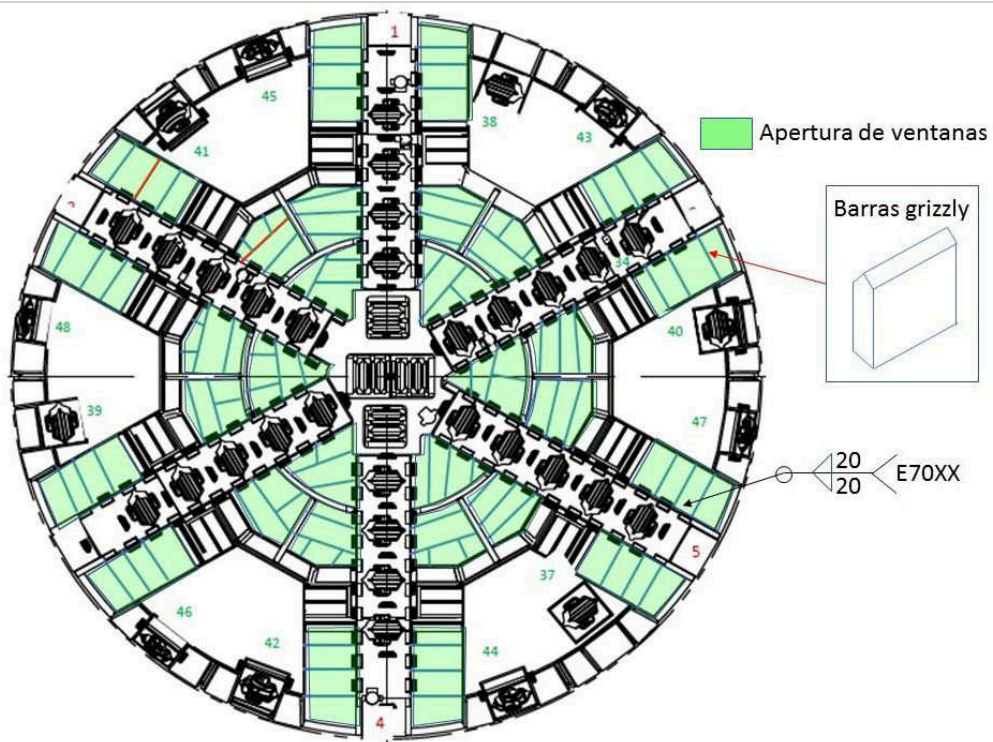


Figura 14.83. Barras tipo grizzly soldadas a las ventanas de la rueda de corte

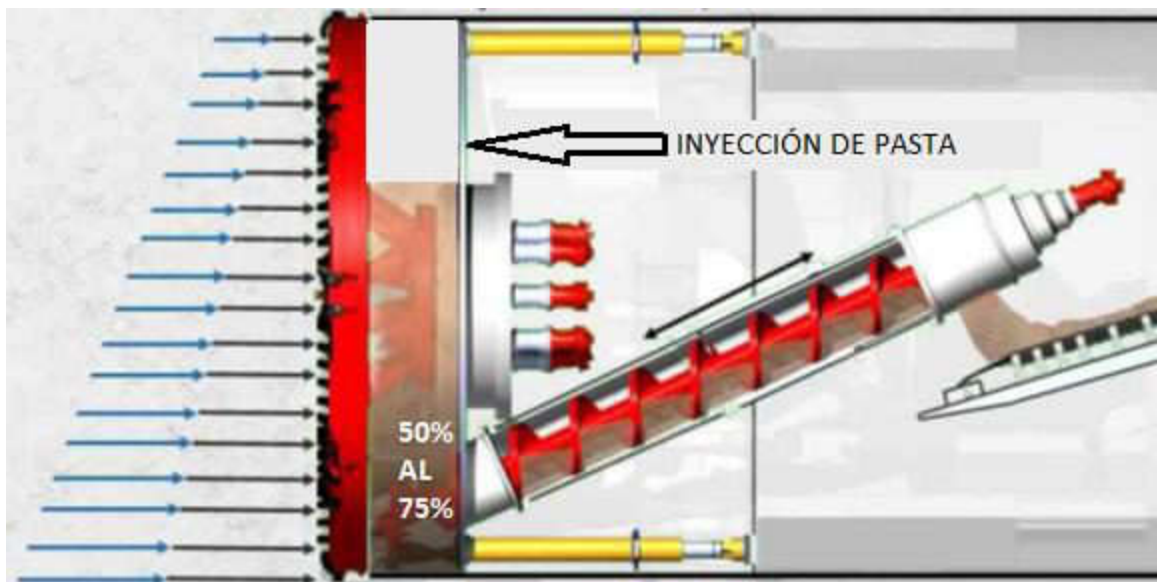


Figura 14.84. Inyección de "pasta" al frente para acondicionar frentes de roca

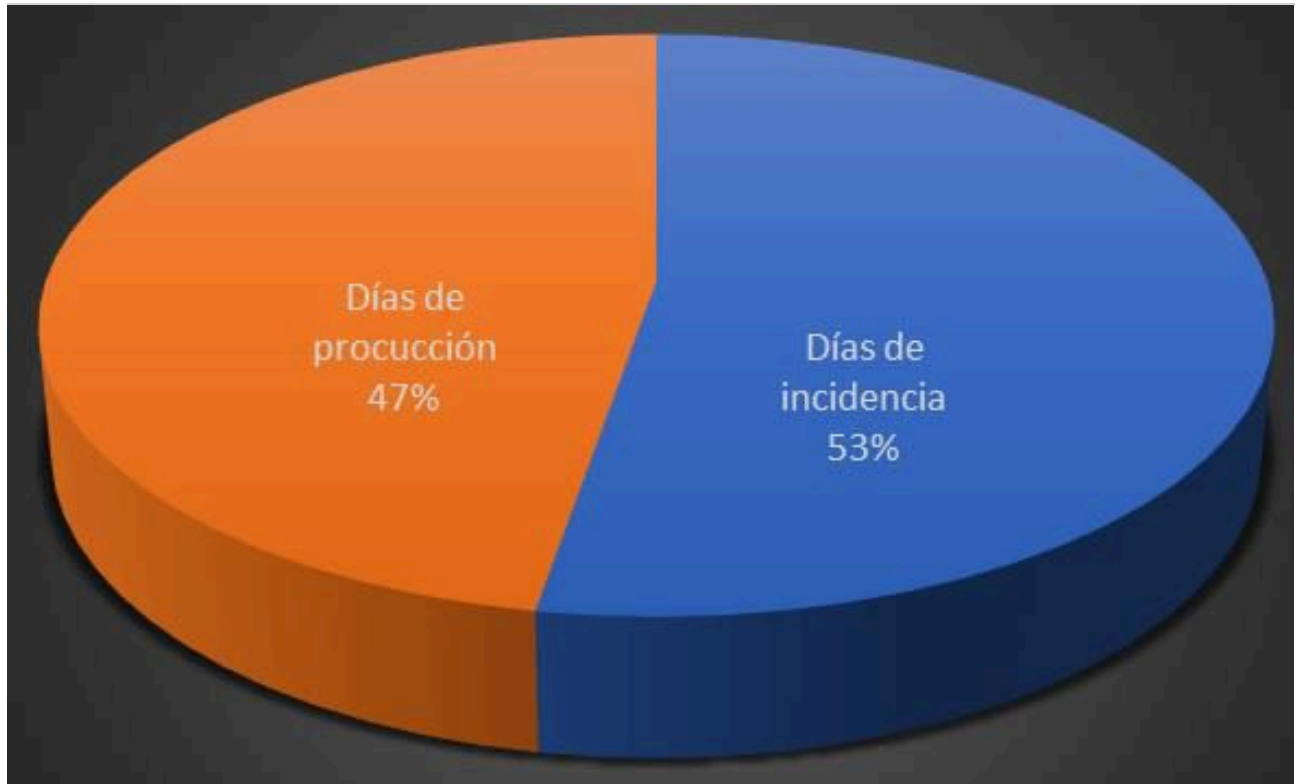


Figura 14.85. Comparación entre días de producción



Figura 14.86. Daño en un cortador central de la rueda



Figura 14.87. Desgaste de hasta 50 mm en el cuerpo de la rueda

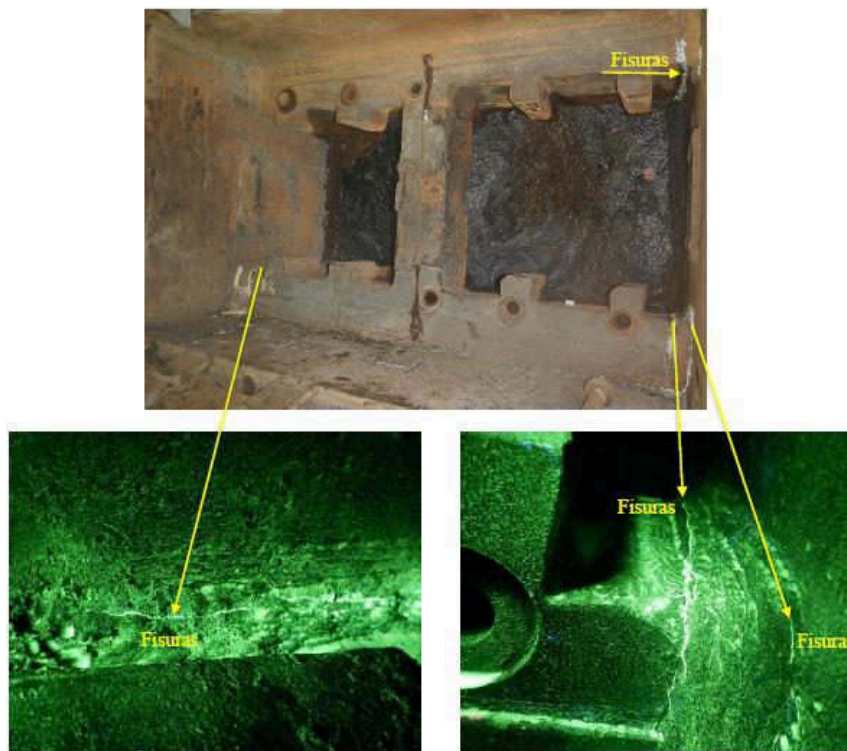


Figura 14.88. Inspección por partículas magnéticas de los housing con fisuras

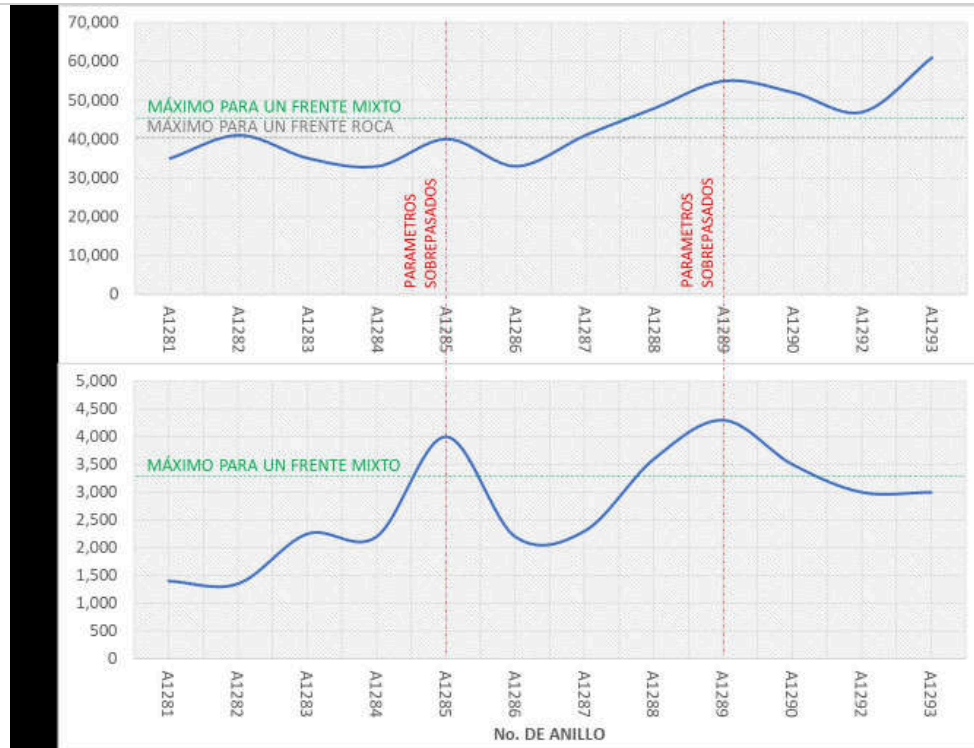


Figura 14.89. Fuerza de empuje y torque sobrepasados antes del segundo daño

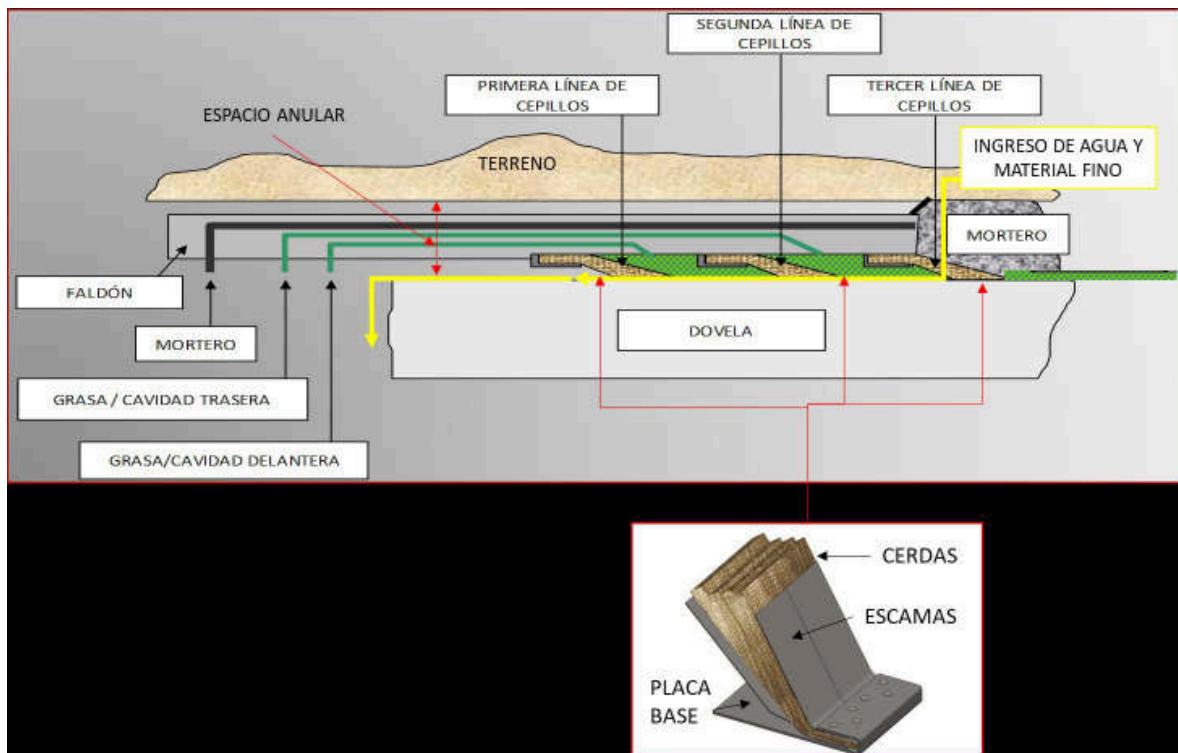


Figura 14.90. Cepillos del faldón con tres líneas y cámaras de grasa

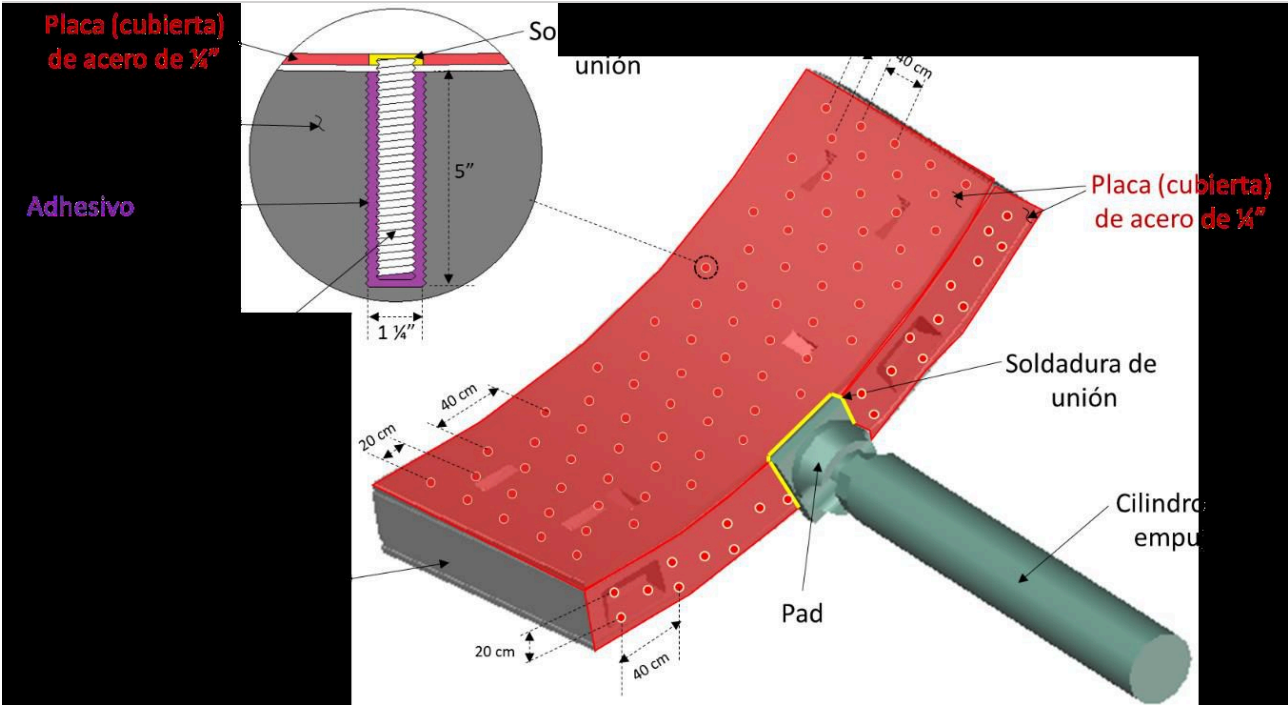


Figura 14.91. Recubrimiento metálico de dovelas con placa y varilla roscada para el anillo

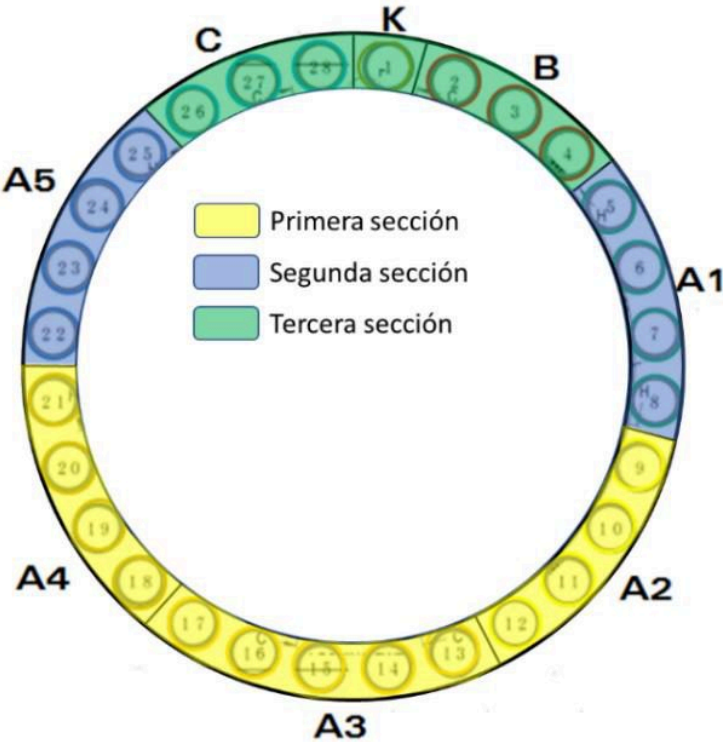


Figura 14.92. Secuencia de reemplazo de cepillos por secciones de dovelas

PASO POR LUMBRERA

Pasar por una lumbrera era, en sí, una operación de taller. Para que la TBM cruce una lumbrera de paso se mejoran los portales y se construyen dos losas de fondo de 350 kg/cm² (la 1 con cárcamos y la 2 como cuneta de arrastre con rieles). Se avanza hasta dejar la rueda al borde del muro, se cambian los 48 cortadores y 188 scrapers y se renueva el blindaje Hardox (en L11 se sustituyeron todas las placas y 37 knife bits con soldadura E7018). Se monta el carrusel y se cambian los cepillos con prueba de líquidos penetrantes. Luego se construye un tímpano de concreto con sello de neopreno en el portal de entrada y se arma un "túnel falso" con dovelas rechazadas, engrapadas con canal de 8" desde 10 anillos antes hasta 10 anillos después. Los cambios de cepillos sumaron 17 días en cinco ocasiones.

13

Auscultación del revestimiento: anillo instrumentado y convergencias

Además de los inclinómetros y piezómetros de las lumbreras, el TEO instrumentó el propio revestimiento primario. El departamento de Instrumentación de COMISSA instaló en los tramos 3 y 4 anillos instrumentados y sistemas de convergencias automatizados, con un fin concreto: confirmar las hipótesis del diseño comparando lo medido con lo estimado en proyecto, es decir, la presión de tierra y de agua y el empuje de los gatos sobre los anillos, la deformación del revestimiento, los asentamientos y los niveles piezométricos, y seguir el comportamiento a largo plazo de la estructura.

El sistema de auscultación de la etapa de construcción es el tercero del proyecto, después del de la ingeniería básica y el del proyecto ejecutivo. Su definición partió de un proceso de ingeniería que siguió estos pasos:

-
1. Definir las condiciones del proyecto a partir del diseño y de la instrumentación ya instalada.
 2. Definir los nuevos objetivos del sistema para la etapa de construcción.
 3. Seleccionar las variables que se iban a medir.
 4. Definir umbrales de comportamiento esperado.
 5. Establecer y anticipar las medidas y soluciones a los problemas que se detectaran.
 6. Definir los instrumentos apropiados.
 7. Formar un equipo de trabajo y procedimientos para recoger las lecturas en los distintos frentes.
 8. Definir los procedimientos de instalación, procesamiento e interpretación de la información.
 9. Precisar los periodos de entrega de la información del monitoreo.

Las variables clave, comunes a los proyectos de túnel, son las convergencias, divergencias y diámetros; los desplazamientos horizontales y verticales de puntos internos y de superficie; las presiones de poro y los niveles piezométricos; los esfuerzos y las deformaciones de las estructuras; y las variables de carga. Normalmente se usa un instrumento por variable, con excepciones como la piezocelda, que combina un sensor de presión con uno piezométrico para obtener las presiones del subsuelo y parámetros geotécnicos como el coeficiente de empuje en reposo K_0 .

En las lumbreras se instalaron inclinómetros en terreno natural y en los muros Milán, pozos de observación y piezómetros abiertos tipo Casagrande y eléctricos para el nivel freático y la presión de poro durante el paso de la tuneladora, extensómetros de barra y magnéticos para los desplazamientos diferenciales del terreno a profundidad e instrumentación topográfica. En los frentes se colocaron, entre otros, piezómetros de cámara extendida, para observar las presiones y la recuperación del nivel freático en el frente de excavación, extensómetros magnéticos y piezoceldas. En el túnel, para verificar el revestimiento primario de dovelas y el definitivo, se usaron celdas de presión en el perímetro del anillo y en su cara exterior, para garantizar el contacto con el terreno; deformímetros para concreto, que miden la deformación longitudinal y transversal de las dovelas; deformímetros para el acero de refuerzo; crackmeters en algunos casos para la

evolución de las juntas entre dovelas y de algunas grietas; instrumentación topográfica para convergencias, divergencias y diámetros; y un sistema automatizado de convergencias para seguir la deformación en etapas tempranas, en la zona de los gantries de la tuneladora. Las lecturas se tomaron de manera manual y se repartieron en tres frentes de trabajo: uno para los tramos 1, 2 y 5, otro para los tramos 3 y 4, y otro para el tramo 6, con los mismos criterios de instalación, monitoreo y reporte. Es el marco general del que forman parte el anillo instrumentado y el sistema de convergencias que se explican a continuación.

EL ANILLO INSTRUMENTADO

El anillo del TEO es universal, de siete dovelas (A1 a A5, B y C) más la llave K, de 40 cm de espesor, con concreto clase I resistente a sulfatos de 500 a 550 kg/cm² a 28 días y acero de refuerzo de $f_y = 4,200$ kg/cm². En el anillo instrumentado se equiparon cuatro dovelas, A1, A3, A5 y K, con cinco instrumentos cada una: una celda de presión de tierra, dos deformímetros de acero (lecho superior e inferior) y dos deformímetros de concreto (también en ambos lechos). Son 20 instrumentos por anillo, y cada uno lleva una clave como CELPD-T4-A819-A3-10: tipo de instrumento, tramo, número de anillo, dovela y consecutivo. El anillo 819 del tramo 4 es el que la tesis usa como ejemplo, y las posiciones del anillo instrumentado en el túnel fueron la U-7 y la U-21, elegidas porque las dovelas instrumentadas quedan en la cubeta, la clave y los dos hastiales.

Los instrumentos son de cuerda vibrante, de la marca Geokon. La celda de presión es el modelo 4820 (rangos de 350 kPa a 5 MPa, precisión de ± 0.1 % del rango, dos placas de acero inoxidable con fluido y un transductor); el deformímetro de acero es el 4150 (3,000 $\mu\epsilon$, resolución de 0.4 $\mu\epsilon$, base de 51 mm) y el de concreto, el 4200 (3,000 $\mu\epsilon$, resolución de 1 $\mu\epsilon$, base de 153 mm). Cada celda llega con su ficha de calibración, que da la presión barométrica, la temperatura, la lectura inicial y el factor de calibración.

Todo se instala antes de colar la dovela. La celda se amarra al acero con alambre recocido y separadores, y se cubre su cara sensible con cinta para que el colado no la dañe. El deformímetro de acero se suelda por puntos a una cara del refuerzo que antes se desbasta

con esmeril; el de concreto se amarra al armado. Los cables se agrupan en una caja galvanizada en el lecho interior de la armadura para poder leer la dovela una vez en el túnel, y antes de cada paso se verifica el instrumento con la consola de lectura.

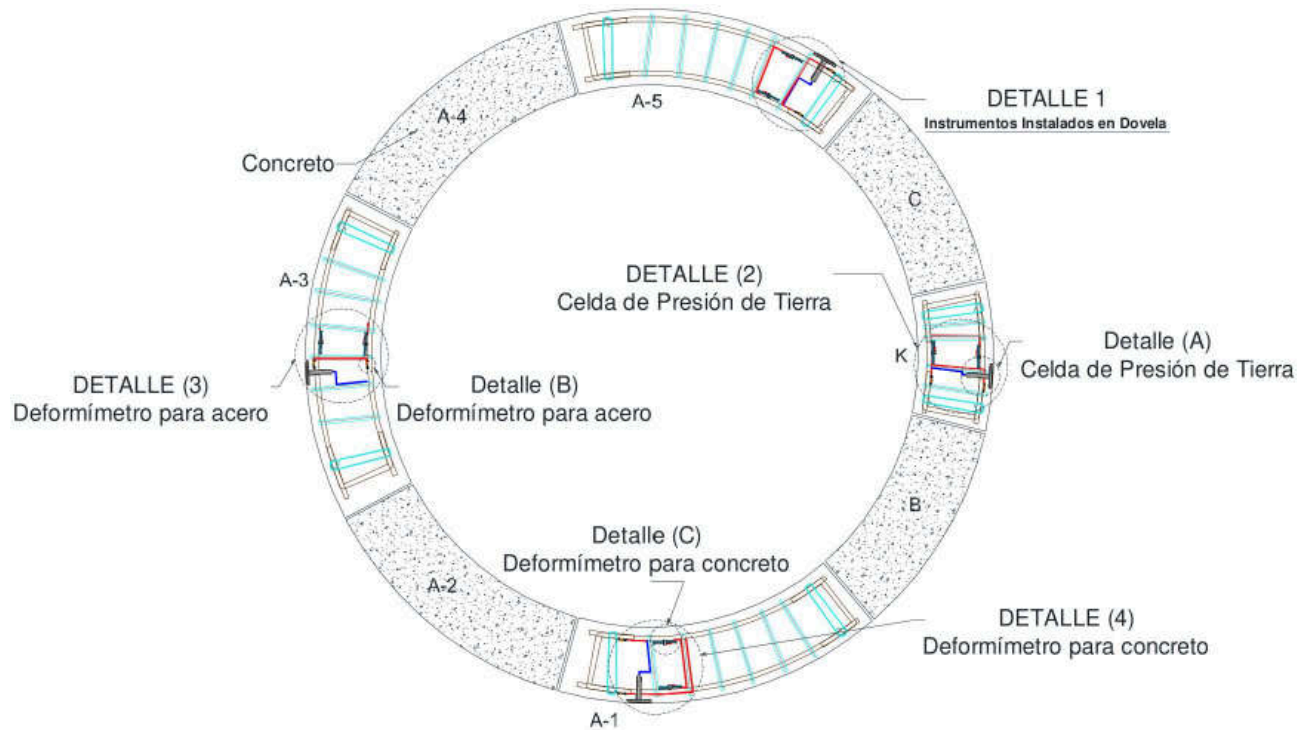


Figura 3. AREGLO DE INSTRUMENTOS EN ANILLO INSTRUMENTADO

Figura 14.93. Arreglo de instrumentos en las dovelas del anillo instrumentado

CÓMO SE CALCULA LA PRESIÓN DE LA CELDA

La consola entrega la frecuencia de vibración en dígitos (Hz^2 dividido entre 1000) y la temperatura. La presión se obtiene con la calibración de fábrica:

$$P = G (R_0 - R_1) + K (T_1 - T_0)$$

donde P es la presión sobre la celda (kPa), G es el factor de calibración (kPa/dígito), R_0 y R_1 son la lectura inicial y la lectura del día (dígitos), K es el factor térmico (kPa/°C) y T_0 y T_1 son la temperatura inicial y la del día (°C). La presión que realmente recibe el anillo es la diferencia entre la lectura del día y la lectura cero tomada al colocar el anillo:

$$P_t = P_n - P_i$$

donde P_t es la presión que el terreno ejerce sobre el anillo (t/m^2), P_n es la presión de la lectura n (t/m^2) y P_i es la presión de la lectura cero (t/m^2). Para la celda de la dovela A3 del anillo 819, con $G = 0.1720$ kPa/dígito y $K = -0.0265$ kPa/°C, la primera lectura del monitoreo, el 3 de octubre de 2013, fue de 6,978.9 dígitos a 24.3 °C, y la lectura inicial de referencia, de 8,826.40 dígitos a 18.7 °C:

$$P = 0.1720 (8826.40 - 6978.90) + (-0.0265) (24.3 - 18.7) = 317.77 - 0.15 = 317.62 \text{ kPa} = 32.38 \text{ t/m}^2$$

Restando la lectura cero de ese día, de 6.49 t/m^2 , queda $P_t = 32.38 - 6.49 = 25.89$ t/m^2 sobre la dovela. La tesis grafica esa presión contra el tiempo desde octubre de 2013 hasta noviembre de 2014 para el anillo 819 del tramo 4 (L-17 a L-16).

Dato técnico: el anillo 819 se ubica en el tramo 4 entre la L-17 y la L-16 según la gráfica de la tesis, mientras que las conclusiones hablan de ejercicios en los subtramos L-16 a L-15 (tramo 4) y L-10 a L-11 (tramo 3). Los datos del anillo 819 sirven como ejemplo de procedimiento, no como una serie completa de un subtramo.

SISTEMA DE CONVERGENCIAS AUTOMATIZADO

El sistema de convergencias mide cómo cambia la forma del anillo. Cada una de las ocho dovelas (A1 a A5, B, C y K) lleva un inclinómetro de dos ejes (*tiltmeter*) de RST Instruments, con rango de $\pm 15^\circ$ y resolución de 2 segundos de arco, fijado en el centroide de la dovela con dos tacos expansivos de $\frac{1}{4}$ ". Los ocho sensores se conectan en serie con cable de cuatro conductores, canalizado en poliducto dentro de una cavidad triangular que se forma con el biselado de las juntas entre dos anillos, y llegan a un registrador de datos CR800 programado con el software LoggerNet. Cada sensor va dentro de una caja de acero para protegerlo. La precisión del sistema es de unos 1 mm de convergencia típica.

