



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Proceso Constructivo del  
Túnel Churubusco - Xochiaca**

**TESIS**

Que para obtener el título de

**Ingeniero Civil**

**P R E S E N T A**

Edgar Arias Medina

**DIRECTOR DE TESIS**

M.I. Sergio Macuil Robles



**Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2024**

## Agradecimientos

A Dios

Por esta vida, por guiarme, por ayudarme a concluir otra etapa y por brindarme una vida llena de aprendizajes.

A mis papás

Por nunca dejarme de apoyar en todo momento y forma, por la confianza en cada paso que doy; por todo su amor; al fin puedo mostrarles algunos frutos de todo lo que me han dado. En verdad agradezco que sean mis padres.

A Jimmy, Ale y Lore

Por procurarme y ayudarme, por ser mis amigos, y serlo incondicionalmente. Soy muy afortunado de que me acompañen, son los mejores.

A Bren

Por motivarme a ser mejor día a día, por el amor absoluto e infinito. Gracias por ser luz en mi vida, y estar siempre a mi lado, que orgullo. Definitivamente eres MÍ reina.

“Nada en las manos y todo en la mentes es la identidad de un ingeniero”

A la Universidad Nacional Autónoma de México

Por haberme formado en su facultad de ingeniería. Agradezco a los profesores que dedicaron su tiempo y esfuerzo, en especial a: Ing. Sergio Macuil Robles, por ser director y artífice de este trabajo; al Ing. Agustín Demeneghi Colina; Ing. Marcos Trejo Hernández; Ing. Marco Antonio Escamilla García. Gracias por transmitirme sus conocimientos, espero poder saldar la deuda tácita que contraí por sus sabias enseñanzas.

A Ingenieros Civiles Asociados (ICA)

Por permitirme formar parte y ayudarme en esta tesis; en especial al Ing. Pedro L. Barrera, Arq. Lizbeth Vázquez, al Ing. Carlos J. Ilhuicatzi, al Ing. Eduardo Zaragoza, y a “maifren” José Alatorre Valencia.

## **In Memoriam**

A mi abuelita Margarita, a mi tía Rosa, a mi tío Oscar, a mis abuelitos Elisa y Antonio, y a mi primo Antonio “Siquinos”.

Aunque desafortunadamente no están aquí, SIEMPRE los llevo en el corazón.

## **Dedicatoria**

A mis sobrinos, a todos y cada uno de ellos, espero pueda inspirar un poco su desarrollo; ya que ustedes son el futuro; y les comparto una frase (como me la compartieron a mi):

*“Dar, dar siempre, darlo todo, dar lo que se tiene y lo que no se tiene: es la única manera de poseerlo todo”.*

-Dr. Atl-

La vida nunca es justa, a veces tenemos suerte, a veces fortuna  
La forma de nuestras vidas no se pierde con abrirnos  
Definirse así mismo no es remar siempre contra la corriente  
Ser auténtico es que lo que piensas, dices y haces sea lo mismo  
Hay que saber pedir; pedir no empobrece, no compartir si  
Nunca está de más decir: “Gracias”  
Ser humilde es agradecer lo bueno y lo malo  
Solo lo que está en nuestra alma nos pertenece.  
No se arrepentan de nada, aprendan de todo  
Nunca olviden sus raíces.

## Resumen/Abstract

### Resumen

La construcción de túneles se remonta a tiempos del Paleolítico medio; y han tenido diversos usos.

La necesidad de túneles (sobre todo los excavados con tuneladora) en entornos urbanos ha aumentado continuamente en las últimas dos décadas, como resultado de la expansión demográfica.

Se han desarrollado tecnologías especiales para controlar la estabilidad del frente y el techo del túnel y para minimizar los asentamientos en la superficie. Así como se han ido mejorando los procedimientos de construcción de dovelas y también de lumbreras.

Este trabajo se estructuró a partir de la construcción del túnel Churubusco -Xochiaca (TCX) de la cual el autor formó parte.