El sistema acompaña al anillo desde que se instala hasta que sale de la zona de los gantries de la tuneladora, donde se aloja el equipo de potencia, el tanque de mortero, la cabina del operador y los soportes del tornillo. Entonces se retira junto con el registrador, se limpian los sensores y se descargan los datos en una computadora portátil; el programa

Geoviewer los convierte en un polígono de deformaciones. Al comparar el polígono inicial con el final, se determinan la convergencia y la divergencia mayores: en el ejemplo de la tesis aumentó el diámetro horizontal y disminuyó el vertical. La mayor deformación ocurre mientras pasan los carros de la tuneladora sobre el anillo; después de su paso, las velocidades de deformación bajan de forma considerable. El reporte final compara la deformación diametral del sistema con la que da la topografía.

Esta instrumentación tiene un límite: depende de que el personal esté capacitado, de las calibraciones de los equipos y de seguir los parámetros del proveedor, porque los instrumentos se afectan con movimientos simples. El anillo mide lo que el terreno le hace a la dovela, y esa información permite comparar el diseño del revestimiento con su comportamiento real tramo por tramo, un insumo útil para proyectar el siguiente túnel.

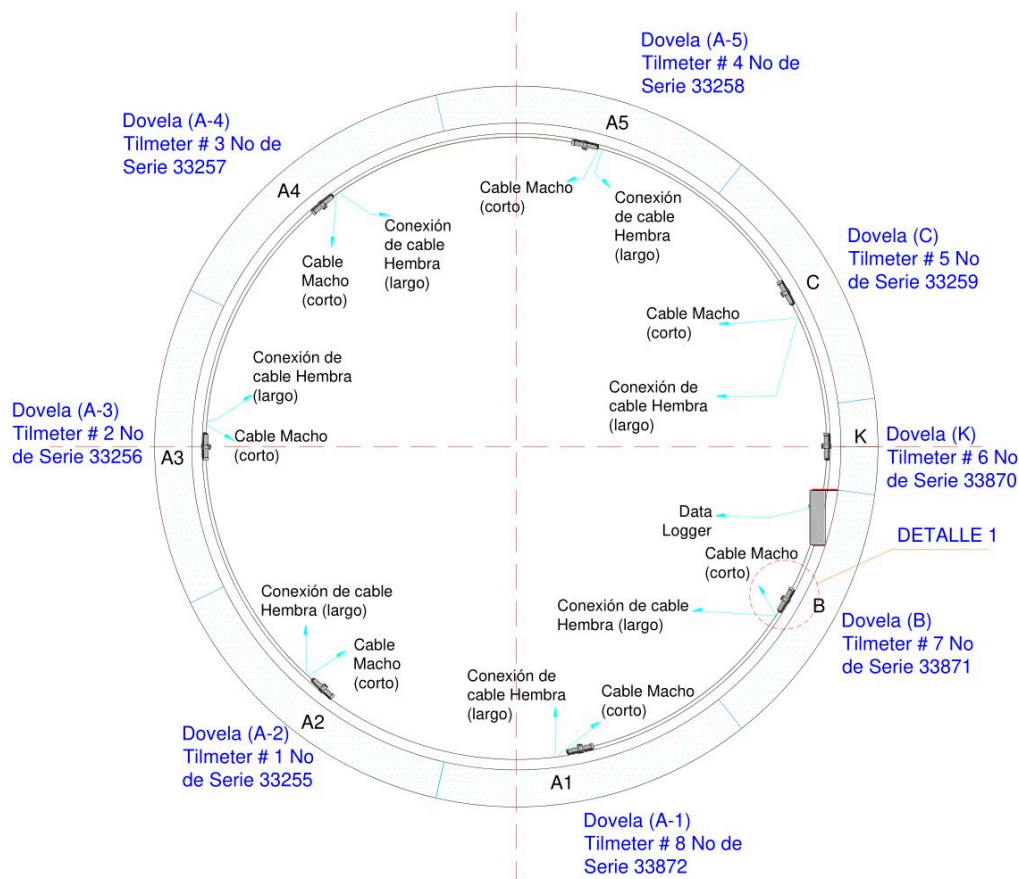


Figura 14.94. Distribución del sistema de convergencias automatizado en el anillo

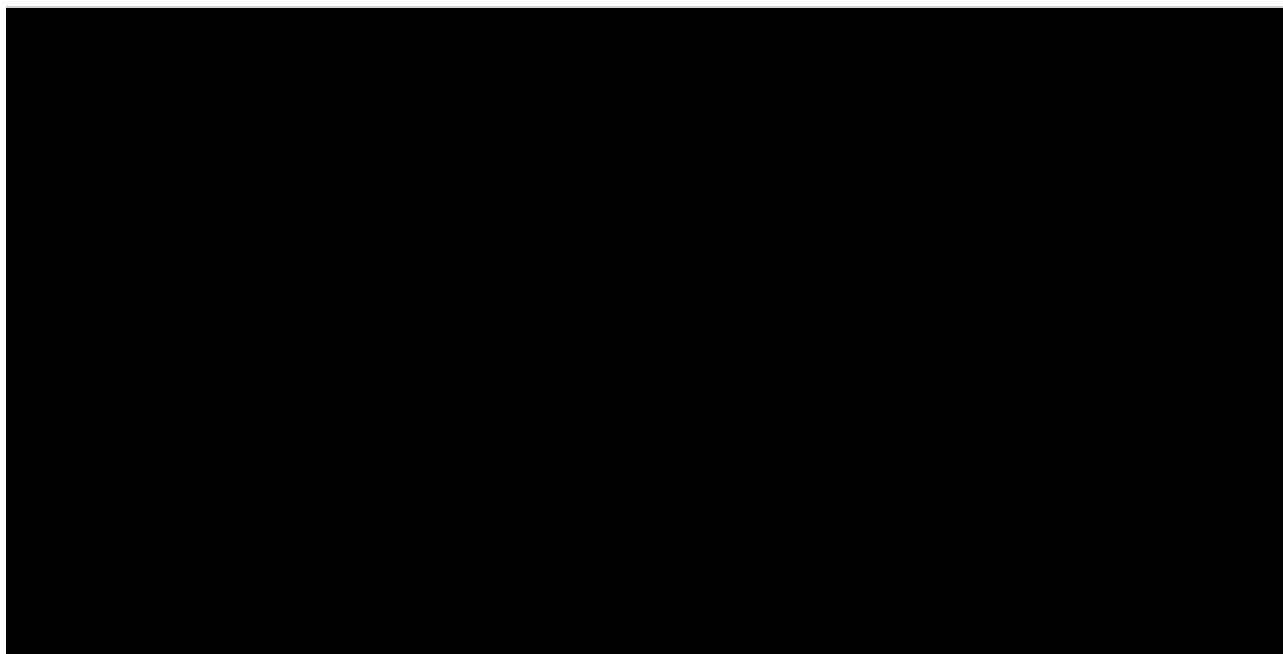


Figura 14.95. Polígono virtual de deformaciones del anillo según el sistema de convergencias

14

Maquinaria

La maquinaria que se usó realmente en el TEO: las tuneladoras de cada tramo, sus componentes tal como se documentan en las tesis, el equipo auxiliar de superficie, lumbrera y túnel, y las innovaciones identificadas. La clasificación general y su teoría están en el capítulo 5.

TABLA GENERAL DE MAQUINARIA DEL TEO

TABLA 14.18. MAQUINARIA PRINCIPAL Y AUXILIAR DOCUMENTADA EN LAS

EQUIPO	CARACTERÍSTICA DOCUMENTADA	FUNCIÓN
Tuneladora EPB Herrenknecht	8.74 m (8.7 m); tramos 1, 2, 6 y S-519 del 5b	Excavar suelo blando
Tuneladora EPB Robbins	8.93 m; empuje 84,000 kN; torque 17,900 kN·m; tramos 1B, 3, 4 y 5a	Excavar suelo, mixto y roca
Grúa pórtico	200 t (tramo 3); 800 t para bajar el escudo en L-21A	Bajar escudo, dovelas y materiales

EQUIPO	CARACTERÍSTICA DOCUMENTADA	FUNCIÓN
Grúa pórtico de dovelas	60 t con pinza Acimex de 3 u 8 dovelas; en fondo, 15 t	Descarga y acomodo de dovelas
Grúa radial en gantry	10 t	Descarga de dovelas en fase provisoria
Locomotora y carros doveleros	18 km/h; riel de 60 lb, 9.1 m	Suministro al frente
Vaca de mortero	8.5 m ³	Transporte de mortero
Planta dosificadora ODISA 2000	2 silos de 35 t, mezclador 4 m ³	Mortero y lodo
Bombas de mortero	Putzmeister KOV 1050 DUO	Descenso e inyección
Sistema de bandas	tela de 762 mm; 183 m/min; cangilones 162 m/min	Rezaga continua
Apilador radial	descarga en dique de 2,000 m ³	Almacenar rezaga
Turbina Zitrón	31 m ³ /s	Ventilación
Bombas Flygt	58 HP y 140 HP, 50 L/s	Agua residual
Hidrofresa	hasta 120 m, 4 discos	Muro Milán profundo (L-18 a L-20)
Cámaras hiperbáricas	principal, gemela y médica	Intervención a presión
Pozos de bombeo	17½" con ademe de 12", 10 a 135 HP	Abatir nivel piezométrico

LAS TUNELADORAS DEL TEO

Las seis tuneladoras son tres Herrenknecht y tres Robbins. Cada ficha reúne los datos de una máquina; después se detallan los componentes de la "Hidalgo", las especificaciones de las Herrenknecht, la rueda de la "Morelos" y las modificaciones hechas durante la obra.

FICHAS TÉCNICAS

TABLA 14.19. FICHA TÉCNICA DE LA TUNELADORA 1: HERRENKNECHT S-497 (SUBTRAMO 1A).

CONCEPTO	DATO
Fabricante y número	Herrenknecht S-497 (HK497)
Tipo	EPB para suelo blando; rezaga por bombeo en tubería

CONCEPTO	DATO
Diámetro	8,700 mm
Tramo y lumbreras	Tramo 1, subtramo 1A, de la L-0 a la L-3A (lote 1)
Longitud excavada	Hasta la L-3A (cadenamiento 6+487); 4.6 km a febrero de 2012
Fechas de inicio y fin	Inicio: 10 de noviembre de 2009. Fin: 19 de diciembre de 2012
Rendimiento	7.2 m/día en promedio desde la reanudación; ciclos de 30 a 40 min por anillo de 1.5 m
Observaciones	Con 231 m excavados, la tormenta del 3 y 4 de febrero de 2010 inundó el avance y dañó la máquina; reparación de casi 160 días y reanudación el 4 de agosto de 2010. Potencia de 1,600 kW, torque de 6,613 kN·m y empuje de 73,187 kN

TABLA 14.20. FICHA TÉCNICA DE LA TUNELADORA 2: HERRENKNECHT S-498 (TRAMO 2).

CONCEPTO	DATO
Fabricante y número	Herrenknecht S-498 (HK498)
Tipo	EPB para suelo blando; rezaga por bombeo en tubería
Diámetro	8,700 mm
Tramo y lumbreras	Tramo 2, de la L-5 a la L-10 (lote 2)
Longitud excavada	11.6 km (longitud del tramo); 0.6 km a febrero de 2012
Fechas de inicio y fin	—
Rendimiento	—
Observaciones	Llevaba casi 340 m el 4 de febrero de 2010. La excavación de la L-5 a la L-6 se detuvo varios meses durante el montaje de la Robbins "Morelos" en la L-5. Potencia de 1,600 kW, torque de 6,613 kN·m y empuje de 73,187 kN; anillo de 35 cm

TABLA 14.21. FICHA TÉCNICA DE LA TUNELADORA 3: ROBBINS "HIDALGO" (TRAMO 3).

CONCEPTO	DATO
Fabricante y número	Robbins, "Hidalgo"; número —
Tipo	EPB con capacidad de frente mixto (discos de 17" intercambiables con <i>rippers</i>); rezaga por banda
Diámetro	8.93 m
Tramo y lumbreras	Tramo 3, de la L-10 a la L-13 (subtramos L10-L11, L11-L12 y L12-L13)
Longitud excavada	9,108.63 m (6,060 anillos)
Fechas de inicio y fin	Inicio: 19 de enero de 2012. Fin: 13 de abril de 2018
Rendimiento	4.0 m/día en promedio calendario (unos 122 m/mes); efectivo de 12.46 m/día en suelo, 6.94 en frente mixto y 4.85 en roca; máximo de 20 anillos (30 m) por día
Observaciones	997 de 2,276 días con producción; 259 intervenciones atmosféricas y una hiperbárica (anillo 581); dos daños a la rueda (anillos 1014 y 1293) que sumaron 68 días; tornillo único en la L-11. Empuje de 84,000 kN; límites de obra de 65,000 kN y 6,000 kN·m

TABLA 14.22. FICHA TÉCNICA DE LA TUNELADORA 4: ROBBINS DEL LOTE 4 (TRAMO 4).

CONCEPTO	DATO
Fabricante y número	Robbins, conocida como "La Corregidora"; número —
Tipo	EPB con capacidad de frente mixto; rezaga por banda continua
Diámetro	8.93 m
Tramo y lumbreras	Tramo 4, de la L-17 a la L-13 (lote 4)
Longitud excavada	10.2 km
Fechas de inicio y fin	Inicio: agosto de 2012. Fin: 23 de mayo de 2019, con la llegada a la L-13
Rendimiento	Unos 125 m/mes en promedio; mejor mes de 528 m, mejor día de 30 m y mejor turno de 12 h de 22.5 m

CONCEPTO	DATO
Observaciones	Primera intervención hiperbárica con una EPB en México; 97 intervenciones de cambio de herramienta en los primeros 1,411 m y unas 50 hiperbáricas en total; bombeo de hasta 180 L/s al abrir la cámara. El fabricante la llama "Hidalgo"

TABLA 14.23. FICHA TÉCNICA DE LA TUNELADORA 5: ROBBINS S-209 "MORELOS" (SUBTRAMOS 1B Y 5A).

CONCEPTO	DATO
Fabricante y número	Robbins S-209, "Morelos"
Tipo	EPB con capacidad de frente mixto; rezaga por banda, con casete vertical
Diámetro	8.93 m (rueda con 40 discos sencillos y 4 dobles de 17")
Tramo y lumbreras	Primero subtramo 1B, de la L-5 a la L-3A; después subtramo 5a, de la L-20 a la L-18
Longitud excavada	Unos 3.6 km en el 1B (el fabricante reporta 3.9 km) y 5.45 km en el 5a
Fechas de inicio y fin	1B: inicio el 18 de julio de 2011 y fin el 1 de octubre de 2012. 5a: inicio —; fin el 28 de febrero de 2019
Rendimiento	1B: 8.1 m/día en promedio y máximo de 35.1 m en un día. 5a: 592.5 m en un mes
Observaciones	En el 1B atravesó arcillas con hasta 400 % de contenido de agua. En el 5a salió de la lumbrera de 150 m (L-20), con cámara de montaje de 28 m y esclusa de personal de 7 bar. Torque de 14,916 kN·m y empuje de 84,000 kN

TABLA 14.24. FICHA TÉCNICA DE LA TUNELADORA 6: HERRENKNECHT S-519 (TRAMO 6 Y SUBTRAMO 5B).

CONCEPTO	DATO
Fabricante y número	Herrenknecht S-519
Tipo	EPB para suelo blando; acondicionamiento con espumas
Diámetro	8.74 m (8,890 mm en la ficha del fabricante)
Tramo y lumbreras	Tramo 6, de la L-20 al portal de salida (lote 6), y subtramo 5b, de la L-17 a la L-18
Longitud excavada	12.2 km en el tramo 6 y 3.28 km en el 5b; 2.8 km a febrero de 2012

CONCEPTO	DATO
Fechas de inicio y fin	—
Rendimiento	Ciclos de 30 a 40 min por anillo de 1.5 m
Observaciones	En enero de 2011 se modificó el trazo del tramo 6 por el riesgo de atrapamiento en vulcanitas muy fracturadas, con las lumbreras L-21A, L-23A y L-24A; galería de montaje en la L-21A. Potencia de 2,080 kW, torque de 10,251 kN·m y empuje de 62,437 kN

COMPONENTES DE LA TUNELADORA ROBBINS "HIDALGO" (TRAMO 3)

TABLA 14.25. FICHA DE LA TBM "HIDALGO"

COMPONENTE	DATO
Diámetro de excavación	8.93 m
Peso total / longitud	aprox. 600 t / hasta 92 m (dato general de las 6 máquinas)
Rueda	tipo spoke, apertura 45 %, 48 housings
Cortadores	17", 4 dobles centrales, 31 frontales, 9 periféricos
Scrapers / knife bits	188 / 44 (37 knife bits reemplazados en L11)
Gatos de empuje	28; pads con placas de fibra dura
Empuje y torque máximos permisibles de obra	65,000 kN; 6,000 kN·m
Tornillo	original 2 (vertical y horizontal); sustituido por 1 en L11; 500 m ³ /h; 14 álabes
Cepillos	3 líneas, 8 puertos de grasa por cámara
Mamparo	10 sensores de presión; 28 válvulas de 4"
Presión del frente	estática máx. 10 bar; excavación 5 bar
Back up	gantries (10.30 × 6.30 × 3.90 m); mortero en gantry 3, enfriamiento en gantry 5, ventilación en gantry 6
Erector	succión por vacío; giro 220°

HERRENKNECHT (TRAMOS 1, 2, 6 Y SUBTRAMO 5B)

La especificación técnica preliminar de una EPB Herrenknecht, de la etapa de selección del equipo, fija una rueda de 8,130 mm en 4 piezas (80 t); un escudo de 8,090 mm de diámetro y 9,000 mm de largo con 2×13 cilindros y 56,033 kN de empuje (250 t); un

tornillo de 800 mm de diámetro y unos 16 m de largo, telescópico, con 315 kW y 420 m³/h; un accionamiento de 8 motores de 160 kW (1,280 kW), torque de 4,580 kN·m y 0 a 4 rpm; y un back up de unos 84 m con alimentador de un anillo completo, 3 bombas de mortero KSP12, 2 transformadores de 1,200 kVA y cassette de ventilación de 1,400 mm. La S-519 del tramo 5b tiene 8.74 m, 10,251 kN·m, 62,437 kN y 2.55 rpm. Los valores de 2009 corresponden a la etapa de selección y los de 2021 describen la máquina real.

ROBBINS S-209 "MORELOS" (SUBTRAMOS 1B Y 5A)

Rueda con 40 discos sencillos y 4 dobles de 17" con espaciamiento de 100 mm, cuchillas para suelo, 0 a 3 rpm, 14,916 kN·m y 84,000 kN.

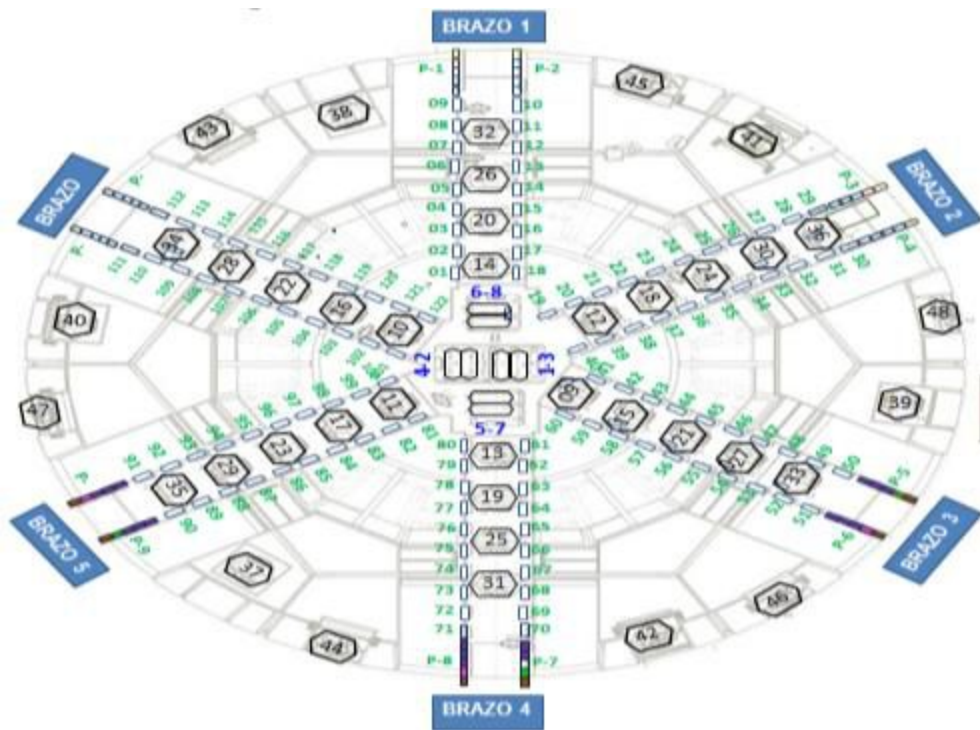


Figura 14.96. Configuración de la rueda de corte de la TBM-EPB S-209 "Morelos"

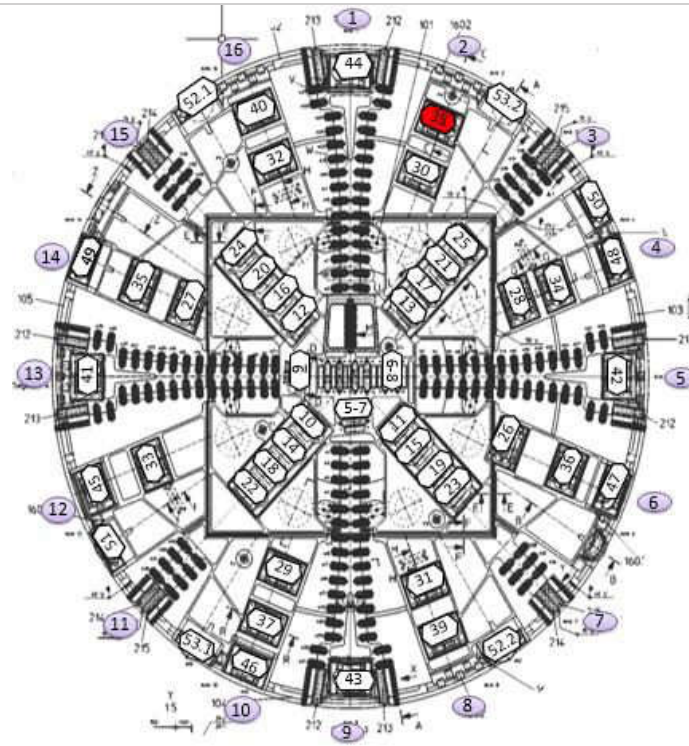


Figura 14.97. Configuración de la rueda de corte de la TBM-EPB S-519 Herrenknecht

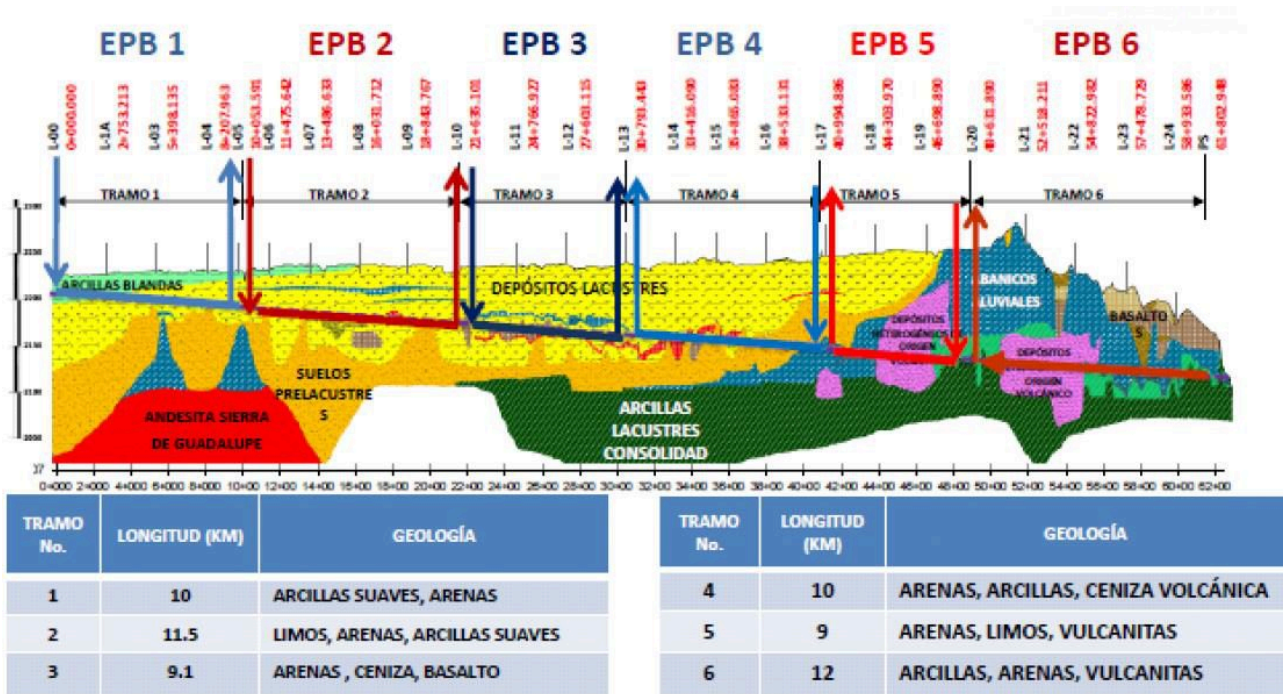


Figura 14.98. Perfil geológico utilizado para ubicar las seis máquinas EPB del TEO

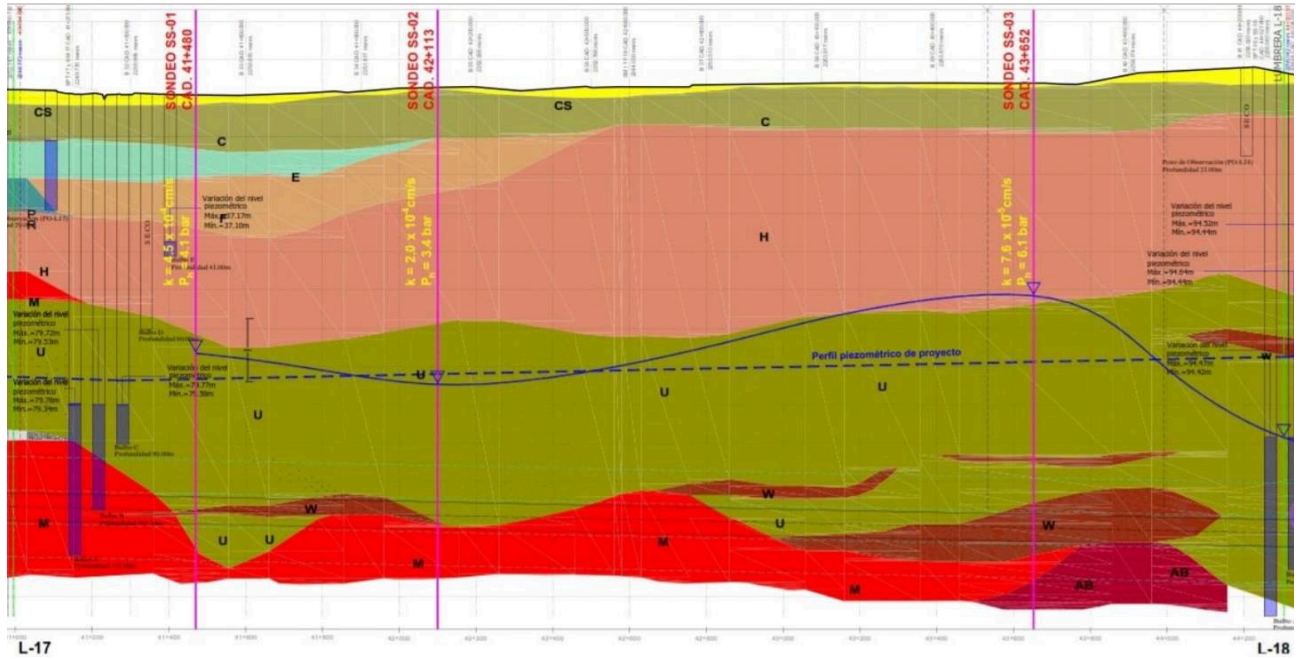


Figura 14.99. Sección geotécnica del tramo 5 con los sondeos selectivos

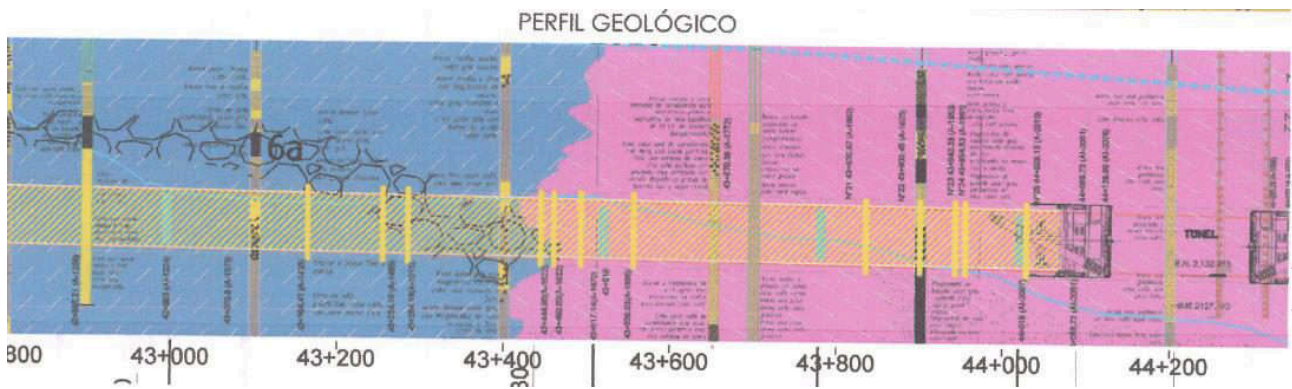


Figura 14.100. Perfil geológico del túnel L-17 a L-18

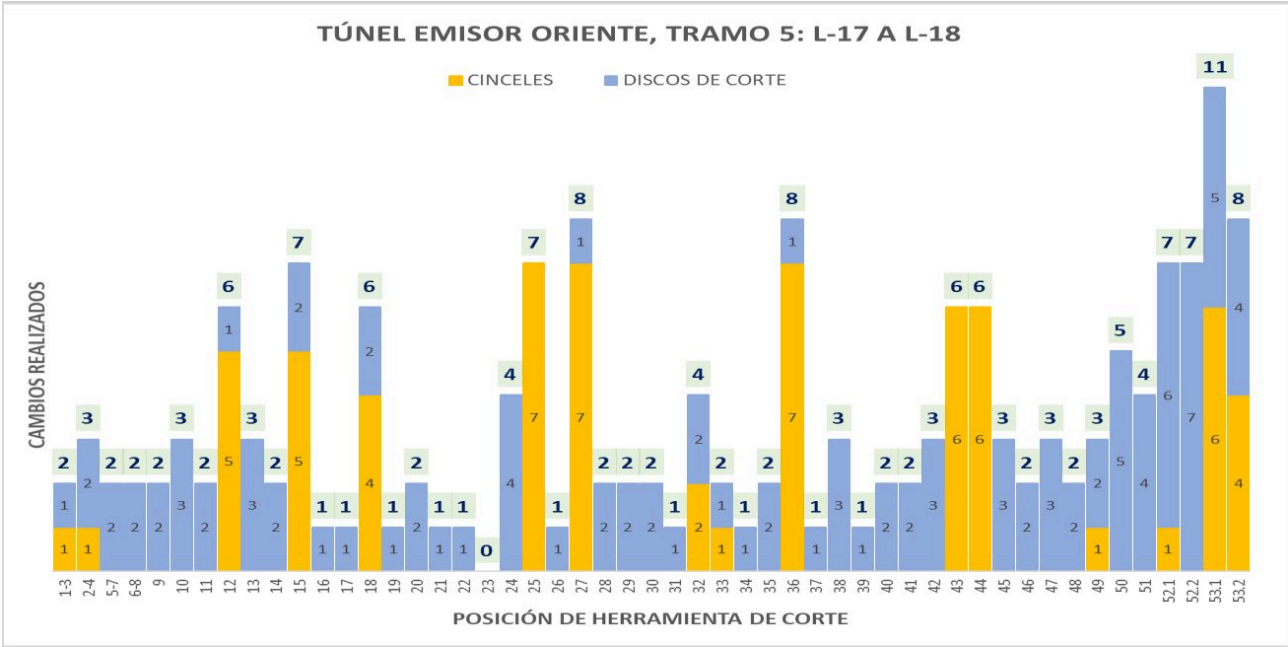


Figura 14.101. Cambios de herramientas de corte por posición de instalación, L-17 a L-18

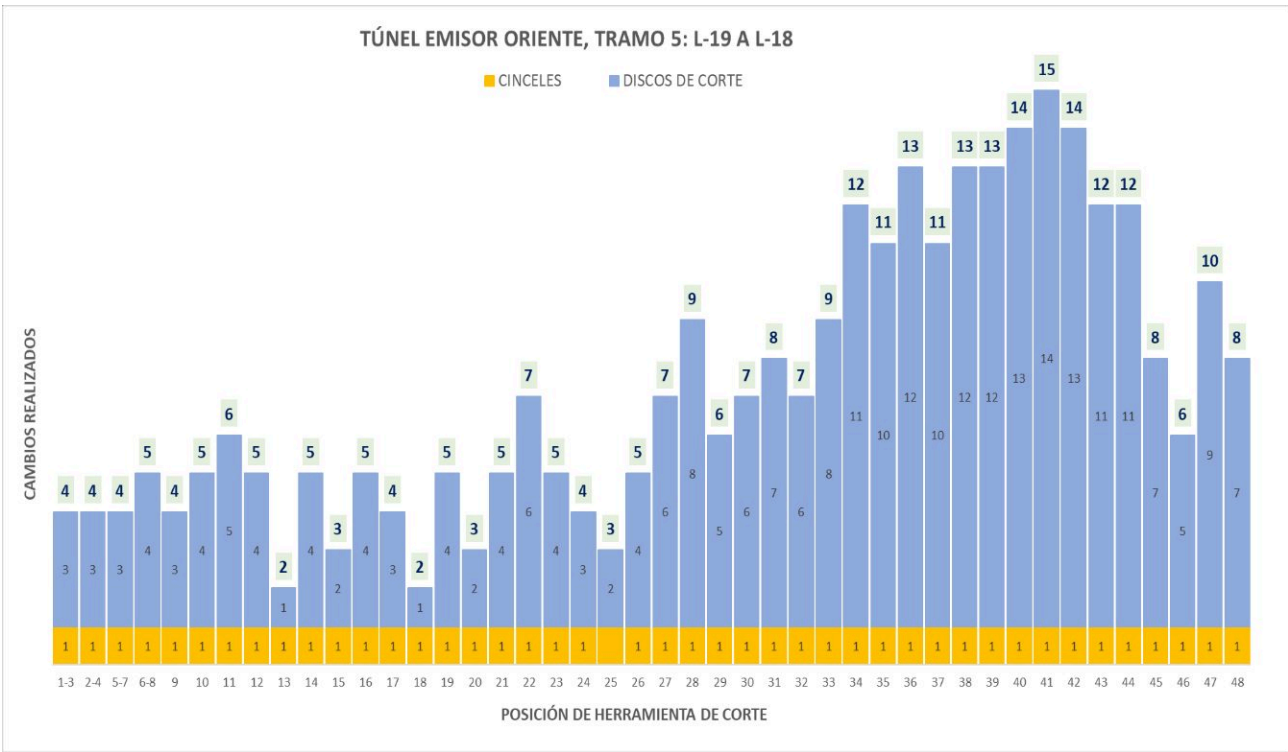


Figura 14.102. Cambios de herramientas de corte por posición de instalación, L-19 a L-18

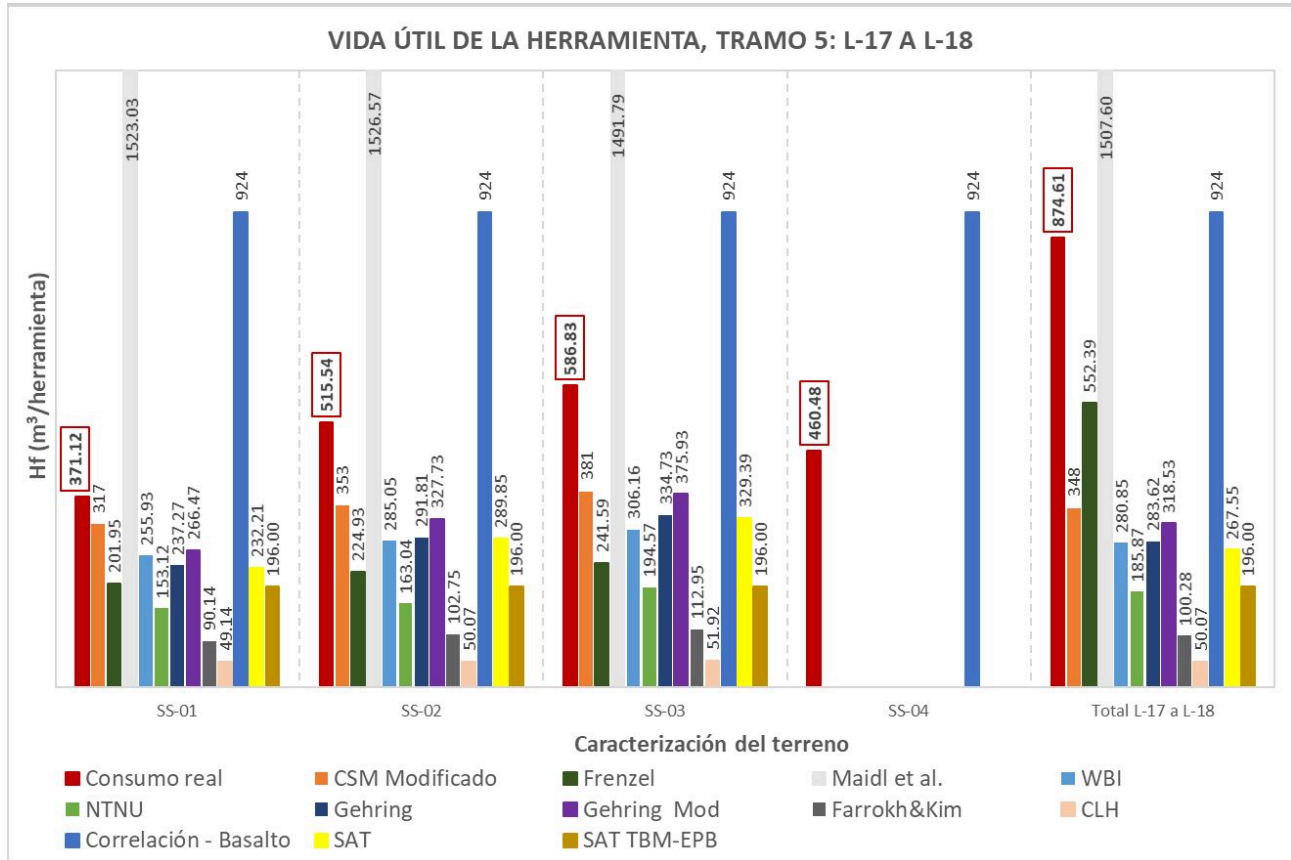


Figura 14.103. Vida útil de las herramientas, real contra modelos teóricos, tramo 5 L-17

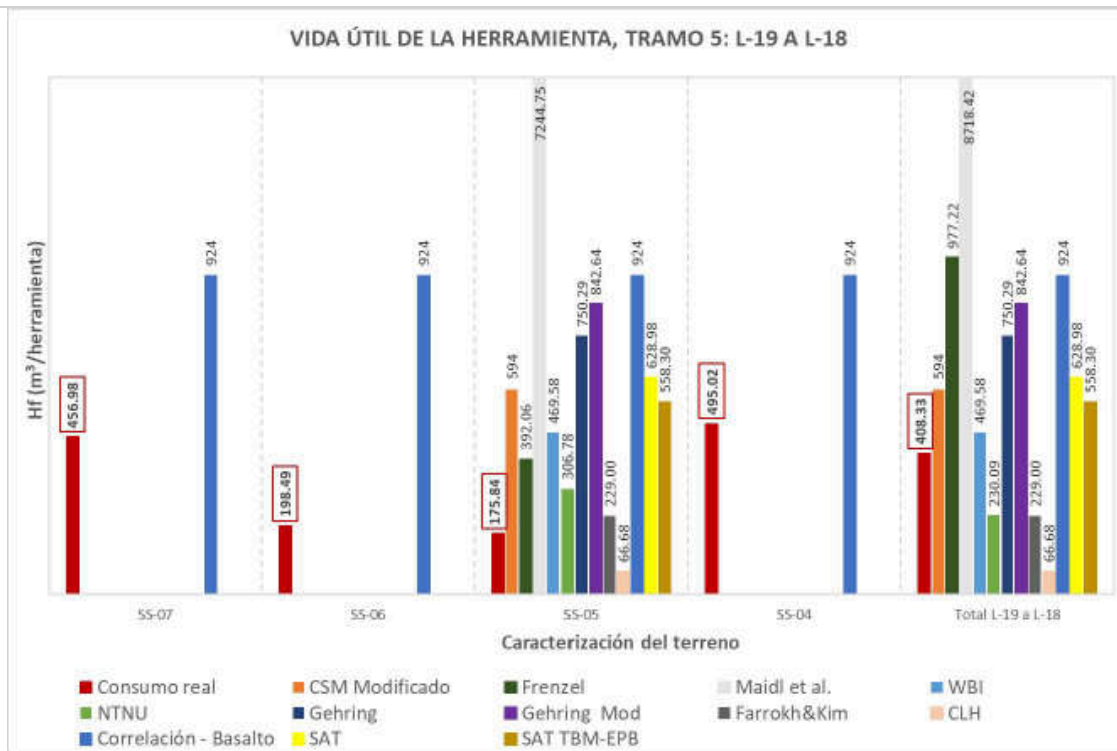


Figura 14.104. Vida útil de las herramientas, real contra modelos teóricos, tramo 5 L-19

MODIFICACIONES A LAS MÁQUINAS DURANTE LA OBRA

Las máquinas no se mantuvieron como llegaron. En el tramo 3 se agregaron barras *grizzly* (placa A36 de 2") a las ventanas de la rueda y luego se retiraron en suelo fino; se fabricó un tornillo único con puertos de inyección y telescopía de 50 cm dentro de la cámara; se reemplazó el tornillo horizontal por banda; y se reparó la rueda con housings y soldadura antidesgaste. Estas modificaciones se hicieron durante el paso por la L11 porque ahí había espacio para instalar el tornillo en una sola pieza.

EQUIPO AUXILIAR SEGÚN LA ETAPA

Para el arranque se usó una cuna de recepción con rieles embebidos, muertos de concreto trapezoidales y estructura de reacción con ménsulas, y un sello de salida para impedir el paso de material. En el diseño, el arranque requería además plataformas en lumbrera, escalera de caracol y subestación de 23 kV con distribución a 4,160 V, 440 V y 220 V, y una planta de emergencia.

Para la llegada se prepara un portal con tímpano y sello de neopreno; el último tramo se cruza con presión de la cámara decreciente y las dovelas se calafatean.

En el manteo, antes de las bandas, se usaban torres con skips y alcancías. En el TEO, grúa pórtico para materiales y dovelas y banda de cangilones para rezaga.

MAQUINARIA DE INTERVENCIÓN Y MANTENIMIENTO

La Hidalgo tenía cámara hiperbárica principal, cámara gemela y cámara médica, compresores en el primer gantry y sistema Samson de regulación. La descompresión se hizo por el método SurDO₂ de la Marina de EE. UU.. La única intervención hiperbárica del tramo 3 requirió 136 inmersiones. Para el mantenimiento en lumbrera, el equipo incluyó soldadura E7018, arco-aire para corte, ensayos de líquidos penetrantes y de partículas magnéticas.

SOLUCIONES PROPIAS DE LA OBRA

En el TEO, las soluciones innovadoras documentadas fueron locales y nacieron de problemas de obra. Para cambiar cepillos en las lumbreras se fabricó un anillo metálico tipo carrusel y se recubrieron dovelas con placa; para los frentes de roca se desarrolló una pasta de bentonita y arenas; se fabricó un tornillo único con telescopía; y en el tramo 5 se adaptó la rueda según el terreno, de rippers a discos.

De fábrica, las Robbins traían soluciones para el frente mixto: cortadores con detección de desgaste que pierden presión en el punto de reemplazo; un tornillo de dos etapas, con una cinta de 900 mm capaz de pasar boleos de hasta 600 mm y un tornillo de eje para regular presiones de hasta 6 bar; y un casete vertical de banda de 34 m de alto, con una huella 170 % menor que la de uno horizontal, que empalma 450 m de banda en unas 12 horas y deja avanzar de 200 a 225 m. Tras los primeros problemas se les agregó una esclusa de personal de 7 bar con una cámara de descompresión adicional y una esclusa de material, placas Hardox en el tornillo con placas de desgaste removibles, un sistema de aire comprimido para controlar las entradas de agua en la cámara, barras grizzly, una nueva unión rotatoria que acorta el cambio de discos y un nuevo diseño de scrapers. Para el revestimiento definitivo se usó una cimbra telescópica de 45 m que colaba el concreto de 350 mm de espesor sin interrupción, con más de 180 m por semana.

COMPARACIÓN HISTÓRICA: DEL ESCUDO CON LODOS AL EPB DEL TEO

El Drenaje Profundo pasó de una cabeza de 6.12 m a una de 8.93 m. Sus escudos de frente presurizado con lodos tenían 24 gatos de 120 t (2,880 t) y bombas de lodo. El TEO pasó a EPB de 8.7 a 8.93 m con 28 gatos y empuje nominal de hasta 84,000 kN, unas 8,570 t-fuerza (cálculo propio: $84,000 \text{ kN} / 9.80665$), casi 3 veces más que 2,880 t. Se eliminó la planta de tratamiento de lodos y se cambió por bandas y diques de rezaga.

Los servicios que consume cada máquina también crecieron: 90 m³/h de agua de enfriamiento por tubería de 4", una turbina Zittrón de 31 m³/s que entrega 26 m³/s a 3,500 m del portal y una acometida de 23 kV con cable de 13,200 V en el tren de apoyo.

15

Cierre del capítulo

Elegir EPB fue la respuesta a un suelo blando bajo el nivel freático que ya había vencido a los métodos anteriores, y la elección aguantó el basalto. Los datos muestran cuatro cosas: el diseño EPB fue necesario por el nivel freático y los suelos blandos; los frentes mixtos y de roca bajaron el rendimiento efectivo de 12.46 m/día en suelo a 6.94 en frente mixto y 4.85 en roca en el tramo 3; las herramientas intercambiables y las intervenciones atmosféricas permitieron seguir; y las lumbreras de paso funcionaron como estaciones de mantenimiento.

La tuneladora fue la máquina correcta y el atraso no vino de ella, sino del escaso conocimiento del terreno antes de arrancar y del reparto de la obra en tramos de unos 10 km sin atender a la geología. Un participante de Robbins señala que el informe geotécnico de línea base no estaba terminado hasta 2010, con la obra empezada en 2008, y que la alineación habría podido ir más profunda para evitar el frente mixto, como los casi 3 km con el frente mitad roca y mitad suelo del tramo 3. La opinión proviene de un proveedor, pero coincide con los números del tramo 3, donde la máquina produjo solo en

el 44 % de los días y el basalto costó once veces más herramientas por kilómetro que el suelo. El anillo instrumentado ofrece, por último, la vía para contrastar lo medido con el diseño de las dovelas.

En resumen: la excavación del TEO combinó pozos verticales, abiertos con muros y bombeo, y un túnel excavado con seis tuneladoras EPB repartidas en seis tramos, elegidas por el suelo blando bajo el nivel freático. El terreno pasó de arcilla a basalto, y con él bajó el rendimiento y subió el consumo de herramientas, sobre todo en el tramo 3. Las modificaciones a las máquinas, las intervenciones hiperbáricas y la auscultación del revestimiento forman la experiencia técnica que dejó la obra.



Parte II La línea de conducción del TEO

15

Lumbreras y cimentaciones

Los pozos que dieron acceso al túnel y cómo se cimentaron

Una lumbrera del TEO es un pozo de 12 a 22 m de diámetro y de 23 a 152 m de profundidad. Se excava en suelo saturado, así que el agua empuja las paredes hacia dentro y el fondo hacia arriba. Ganó la lumbrera que supo sostener el terreno y bombear el acuífero antes de que la máquina llegara.

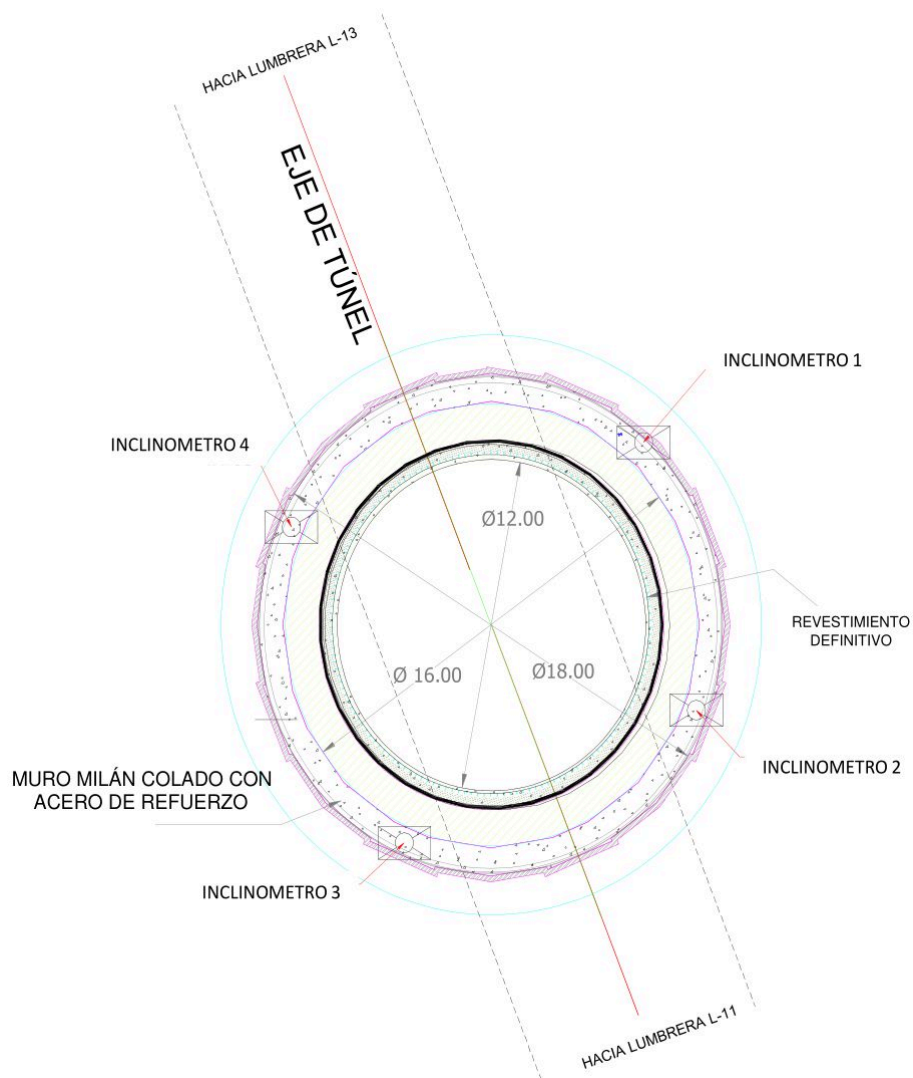


Figura 15.1. Características generales de la lumbrera L-12, vista en planta

Este capítulo trata la parte vertical del TEO: las lumbreras, los pozos por los que se construyó el túnel, y el portal de salida. Los procedimientos generales (flotación, anillos, muro Milán, convencional) y las revisiones de estabilidad están en el capítulo 5; los parámetros del terreno, en el capítulo 12. Se presentan las decisiones tomadas en el TEO, las cifras de cada lumbrera, lo que se midió durante la excavación y lo que cambió entre proyecto y obra.

Qué se decidió y por qué

Para el TEO se previeron tres métodos según el suelo: muro Milán, convencional y una combinación de ambos. El mixto, con muro Milán arriba y excavación convencional abajo, fue el más usado. Las siete lumbreras de montaje (L-0, L-3A, L-05, L-10, L-13, L-17 y L-20) tienen 16 m o más de diámetro; el resto son de paso.

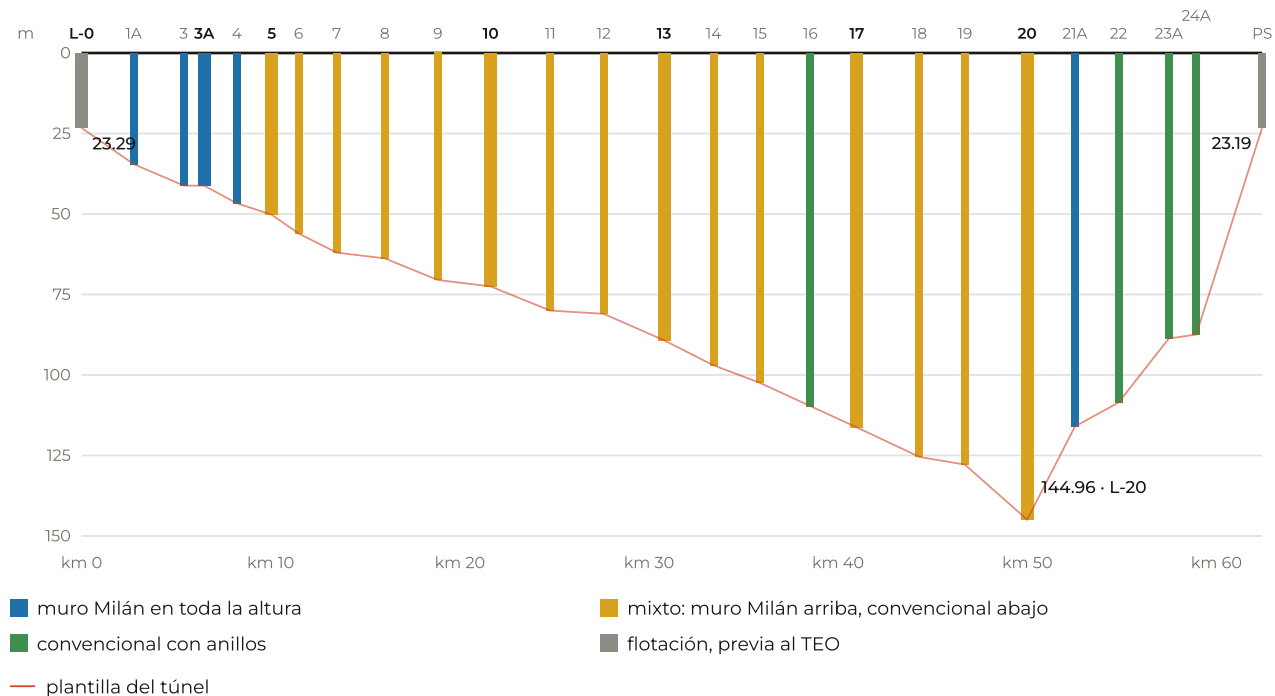
Los términos de referencia de Conagua pedían, para cada lumbrera, diagramas de esfuerzos, revisión de falla de fondo y de flotación final, estabilidad de la zanja, análisis con elementos finitos (PLAXIS o similar), estabilidad de taludes cercanos y procedimiento constructivo. Las estructuras enterradas se trataron como grupo A bajo el Reglamento de Construcciones del Distrito Federal y sus normas técnicas, porque el Estado de México no tenía reglamento propio; los códigos extranjeros (ACI, AISC, ASTM) quedaron para lo no cubierto y con acuerdo de Conagua.

La flotación, el método que se usó en el Drenaje Profundo, tiene un máximo probado de 19 m de diámetro y 30 m de profundidad. Las lumbreras del TEO llegan a 152 m, de modo que quedó descartada. De las siete lumbreras de montaje, la L-0 fue la única flotada, y ya existía antes del TEO como lumbrera 2 del Interceptor Río de los Remedios.

El muro Milán sustituyó a la flotación. Funciona como tablestacado perimetral que, bien ejecutado, da soporte anular aunque los tableros sean planos, y forma una barrera casi impermeable entre el núcleo y el suelo circundante. La hidrofresa decidió el límite de ese muro: corta suelo duro y roca de hasta 100 kg/cm², llega a unos 120 m y mantiene una desviación máxima de 0.3 %. Bajo esa profundidad el pozo sigue por el método convencional, con una trabe de liga entre ambos tramos.

Las 25 lumbreras, de la L-0 al portal

profundidad a plantilla y método constructivo; las siete de montaje, con nombre en negritas



Elaboración propia con datos de Bautista Moreno (2014, pp. 35-37 y 78). De Nova y Luna (2014, p. 34) dan otras profundidades (L-20: 152.36 m).

Figura 15.2. Las 25 lumbreras del TEO, con su profundidad y su método

Un análisis de riesgos laborales en la construcción de las lumbreras del TEO describe el procedimiento de las lumbreras en suelo arcilloso del Valle: el muro anular se excava por sectores de 60° con perforaciones de 0.60 m estabilizadas con lodo bentonítico y se cuela con tubo tremie, después se excava el núcleo con almeja, se repone el peso extraído con agua para evitar expansión y se cuela la losa de fondo bajo el agua. El artículo da para el TEO 52 km y 7.5 m, cifras que no coinciden con las oficiales (62.4 km y 7.0 m de la ASF), por lo que aquí solo se usa su descripción del procedimiento.

02

Las lumbreras del TEO: tabla general

La tabla siguiente reúne el diámetro interior proyectado, la profundidad al nivel de plantilla hidráulica, el cadenamiento y el método de cada lumbrera.

TABLA 15.1. LUMBRERAS DEL TEO: CADENAMIENTO, DIÁMETRO, PROFUNDIDAD Y MÉTODO

LUMBRERA	CADENAMIENTO (KM)	DIÁMETRO INTERIOR PROYECTADO (M)	PROFUNDIDAD A PLANTILLA (M)	FUNCIÓN	MÉTODO CONSTRUCTIVO
L-0	0+000	16.00	23.29	Montaje	Flotación (construida antes del TEO)
L-1A	2+753	12.00	34.50	Paso	Muro Milán en toda la altura
L-03	5+398	13.50	41.15	Paso	Muro Milán en toda la altura
L-3A	6+488	16.00	41.24	Montaje	Muro Milán en toda la altura
L-04	8+208	13.50	46.66	Paso	Muro Milán en toda la altura
L-05	10+050	16.50	50.22	Montaje	Muro Milán + convencional
L-06	11+476	13.60	56.07	Paso	Muro Milán + convencional
L-07	13+486	15.60	61.99	Paso	Muro Milán + convencional
L-08	16+032	16.00	63.75	Paso	Muro Milán + convencional
L-09	18+844	16.00	70.50	Paso	Muro Milán + convencional
L-10	21+632	20.00	72.50	Montaje	Muro Milán + convencional
L-11	24+777	16.00	80.00	Paso	Muro Milán + convencional
L-12	27+603	16.00	81.00	Paso	Muro Milán + convencional
L-13	30+790	20.00	89.21	Montaje	Muro Milán + convencional
L-14	33+416	16.00	97.00	Paso	Muro Milán + convencional
L-15	35+865	16.00	102.45	Paso	Muro Milán + convencional

	CADENAMIENTO LUMBRERA (KM)	DIÁMETRO INTERIOR PROYECTADO (M)	PROFUNDIDAD A PLANTILLA (M)	FUNCIÓN	MÉTODO CONSTRUCTIVO
L-16	38+533	12.00	109.69	Paso	Convencional con anillos
L-17	40+992	19.80	116.29	Montaje	Muro Milán + convencional
L-18	44+304	17.00	125.45	Paso	Muro Milán + convencional
L-19	46+699	17.00	127.82	Paso	Muro Milán + convencional
L-20	49+992	22.46	144.96	Montaje	Muro Milán + convencional
L-21A	52+518	15.00	116.00	Paso	Muro Milán en toda la altura
L-22	54+823	12.00	108.56	Paso	Convencional con anillos
L-23A	57+479	12.00	88.69	Paso	Convencional con anillos
L-24A	58+934	12.00	87.42	Paso	Convencional con anillos

La lista trae 25 lumbreras porque la lumbrera 2 del Interceptor Río de los Remedios se cuenta como L-0. El portal de salida tiene 23.19 m.

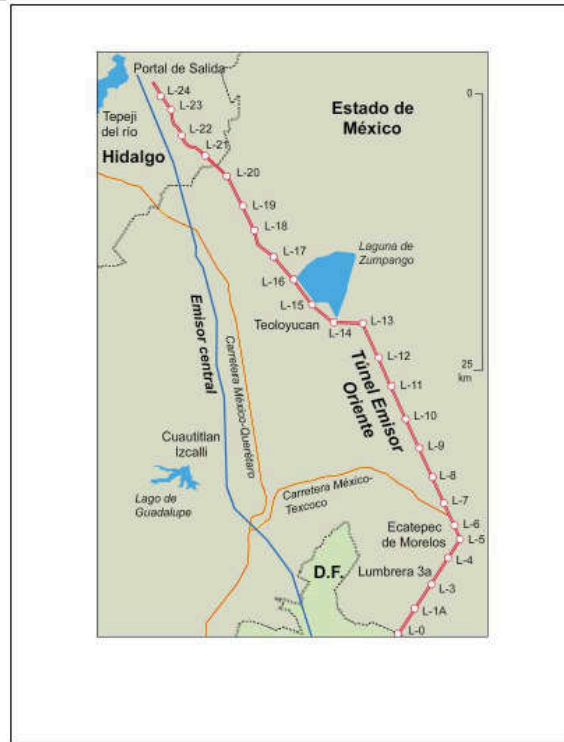


Figura 15.3. Trazo en planta del TEO con lumbreras y portal

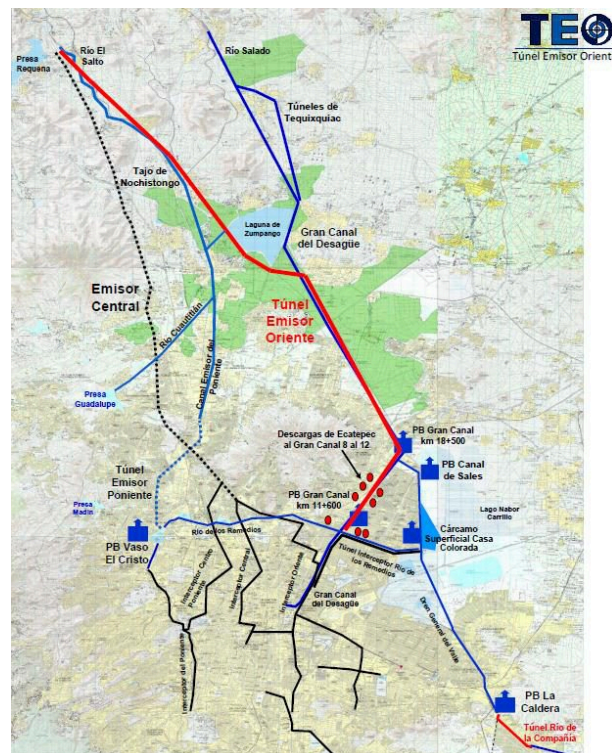


Figura 15.4. Trazo del TEO junto al sistema de drenaje profundo

03

L-00 (km 0+000): arranque en arcilla muy blanda

La L-00 coincide con la lumbrera 2 del Interceptor Río de los Remedios y se construyó por flotación antes del TEO. Al abrir su pared para sacar el escudo EPB, el riesgo era la extrusión del suelo. El FS era de 0.59 sin tratamiento y de 3.5 con una franja de 3.67 m de lodo fraguante de resistencia mínima de 1,500 kPa, más inyecciones verticales por manguitos. Con FS menor a 1, excavar no era viable.

Se reemplazó el suelo por lodo fraguante; aumentar solo el espesor del reemplazo quedó descartado (capítulo 12). Es el caso de cimentación donde el tratamiento del terreno, y no el muro, resolvió el problema.