### Abstract

*Tunneling dates to Middle Paleolithic times; and have had several uses.*

*The need for tunnels (particularly those excavated with a TBM) in urban environments has increased continuously in the last two decades, as result of population expansion.*

*Special technologies have been developed to control the stability of the tunnel face and roof and to minimize settlement on the surface. Just as the construction procedures for voussoirs and luminaries have been improved.*

*This work was structured based on the construction of the “Churubusco -Xochiaca” Tunnel (TCX) of which the author was a part.*



Julio 02, 2018

**ING. ARTURO ZAVALA QUEZADA**  
RESIDENTE CONSTRUCCIÓN  
CONAGUA  
PRESENTE:

ACUSE

Estimado Ing. Zavala, por medio de la presente me nos permitimos solicitar como profesor de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, su apoyo para que alumnos de esta casa de estudios puedan desarrollar su trabajo de tesis en los proyectos a su digno cargo; el desarrollo de estos trabajos de tesis, contribuyen para que los alumnos puedan integrar sus conocimientos adquiridos durante su paso por la Facultad de Ingeniería de la UNAM.

Para la Facultad de Ingeniería de la UNAM es muy importante que nuestros alumnos y futuros profesionistas de la Ingeniería, puedan desarrollar este tipo de actividades en proyectos de gran relevancia como los que usted tiene a su digno cargo, y también para la academia resultan de gran relevancia ya que nos permiten conocer los proyectos de infraestructura que se desarrollan en nuestro país, y al mismo tiempo conocer los diferentes procedimientos constructivos, equipo y maquinaria utilizada en su construcción, así como las modalidades de contratación realizadas para este tipo de proyectos.

Sin otro particular le envío un saludo, quedando atento a su respuesta.

**Atentamente**

**M.I. Sergio Macuil Robles**  
Profesor Asignatura

C.C.P. **Ing. Pedro Luis Barrera del campo Olavarrieta, Gerente de Proyecto ICA**

Recibe copia  
Arturo Zavala Q  
  
17-VII-18

Recibi copia  
PEDRO BARRERA  
16/07/18

## Definiciones

1. Abrasividad

Acción y el efecto mediante los cuales se produce el desgaste, erosión, corrosión, u oxidación.

2. Acciones

Todos los fenómenos que inducen en una estructura fuerzas internas, esfuerzos y deformaciones. Generalmente denominadas cargas. El término acciones es más amplio ya que incluye cambios de temperatura, hundimientos, viento, sismo, etc.

3. Acuífero

Formaciones geológicas por las que circulan o se almacenan aguas del subsuelo. Además, pueden funcionar como filtros purificadores, preservando la calidad del agua, funcionan como depósitos de almacenamiento y red de distribución, siendo posible extraer agua en cualquier época del año de prácticamente cualquier punto del acuífero. Existen 653 acuíferos en México

4. Ademar

Acción de contener las paredes de la excavación

5. Adhesividad

Firmeza con que se unen los materiales, o la resistencia de los suelos a la deformación y el desplazamiento.

6. Agua potable

Agua que no contiene contaminantes objetables, ya sean químicos o agentes infecciosos, y que no causa efectos nocivos a los seres vivos; sus características son: incolora e inodora, oxigenada, libre de bacterias patógenas y de compuestos de nitrógenos.

7. Agua residual

Aguas de composición variada provenientes de las descargas posteriores al uso público urbano, doméstico, industrial, comercial, de servicios, agrícola, pecuario, así como la mezcla de ellas.

8. Ángulo de fricción (interna)

Ángulo entre el eje de esfuerzos normales y la tangente o envolvente de falla en un punto, que representa una condición dada de esfuerzo de ruptura por la ley de resistencia al corte de un material cohesivo – friccionante. (Demeneghi, Sanginés y Puebla).

9. ANFO

Abreviación para fuelóleo de nitrato de amonio, es utilizado en forma de pellets o glóbulos sólidos formados durante un proceso industrial.

10. Anillo

Estructura utilizada para revestir un túnel excavado con TBM, que consiste en (seis) segmentos (“Dovelas”) prefabricados de concreto reforzado, ensamblados in situ al final de cada ciclo de excavación.

11. Aplastamiento

Desmoronamiento local de la piedra, mampostería o concreto debido a esfuerzos de compresión que exceden la resistencia del material a este efecto. También puede considerarse como el alcance de la deformación plástica de un material.

12. Arcilla

Material mineral de partículas muy finas, el cual posee propiedades plásticas, y cuyo tamaño es inferior a los 0.002 mm.