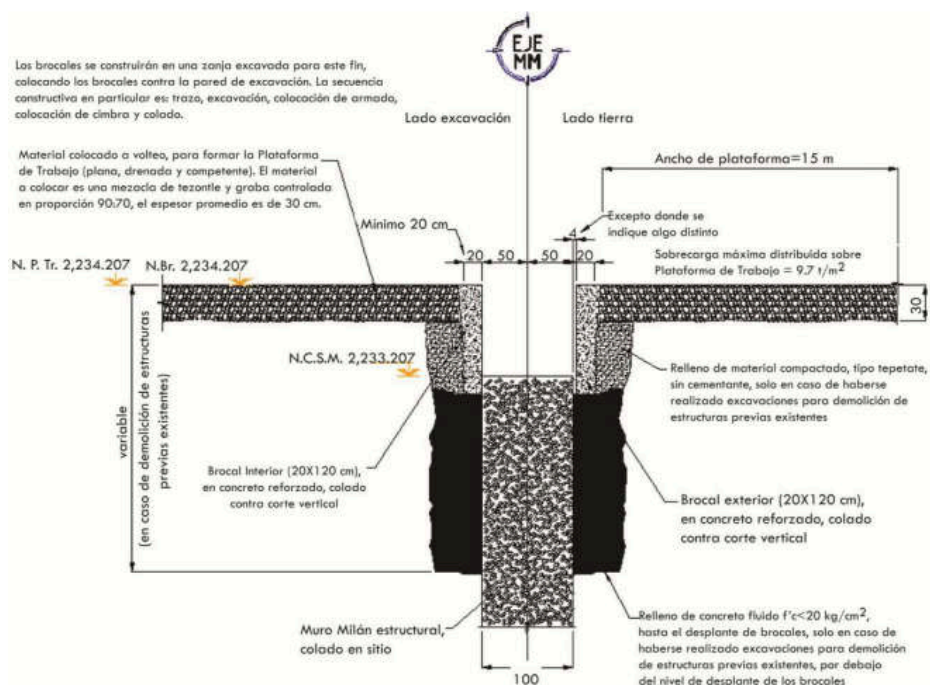
Los escudos de los tramos 1 y 2 arrancaron en lumbreras de 16 m de diámetro y de 27 a 52 m de profundidad.

04

L-04 (km 8+208): lumbrera de muro Milán único

La L-04 es de servicio, con muro Milán de 1.0 m de espesor como revestimiento único, 51 m de profundidad de excavación y 13.5 m de diámetro interior (12 m útiles tras el anillo de rigidez). Donde el diseño y la obra difieren, se toma lo construido.

La obra empezó por el brocal, una guía de concreto de $f'c = 350 \text{ kg/cm}^2$ que alinea la excavación y sostiene los primeros metros de zanja. Después vinieron siete tableros con juntas planas, excavados con almeja hidráulica semiguiada de 250 HP y verticalidad de 0.5 %, con lodo de 1.10 t/m^3 y una espera mínima de tres días entre paneles contiguos.

Figura 14. Detalle de brocal para muro Milán**Figura 15.5.** Brocal del muro Milán de la lumbrera L-04**TABLA 15.2. ELEMENTOS ESTRUCTURALES DE LA L-04 (VALORES CONSTRUIDOS)**

ELEMENTO	DATO
Brocal	3 m de profundidad; $f'c = 350 \text{ kg/cm}^2$
Excavación de tableros	Almeja hidráulica semiguiada de 250 HP en grúa de 100 t; verticalidad 0.5 %
Tableros	7 paneles con juntas planas; espera mínima de 3 días entre contiguos
Lodo	1.10 t/m ³ ; nivel no menor a 0.50 m bajo el brocal
Colado	Tubos tremie de 273 mm; colado antes de 24 h tras la excavación
Trabe de coronamiento	1.0 × 1.0 m
Anillo de rigidez	Nivel -37.112 m; 2.0 m de peralte y 0.75 m de ancho
Losa de fondo	2.5 m de espesor
Bombeo previo	4 pozos de zanja 2.7 × 0.6 m a 59 m

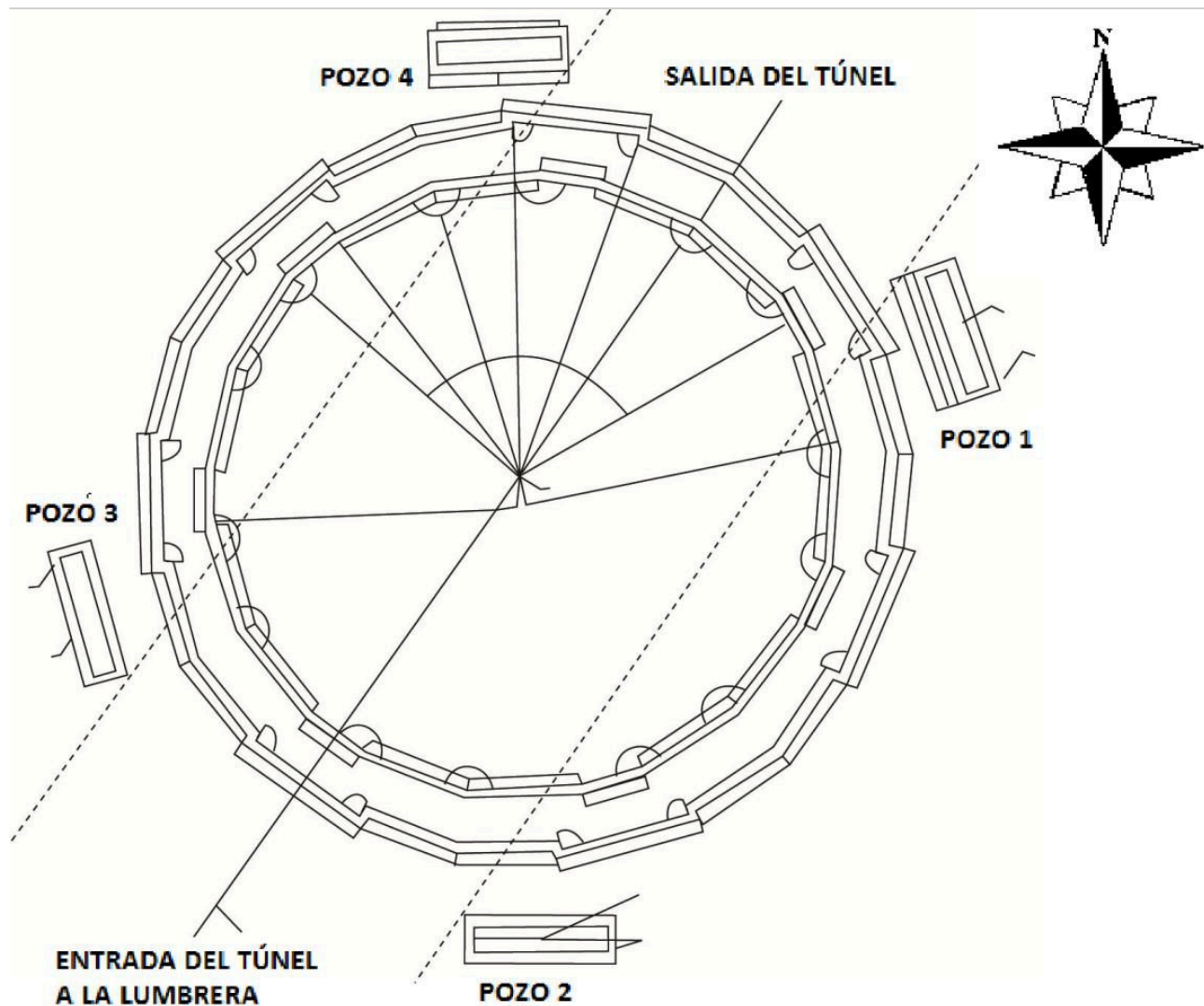


Figura 15.6. Corte transversal esquemático de la lumbrera L-04

EL ANILLO DE RIGIDEZ Y EL JET GROUTING

Cuando la tuneladora sale por la lumbrera hay que demoler el muro Milán y cortar su acero. Una máquina de suelo blando no lleva herramientas para cortar concreto armado, así que se prefirió demoler y compensar con un anillo de 2.0×0.75 m que evita deformaciones excesivas en la zona baja. Configurar la máquina para cortar concreto reforzado se descartó por costo innecesario.

Para el paso de la máquina se propuso mejorar el suelo con jet grouting de barra simple (tipo 1) a unos 400 kg/cm^2 (40 MPa): 479 columnas de suelo concreto de 0.80 m, 177 a la entrada y 302 a la salida. En planta son rectángulos de 17×3 m y 17×7 m, con longitud

de 2.5 diámetros del túnel (1 sobre la clave, 1 del propio túnel y 0.5 bajo la rasante). El curado mínimo es de 24 h entre columnas adyacentes y la ejecución va en tresbolillo.

RESULTADOS DEL DISEÑO

La cuenta crítica fue la subpresión. Sin bombeo, el factor de seguridad (FS) era de 0.5 a los 15 m y de 1.2 tanto a los 25 como a los 49 m, contra 1.3 exigido. El agua habría levantado el fondo. Por eso el diseño exige abatir el nivel con pozos de bombeo antes de excavar el núcleo, y con bombeo todas las etapas superan 1.3.

TABLA 15.3. FACTORES DE SEGURIDAD DE LA L-04

REVISIÓN	FS CALCULADO	FS MÍNIMO	RESULTADO
Estabilidad de la zanja (51 m)	2.2	1.5	Cumple
Falla de fondo (49 m)	2.1	1.7	Cumple
Subpresión sin bombeo	0.5 a 15 m; 1.2 a 25 m; 1.2 a 49 m	1.3	No cumple
Subpresión con bombeo	mayor a 1.3 en todas las etapas	1.3	Cumple
Flotación (lumbrera terminada)	193	1.3	Cumple sobradamente
PLAXIS, reducción ϕ -c (global)	5.5 a 7.9 según la etapa	no dado	Satisfactorio

La flotación de la lumbrera terminada se revisa comparando lo que se opone a la subida (peso del concreto más fricción del fuste) con la fuerza del agua bajo la losa:

$$FS_f = \frac{W + F_{fr}}{U}$$

donde FS_f es el factor de seguridad contra flotación (adimensional), W es el peso del concreto de muro y losa (kN), F_{fr} es la fuerza de fricción en el fuste, igual al área del fuste por la resistencia media al cortante del suelo (kN), y U es la fuerza ascendente, igual al área de proyección inferior por la presión piezométrica a la profundidad de la losa (kN).

Con los datos de la L-04, el concreto suma $2,609.4 \text{ m}^3$ a 24 kN/m^3 , es decir $W = 62,625.6 \text{ kN}$; la fricción es $F_{fr} = 411,504.2 \text{ kN}$ (resistencia media de 165.7 kN/m^2); y la presión piezométrica de 13 kN/m^2 sobre 188.7 m^2 da $U = 2,453 \text{ kN}$. Entonces:

$$FS_f = \frac{62,625.6 + 411,504.2}{2,453} = 193.3$$

El resultado coincide con el FS de 193 de la tabla. Aun sin contar la fricción, el peso del concreto solo daría un factor de 25.5.

Dato técnico: con elementos finitos (PLAXIS 2D axisimétrico, elementos de 15 nodos, Mohr-Coulomb) el asentamiento máximo en superficie fue de 12.81 cm contra 30 cm permisibles; la expansión del fondo llegó a 15.23 cm; el muro se desplazó 0.28 cm en horizontal y la losa 4.86 cm en vertical. Elementos mecánicos máximos: muro, axial de -1,465.49 kN/m, cortante de 148.27 kN/m y momento de -179.15 kNm/m; losa, 11.08 kN/m, 101.89 kN/m y 192.26 kNm/m. El asentamiento medido promedio en la periferia fue de 15 cm; la diferencia entre los 12.81 cm calculados y los 15 cm medidos es de 17 %.

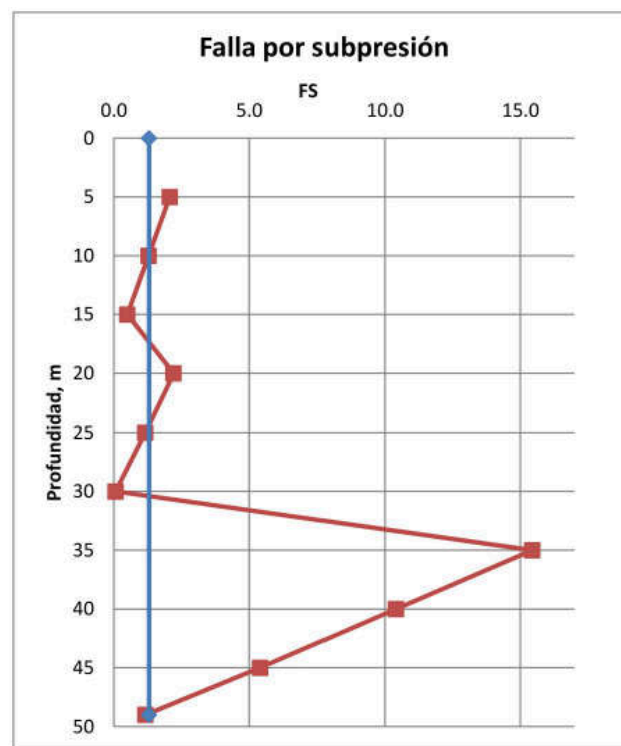


Figura 15.7. Subpresión sin abatimiento y variación del factor de seguridad en la L-04

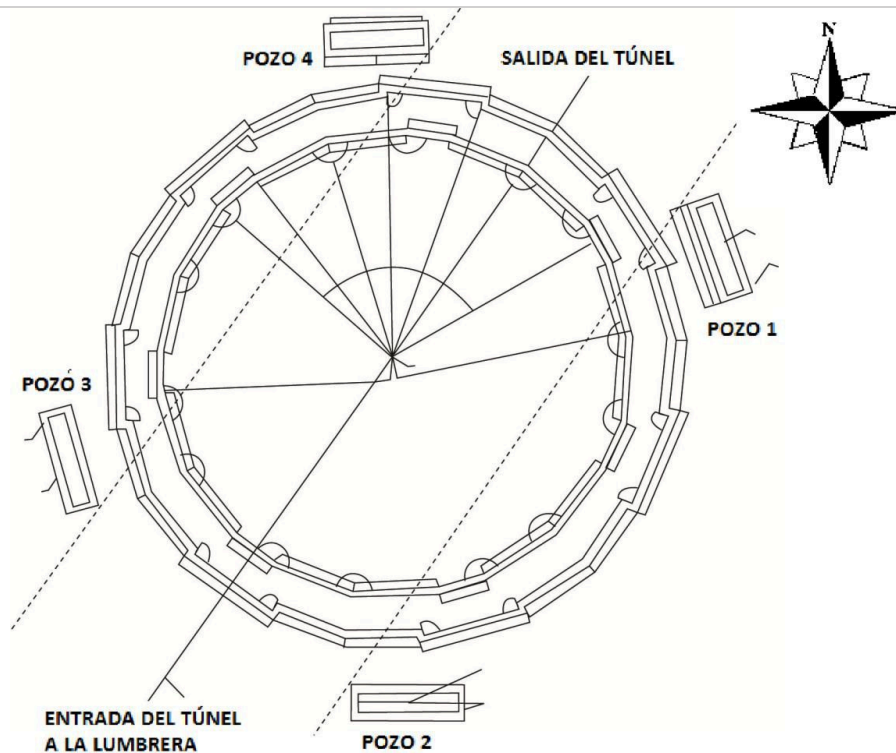


Figura 15.8. Pozos de bombeo de la lumbrera L-04

05

L-10 (km 21+632): el modelo contra el inclinómetro

La L-10 es lumbrera de montaje de la tuneladora del tramo 3 y, por haber terminado su construcción antes de la galería, es la que mejor permite comparar el cálculo con lo medido. El análisis parte del proyecto geotécnico y estructural de COMISSA (2009).

La solución combinó dos métodos. Del nivel de plataforma (0.0 m) a -45.0 m se hizo un muro Milán estructural de 1.0 m de espesor y 20 m de diámetro interior. De -45.0 m al máximo de excavación (-76.0 m) se hizo un muro primario de concreto lanzado con fibra metálica, trabajando con marcos metálicos horizontales, y un muro secundario colado en sitio de 25 cm para dejar un diámetro interior final de 16 m. Una trabe de coronamiento liga los paneles en la parte superior y una trabe de liga, a -45.0 m, une el muro Milán con el convencional. Fuera del muro, 8 pozos profundos de 85 m, cada uno con bomba

sumergible controlada por electroniveles, abatieron el agua; dentro, un bombeo de achique lo complementó. A partir de -45.0 m los cortes verticales se acotaron a 1.0 m de altura.

TERRENO Y MODELO

El perfil de la L-10 tiene arcilla blanda de alta plasticidad en los primeros 5 m ($w = 210\%$), limos y limos arenosos duros hasta 68 m y, de 68 a 85 m, intercalaciones de limos arenosos y arenas limosas. El nivel freático está a 6 m, pero las presiones están muy abatidas: a 30 m de profundidad falta cerca de 50 % de la presión hidrostática y a 70 m, casi 80 %.

El modelo se hizo en PLAXIS 8.6, axisimétrico, con elementos de 15 nodos y suelos elastoplásticos con criterio Mohr-Coulomb. Se aumentó 50 % el módulo de elasticidad en las etapas convencionales, porque el suelo está en descarga y su módulo es del orden del doble que en carga. El muro Milán y el concreto lanzado se modelaron como placas elásticas con módulo

$$E = 14000\sqrt{f'_c}$$

donde E es el módulo de elasticidad del concreto (kg/cm^2) y f'_c su resistencia a la compresión (kg/cm^2). Con $f'_c = 350 \text{ kg/cm}^2$, $E = 14000\sqrt{350} \approx 261,900 \text{ kg/cm}^2$. La interfaz suelo-estructura se tomó con $R = 0.8$, es decir, 20 % menos de resistencia por los procesos constructivos. Los marcos de acero se simularon como anclas horizontales con la rigidez equivalente a la compresión del anillo, y el concreto lanzado maduró en el modelo con 50, 65, 80 y 100 % de f'_c a 1, 2, 3 y 4 días. Se supuso un día por etapa de excavación y 3 t/m^2 de sobrecarga de equipo en superficie.

La secuencia modelada fue: muro Milán y pozos de bombeo, inicio del bombeo, excavación del núcleo hasta la trabe de liga, trabe de liga, excavación convencional con 15 cm de concreto lanzado, marco, otros 30 cm de concreto entre marcos (45 cm finales), muro secundario, losa de fondo y, al final, paro del bombeo y recuperación de los niveles piezométricos. Para ser conservadores, cada etapa modelada agrupó dos marcos, es decir, 2 m de excavación, en lugar de uno solo.

FACTORES DE SEGURIDAD Y DEFORMACIONES

Los factores de seguridad salieron de la herramienta de reducción $c-\varphi$ de PLAXIS, que baja de forma monotonica la cohesión y la fricción hasta provocar deformación excesiva:

$$FS = \frac{\tan \varphi}{\tan \varphi_r} = \frac{c}{c_r}$$

donde FS es el factor de seguridad (adimensional), c y φ son la cohesión (t/m^2) y el ángulo de fricción (grados) originales del suelo, y c_r y φ_r son los valores reducidos con los que el modelo llega a la falla.

El FS fue de 3.9 al terminar el núcleo dentro del muro Milán (45 m) y bajó a un mínimo de 3.4 en la etapa de 51 a 53 m, la de menor seguridad; al final, con la losa y los niveles piezométricos recuperados, la gráfica llega a cerca de 9. El cálculo da un desplazamiento horizontal máximo de 8.3 cm hacia el interior, entre 53 y 55 m, y una expansión vertical máxima de 6.4 cm, entre 73 y 75 m. Por el modelo elastoplástico y los módulos usados, las deformaciones teóricas están sobreestimadas.

La comparación con el inclinómetro es lo que le da peso al análisis. Se instalaron cuatro: dos dentro del muro Milán hasta 45 m y dos más, dentro del muro y continuando 2 m detrás del muro convencional, hasta 85 m. Se leyeron cada semana desde octubre de 2009. El inclinómetro del tablero A3 registró un máximo de unos 2.0 cm hacia el interior a unos 69 m, y el modelo daba cerca de 4 cm a 70 m. Los desplazamientos medidos son menores que los calculados, con la misma forma y a la misma profundidad.

Dato técnico: el modelo sobreestima el desplazamiento horizontal a 70 m por un factor cercano a 2 (4 cm contra 2 cm). Se atribuye al comportamiento idealizado del suelo y se considera una aproximación adecuada para fines prácticos; el valor medido representa el movimiento real y el calculado, un límite superior.

de 1 m.

- Fin de excavación, de 75 a 76,55 m, con separación de anillos de 1 m.
- Construcción de muro secundario.
- Fin de construcción (construcción de losa de fondo y recuperación de niveles piezométricos).

Los valores de FS fueron obtenidos con el programa, usando la herramienta "phi/c reduction", en la que realiza una reducción monótonica de las propiedades c y ϕ del medio, obteniendo como Factor de Seguridad el cociente entre la resistencia original y la resistencia reducida de las zonas que presenta deformaciones excesivas. Los valores de FS se muestran en la Figura 2 y en la Figura 3 los mecanismos hipotéticos de falla para las etapas de excavación a 51m y a 53m.

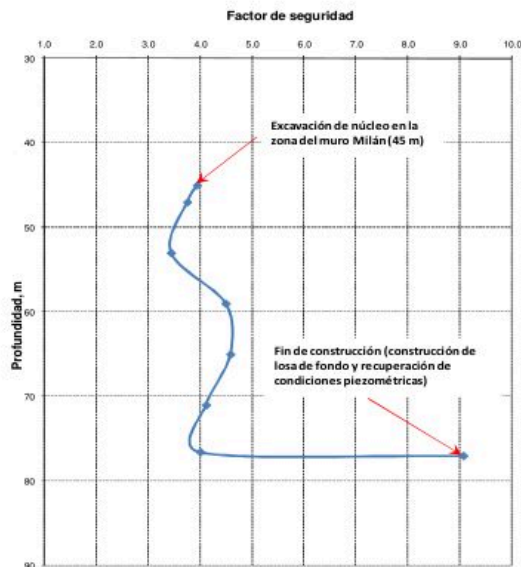


Figura 2. Factores de Seguridad contra Profundidad

En la Figura 4 se muestra un ejemplo de los sitios donde se desarrollan estas deformaciones horizontales y verticales máximas por etapa. En esta misma Figura, se muestran los sitios donde se presentan puntos plásticos.

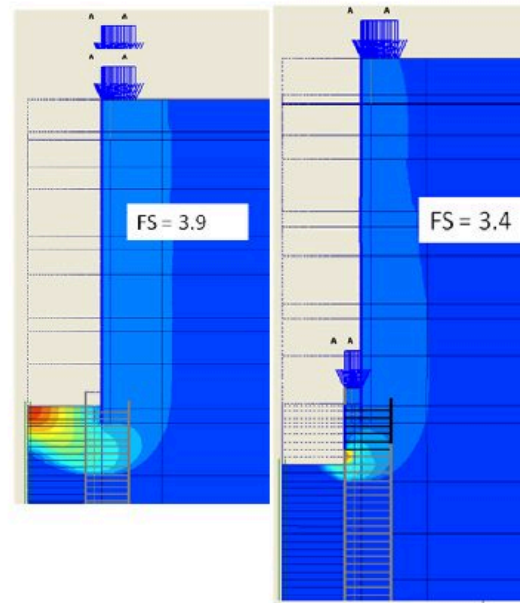


Figura 3. Mecanismos hipotéticos de falla para etapa de fin de la excavación en zona de muro Milán y etapa de excavación de 51 m a 53 m (etapa con Factor de Seguridad mínimo).

Cabe señalar que, de acuerdo con la forma de modelar al suelo (comportamiento elastoplástico con ley de resistencia de Mohr-Coulomb), así como con las consideraciones que el propio programa realiza, se estima que, para los valores de módulo de elasticidad considerados, las deformaciones teóricas obtenidas están sobreestimadas.

Figura 15.9. Factores de seguridad contra profundidad y mecanismos de falla en la L-10

El análisis por elementos finitos sirve para entender el comportamiento de la secuencia constructiva, no como único criterio para calificar el comportamiento real de la excavación. Se presentó para los tramos III y IV, con la L-10 como ejemplo.

convencional (aproximadamente a una distancia de 2 m) hasta 85 m de profundidad. Desde el inicio de la excavación y hasta esta fecha en que la construcción de la lumbrera se ha finalizado y se están iniciando los trabajos de construcción de la galería de montaje, se han tomado lecturas de forma semanal. En la Figura 5

se muestran los desplazamientos reales registrados en uno de los inclinómetros mencionados.

Como se puede ver, los desplazamientos reales máximos que se han presentado son de aproximadamente 2.0 cm, hacia el interior de la excavación, aproximadamente a 69 m de profundidad.

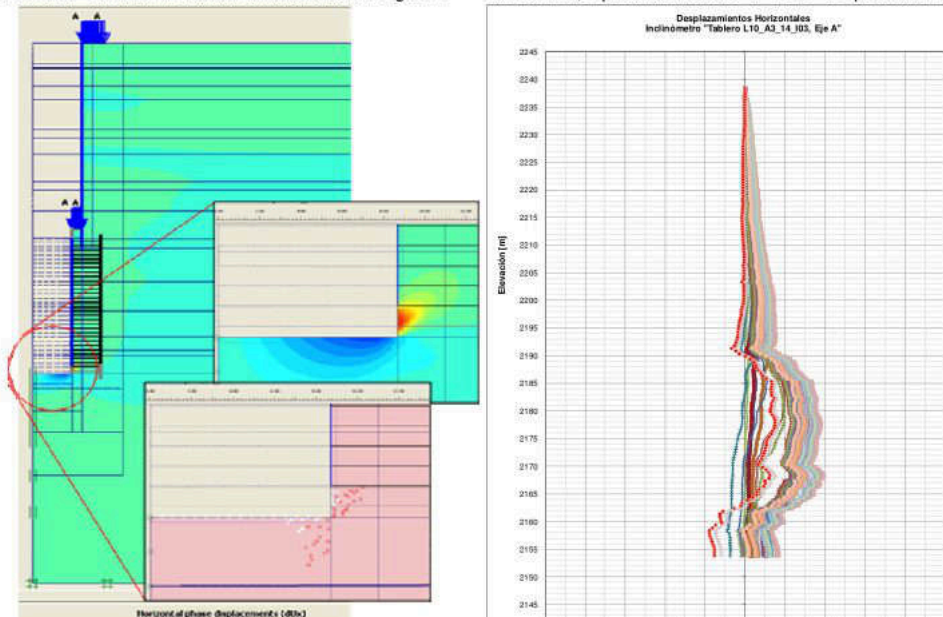


Figura 15.10. Deformaciones horizontales de la L-10

06

L-12 (km 27+603): el acuífero que obligó a rediseñar el bombeo

Los datos geohidrológicos de la L-12 (acuífero Cuautitlán-Pachuca, 18 pozos, más de 600 L/s, subpresión con $FS = 0.11$) están en el capítulo 12. El estudio de ingeniería básica previó 4.6 L/s de bombeo; en obra se midieron más de 600 L/s.

La L-12 se resolvió con un procedimiento mixto: muro Milán de 1.0 m de espesor hasta 44 m (estructural de 0 a 42 m y una pantalla sin refuerzo de 42 a 44 m), diámetro interior del muro de 16 m para absorber desviaciones y permitir el muro convencional, y excavación convencional desde ahí hasta el nivel máximo de 84.55 m. La plantilla del túnel queda en la cota 2,156.393 msnm y la profundidad a la conexión es de 80.397 m.

El muro Milán se detuvo a 44 m porque debajo había gravas y arenas con agua a presión; la pantalla de 42 a 44 m sin acero evita juntas entre paneles en una zona de mejoramiento de suelo. La etapa convencional usó cortes de 2 m de altura, concreto lanzado de unos 15 cm con fibras Dramix ZP305 (40 kg/m³), marcos metálicos cada 1.0 m (0.5 m en los últimos 2 m) con pernos de cortante, y una zanja piloto cada 2 m para confirmar el material. Como refuerzo se previeron dos alternativas: inyección de compactación o tubos metálicos verticales perimetrales. El muro secundario se coló con cimbra deslizante, ascendiendo desde el fondo hasta la trabe de liga, y la losa de fondo en una sola etapa masiva. El bombeo debía mantener el agua a unos -88 m hasta terminar la losa.

TABLA 15.4. ELEMENTOS DE LA L-12

ELEMENTO	DATO
Plataforma y brocales	Escarificación y despalle de unos 70 cm, relleno granular del mismo espesor
Muro Milán	1.0 m de espesor, desplante a -44 m, desviación máxima 0.8 % (1.6 % total de diseño)
Trabe de coronamiento	Liga los paneles en la parte superior
Excavación del núcleo	Excavadora tipo CAT 312 y grúas Link-Belt 318 con almeja de 1.5 m ³ ; camiones de 14 m ³
Trabe de liga	Entre el muro Milán y el muro convencional; con reservaciones para el muro secundario
Anillo de empotramiento	Junta plástica impermeable en la conexión túnel-lumbrera
Bombeo	Nivel abatido a unos -88 m hasta terminar la losa

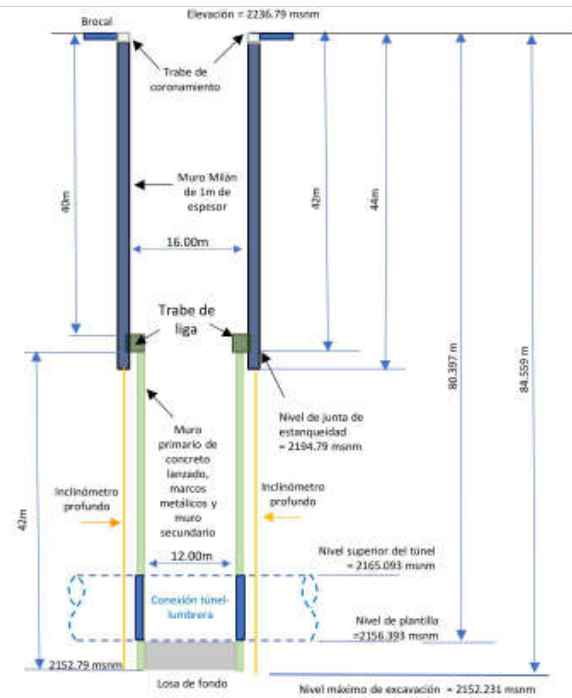


Figura 58.-Características generales de la lumbrera L-12, vista en perfil (Fuente: CONAGUA- COMISSA, modificada por S. González 2023).

Figura 15.11. Perfil vertical de la lumbrera L-12

siguiente figura (se indican las profundidades de instalación de cada instrumento).

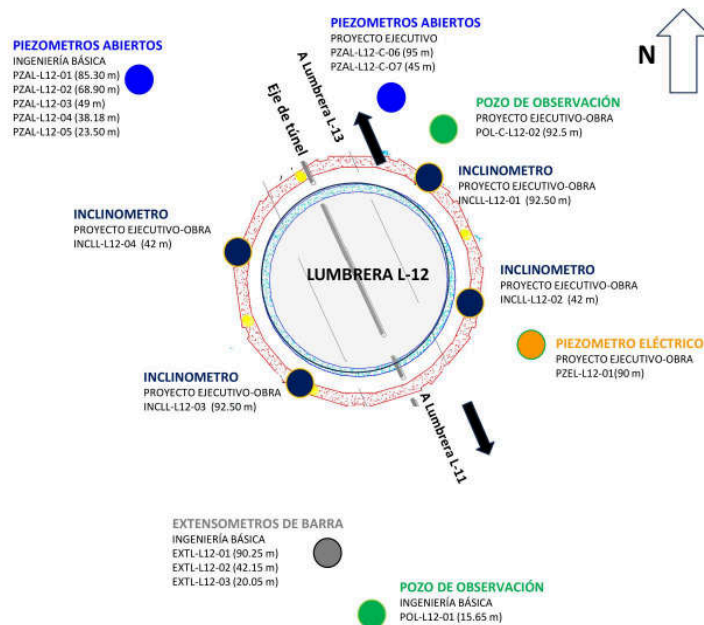


Figura 29.- Sembrado de instrumentación utilizada para la lumbrera L-12 (Fuente: CONAGUA-CFE-COMISSA).

Figura 15.12. Instrumentación de la lumbrera L-12

07

L-18 (km 44+304, Huehuetoca): lumbrera mixta de 128.5 m

La L-18, del tramo 5, tiene 128.5 m de profundidad proyectada y 12 m de diámetro terminado. El muro Milán se redujo de 81.0 a 80.0 m con los datos de obra.

Dato técnico: una tesis ubica la L-18 en el km 43+612 y otras dos en 44+303.970; la Tabla 15.1 usa el segundo valor. La diferencia es de 692 m y no afecta el procedimiento descrito, que solo está documentado paso a paso en la primera.

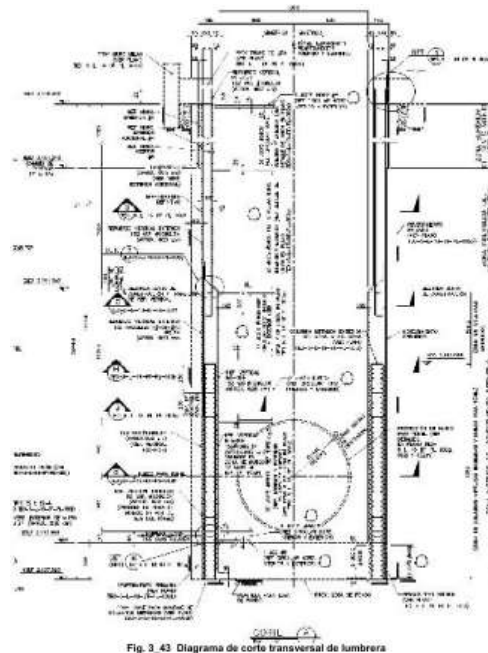


Fig. 3_43 Diagrama de corte transversal de lumbrera

Figura 15.13. Cinco etapas del procedimiento mixto de la L-18

PREPARACIÓN DEL TERRENO Y BROCALES

Se retiró la capa vegetal (hasta 1 m) y se rellenó con tepetate en capas de máximo 30 cm compactadas al 90 % Proctor estándar con rodillo de 10 t. En el área del brocal se excavó 90 cm en un radio de 11 m y se rellenó con cinco capas de 20 cm de grava compactada al

95 %. La razón: la hidrofresa, de 37 t, trabajaría más de tres meses en el mismo sitio.

Los brocales se alojaron en zanja de 2.5 m. El interior llevó 30 t de acero, 125 m² de cimbra y 80 m³ de concreto de $f'c = 350 \text{ kg/cm}^2$; sobre ellos se coló una plataforma de 15 cm para la hidrofresa.



Figura 15.14. Mejoramiento del suelo en el predio de la L-18

MURO MILÁN CON HIDROFRESA

Se usó la hidrofresa BC40, de 37 t, con cabezal de $1.20 \times 2.80 \text{ m}$, capaz de llegar a 120 m y guiada por sistema ultrasónico. El lodo se hizo con 70 kg de bentonita sódica por 973 L de agua y se recicló en una planta de cuatro fases.

La primera etapa tiene 24 tableros de dos tipos (A1 y A2) que se traslapan; se excavaron primero los A2. Las armaduras miden 79 m más 1 m de anclaje, con varilla acoplada con conectores mecánicos roscados; se armaron sobre rieles para garantizar la verticalidad y se izaron con grúa de más de 30 t. La verticalidad se verificó con el equipo KODEN Sonic Caliper.

El concreto fue autocompactable, producido en planta propia y colocado con tubería tremie de 8" y tres pelotas de hule que expulsan el lodo; se llevó control numérico entre la columna teórica y la real. Se dejó el concreto a 2 m bajo el brocal para la trabe de

coronamiento, de 140 m³ y 10 t de acero.

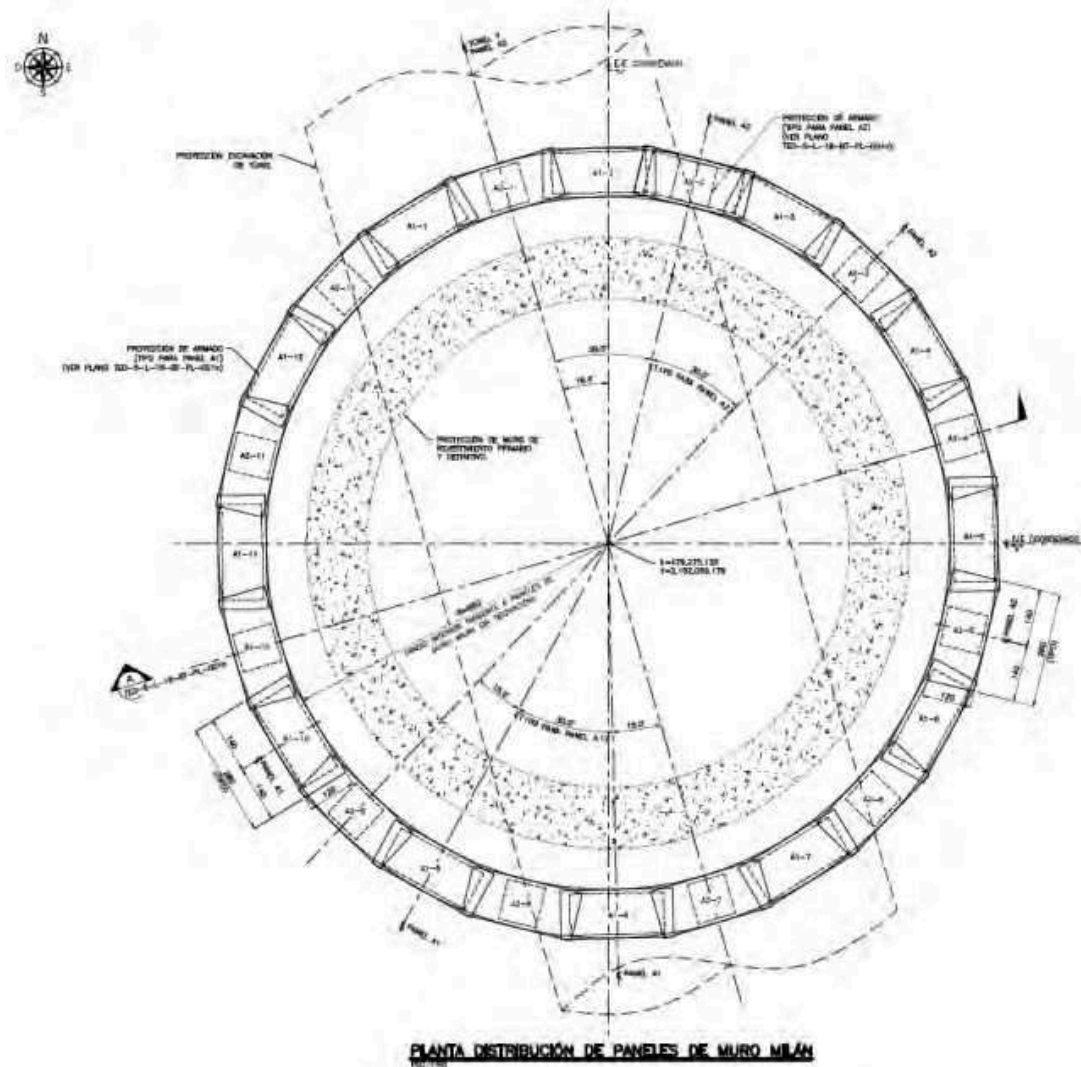


Figura 15.15. Planta de distribución de paneles de muro Milán de la L-18



Figura 15.16. Hidrofresa BC40 en la L-18



Figura 15.17. Planta de tratamiento de lodos bentoníticos de la L-18



Figura 15.18. Hidrofresa y armadura en tableros opuestos de la L-18

NÚCLEO, TRABE DE LIGA Y REVESTIMIENTO PRIMARIO

Se demolió la plataforma con martillo (menos de 12 h) y se excavó el núcleo hasta 78 m, donde se hizo la trabe de liga. El volumen de la primera etapa, con abundamiento de 0.25, fue de 22,130.55 m³, llevados al tiro de Conagua en San Miguel Jagüeyes. La trabe de liga une el muro Milán con la etapa convencional: se escarificó el muro unos 10 cm, se anclaron varillas con resina epóxica y se coló en dos etapas hasta un radio de 7.65 m, con tremie.

El revestimiento primario fue de marcos metálicos y concreto lanzado con fibras de acero y acelerante; la capa entre el muro y el primer marco es de 60 cm de terreno a lanzar. Pasados 98.85 m y desde los 95 m se añadió armado y una tercera capa de 20 cm cada 3.85 m de avance. Se inyectó aire con manga de lona hasta 90 m para disipar el polvo. En los primeros 80 m el agua se achicó con un cárcamo y bomba sumergible de 10 HP.



Figura 15.19. Filtración de agua en las paredes de la excavación de la L-18



Figura 15.20. Acumulación de agua en el cárcamo de bombeo de la L-18

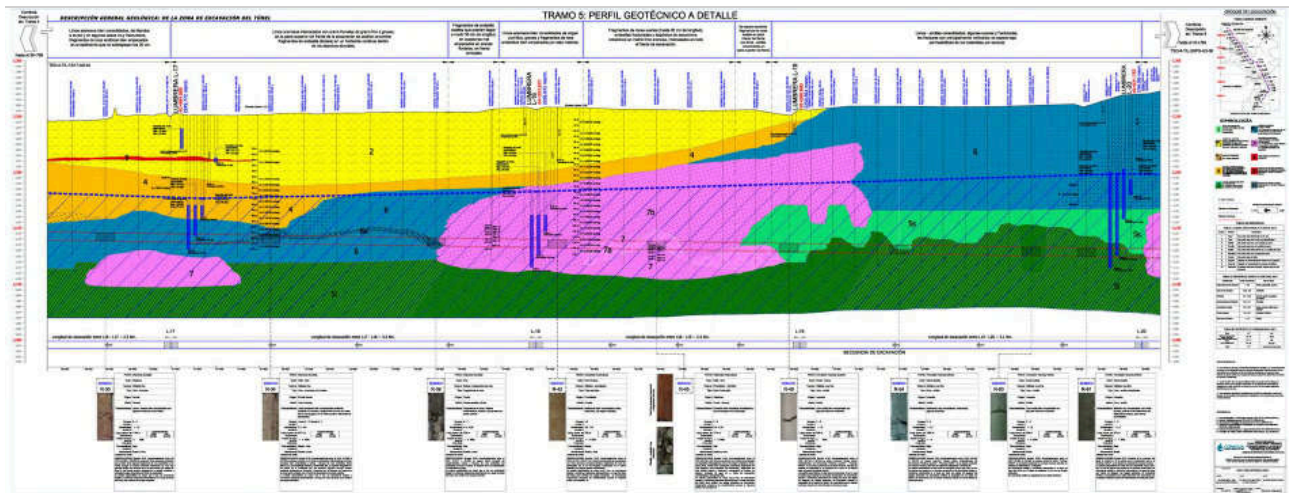


Figura 15.21. Perfil geotécnico a detalle del tramo V

REVESTIMIENTO DEFINITIVO, PORTAL DE CONEXIÓN Y LOSA DE FONDO

El revestimiento definitivo incluye una estructura de acero A-36 ahogada en el concreto: 14 columnas de 17.5 m, 4 trabes y 8 cartelas, unas 400 t, que enmarcan el portal del túnel. Las columnas C1 pesan unas 40 t y las C2 unas 12 t. Se probaron las soldaduras con líquidos penetrantes y ultrasonido. El refuerzo vertical de más de 50 m se armó de abajo hacia arriba desde una plataforma colgada de la grúa.

El concreto del revestimiento se coló con cimbra deslizante de 1.20 m de altura, en capas de 40 cm y de forma continua las 24 h del día, desde 125.5 m hasta la trabe de liga a 76 m. La losa de fondo, de 3 m de espesor y 523 m³, se coló de forma monolítica en 24 a 36 h, con retardante y control de temperatura por el calor de hidratación; se usaron conectores Lenton Terminator por el armado congestionado de cinco lechos.

Se eligió cimbra deslizante en lugar de cimbra por tramos porque permite colado continuo sin juntas frías en alturas de decenas de metros, y la losa de fondo "mitiga las subpresiones" del agua del subsuelo.

L-20 (km 49+992): la lumbrera más profunda

La L-20 es la lumbrera de ensamble de la tuneladora del tramo 6 y la más profunda del TEO. El estudio de instrumentación la ubica en el cadenamiento 49+607.654 (la Tabla 15.1 usa 49+992) ($X = 476,861.310$ y $Y = 2,196,795.830$), con profundidad máxima de 148.204 m, diámetro libre de 22.06 m y brocal en 2,269.385 msnm. El muro Milán, de tableros de 1.20×2.80 m, llega a 120 m; de 120 m a unos 160 m la excavación sigue con concreto lanzado, anclas y anillos de acero. Las cuatro profundidades de la L-20 que aparecen en el documento corresponden a fuentes distintas: 144.96 m es la de proyecto hasta la plantilla (tabla 15.1), 148.204 m la máxima del estudio de instrumentación, 152.36 m la de la tabla de cadenamientos del capítulo 11 y 158.5 m el fondo del perfil geotécnico del sondeo.

TERRENO: SIETE UNIDADES HASTA 158.5 M

Los sondeos con muestreo continuo del proyecto de la lumbrera permitieron dividir el subsuelo en siete unidades.

TABLA 15.5. ESTRATIGRAFÍA DE LA L-20

UNIDAD	PROFUNDIDAD (M)	MATERIAL	SPT PROMEDIO (GOLPES)	CONTENIDO DE AGUA PROMEDIO (%)
A	0 a 3.10	Costra superficial de arcilla de alta plasticidad (CH), rígida	15	31
B	3.10 a 33.50	Limos y arcillas arenosas (CH, CL, MH, ML), rígidos	60 a 90	30
C	33.50 a 52.00	Limo y arcilla de alta plasticidad (MH, CH)	30	36
D	52.00 a 59.50	Limo arenoso (MH, ML), muy rígido	90	29
E	59.50 a 85.60	Arenas limosas muy densas y limos arenosos (SM, ML)	90	31

UNIDAD	PROFUNDIDAD (M)	MATERIAL	SPT PROMEDIO (GOLPES)	CONTENIDO DE AGUA PROMEDIO (%)
F	85.60 a 112.50	Arcillas arenosas muy rígidas (CL) con boleos	75	40
G	112.50 a 158.50	Limo de alta plasticidad (MH), muy rígido	60 a 90	45

El muro Milán de 120 m atraviesa las unidades A a F y entra en la G; la excavación convencional de 120 m al fondo se hace entera en el limo plástico de la unidad G. La unidad F, con boleos a distintas profundidades, es la que más complica la perforación del muro entre 85.6 y 112.5 m.

Figure 2 presents the geotechnical conditions encountered at the site; a summarized description of the main stratigraphic units is included as follows.

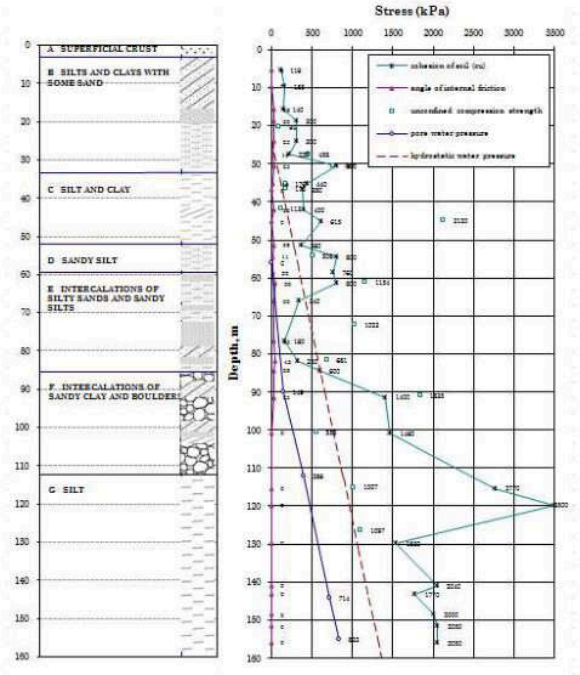


Figure 2. Geotechnical conditions at the site

(A) Superficial Crust. From 0 to 3.10 m in depth; it is

Figura 15.22. Perfil estratigráfico y geotécnico de la L-20 hasta 158.5 m

PRESIONES DE PORO: DOS ESTACIONES, DOS LECTURAS

La estación piezométrica de la ingeniería básica tiene cinco piezómetros Casagrande en un solo barreno de 8.5" y un tubo testigo (TO-L20). La presión de poro se convierte en carga de agua con

$$h = \frac{u}{\gamma_w}$$

donde h es la carga de agua equivalente (m), u es la presión de poro medida (kPa) y γ_w es el peso volumétrico del agua (9.81 kN/m³).

TABLA 15.6. ESTACIONES PIEZOMÉTRICAS DE LA L-20

ESTACIÓN	INSTRUMENTO	PROFUNDIDAD (M)	PRESIÓN DE PORO (KPA)	CARGA (M)	RELACIÓN CON LA HIDROSTÁTICA
CFE (2008-2010), Casagrande	PZA-L20-A	155	837.31	85.4	0.55
	PZA-L20-B	144	725.64	74.0	0.51
	PZA-L20-C	111.7	443.49	45.2	0.40
	PZA-L20-D	90	157.98	16.1	0.18
	PZA-L20-E y TO-L20	56 y 25.55	seco		
Cuerda vibrante	PCV-1	123	47.9	4.9	0.04
	PCV-2	139	64	6.5	0.05
	PCV-3	147.5	78.6	8.0	0.05
	PCV-4	159.5	109	11.1	0.07

Por ejemplo, para PZA-L20-A: $h = 837.31/9.81 = 85.4$ m, que frente a los 155 m de profundidad da una relación de $85.4/155 = 0.55$ de la presión hidrostática.

Los valores de 2010 son mucho menores que los de 2008. Meter cinco piezómetros abiertos en un solo barreno, con sellos de 20 a 80 cm entre ellos, favorece que se interconecten y den lecturas defectuosas; además, en la estación nueva colocar los filtros y sellos a gran profundidad es difícil y hay riesgo de pasarse del límite de presión del instrumento durante la inyección. Lo recomendable es perforar barrenos independientes de no más de 4" por piezómetro.

INCLINÓMETROS: INSTALACIÓN Y PRIMERAS LECTURAS

La instrumentación la especificó Conagua: cuatro inclinómetros verticales a 160 m (IV-1 e IV-3 en el muro Milán, IV-2 e IV-4 en el terreno) y una estación de piezómetros de cuerda vibrante. Para los del muro, el contratista metió un tubo de PVC de 3" por el acero antes del colado, lo relleno con arena, y con el concreto a su resistencia de diseño (35,000 kPa) perforó con trícorno en tres pasos, de 2 15/16" a 4½", hasta 160 m. En el terreno se perforó igual. Se bajaron secciones de tubo ABS de 73 mm de diámetro y 3.05 m de largo, con punta de acero, tapón de fondo y concreto simple como lastre en el primer tramo, llenas de agua para que descendieran por su peso, y se inyectó una mezcla de 15 % cemento, 5 % bentonita y 80 % agua. Al empezar los del muro, la excavación del núcleo ya iba en 16 m y fue necesario apoyar el tubo en una estructura anclada a la pared.

Lo que se midió entre mayo y junio de 2010: el inclinómetro IV-2, en el terreno, registró hasta 10 mm hacia la excavación en superficie, y a 123 m cambió de sentido a 29 mm hacia afuera; el IV-4 marcó 5 mm hacia afuera hasta 71.5 m; el IV-3, en el muro, solo 3 mm hacia afuera, que los autores atribuyen al asentamiento del tubo en el barreno y a la precisión del aparato. El IV-1 se tuvo que reinstalar por un problema de instalación y no tenía lecturas en ese momento.

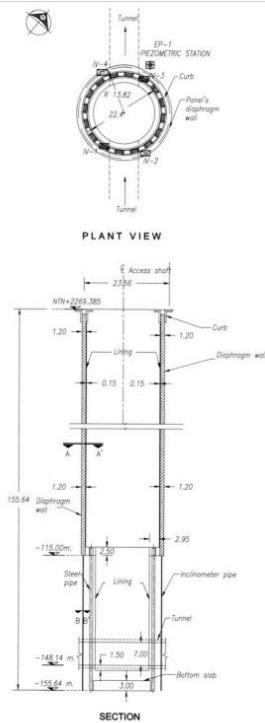


Figure 3. Location and depths of the instrumentation

Figura 15.23. Ubicación y profundidades de la instrumentación de la L-20

DISEÑO ALTERNATIVO ESTUDIADO

El diseño de la L-20 se estudió con tres soluciones. El concreto lanzado por etapas de 3 m de 0 a 60 m dio un FS global de 0.70 y falla a 30 m con 30 cm de desplazamiento. Se propuso entonces una primera etapa de 0 a 40 m con anillos prefabricados y relleno fluido: FS de 2.27, falla de fondo de 1.78, desplazamientos de 2.4 cm horizontal y 1 cm vertical. Para la segunda etapa, de 40 a 152 m, un elemento de retención inferior (ERI-1) de muro Milán o pilas secantes que crea un acuífero confinado a presión atmosférica, con FS de 1.80. El elemento se extiende 10 m bajo la losa de fondo y su espesor mínimo calculado de 1.0 m se ajustó a 1.30 m. El concreto lanzado solo se descartó.

TABLA 15.7. ESTABILIDAD DE LA L-20 SEGÚN EL DISEÑO

REVISIÓN	RESULTADO	CRITERIO
Falla de fondo sin soporte	FS cercano a 1 a 60, 90 y 150 m	FS mínimo 1.5
Subpresión	Abatir hasta 47 kPa en el estrato de 156 m	FS 1.5 a 152 m
Zanja anular	FS menor a 1 entre 40 y 100 m; deformación de unos 15 cm	Se absorbe con mayor espesor

REVISIÓN	RESULTADO	CRITERIO
Flotación	FS = 7.90	1.5
Sismo (seudoestático, PRODISIS)	FS = 1.40; fuerza sísmica de 23,483 kN	Grupo A
Desplazamiento vertical en superficie	4 cm	Servicio

Los parámetros sísmicos del sitio fueron $a_0 = 0.172$ g y meseta espectral $c = 0.429$ g. La losa de fondo del diseño tiene 2 m de espesor.

LO CONSTRUIDO

Las lumbreras L-18, L-19 y L-20 se hicieron en dos etapas: muro Milán con hidrofresa y, después de la trabe de liga (a 120 m en la L-20), método convencional con marcos metálicos, concreto lanzado, losa de fondo y cimbra deslizante. La hidrofresa BC40 se usó por primera vez en América en la L-20.

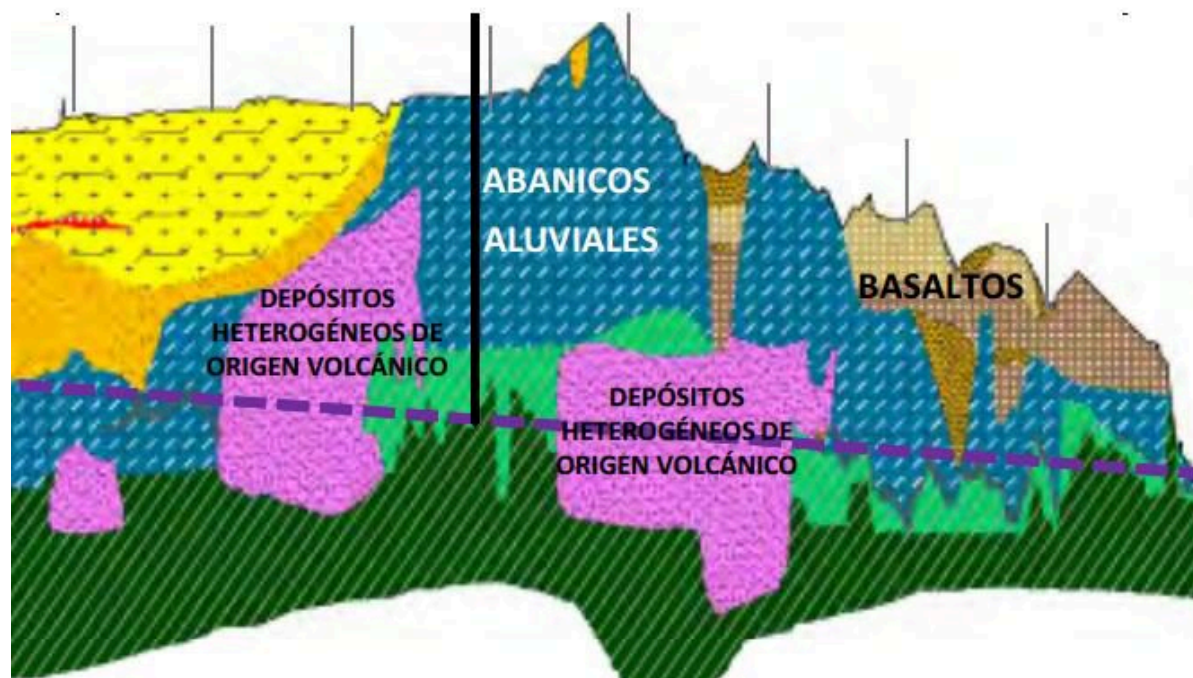


Figura 15.24. Perfil geológico de la L-20 en las etapas 5 y 6

562

Portal de salida (Conejos, El Salto, Hidalgo)

El portal es el extremo de descarga y, a la vez, el punto de partida de la excavación del tramo 6, ya que la tuneladora se armó ahí. Es una lumbrera con muro Milán, túnel y obras adicionales, construida con hidrofresa y tableros de 1.20 × 2.80 m hasta 122 m. El portal está en el cadenamiento 61+802.948 y el inicio del vertedor en 61+991.948; el modelo físico de la descarga se corrió con 170 m³/s, un escenario de ensayo mayor que los 150 m³/s de proyecto.

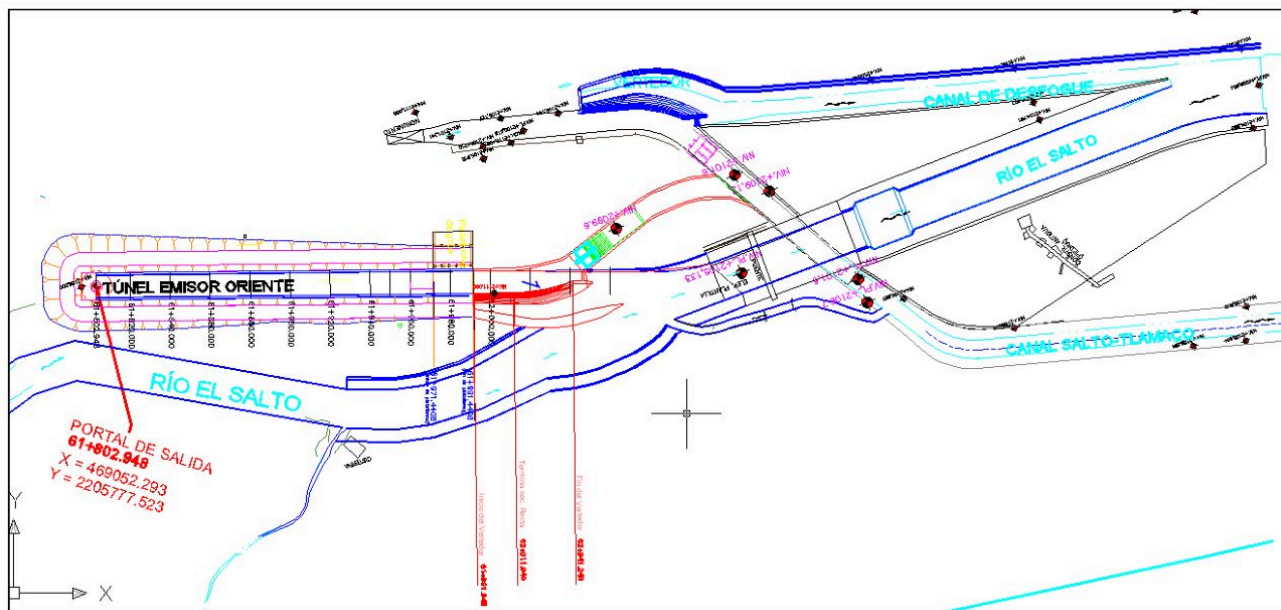


Figura 15.27. Portal de salida, canal principal y vertedor sobre el río El Salto



Figura 15.28. Portal de salida del TEO en construcción

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN

TABLA 15.8. PARÁMETROS DEL PORTAL DE SALIDA

ELEMENTO	DATO
Plataforma de trabajo	7.50 m de ancho desde el faldón del brocal exterior, capas de 20 cm, tepetate-arena limosa al 90 % PVSM
Brocal	Zanja de 2.50 m, talud de 30°; $f'c = 350 \text{ kg/cm}^2$, CPC 40 RS
Muro Milán	Hidrofresa; tableros primarios de $1.20 \times 2.80 \text{ m}$, excavación hasta 122 m
Concreto del muro	$f'c = 350 \text{ kg/cm}^2$ de 0 a 100 m y 400 kg/cm^2 de 100 a 122 m; relación agua-cemento máxima 0.45; autocompactable
Lodo bentonítico	Densidad entre 1.07 y 1.15 t/m^3 , Marsh de 40 a 60 s, arena menor a 3 %, pH de 7 a 9.5
Control de tableros	Mínimo 3 tableros sin excavar entre uno y otro; 3 días de espera junto a uno recién colado
Bombeo	4 pozos exteriores autorizados por Conagua en Junta de Ingeniería; antes de excavar el núcleo
Excavación del núcleo	Almeja loca con grúa Link-Belt LS-218 y luego excavadora CAT 330
Losa de fondo	4.30 m de espesor, $f'c = 350 \text{ kg/cm}^2$, CPC 30 RRS, mínimo 375 kg de cemento por m^3
Revestimiento definitivo	1.50 m de espesor desde -116.00 hasta -102.033 m; cimbra deslizante; $f'c = 350 \text{ kg/cm}^2$

La hidrofresa se prefirió a la almeja porque corta suelos muy duros y mantiene la verticalidad con computadora y sensores; las juntas entre tableros ajustan mejor y el flujo hacia el interior es menor. El bombeo opera hasta que la losa de fondo alcanza su resistencia de diseño. El revestimiento definitivo se coló con cimbra deslizante en una sola etapa, las 24 h del día, esperando a que la losa llegara al 80 % de $f'c$.

Dato técnico: una fuente describe una lumbrera de ensamble con muro hasta 122 m y revestimiento definitivo que arranca en -116 m, y otra da 23.19 m para el portal de salida. Son dos estructuras del mismo sitio: la lumbrera profunda desde la que se armó la tuneladora del tramo 6 y la estructura de salida de poca profundidad. El procedimiento constructivo descrito corresponde a la primera.