## Proceso Constructivo del Túnel Churubusco – Xochiaca

---

### 13. Arena

Conjunto de partículas desagregadas de las rocas, a partes muy pequeñas. Término para designar los fragmentos de roca cuyo tamaño se encuentra en el rango de los 3.125 mm (tamiz no.7) y mayor a los 0.06 mm (tamiz no.230); fina hasta 0.2 mm; media hasta 0.6 mm; gruesa por encima de 0,6 mm.

### 14. Asentamiento

Deformación vertical que experimenta una estructura por deformaciones del terreno.

### 15. Atasco

Tapón formado en la cabeza/rueda de corte por lodo o tierra pegajosa.

### 16. Avance

El proceso de marcha hacia delante de la excavación del túnel; normalmente significa la distancia excavada durante un período de tiempo determinado (generalmente un turno o un día).

### 17. Banqueta o alerón de brocal

Es la parte horizontal superior de los brocales; en el caso del brocal exterior de las lumbreras flotadas este se amplía, esta ampliación es conocida como nariz.

### 18. BATF

Buró de Alcohol, Tabaco y Armas de Fuego, Departamento del Tesoro de los EUA; aplica el control de explosivos y las normas de seguridad

### 19. Bentonita

Arcilla de grano muy fino (coloidal) del tipo de montmorillonita que contiene bases y hierro. Tiene aplicaciones en estabilización de taludes, e impermeabilización. El nombre deriva de un yacimiento en Fort Benton, USA.

### 20. Brocal

Estructura de concreto reforzado que rodea el borde de la lumbrera y sirve como guía para la excavación de la pantalla y la zanja perimetral de las lumbreras.

### 21. Cabeza cortadora/ Cabezal de corte

Elemento principal de excavación, es la parte giratoria de una tuneladora que soporta las herramientas de corte [regularmente de tungsteno] o cortadores (ver Cortadores), utilizadas para excavar la cara del túnel a través de la acción combinada de la fuerza de empuje y el torque de rotación. Es el extremo delantero de la máquina tuneladora.

### 22. Calibración

Proceso en el que por medio de un valor o patrón de referencia se determina o ajusta un resultado real, evitando errores de lectura o desviaciones en un instrumento de medición, dando como resultado una lectura confiable o consistente.

### 23. Cara de la excavación

La superficie que separa el túnel excavado del suelo a excavar

### 24. Cargas

Son las fuerzas que actúan sobre una estructura (ver Acción).

### 25. Cassete de ventilación

Mecanismo que sirve para la prolongación del abastecimiento de aire; sirviéndose de un dispositivo de elevación puede cambiarse el cassette usado.

### 26. Cementante

Material inorgánico de granulometría fina que en presencia de agua tiene la propiedad de fraguar y endurecer, esta agua no se evapora, sino que pasa a ser parte de él una vez endurecido.

### 27. Cemento / Cemento Portland

Es un aluminato-silicato de calcio, patentado por J. Aspdin en 1824, y denominado “Portland” por su semejanza a una piedra que abunda en esa localidad de Inglaterra; formado por material inorgánico finamente calcinado y molido, el promedio del diámetro de las partículas es de 15 micrómetros, compuesto principalmente de Clinker, roca caliza y arcilla, también puede contener yeso, arcillas, ceniza volcánica, puzolanas, calcio y sílice; al mezclarse con agua produce una reacción exotérmica que termina endureciendo (fragua).

### 28. Cimbra

Molde o estructura provisional, fabricada con madera, metal o plástico, el cual tiene una parte o la forma del elemento a construir. Dentro de ella es colada la mezcla de concreto fresco.

### 29. Cimbra telescópica

Estructura auxiliar que sirve para sostener el peso del concreto en el colado del revestimiento definitivo del túnel, hasta que se obtenga una resistencia óptima para su descimbre; está suele ser metálica y deslizante

### 30. Cimentación

Parte de la estructura que está en contacto con el suelo y sirve para transmitir a éste las cargas generadas por la edificación.

### 31. Clinker

Es el principal componente del cemento Portland, se forma tras pulverizar y calcinar roca caliza y arcilla a una temperatura que está entre 1350°C; el promedio del diámetro de las partículas (granulometría) es de 15 micrómetros. Se compone principalmente de: silicato tricálcico, silicato bicálcico, aluminato tricálcico, y ferrito aluminato tetracálcico.