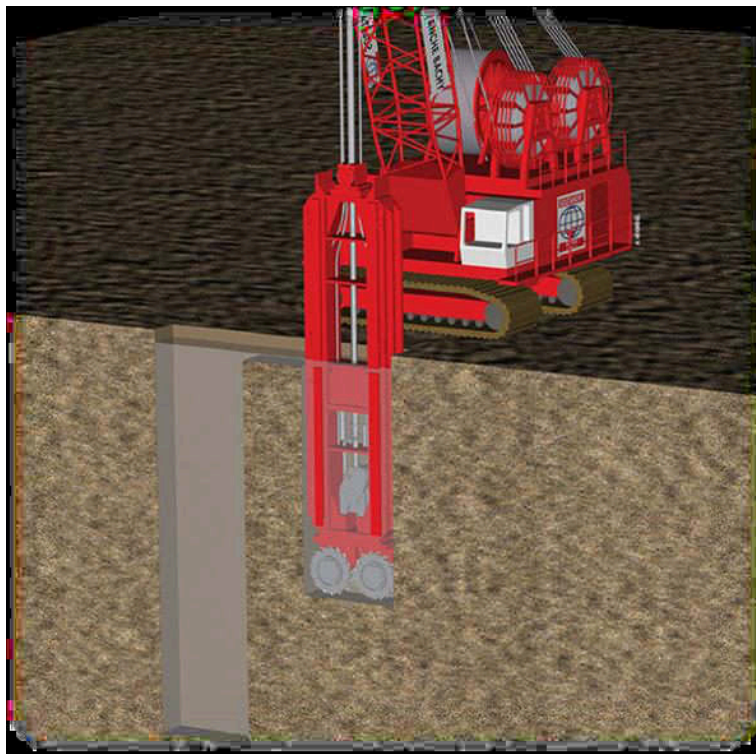


Figura 15.29. Tablero de muro Milán con hidrofresa en el portal

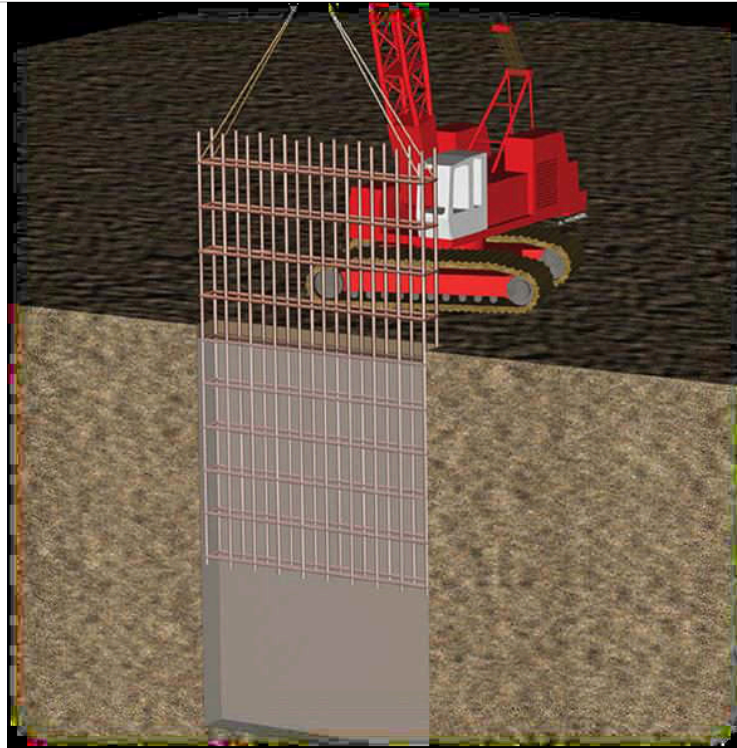


Figura 15.30. Izaje del armado de acero para un tablero



Figura 15.31. Colado del tablero con cuchara de concreto

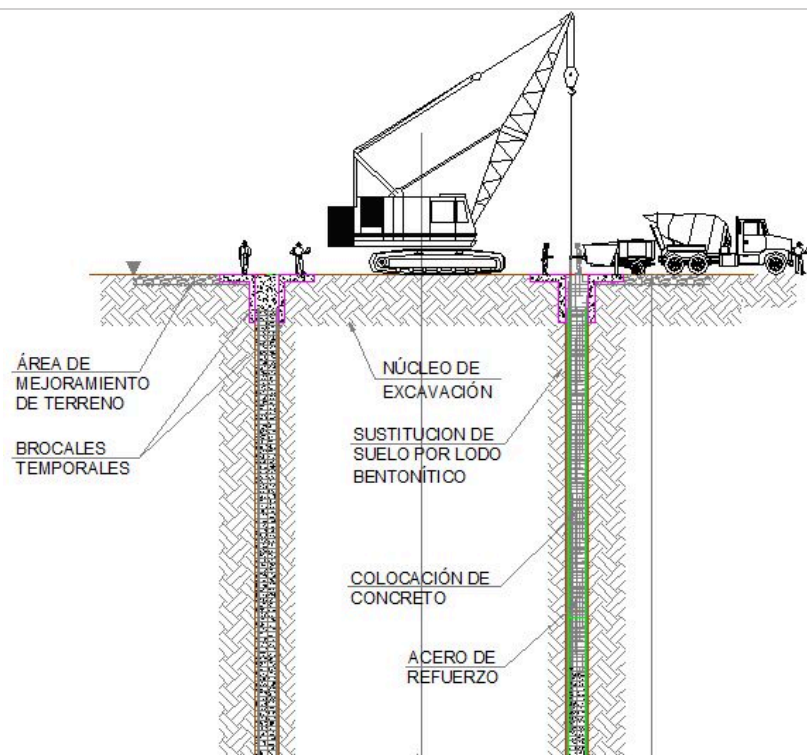


Figura 15.32. Esquema de la colocación de concreto en el muro Milán

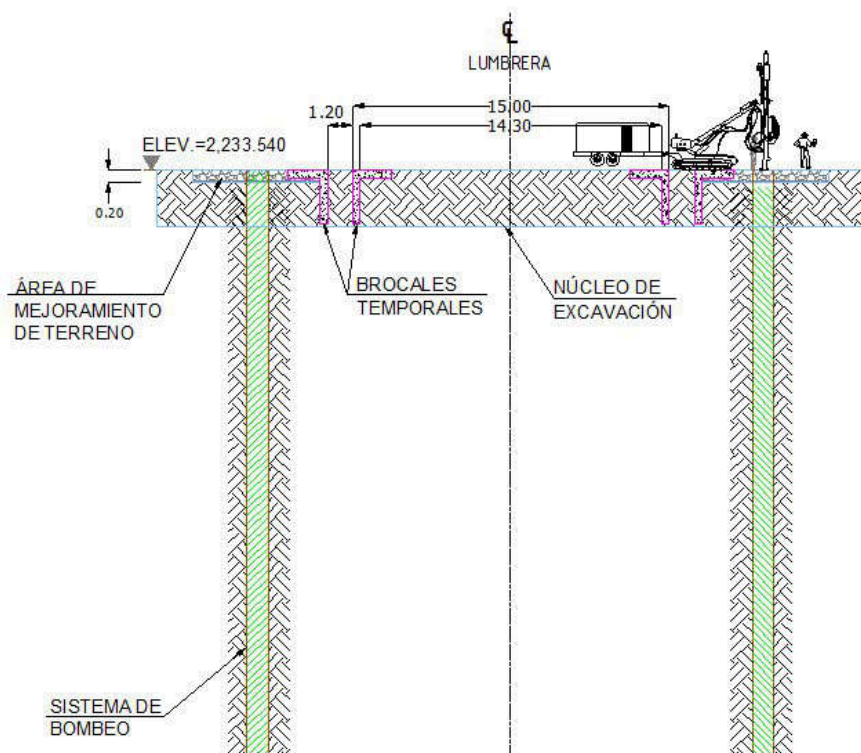


Figura 15.33. Esquema del sistema de bombeo exterior y los brocales



Figura 15.34. Colocación del sistema de bombeo

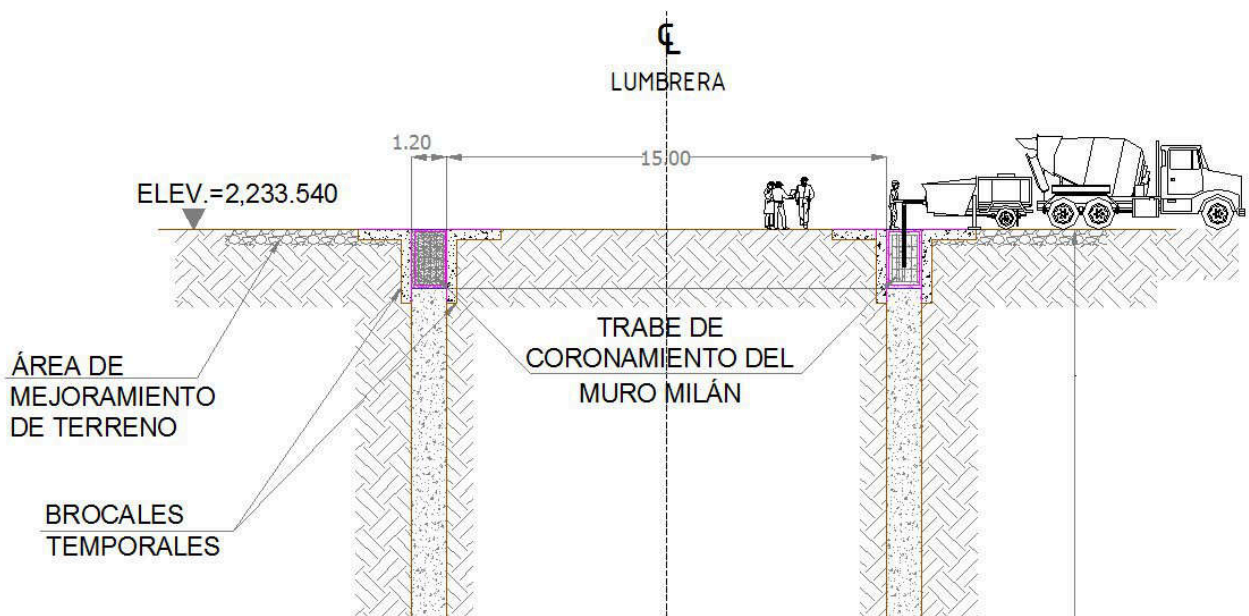


Figura 15.35. Trabe de coronamiento del muro Milán, esquema

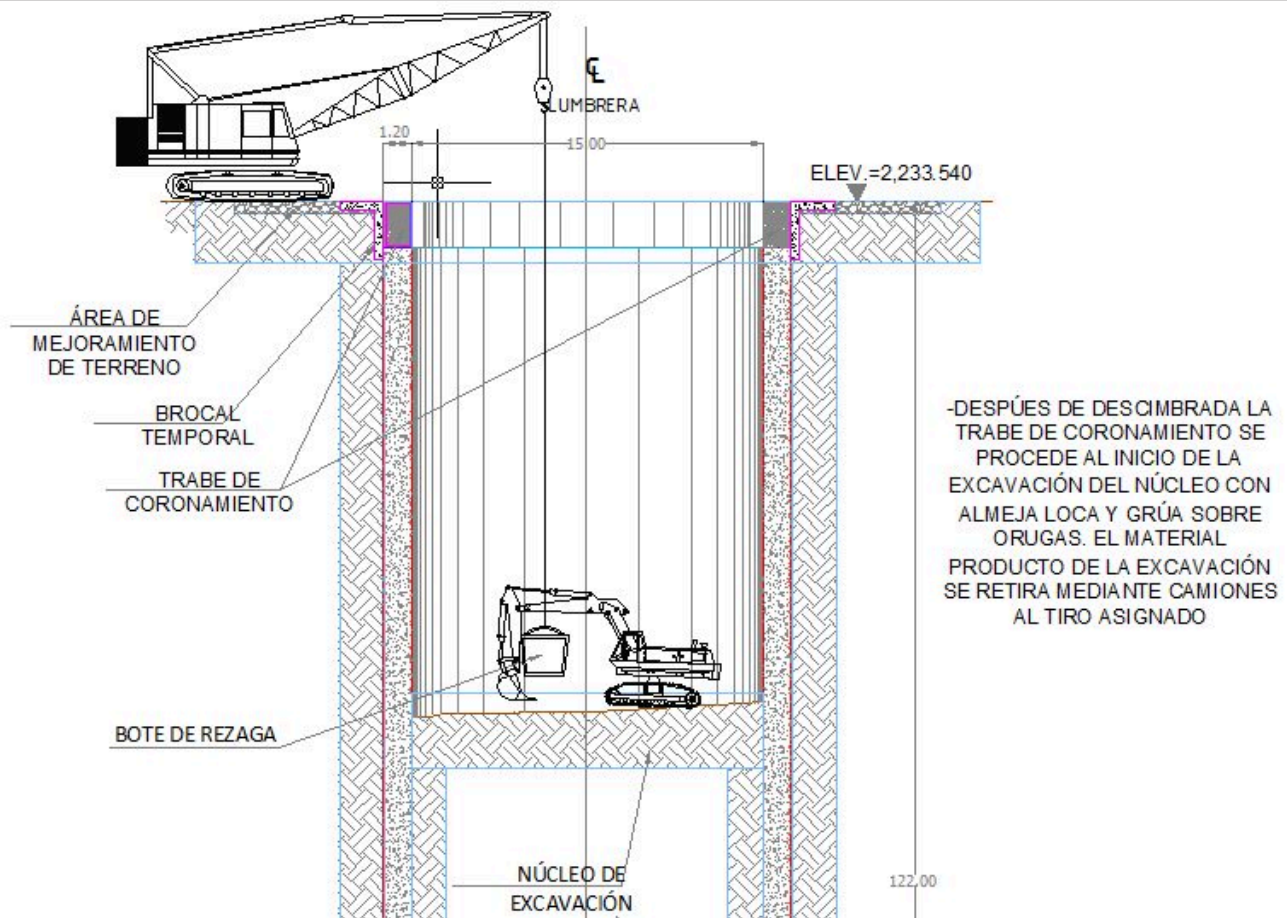


Figura 15.36. Excavación del núcleo de la lumbrera del portal, esquema

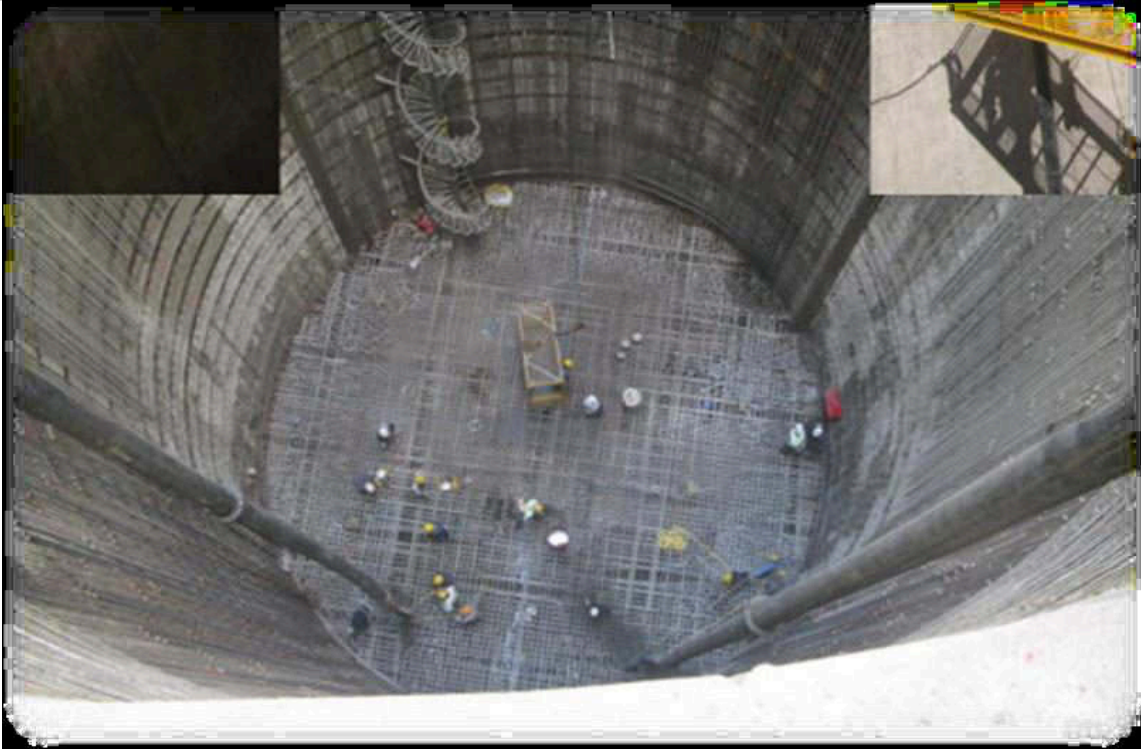


Figura 15.37. Fondo de la lumbrera del portal con el armado de la losa

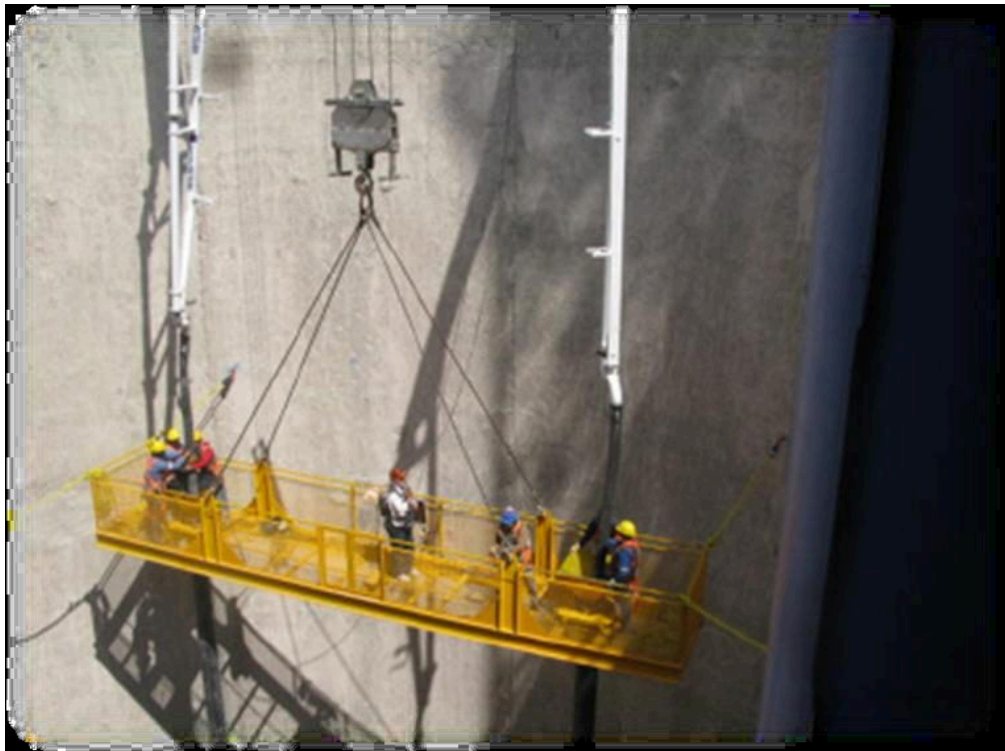


Figura 15.38. Plataforma colgada y tubería de colado dentro de la lumbrera

TÚNEL, CONEXIÓN TÚNEL-LUMBRERA Y OBRAS ADICIONALES

El revestimiento primario es de dovelas de concreto reforzado (41,600 anillos de 0.35 y 0.40 m de espesor, 1.50 m de ancho, 7.70 m de diámetro interior y 8.4 m de diámetro exterior) y el definitivo de 0.35 m con $f'c = 350 \text{ kg/cm}^2$ y diámetro terminado de 7.00 m. El diseño de dovelas debía limitar la deformación diametral a 0.005 veces el diámetro y la distorsión a 1 %. Los escudos EPB son de 8.70 m con 24 gatos de empuje; el espacio mínimo entre dovela y faldón es de 5 mm; la inyección de contacto se dosifica por 0.5 m^3 con 200 kg de cemento, 0.243 m^3 de arena sílica, 50 kg de bentonita y 380 L de agua.

Como obras adicionales se construyeron una losa base de 10 cm ($f'c = 350 \text{ kg/cm}^2$) para la grúa que baja los trenes del escudo y las dovelas; un pozo y planta de bombeo que abastece de agua al municipio de El Salto, como compensación a la población y requerimiento de Semarnat; un puente de acero sobre el río El Salto, pedido por el gobierno municipal; y una subestación eléctrica que no estaba en el proyecto original.

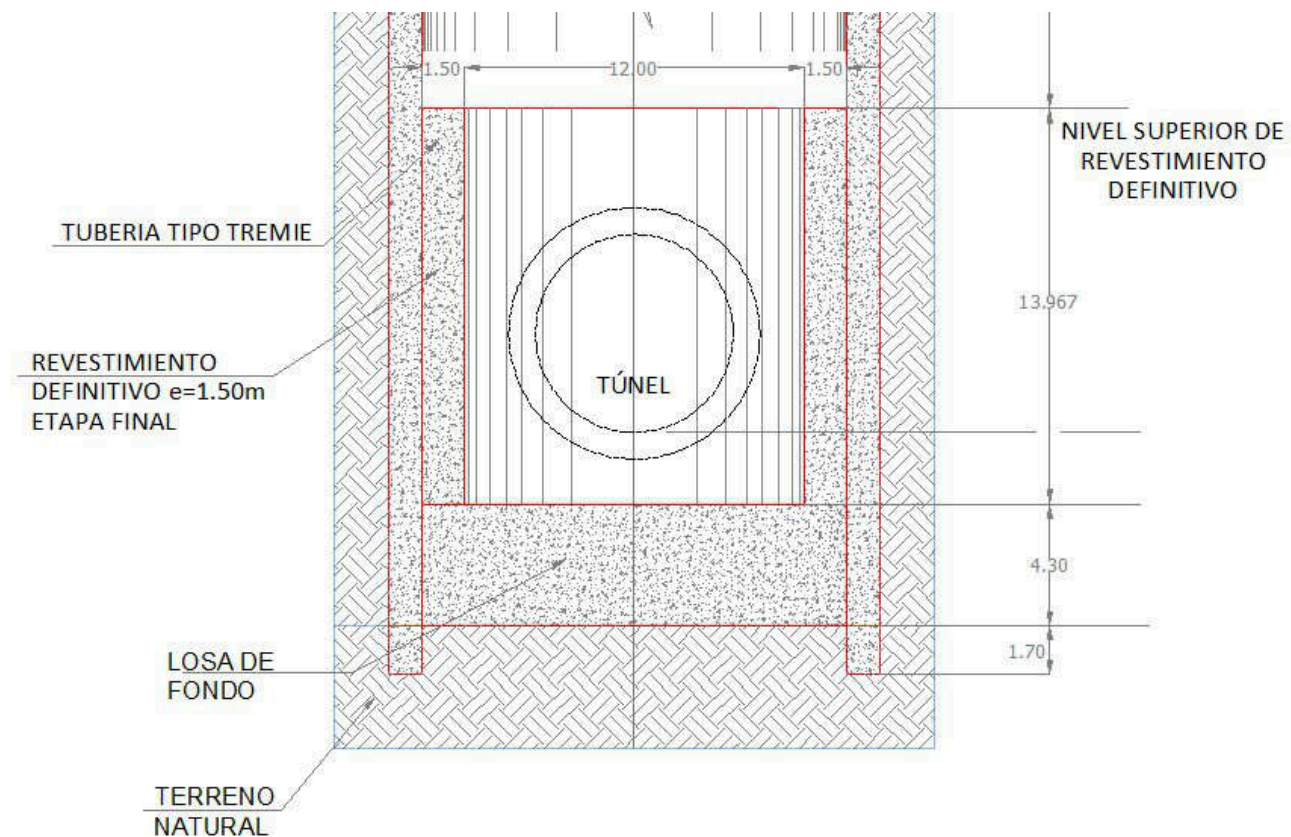


Figura 15.39. Esquema del revestimiento definitivo en la conexión túnel-lumbrera



Figura 15.40. Acceso revestido del túnel en la luminera 0



Figura 15.41. Losa base y patio de dovelas para el descenso del equipo



Figura 15.42. Subestación eléctrica en el portal de salida

10

Lumbreras de montaje y galería de ensamble de la tuneladora

Las siete lumbreras de montaje se diseñaron para bajar, armar y sacar las tuneladoras. Antes de armar el equipo se necesitaban en superficie plataforma de maniobras y patio de manto de anillos, cimentación de la grúa, de la planta de inyección y de las zonas de soldadura de la rueda de corte y del faldón de cola, además del depósito de rezaga y las trincheras de instalaciones; en el fondo, la demolición del muro de la lumbrera para la salida del escudo.

El espacio fue el límite. Con lumbreras de 16 m y de 27 a 52 m de profundidad, las máquinas S-497 y S-498 solo pudieron armarse por partes y alcanzaron su configuración completa con todos los trenes tras avanzar 95 m. Hasta entonces los trenes quedaron en

superficie y se conectaron por un cordón umbilical de mangueras. El tornillo y las bombas de sólidos de las EPB (hasta 360 m³/h) sustituyen al transportador vertical convencional que sería necesario en pozos profundos.

Las lumbreras con salida de máquina llevan estructura metálica de emportalamiento: en la L-18 son 14 columnas y unas 400 t de acero, y en la L-20 se bajó una estructura de emportalamiento al fondo abierto. Dónde y cómo se armó cada escudo está en el capítulo 14. La galería de montaje de la L-10 se construyó cuando terminó el pozo y la de la L-21A, con 28 m de herradura, se trata en el capítulo 14.



Figura 15.43. Lumbrera con concreto lanzado, marcos metálicos y excavación con retroexcavadora

11

Instrumentación geotécnica de las lumbreras

Las lumbreras llevaron inclinómetros, que miden cuánto se mueve el muro y el terreno, y piezómetros, que miden la presión del agua. La tabla resume lo instalado en las cinco lumbreras con datos publicados.

TABLA 15.9. INSTRUMENTACIÓN DE LAS LUMBRERAS ESTUDIADAS.**LUMBRERA INSTRUMENTOS**

L-04	4 piezómetros Casagrande y tubo de observación a 7.30 m; 4 inclinómetros hasta 51 m en el muro; 6 tubos para pruebas sónicas de integridad en 3 tableros
L-10	4 inclinómetros (2 en el muro Milán hasta 45 m y 2 hasta 85 m, a 2 m detrás del muro convencional), lecturas semanales desde octubre de 2009; 8 pozos de abatimiento de 85 m
L-12	5 piezómetros Casagrande, 1 pozo somero, 3 extensómetros (ingeniería básica); 2 piezómetros, 1 eléctrico, 1 pozo profundo y 4 inclinómetros (proyecto ejecutivo)
L-18	4 inclinómetros, 5 piezómetros, 2 tubos de observación y 2 pozos de bombeo; 20 referencias superficiales radiales
L-20	4 inclinómetros a 160 m (2 en el muro, 2 en terreno) y estación de 4 piezómetros de cuerda vibrante (123, 139, 147.5 y 159.5 m)

El registro de la L-20 en 27 pasos muestra movimientos hacia el centro tras pasar los 118 m (desplante del muro Milán) y ningún movimiento tras colar la losa y el revestimiento. Durante el fondo abierto ocurrió un sismo y se registraron desplazamientos hacia el interior. Los piezómetros de la L-20 bajaron de 38.66, 52.27, 65.91 y 97.43 t/m² a 3.45, 10.53, 18.25 y 24.34 t/m² con el bombeo, y el nivel de excavación se mantuvo como mínimo 6 m sobre el nivel del agua del pozo central en la L-19.

Una lección de calibración: se verificaron cinco sondas inclinométricas en un mismo inclinómetro y cinco consolas en un piezómetro, con tendencias iguales, pero no se verificó el cable.

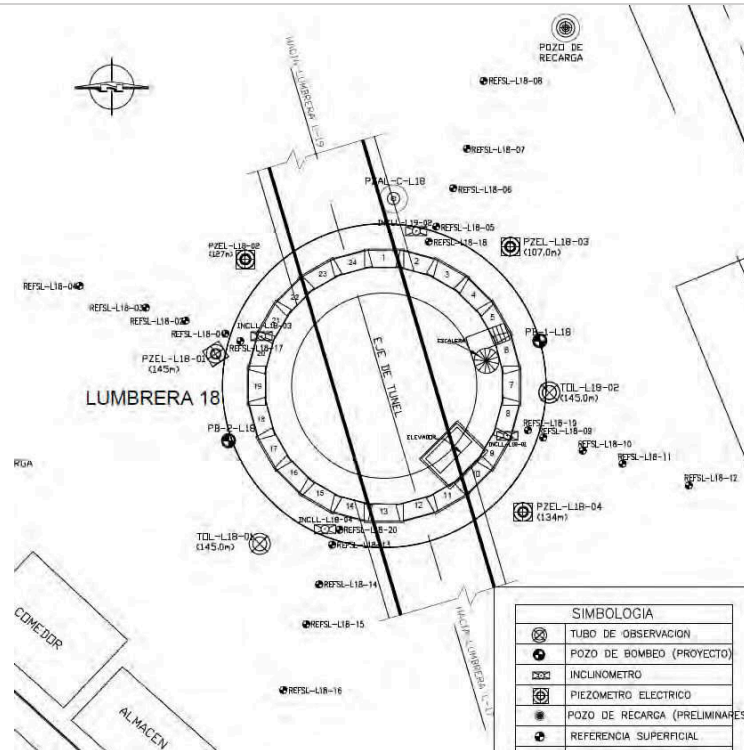


Figura 15.44. Ubicación de la instrumentación geotécnica de la lumbrera L-18

12

Cortes transversales

Los cortes disponibles son esquemáticos. El corte tipo de muro Milán único (L-04) muestra un muro de 1.0 m con anillo de rigidez a -37.112 m, losa de 2.0 a 2.5 m y trabe de coronamiento de 1.0×1.0 m. El corte tipo mixto (L-10, L-12, L-18, L-19, L-20) muestra muro Milán, trabe de liga, muro de concreto lanzado con marcos y muro secundario, losa de fondo y conexión túnel-lumbrera. En conjunto se distinguen tres secciones tipo: muro Milán en toda la altura, muro Milán más convencional y convencional con anillos o con anclas.

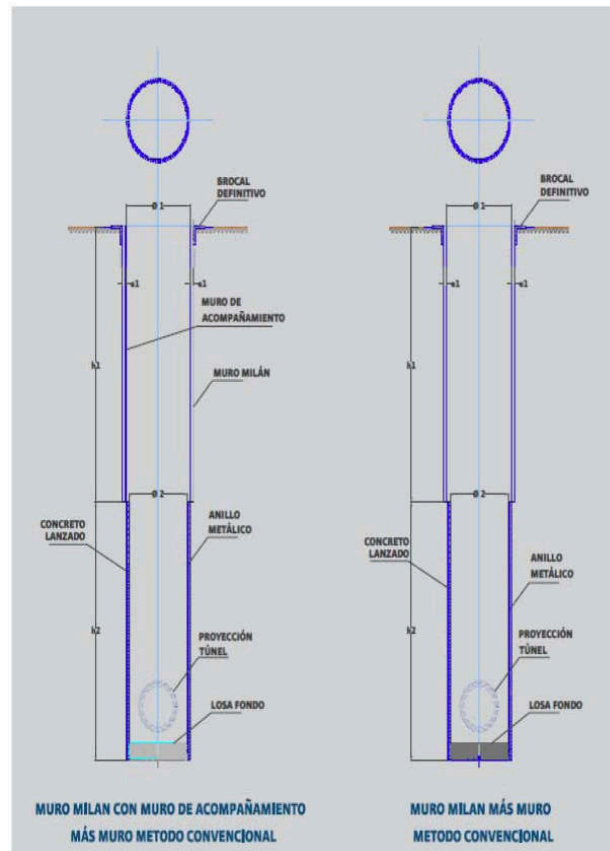


Figura 15.45. Secciones de lumbreras con muro Milán y con muro Milán más convencional

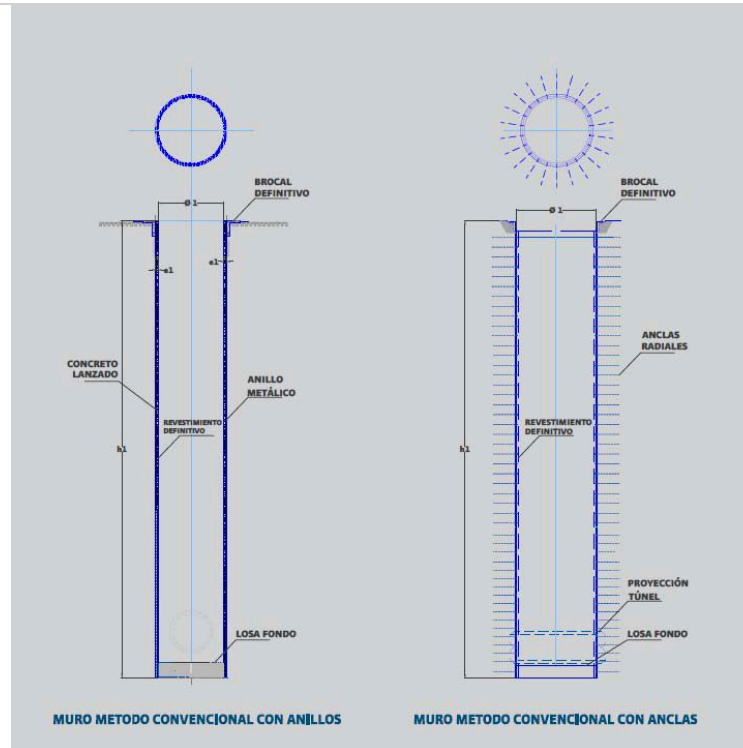


Figura 15.46. Secciones de lumbreras por el método convencional, con anillos y con anclas

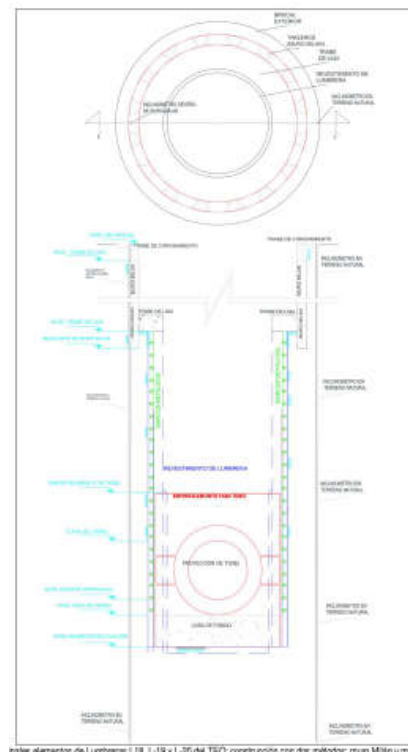


Figura 15.47. Elementos de las lumbreras L-18, L-19 y L-20

Cimentaciones y decisiones: síntesis

Cada solución tuvo una alternativa. El muro Milán sustituyó a la flotación porque el pozo supera de lejos los 30 m probados. La hidrofresa desplazó a la almeja por su verticalidad en suelo duro. El procedimiento mixto con trabe de liga se adoptó porque el muro solo llega hasta donde la herramienta permite. El bombeo precede al núcleo, porque sin él el FS de subpresión de la L-04 cae a 0.5 y 1.2.

TABLA 15.10. DECISIÓN, RAZÓN Y ALTERNATIVA DESCARTADA.

DECISIÓN	RAZÓN	ALTERNATIVA DESCARTADA
Muro Milán en vez de flotación	Profundidades de 40 a 150 m; flotación probada hasta 30 m	Flotación
Hidrofresa en las lumbreras profundas	Suelos duros y verticalidad	Almeja guiada o libre
Procedimiento mixto con trabe de liga	El muro llega solo hasta donde la herramienta lo permite	Muro Milán a toda la profundidad
Bombeo profundo antes del núcleo	FS de subpresión de 0.5 a 1.2 sin abatir (L-04); 8 pozos de 85 m en la L-10	Excavar sin bombeo
Anillo de rigidez en la salida del escudo	Evitar deformaciones al demoler el muro	Escudo que corte concreto armado
Jet grouting en entrada y salida	Evitar desplazamientos excesivos al abrir el muro	Inyección convencional
Cimbra deslizante en el revestimiento	Colado continuo sin juntas frías	Cimbra por tramos
Concreto autocompactable bajo lodo	No requiere vibrado	Concreto vibrado

De las cinco lumbreras documentadas con detalle, tres (L-12, L-18 y L-20) cambiaron algo entre el proyecto y la obra: en la L-12 el bombeo previsto de 4.6 L/s se volvió más de 600 L/s; en la L-18 el muro Milán bajó de 81 a 80 m; y en la L-20 la tesis de diseño

propuso anillos y un elemento de retención que el proyecto ejecutivo no adoptó. En la L-12 los datos indican una falla de estudio, porque un error de más de cien veces en el caudal no es un ajuste fino. Excavar a 100 m en un terreno donde las presiones de poro dependen del bombeo regional implica también ese tipo de incertidumbre, y la L-20 lo ilustra: entre 2008 y 2010 las presiones medidas bajaron de 18-55 % a 4-7 % de la hidrostática.

La L-10 es el contrapeso. El modelo resultó conservador (4 cm calculados contra 2 cm medidos) y el factor de seguridad mínimo, de 3.4, quedó muy por encima de lo exigido. Un buen proyecto se reconoce porque lo medido no se acerca al límite y porque el inclinómetro, leído cada semana, avisa antes que el modelo. La contrapartida es que, en una obra de 25 pozos, solo cinco tienen datos publicados de comportamiento.

En resumen: las lumbreras del TEO se resolvieron con muro Milán, hidrofresa y excavación convencional por debajo del límite de la herramienta, siempre con bombeo previo. Los casos documentados muestran que el terreno y el agua obligaron a ajustar proyectos y que la instrumentación permitió verificar el comportamiento real. La disponibilidad de datos de obra es desigual entre lumbreras.



Parte II · La línea de conducción del TEO

16

Materiales y control de calidad

Dovelas, concreto y acero, y cómo se certificó cada anillo

El túnel se sostiene con 41.352 anillos de concreto que se fabricaron en el mismo sitio, uno por uno, cada 1.5 m. La cifra salió de un documento oficial y no de las tesis; entre todas las fuentes aparecen números de 22.000 a 40.000 (el menor es solo de la parte de una de las contratistas), y este capítulo explica qué se adopta y por qué. Lo demás es el control que cada anillo debía pasar antes de llegar a la patacona.

Este capítulo trata los materiales del TEO (revestimiento, dovelas, concreto, bancos y material excavado) y cómo se controló su calidad. Los materiales en general y las normas de calidad están en los capítulos 6 y 8; aquí solo va lo específico del TEO.

01

El revestimiento del TEO: dos capas con funciones distintas

El túnel se reviste con dos capas: un revestimiento primario de dovelas prefabricadas de concreto armado y un revestimiento definitivo de concreto reforzado colado en sitio. El primario da apoyo temporal, mantiene los asentamientos superficiales dentro de límites tolerables y sirve de apoyo a los gatos del escudo EPB; el secundario asegura el comportamiento a largo plazo y la geometría final. Además, los anillos troncocónicos permiten trazar curvas en planta y en alzado. Con escudos EPB el anillo de dovelas es indispensable, porque es la estructura contra la que reaccionan los gatos de empuje.

Medidas del anillo: tramos 1 y 2 con 35 cm de espesor, seis piezas más una de cierre, 1.5 m de ancho y 29 t; tramos 3 a 6 con 40 cm, siete piezas más cierre, 1.5 m y 34 t. El diámetro terminado es de 7.00 m.

TABLA 16.1. REVESTIMIENTO DEFINITIVO

PARÁMETRO	VALOR
Diámetro terminado (interior)	7.00 m
Diámetro de excavación (escudo EPB)	8.70 m
Espesor del revestimiento definitivo	35 a 40 cm

PARÁMETRO	VALOR
f'c del concreto definitivo	350 kg/cm ² con cemento CPO 30 y/o 40 RS (resistente a sulfatos)
Colado	monolítico en tramos de 9 m, con cimbra metálica telescópica y bombeo con bombas de pistón
Curado	membrana de polímeros acrílicos aplicada tras el descimbrado
Aditivación	concreto hidráulico con fibras de polipropileno

Dato técnico: el espesor del revestimiento definitivo aparece como 35 cm y como 40 cm en la misma tesis. Otra reporta concreto "clase I" de 500 a 550 kg/cm² a 28 días para dovelas y revestimiento definitivo, y la ASF (2013) menciona dovelas de f'c = 550 kg/cm² (concepto PUE-078), mientras que otras fuentes hablan de 350 kg/cm². La diferencia corresponde a un cambio de especificación entre el diseño inicial (2008-2011) y las obras de los tramos 3 y 4 (2013): 350 kg/cm² para las dovelas de la planta de Ecatepec y de 500 a 550 kg/cm² para los tramos 3 y 4.

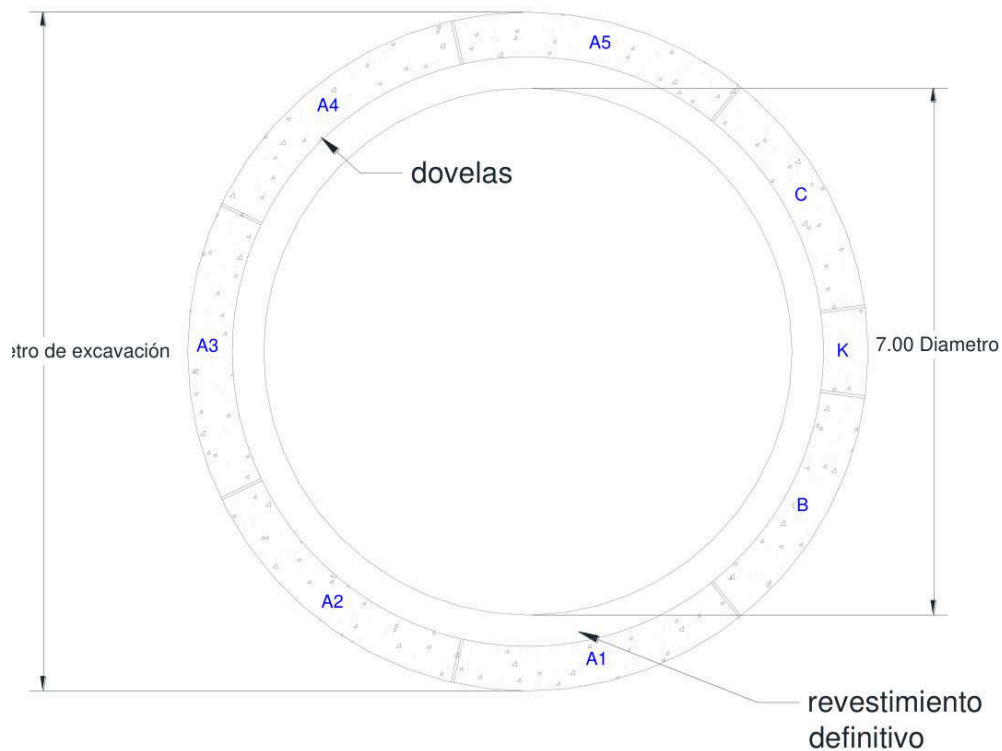


Figura 16.1. Configuración del revestimiento

Las dovelas prefabricadas

QUÉ SON Y CÓMO SE COMPONE EL ANILLO

Las dovelas son piezas prefabricadas de concreto armado que se atornillan entre sí para formar un anillo troncocónico. El escudo las instala mientras avanza. La dovela de cierre (K) se coloca al final y además permite corregir la orientación del avance.

TABLA 16.2. GEOMETRÍA DEL ANILLO POR TRAMOS.

TRAMOS	ANCHO	ESPESOR	DIÁMETRO INTERIOR / EXTERIOR	PIEZAS POR ANILLO
1 y 2 (planta de Ecatepec)	1.50 m	0.35 m	7.70 m / 8.40 m	7 (A, A, A, A, B, C, K; "6+1")
3 a 6	1.50 m	0.40 m	7.70 m / 8.40 m	8 (A1 a A5, B, C, K; "7+1")

Dato técnico: los tramos 1 y 2 usan 7 piezas (6+1) y los tramos 3 a 6, 8 (7+1), lo que concuerda con las 8 piezas del anillo instrumentado de los tramos 3 y 4. Las menciones de "siete dovelas" omiten la clave.

TABLA 16.3. PESOS Y VOLÚMENES DE LAS DOVELAS DE LA PLANTA DE ECATEPEC (ANILLO DE 0.35 M)

TIPO	ARMADURA (KG)	CONCRETO (M³)	CUANTÍA (KG/M³)
A-1, A-2, A-3	250.15	2.07	120.84
A-4	254.50	2.07	122.94
B	251.55	2.01	124.71
C	251.55	2.01	124.71
K	150.88	1.01	149.39

La armadura del anillo de siete piezas (A-1, A-2, A-3, A-4, B, C, K) y su concreto suman, con los valores de la tabla (cálculo propio):

$$W_a = 3(250.15) + 254.50 + 2(251.55) + 150.88 = 1658.9 \text{ kg} \quad V_c = 4(2.07) + 2(2.01) + 1.01 = 13.31 \text{ m}^3$$

donde W_a es el peso de la armadura del anillo (kg) y V_c es el volumen de concreto del anillo (m^3). Son unos 125 kg de acero por m^3 de concreto. El peso de un anillo, con la densidad de la mezcla de la Tabla 16.6 ($2,360.6 \text{ kg/m}^3$), es:

$$P_a = 13.31 \times 2360.6 = 31,419 \text{ kg} \approx 31.4 \text{ t}$$

donde P_a es el peso del anillo sin armadura adicional (kg), del mismo orden que las 35 t por anillo citadas por Fuentes Silva (2010, p. 29 del PDF).

Dato técnico: una fuente indica 94.5 kg/m^3 de acero para dovelas de 35 cm y otra, entre 120.8 y 149.4 kg/m^3 según el tipo de dovela. Se usan las cuantías de la segunda, que trae cada tipo de pieza con su peso de armadura y su volumen de concreto.

PLANTAS DE DOVELAS Y SU DISTRIBUCIÓN A LO LARGO DEL TRAZO

Tres plantas fabricaron las dovelas, en Ecatepec, Zumpango y Huehuetoca (Estado de México), cada una asignada a un tramo del trazo.

TABLA 16.4. PLANTAS DE DOVELAS Y CÁLCULO DEL NÚMERO DE ANILLOS (A 1.50 M POR ANILLO)

PLANTA	CADENAMIENTO	LONGITUD (M)	ANILLOS EQUIVALENTES (LONG./1.5 M)
1. Ecatepec	0+000 a 21+617	21,617	14,411
2. Zumpango	21+617 a 49+573	27,956	18,637
3. Huehuetoca	49+573 a 62+049	12,476	8,317
Total	0+000 a 62+049	62,049	41,365

Dato técnico: se afirma también que cada planta fabricaría 14,000 anillos, pero el reparto por cadenamiento da más anillos en Zumpango y menos en Huehuetoca (cálculo propio). Los "14 mil por planta" son una aproximación del total de 42 mil entre tres, no un cálculo por tramo.

Para el TEO se fabricaron 41,333 anillos de dovelas, de los cuales ICA fabricó 22,000 en dos plantas de última generación, Ecatepec y Huehuetoca. Juntas albergaron tres naves automatizadas, con una capacidad diaria de siete anillos por turno cada una. La relación de esa cifra con la postulación de ACI Excellence se explica en la sección 16.4.

La planta de Ecatepec está en la colonia Potrero, a unos 1,000 m de la lumbrera 5. Ocupa 51,504 m² y tiene tres naves, dos de producción y una de ensamble de acero. Produce 16 a 18 anillos diarios por nave en dos turnos y opera con 120 obreros en dos turnos de 12 h. Para los tramos 1 y 2 fabricó 12,045 anillos, equivalentes a unos 18,068 m de túnel a 1.5 m por anillo (cálculo propio).



Figura 16.2. Vista satelital de la planta de dovelas de Ecatepec

03

Fabricación de las dovelas: proceso y materiales

PLANTA TIPO CARRUSEL

Se usó una planta automatizada tipo carrusel, con moldes de la empresa francesa CBE sobre rieles entre una línea de trabajo y tres líneas de curado a vapor, en lugar de puestos de trabajo fijos. Se justifica por una productividad de 30 a 40 % mayor que en plantas de puestos fijos y menos ruido, porque el colado se hace en una cámara cerrada; la cifra procede del fabricante.

La planta de Ecatepec tiene 42 moldes, o seis anillos completos. Un molde tarda poco más de 8 h en el ciclo, de las cuales 5 a 6 h pasan en el túnel de curado. El ciclo tiene 13 estaciones: limpieza, desmoldante, armado e insertos, colado, enrasado y pulido, lavado exterior, curado a vapor, desmolde, giro, resane, marcaje, pre-almacenaje y almacenaje final.

La planta que fabricó la mayor parte de los anillos era de carrusel. Antes, las plantas eran estacionarias: los moldes estaban fijos, el acero y el concreto se llevaban hasta ellos con grúas viajeras y las piezas pasaban al curado de forma manual, con gatos hidráulicos. En las plantas de carrusel todos los moldes se mueven, lo que da mayor producción con menos moldes, instalaciones más pequeñas, mejor control de calidad y más seguridad. Cada planta tiene cuatro vías por las que circulan los moldes: una vía principal donde se atienden ocho moldes a la vez y tres vías secundarias en la cámara de curado, donde caben 30 moldes. Un controlador lógico programable (PLC) gobierna el carrusel y puede monitorearse por módem desde las oficinas del proveedor para corregir fallas de programación a distancia.

Un molde tarda poco más de 8 h en el ciclo, de las cuales 5 a 6 h pasan en el túnel de curado



Figura 16.3. Ciclo de una dovela en la planta

Los moldes son de origen francés y de dos tipos. En cada una de las dos naves de la planta de Ecatepec había seis juegos de siete piezas (A-1 a A-4, B, C y K), de 35 cm de espesor, y en la nave de Huehuetoca, cinco juegos de ocho piezas (A-1 a A-5, B, C y K), de 40 cm. La diferencia de piezas y de espesor dependió solo del tipo de tuneladora en que se usarían las dovelas. El anillo es universal: sirve para tramos rectos y curvos según la posición de la dovela de cierre o llave K, que el programa de guiado de la tuneladora indica en cada armado. El número de posiciones posibles de la llave suele ser la mitad del número de cilindros de empuje, para empujarla con al menos dos cilindros en cada posición; la máquina de los tramos 3, 4 y 5 tenía 28 cilindros, de modo que la llave podía ir en 14 posiciones. El proceso fue continuo y siguió estas etapas:

1. Se limpia el molde para quitar restos de concreto de la dovela anterior y se aplica desmoldante en toda la superficie que tocará el concreto.

2. El acero de refuerzo se habilita aparte y se arma en la nave intermedia con puntos de microalambre. Esa soldadura no tiene función estructural: mantiene el acero en la posición del proyecto ejecutivo y sustituye el amarre con alambre recocido, con lo que sube la productividad. La parrilla se lleva al molde con una grúa viajera; se colocan separadores, que garantizan el recubrimiento, e insertos que funcionan como tuercas para los tornillos metálicos con que se unen las dovelas y los anillos. Con estos insertos se redujeron los tiempos de colocación y de ensamble del anillo en el túnel frente a los insertos metálicos que se usaban antes.
3. El concreto sale de una planta instalada junto a la nave, con dosificación automatizada de aditivos, tiempos de mezclado y compuertas, y llega al molde en una bacha. Cada molde tiene un vibrador neumático integrado, que controla el operador de la bacha, que también maneja todo el carrusel. Después del colado, dos oficiales enrasan con regla metálica y pulen la cara exterior del anillo.
4. El curado es con vapor por transferencia de calor en ambiente húmedo: la pieza permanece de 5 a 6 horas en la cámara, entre 50 y 60 °C. El desmolde se hace con una ventosa de vacío diseñada para las dovelas de cada proyecto, porque varían en peso y geometría.
5. La dovela se voltea en una mesa giratoria para rotular su cara interna con la fecha de colado, el número de anillo y el número de pieza, y se envía al patio, donde se estiba con la parte cóncava hacia arriba y separadores de madera colineales, en un trazo de cuadrícula con grúas pórtico. El estibado se hace en dos eventos: primero, con el anillo en dos entongados, porque las dovelas aún no resisten el peso de las demás, que en el TEO rondaban de 5 a 6 toneladas cada una; después, en uno solo, cuando el concreto ya maduró.

El control de calidad abarcó desde las materias primas hasta el entongado final: concreto (agregados finos y gruesos, cemento, agua y aditivos), acero (habilitado y soldadura), calibración de equipos (básculas, dosificadoras y prensas), vaciado (revenimientos, pesos volumétricos y resistencias), acabado y entongado. Los controles con sus criterios de aceptación se desarrollan en las secciones 16.8 y 16.9. La contratista valora que estas plantas semiautomatizadas permitieron producciones que antes no se habían logrado y

ahorros de espacio, mano de obra e insumos, con beneficios económicos. Lo comprobable es el orden de magnitud: 22,000 anillos de 1.5 m cubren unos 33 km de túnel, algo más de la mitad del TEO (cálculo propio).



Figura 16.4. Armaduras curvas de dovelas junto a la mesa giratoria de armado



Figura 16.5. Molde metálico de dovela en la línea de producción



Figura 16.6. Desmolde de una dovela con grúa de ventosa

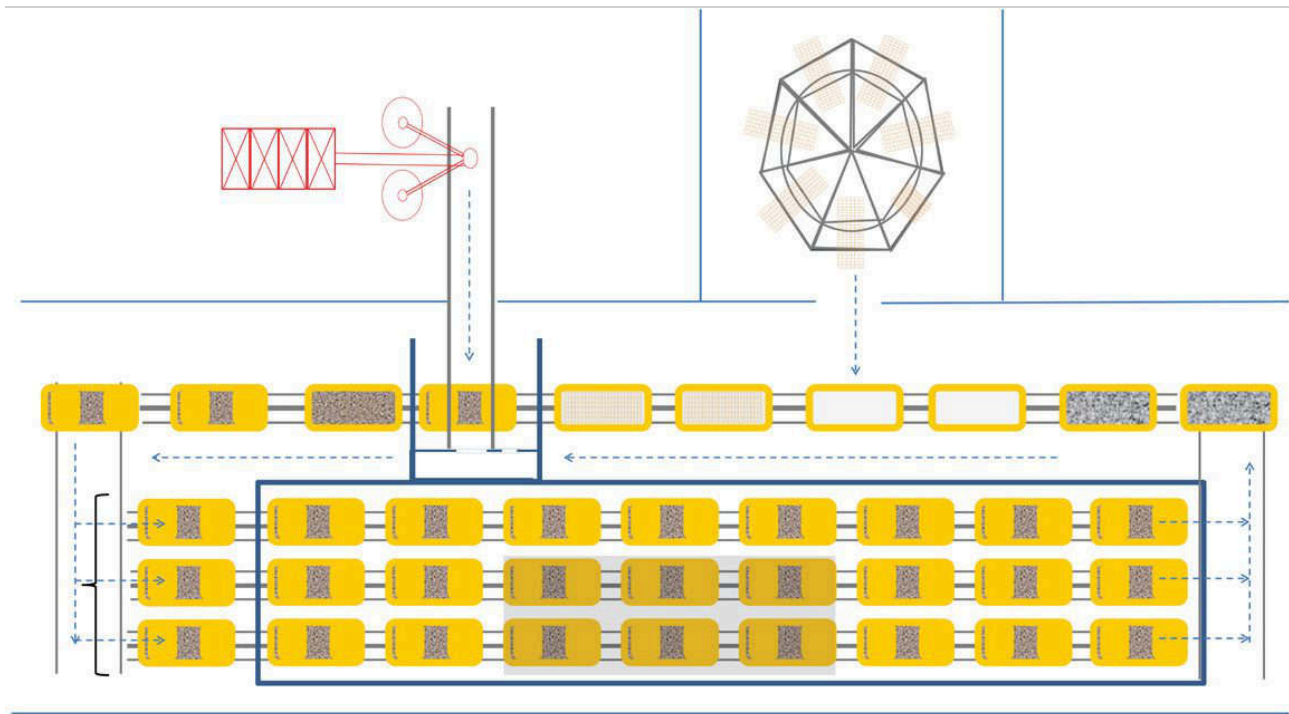


Figura 16.7. Planta de dovelas tipo, vista en planta de una nave de carrusel



Figura 16.8. Planta estacionaria y planta tipo carrusel

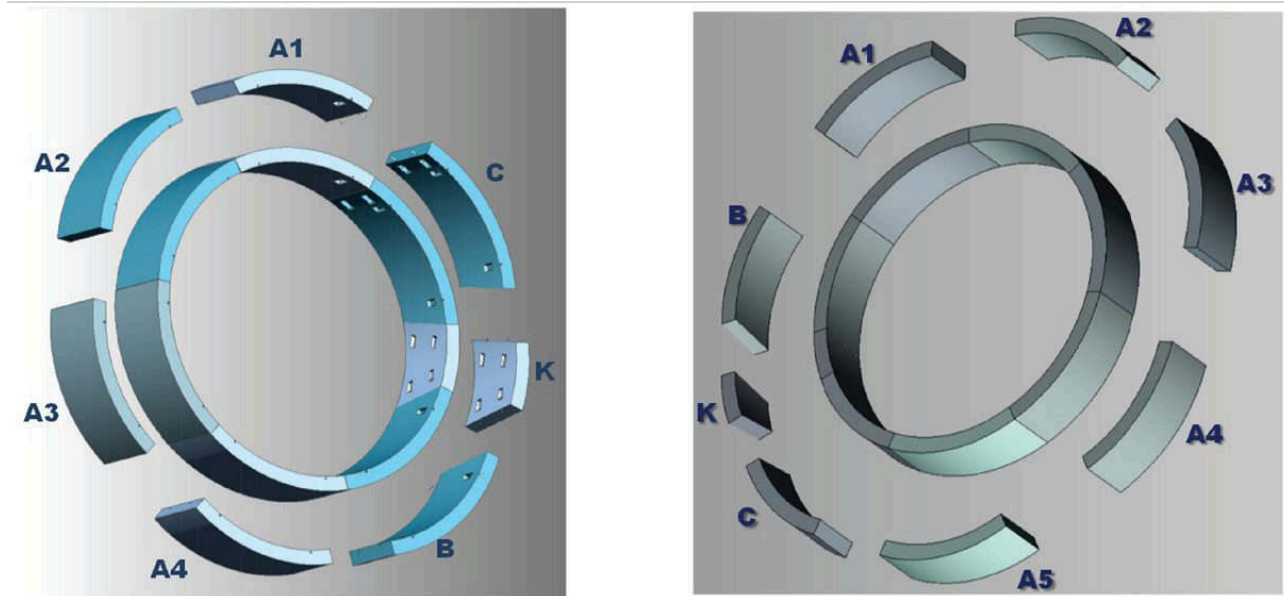


Figura 16.9. Anillos de dovelas de las plantas de Ecatepec y Huehuetoca

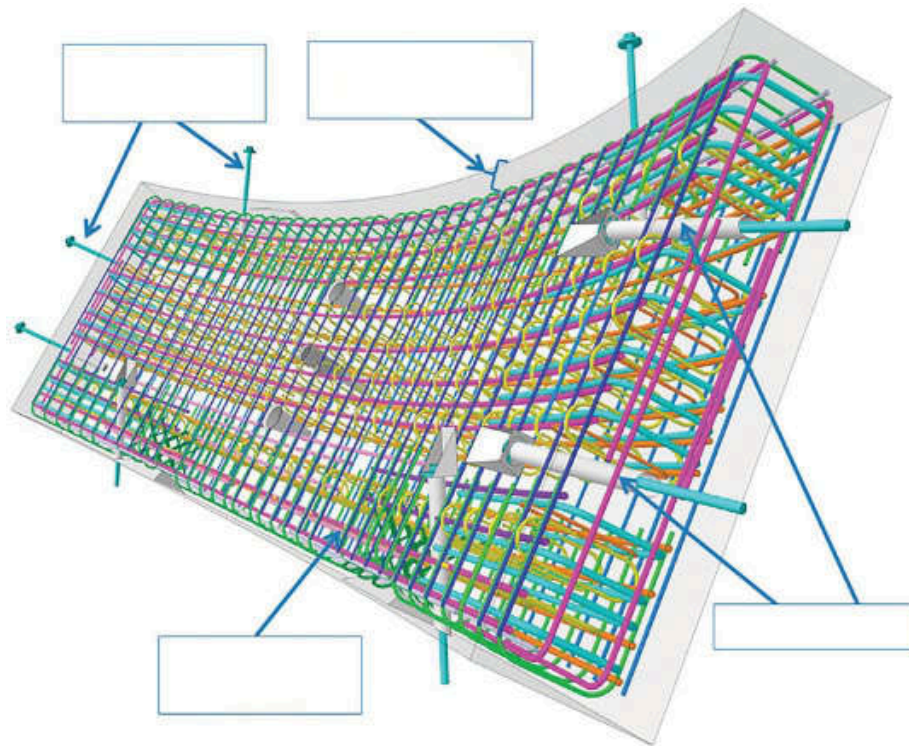


Figura 16.10. Elementos de una dovela de concreto armado



Figura 16.11. Patio de almacenamiento de dovelas en la planta de Ecatepec

CURADO A VAPOR

El curado tiene cuatro etapas y dura 490 min en total.

TABLA 16.5. CICLO DE CURADO A VAPOR

ETAPA	DURACIÓN (MIN)	TEMPERATURA
Reposo inicial sin vapor	70 ± 30	ambiente
Elevación de temperatura	84 ± 36	de ambiente a 31-55 °C
Mantenimiento	252 ± 108	50 a 65 °C
Descenso	84 ± 35	de 55 a 31 °C (rango citado)
Suma nominal	490	(cálculo propio: 70+84+252+84)

La cámara mide 53 × 10 m y aloja 30 moldes. El vapor viene de una caldera Clayton con tanques de diésel de 40,000 L y de agua de 25,000 L. Válvulas termostáticas y termopares conectados a un tablero regulan la temperatura. El desmolde se hace cuando

las probetas alcanzan 130 kg/cm^2 , 37 % del f'_c de proyecto de 350 kg/cm^2 , porque $130/350 = 0.371$ (cálculo propio, coincide). Criterio visual de aceptación: sin fisuras; si las hay, se toma como máximo 0.41 mm, según ACI 224.

CONCRETO DE LAS DOVELAS

TABLA 16.6. DOSIFICACIÓN POR M^3 DE CONCRETO DE DOVELAS $F'_C = 350 \text{ KG/CM}^2$

MATERIAL	PESO (KG)	%
Cemento	400	16.9
Arena	607	25.7
Grava de 3/4"	1,197	50.7
Agua	153	6.5
Aditivo	3.6	0.2
Total	2,360.6	100

La relación agua/cemento es $153/400 = 0.38$ (cálculo propio). El aditivo es Rheobuild 1000, un reductor de agua de alto rango con dosificación habitual de 0.8 a 2.5 % sobre el peso del cemento, y $3.6/400 = 0.9$ % queda dentro del rango (cálculo propio). El desmoldante es Rheofinish 255.

Para las dovelas de la planta de Ecatepec se especifica cemento portland compuesto resistente a sulfatos clase 40 (CPC 40 RS) de CEMEX, con resistencia mínima de 40 N/mm^2 a 28 días (408 kg/cm^2), fraguado inicial mínimo de 45 min y final máximo de 600 min, y expansión por sulfatos máxima de 0.10 % a un año. En contraste, para prefabricados curados a vapor se prefiere el cemento portland ordinario (CPO), porque el CPC, por la variabilidad de sus adiciones (6 a 35 % de escoria, puzolana o caliza), altera los tiempos de fraguado; los certificados de cemento citados son de CPO 30 R RS fino.

Los agregados de la planta de Ecatepec provienen de los bancos de la Tabla 16.7, y debe definirse el banco de grava y arena para cumplir las especificaciones. La clasificación de los bancos de obra (de nivel, de préstamo, de desperdicio y de almacenamiento) está en el capítulo 6, y los bancos usados en el TEO, en el capítulo 13.

TABLA 16.7. BANCOS Y

MATERIAL	ORIGEN CITADO	ENTIDAD
Grava caliza de 3/4"	Bancos Cerro Jardín y La Palma	Estado de México
Arena de mina	Banco Santa María 3	Estado de México
Agua de mezclado	Pozo Totolzingo	Estado de México

Los agregados importan por una razón de calidad: la reactividad y la abrasión se prueban al inicio de obra y cada vez que cambia el banco.

ACERO DE REFUERZO

La varilla es corrugada, con $f_y = 4,200 \text{ kg/cm}^2$, de 3/8" y 5/8" y un módulo de elasticidad citado de $2,039,000 \text{ kg/cm}^2$; también se mencionan varillas de 1/2" y de 3/8". El armado se hace con parrillas soldadas con microalambre (soldadoras Miller Deltaweld 452) y se verifica el número de estribos en 1 anillo de cada 50. Los separadores inferiores son de concreto, de 5 cm, y los laterales y superiores de plástico, de 5 y 3 cm. Las muestras de acero, 1.2 m por cada 40 t, van al IMCYC para pruebas de tensión, doblado y corrugaciones.

04

Número de anillos del revestimiento

Es el dato que más pesa en materiales (cantidad de concreto prefabricado, acero, transporte y almacenamiento), y las fuentes no coinciden. Para el túnel completo hay ocho cifras, de 22,000 a 42,000. La ASF registra 41,352 anillos colocados a octubre de 2019, con 62,101 m excavados. Es el único dato oficial primario y de obra concluida.

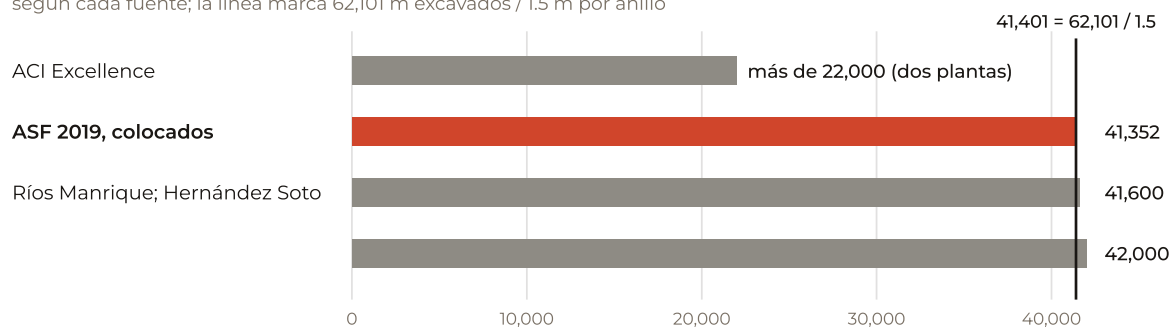
TABLA 16.8. CIFRAS DE ANILLOS DE DOVELAS Y SU ALCANCE.

CIFRA	ALCANCE
Más de 22,000 anillos	Fabricados en "dos plantas"; es un mínimo; sin piezas por anillo

CIFRA	ALCANCE
22,000 anillos	Fabricados por una de las contratistas en dos plantas (Ecatepec y Huehuetoca)
41,333 anillos	Fabricados en total en la obra
42,000 anillos	Proyecto en construcción: tres plantas (14 mil por planta), 7 dovelas por anillo y 35 t por anillo
41,600 anillos	Bases del contrato
41,352 anillos	Colocados a octubre de 2019, con 62,101.0 m de túnel excavados y avance físico de 99.9 %
6,933 anillos	Fabricados y pagados para el tramo km 30+793.443 a 40+631.757; se requerían 6,559 (verifica el ancho de 1.5 m)

Cuántos anillos de dovelas tiene el túnel

según cada fuente; la línea marca 62,101 m excavados / 1.5 m por anillo



Elaboración propia con datos de ASF (2019, p. 2) y la tabla de cotejo del capítulo de investigación; la verificación es cálculo propio.

Figura 16.12. Cifra de anillos de dovelas según cada fuente

Un cálculo de comprobación (propio). El número de anillos es la longitud revestida entre el ancho del anillo:

$$N = \frac{L}{a}$$

donde N es el número de anillos, L es la longitud revestida (m) y a es el ancho del anillo (m). Con $a = 1.50$ m:

$$N = \frac{62,101.0}{1.5} = 41,401 \quad N = \frac{62,049}{1.5} = 41,366 \quad N = \frac{61,700}{1.5} = 41,133$$

el último valor con el túnel de Ríos Manrique, de 61,700 m. El ancho se verifica con la ASF (2013): entre el km 30+793.443 y el 40+631.757 hay

$$\frac{40,631.757 - 30,793.443}{1.5} = \frac{9,838.314}{1.5} = 6,558.9$$

anillos, que coinciden con los 6,559 "requeridos" y confirman con un documento oficial que el anillo mide 1.50 m de ancho. En sentido contrario, 22,000 anillos de 1.5 m cubrirían unos 33,000 m, algo más de la mitad de los 62 km; para revestir todo el túnel cada anillo tendría que medir $62,100/22,000 = 2.8$ m, cifra que ninguna fuente da.

Veredicto y razón:

1. Se adopta "aproximadamente 41,000 a 42,000 anillos" para el túnel completo, y como dato verificado de obra terminada 41,352 anillos colocados. Es el único dato de documento oficial primario, es de obra concluida y no de proyecto, y concuerda con la cuenta longitud/ancho dentro de 0.1 % (41,401 frente a 41,352, cálculo propio). Los 42,000 (Fuentes Silva, Juárez) son redondeos de proyecto; los 41,600 (Ríos Manrique, Hernández Soto) son los del contrato.
2. Los 22 mil de ACI Excellence no se usan como total. El artículo de Barrera del Campo Olavarrieta (2025, p. 5) aclara que ICA fabricó 22,000 de los 41,333 anillos de la obra en dos plantas, Ecatepec y Huehuetoca, lo que coincide con el "más de 22,000" y las "dos plantas" de la postulación. Por cadenamamiento, esas dos plantas corresponden a $14,411 + 8,317 = 22,728$ anillos en la tabla 8.4 (cálculo propio), 3 % más que los 22,000. El dato es correcto, pero describe la parte de una contratista.
3. Alternativa descartada: promediar 22 y 42 mil. Son magnitudes de alcance distinto, no mediciones de la misma cosa.
4. Las dos tesis de Fuentes Silva son del mismo autor y cuentan como una sola fuente; la confirmación independiente viene de la ASF.

Con 41,352 anillos y unos 13.3 m^3 de concreto y 1.659 t de acero por anillo de siete piezas (tramos 1 y 2, 0.35 m), el concreto y el acero prefabricados serían del orden de (cálculo propio, a partir de la Tabla 16.3):

$$V = N v_c = 41,352 \times 13.31 \approx 550,000 \text{ m}^3 \quad W = N w_a = 41,352 \times 1.659 \approx 68,600 \text{ t}$$

donde V es el volumen de concreto de las dovelas (m^3), W es el peso de acero en dovelas (t), N es el número de anillos, v_c es el volumen de concreto por anillo (m^3) y w_a es el acero por anillo (t). La hipótesis es que todos los anillos son iguales al de la planta de

Ecatepec, lo que no es cierto en los tramos 3 a 6, que usan 8 piezas y, en algunos casos, 0.40 m, así que es una estimación gruesa y no un dato de obra. Para comparar, Conagua informa 1.3 millones de m³ de concreto y 142,226 t de acero en toda la obra, con lumbreras y revestimiento definitivo incluidos.

05

Otros materiales de la construcción: mortero de inyección, acondicionadores del terreno y mejoramiento del suelo

MORTERO DE INYECCIÓN DE CONTACTO

Al avanzar el escudo queda un espacio anular de pocos centímetros entre el terreno y el extradós de las dovelas. Si no se rellena con rapidez, causa asentamientos en superficie. Por eso se inyecta mortero de forma continua por aberturas en la cola del escudo. El mortero se elabora en una planta dosificadora o en agitadores de 2.0 m³ y viaja al frente en un vagón-tolva de 2.0 m³ con bomba para inyectar a 1.5 kg/cm². La inyección ocurre al mismo tiempo que la excavación, sobre el anillo que sale del faldón. De Nova y Luna (2014, p. 103 del PDF) piden informes de análisis fisicoquímico del agua (IMCYC) y de la arena de mina del mortero, y aditivos con certificado.

La alternativa, rellenar después con inyecciones de contacto desde el interior, es más lenta y deja el hueco abierto durante ese tiempo.

La dosificación del tramo 3 por m³ de mortero es de 200 kg de cemento CPC 40 RS, 1,016.8 kg de arena de río, 843.75 kg de arena filler, 22.33 kg de bentonita sódica, 127.6 L de agua, 16 L de acelerante y 0.5 kg de aditivo superabsorbente; debe alcanzar 2 MPa y se fabrica en una planta ODISA 2000. En el portal de salida se usó, por 0.5 m³ de mezcla, 200 kg de cemento, 0.243 m³ de arena sílica, 50 kg de bentonita y 380 L de agua. Cada anillo del tramo 3 consume unos 6.8 m³ (capítulo 14).

ACONDICIONAMIENTO DEL TERRENO (ESPUMAS, POLÍMEROS, BENTONITA, AGUA)

Para que el suelo excavado se maneje como fluido plástico dentro de la cámara y por bandas o tubería, se le añaden agentes según el terreno: agua en arcillas blandas, espumas en suelos más compactos como la formación Taximay del tramo 6, y bentonita o polímeros en suelos granulares muy permeables. La espuma da consistencia plástica que mejora el transporte por banda, reduce los bloques de suelo, distribuye mejor la presión en la cámara y baja la permeabilidad (p. 41 del PDF). Con 30 % o más de finos puede requerirse agua para una mezcla impermeable y viscosa, y la espuma sustituye los finos faltantes. En el tramo 3 se aplicó espuma con FIR de 42 % en suelo y hasta 190 % en mixto-roca, FER de 8 a 9 y concentración de tensoactivo de 3 %, más polímero superabsorbente donde hubo aportación de agua.

MEJORAMIENTO DEL TERRENO EN ENTRADAS Y SALIDAS DE LUMBRERAS

Cuando la estabilidad del suelo junto a la lumbrera no cumple los factores de seguridad, se mejora con inyecciones de consolidación, jet grouting, columnas de mortero o anclas de fricción (Ávila Almaguer, p. 42 del PDF). El jet grouting se aplicó en las lumbreras L-1A, L-03 y L-04, en zonas de 3 a 7 m en el sentido del avance y, en vertical, desde un diámetro sobre la clave hasta medio diámetro bajo la rasante (p. 42 del PDF). Para L-00 (lodo fraguante, factor de seguridad de 0.59 a 3.5) véase el capítulo 15.

06

Material excavado y bancos de tiro

Conagua informó que se excavaron 4.7 millones de m³ (comunicado 851-19).

Con 8.70 m de diámetro, la sección excavada y el volumen en banco del túnel son (cálculo propio):

$$A = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi (8.70)^2}{4} = 59.4 \text{ m}^2 \quad V = A L = 59.4 \times 62,101 = 3.69 \times 10^6 \text{ m}^3$$

donde A es el área de la sección excavada (m^2), D es el diámetro de excavación (m), V es el volumen en banco (m^3) y L es la longitud excavada (m). Las 25 lumbreras (de 12, 16 y 18 m de diámetro y 25 a 150 m de profundidad) aportan el resto: la diferencia con los 4.7 millones es de 1.0 millones de m^3 , compatible con ellas (estimación; no se calculó lumbrera por lumbrera). Si los 8.70 m no aplican a todos los tramos, el cálculo cambia; Ríos Manrique (2009, p. 24) y Hernández Soto (2012, p. 20) dan 8.70 m para los escudos EPB.

El sistema de rezaga depende del tramo. En el tramo 1 se construyeron pozos interlumbreras para acortar el bombeo y bajar la presión de las bombas.

TABLA 16.9. SISTEMA DE REZAGA POR TRAMO

TRAMO	SISTEMA
L-00 a L-3A	Bombeo por tuberías
L-3A a L-05	Banda horizontal y bombeo vertical
L-05 a L-10	Bombeo
L-10 al portal de salida	Bandas transportadoras horizontales y verticales

El bombeo por tuberías del primer tramo se debe a que el material arcilloso es manejable como fluido viscoso.

Destino. Las bases de contratación obligaban a transportar los lodos de excavación a los bancos de tiro que designara Conagua, a conformarlos y protegerlos con bordos y tinas, a restituir el sitio al final y a regar caminos para evitar polvo. También debían hacerse estudios de bancos de tiro potenciales y tramitar licencias y permisos de impacto ambiental con autoridades ejidales, municipales, estatales o federales, y la disposición inadecuada del material de excavación en banco de tiro se registra como impacto. En la clasificación de bancos de obra, los bancos de tiro son bancos de desperdicio (capítulo 6).

La MIA de 2008, del anteproyecto, ya proponía 19 sitios. La figura II.2 de la manifestación muestra los bancos de tiro potenciales de la L0 a la L7. El BAT19, una zona de minas de material sobreexplotadas, tiene el mayor potencial: cabrían 1,800,000 m^3 , suficientes para toda la primera etapa y parte de la segunda.

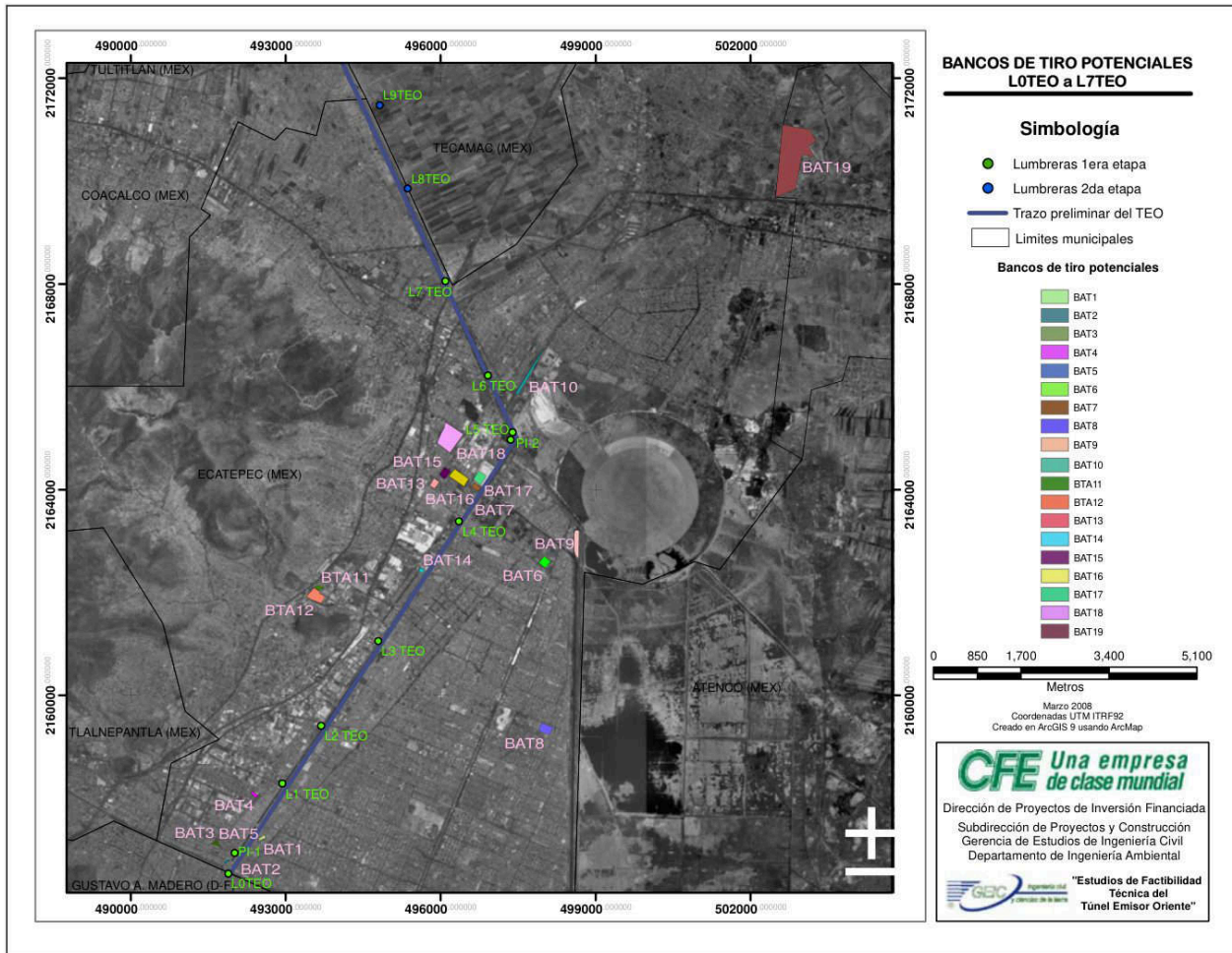


Figura 16.13

Figura 16.13. Bancos de tiro potenciales BAT1 a BAT19 del anteproyecto

07

El sistema de calidad del TEO

El sistema de calidad del TEO es el conjunto de estructura organizativa, responsabilidades, procedimientos y recursos para gestionar la calidad, y distingue necesidades explícitas del cliente (trazo, lumbreras, portal, dimensiones) e implícitas (materiales, resistencia, cumplimiento de normas). Cada elemento de diseño exige memoria de cálculo, manuales, planos y memorias técnicas.

El sistema se basa en las normas mexicanas NMX-CC-9000-IMNC-2008 y NMX-CC-9001-IMNC-2008 y en el modelo de procesos de la familia ISO 9000, con planes de inspección y pruebas. En el TEO rige la versión 2008, que la versión 2015 sustituyó (capítulo 8).

En proyecto rige el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (RCDF) y sus Normas Técnicas Complementarias, versión 2004. Donde no alcanza, y de común acuerdo con Conagua, se emplean códigos de ONNCCE, DGN, SCT, IMCYC, Pemex, ACI, ASTM y AWS. Para el portal de salida añaden AISC, AASHTO, el manual de la CFE para obras civiles, el de IMCA para acero y las normas técnicas para levantamientos geodésicos del DOF (pp. 104-105 del PDF). Los planes de prueba citan también "RCDF-2006", otra edición.

El RCDF y sus NTC son la base de proyecto porque es la norma local de la obra en la Ciudad de México y su zona conurbada y lo fija el contrato.

08

Plan de inspección y pruebas de las dovelas

El plan de inspección y pruebas para la fabricación de dovelas define material, norma, frecuencia, registro y responsable. Los números de norma se transcriben como aparecen en la fuente.

TABLA 16.10. PLAN DE INSPECCIÓN Y PRUEBAS DEL CONCRETO DE DOVELAS

PRUEBA	NORMA CITADA	FRECUENCIA	RESPONSABLE
Diseño de mezcla	RCDF; ACI 318, ACI 211.1, ACI 305; ASTM C192	Una por tipo de cemento, resistencia, agregados y característica especial	Laboratorio de la planta
Revenimiento	NMX-C-430; NMX-C-156	Al inicio del colado y cada 40 m ³ hasta 500 anillos; después cada 100 m ³	Laboratorio de la planta
Masa unitaria del concreto fresco	NMX-C-403; NMX-C-162	Una por día de colado	Laboratorio de la planta

PRUEBA	NORMA CITADA	FRECUENCIA	RESPONSABLE
Resistencia a compresión en cilindros	NMX-C-83	8 cilindros por cada 40 m ³ hasta 500 anillos; después cada 100 m ³	Laboratorio de la planta
Módulo de elasticidad estático	NMX-C-128	3 cilindros al mes	Laboratorio de la planta

TABLA 16.11. PLAN DE INSPECCIÓN DE LOS COMPONENTES DEL CONCRETO

MATERIAL	PRUEBA	NORMA CITADA	FRECUENCIA	RESPONSABLE
Cemento	Análisis físico	NMX-C-414; ASTM C150	Mensual	Proveedor
Cemento	Análisis químico	NMX-C-414; ASTM C150	Trimestral	Laboratorio IMCYC
Agua	Análisis fisicoquímico	NMX-C-122	Al inicio de obra y cada mes	Laboratorio IMCYC
Grava	Finos que pasan la malla 0.075	NMX-C-84	Mensual	Laboratorio de planta
Grava	Terrones de arcilla y partículas deleznales	NMX-C-71	Mensual	Laboratorio de planta
Grava	Partículas ligeras	NMX-C-72	Mensual	Laboratorio de planta
Grava	Peso volumétrico suelto y compacto	NMX-C-73	Mensual	Laboratorio de planta
Grava	Granulometría	NMX-C-77	Mensual	Laboratorio de planta
Grava	Masa específica y absorción	NMX-C-164	Mensual	Laboratorio de planta
Grava	Reactividad potencial (método químico)	NMX-C-271	Al inicio de obra y en cada cambio de banco	Proveedor o IMCYC
Grava	Partículas planas y alargadas	ASTM D791	Mensual	Laboratorio de planta
Grava	Resistencia a la degradación por abrasión e impacto	NMX-C-196	Al inicio de obra y en cada cambio de banco	Proveedor o IMCYC

MATERIAL PRUEBA		NORMA CITADA	FRECUENCIA	RESPONSABLE
Arena	Finos, terrones, partículas ligeras, peso volumétrico, granulometría	NMX-C-84, 71, 72, 73, 77	Mensual	Laboratorio de planta o proveedor
Arena	Masa específica y absorción	NMX-C-165	Mensual	Laboratorio de planta
Arena	Impurezas orgánicas	NMX-C-088	Al inicio y mensual	Laboratorio de planta
Arena	Reactividad potencial	NMX-C-271	Al inicio de obra y en cada cambio de banco	Proveedor o IMCYC
Aditivo	Calidad	ASTM C494	Por lote suministrado	Proveedor

Dos observaciones. Primero, las pruebas de reactividad y de abrasión se repiten cada vez que se cambia de banco, lo que conecta el control de calidad con los bancos de materiales (sección 16.3.3): el banco es una variable de calidad. Segundo, con unos 18 anillos diarios por planta y unos 13.3 m³ por anillo (Tabla 16.3), la producción sería de unos $18 \times 13.3 = 240$ m³ de concreto por día, es decir unos 7,000 m³ al mes por planta (cálculo propio, 30 días), y una prueba mensual de granulometría representa un volumen grande.

TABLA 16.12. ACERO, SOLDADURA, EQUIPOS Y TRANSPORTE

ELEMENTO	PRUEBA	NORMA CITADA	FRECUENCIA	RESPONSABLE
Acero de refuerzo	Físico-químicas	NMX-407 (número según la fuente)	Una por cada suministro de 50 t	Proveedor
Acero de refuerzo	Físicas	no se indica	Mensual y por diámetro	Laboratorio especializado
Soldadura	Calificación del soldador	ASME	Al inicio y para mantener vigencia	Proveedor especializado
Acero estructural (placas)	Físicas	ASTM A370	Cada suministro de 30 t	Proveedor
Básculas de la planta de concreto	Calibración	ACI 318; ASTM C94	Al inicio y cada año	Proveedor especializado

ELEMENTO	PRUEBA	NORMA CITADA	FRECUENCIA	RESPONSABLE
Básculas	Verificación	ACI 318; ASTM C94	Mensual	Laboratorio de planta
Mezclador	Prueba de uniformidad	ACI 318; ASTM C94	Cada seis meses	Laboratorio de planta
Vehículos que transportan dovelas	Emisiones	NOM-041-SEMARNAT-2006 y NOM-045-SEMARNAT-2006	Conforme al programa de verificación local	Contratista

Los cilindros de prueba son ocho: seis reciben el mismo curado que las dovelas (dos para resistencia al desmolde, dos para 28 días y dos de reserva para casos de duda) y dos tienen curado estándar y se prueban a 28 días.

Dato técnico: el plan de Juárez García (2012, pp. 86-87) pide revenimiento cada 5 m³ (valor de 5 ± 2 cm) y 8 muestras por cada 40 m³ (2 cilindros al desmolde, 2 a 7 días y 4 a 28 días), mientras que el de De Nova y Luna (2014) pide revenimiento al inicio y cada 40 m³ hasta 500 anillos (luego cada 100 m³) y otra distribución de cilindros (2 al desmolde, 2 a 28 días, 2 de reserva y 2 de curado estándar). El primero corresponde al arranque de la planta y el plan se relajó después de los primeros 500 anillos. Lo mismo ocurre con el acero: muestras de 1.2 m por cada 40 t (Juárez, p. 89) frente a una prueba por cada 50 t (De Nova y Luna, p. 99).

El laboratorio de la planta está acreditado por la EMA (Entidad Mexicana de Acreditación) y aplica pruebas a la grava, la arena y el concreto fresco y endurecido con las normas NMX-C-083, 109, 111, 152, 156, 159, 160, 161 y 162 (cada una con su año de edición). Los cilindros son de 15 × 30 cm (6 × 12 pulg.), cabeceados con mortero de azufre. El desmolde exige 130 kg/cm² (37 % del f'c de 350). Se arma de prueba un anillo completo cada 200 anillos. Las pruebas del acero van al IMCYC porque la planta no tiene el equipo.



Figura 16.14. Prueba de revenimiento del concreto fresco con cono y cinta métrica

09

Criterios de aceptación del concreto

En el TEO rige el criterio de la NMX-C-155: el resultado de una prueba es el promedio de las resistencias de los cilindros compañeros, descartando los que muestren una falla de muestreo, elaboración, manejo, curado o prueba, y una resistencia individual menor a la especificada no es motivo, por sí sola, de rechazo. Para el revestimiento primario, el concreto debe alcanzar el f'_c a 28 días y

cumplir dos condiciones, con un mínimo de 30 pruebas: no más del 10 % de las pruebas con valores inferiores a $f'c$ y no más del 1 % de los promedios de tres pruebas consecutivas por debajo del $f'c$.

Se acepta por la estadística de muchas pruebas y no por cada cilindro porque un solo cilindro puede fallar por causas ajenas al concreto, como el manejo o el cabeceo, y con producción en serie el criterio estadístico protege a la contratista y a la obra. La alternativa sería rechazar toda dovela asociada a un cilindro bajo.

Tolerancia de fisuración: se acepta la dovela sin fisuras y, si las hubiera, se toma como máximo 0.41 mm. Reparación: las oquedades o despostilladuras menores de 1 cm no se reparan. De Nova y Luna (2014, p. 109 del PDF) citan un manual de resanes para dovelas con curado a vapor o normal, y describen la reparación con "grout" cementicio tras picar hasta concreto firme, limpiar y pre-humedecer (p. 58 del PDF).

Los dos criterios requieren 30 pruebas como mínimo. Con 8 cilindros por cada 40 m³ en los primeros 500 anillos (unos $500 \times 13.3 = 6,650$ m³, cálculo propio) saldrían unas $6650/40 \approx 166$ muestras de 8 cilindros, más que suficiente para aplicar el criterio.

Calidad del revestimiento definitivo y del portal de salida

Para el revestimiento definitivo, de concreto colado en sitio, se piden certificados de calidad e informes de pruebas físicas y químicas (IMCYC) del cemento CPO 30 R RS fino, análisis fisicoquímico del agua y físico de la arena de mina (usados también en el mortero de inyección), certificados de los aditivos Plastiment líquido y Viscoflow 10 MX, y verificación de las básculas de la planta dosificadora. Todos los cementos deben estar certificados ante la ONNCCE y cumplir la NMX-C-414-ONNCCE-2010. El revestimiento definitivo usa CPO; la diferencia está solo en el cemento de las dovelas (sección 16.3.3).

Para el portal de salida, el control se basa en el RCDF y sus NTC (2004) más los códigos de la sección 16.7, y exige análisis de equilibrio límite en condiciones estáticas y sísmicas para los taludes izquierdo y derecho de la excavación y el de la margen izquierda del río. El procedimiento constructivo del portal se trata en el capítulo 15.

11

El anillo instrumentado como control de calidad del revestimiento

El procedimiento, los instrumentos y el cálculo de las lecturas del anillo instrumentado y del sistema de convergencias automatizado están en la sección del capítulo 14 sobre instrumentación del anillo. Aquí interesa lo que aportan al control de calidad. Los instrumentos se instalan en la planta, antes del colado, de modo que la dovela llega al túnel con ellos y su verificación empieza antes de que el anillo sea parte del revestimiento: se prueba cada instrumento con la consola, se leen la celda y los deformímetros antes y después del colado y antes y después de colocar el anillo en el túnel, y solo entonces se toma la lectura cero. La frecuencia de las lecturas depende del avance de la tuneladora, de la estabilización del anillo y de la estratigrafía, y se acuerda con la supervisión del tramo.

La tabla de la celda CELPD-T4-A819-A3-10 muestra ese orden: las lecturas de julio de 2012 son las verificaciones de funcionamiento y el registro de la dovela ya colada, y el 3 de octubre de 2013 aparecen la lectura previa a la instalación, la lectura cero y la primera lectura del monitoreo, es decir, la dovela esperó más de un año entre el colado y el montaje del anillo.

Instrumentar durante la fabricación permite medir las cargas reales del terreno sobre el revestimiento primario desde que la dovela entra al túnel y compararlas con las hipótesis de diseño; las convergencias topográficas desde el interior solo registran la deformación y

no la carga que la produce (pp. 12-13 del PDF). Por eso se instalan ambos sistemas y se comparan sus resultados (pp. 100-104 del PDF).

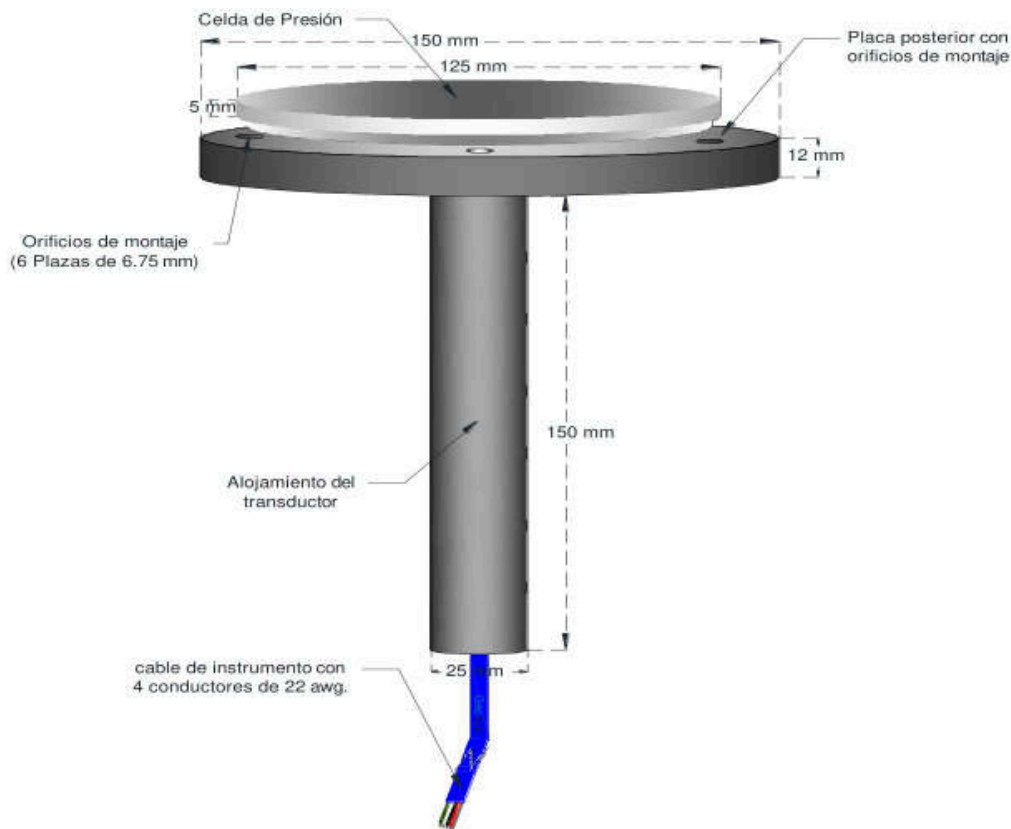


Figura 4. CONFIGURACIÓN CELDA DE PRESIÓN

Figura 16.15. Configuración de la celda de presión de tierra del anillo instrumentado

12

Seguridad, medio ambiente y gestión de residuos como parte del sistema

El sistema incluye los aspectos de seguridad e higiene y de control ambiental (sección 4.3): la LGEEPA, su reglamento y la legislación forestal; el manejo de residuos peligrosos; las emisiones de vehículos (NOM-041 y NOM-045-SEMARNAT); el ruido de vehículos y de fuentes fijas; y las descargas de agua. Los impactos se resumen en la Tabla 16.13.

TABLA 16.13. ELEMENTOS DEL MEDIO CON INDICADOR DE IMPACTO

ELEMENTO	INDICADOR
Atmósfera	Calidad del aire por partículas y por gases; ruido
Suelo	Características topográficas y erosión
Agua	Aguas residuales
Flora y fauna	Vegetación y fauna existentes
Paisaje	Apariencia visual
Residuos	Peligrosos y no peligrosos
Socioeconómico	Bienestar social y empleo

Para los materiales importan, entre los impactos, la disposición inadecuada del material de excavación y de demolición en bancos de tiro (sección 16.6), la contaminación por derrames de aceites y grasas y el manejo de residuos de manejo especial: recortes de varilla, madera, clavos y alambre (sección 4.3 de la tesis de gestión de calidad).

13

Balance de la calidad en los materiales y la fabricación

Lo documentado es sólido: laboratorio acreditado en planta, plan de inspección con frecuencias definidas, control del banco de agregados (reactividad y abrasión al cambiar de banco), desmolde condicionado a la resistencia, ensamble de prueba de un anillo por cada 200 y control topográfico y de instrumentación del comportamiento real del revestimiento. La ASF (2013, pp. 4-5) halló un pago indebido de 37,468.0 miles de pesos en el concepto PUE-078 (fabricación de anillos de dovelas de $f'c = 550 \text{ kg/cm}^2$) por 374 anillos de más en el tramo del km 30+793.443 al 40+631.757: se fabricaron y pagaron 6,933 y se requerían 6,559, y $6933 - 6559 = 374$ anillos, a razón de $37,468.0/374 = 100.2$ miles de pesos por anillo, unos 100 mil pesos a precios de 2012-2013

(cálculo propio). Conagua aplicó una deductiva a la contratista en la estimación 188 que incluye los 37,468.0 observados, y la ASF dio por atendida la observación (los costos y las auditorías se tratan en el capítulo 20). Se conecta con la discrepancia de la sección 16.4: el ancho de 1.5 m y el conteo de anillos son verificables con documentos oficiales. Los datos permiten afirmar que el sistema de control estaba bien definido; la evidencia procede de tesis basadas en documentos de la contratista y no de auditorías de calidad independientes.

El criterio estadístico del concreto resulta razonable para una planta con laboratorio acreditado y producción en serie: con unas 166 muestras de 8 cilindros en los primeros 500 anillos, la regla de 30 pruebas se cumple de sobra. Pesa más que el muestreo se relaje después de esos 500 anillos, de 40 a 100 m³ por prueba, cuando un anillo de más cuesta unos 100 mil pesos, como mostró la observación de la ASF en el tramo del km 30 al 40. El control de cantidades y el de calidad deben leerse juntos: una dovela fabricada de más se paga aunque pase todas las pruebas.

14

Tabla resumen de decisiones

TABLA 16.14. DECISIONES DE MATERIALES Y CALIDAD: DECISIÓN, RAZÓN Y ALTERNATIVA DESCARTADA.

DECISIÓN	RAZÓN	ALTERNATIVA DESCARTADA
Revestimiento en dos capas (dovelas más concreto colado)	Soporte temporal y control de asentamientos más geometría y durabilidad	Una sola capa colada en sitio
Planta de dovelas tipo carrusel con curado a vapor	30 a 40 % más de productividad y menos ruido	Puestos fijos
Cemento resistente a sulfatos (RS)	Suelos y aguas con sulfatos; expansión máxima 0.10 % a un año	Cemento sin resistencia a sulfatos
CPC 40 RS en las dovelas de Ecatepec	Resistencia mínima de 408 kg/cm ² y resistencia a sulfatos	CPO, preferido para curado a vapor porque el CPC varía el fraguado

DECISIÓN	RAZÓN	ALTERNATIVA DESCARTADA
Inyección continua de mortero desde la cola del escudo	Rellenar el espacio anular y limitar asentamientos	No rellenar
Acondicionamiento con espumas, polímeros o bentonita según el terreno	Manejo del material y control de presión en el frente	Operar sin química, con avance posiblemente imposible
Aceptación estadística del concreto (NMX-C-155)	Evita rechazos por un cilindro defectuoso	Rechazo por cilindro individual
Anillo instrumentado más sistema de convergencias automatizado	Medir cargas y deformaciones reales frente al diseño	Solo convergencias topográficas