### 32. Cohesión

La acción y efecto de unión o adherencia entre las partículas del suelo debida a la atracción entre ellas, producidas por sus fuerzas intergranulares.

### 33. Colado

Proceso en el cual una mezcla fresca de concreto, o mortero, es vertida o colocada en cimbra, donde se le deja endurecer (fraguar).

### 34. Cola del escudo (Marca Herrenknecht AG, modelo HK-S364)

Consiste en un segmento de tubo unido al escudo de la máquina mediante 14 cilindros de articulación del escudo. Al final de la cola del escudo una junta de cepillos de tres hileras obtura a la TBM entre el escudo y el último anillo de dovelas construido. Las tuberías de inyección de mortero integradas en la camisa de la cola del escudo procuran la inyección del espacio anular.

### 35. Colapso

Destrucción o ruina de un sistema, una institución o una estructura. En el caso del túnel una caída o derrumbe de suelo desde el techo, paredes o cara del túnel.

### 36. Compresión

Estado de esfuerzos que produce un acortamiento de las fibras de la sección transversal de un elemento estructural paralelas a su eje (Es el estado de esfuerzos opuesto al de tensión).

### 37. CONAGUA

Comisión Nacional del Agua.

### 38. Concreto hidráulico

Combinación de cemento Portland, agregados pétreos, agua y en ocasiones aditivos y/o fibras para formar una mezcla moldeable que al fraguar forma un elemento rígido y resistente. (N·CMT·2·02·005/04)

### 39. Conectores

Pasadores y casquillos para procurar el ensamble de las dovelas, entre sí, para conformar los anillos y entre anillos contiguos, para conformar el revestimiento primario del túnel.

### 40. Contenido de agua o humedad (de un suelo)

Es la relación entre el peso de agua contenida en el suelo y el peso de la fase sólida del suelo.

### 41. Continuidad

Condición de conexión entre dos elementos estructurales en que se impide los movimientos relativos entre ellos.

### 42. Contorno (de voladura)

Fila de barrenos perimetrales que delimitan la sección del túnel o galería. En ocasiones se dividen en corona (techo) y hastiales (laterales, no en el piso).

### 43. Contracción plástica

Reducción del volumen que ocurre cuando el concreto, mortero o pasta cementante, está pasando de su estado plástico (aún no ha fraguado) al estado endurecido.

### 44. Contramedidas

Medidas especiales que se aplicarán a una situación dada para reducir el nivel de riesgo correspondiente.

### 45. Contracuele (de voladura)

Corona de barrenos que circundan a los del cuele; ensancha el hueco creado por el cuele, y no presenta barrenos vacíos. Emplean secuencias de milisegundos en sus barrenos. Si bien son tiros sobrecargados, presentan menor consumo específico que el cuele.

### 46. Corrugado

Surcos o resaltos sobre una superficie, normalmente siguiendo un patrón determinado. Se usa en barras, alambres y láminas de acero para refuerzo de concreto.

### 47. Cortadores/ herramientas de corte

Las herramientas instaladas en el cabezal de corte para penetrar y eliminar el suelo: las púas, los pasadores y los discos son las herramientas más utilizadas y la elección entre ellas es una función de las características del suelo.

### 48. Cortante

Un tipo de esfuerzo que tiende a producir un corrimiento de fibras adyacentes y la consiguiente distorsión de la sección transversal del elemento.

### 49. Cota

Término genérico que se refiere a la elevación o altitud de una marca de referencia, ya sea convencional o especial de carácter temporal o permanente (INEGI, 2007).

### 50. Cribado (o Tamizado)

Método mecánico para separar dos sólidos formados por partículas de tamaños diferentes. Véase Tamizado

### 51. Cuele (de voladura)

Conjunto de barrenos ubicados comúnmente en el centro, que cargados de explosivos o no, crean un hueco inicial en el frente de excavación, de tal manera que los explosivos posteriores encuentren una cara libre que facilite su acción.

### 52. Cuenca

Unidades morfológicas del terreno, definidas por (parteaguas) la división natural de las aguas debida a la conformación del relieve.

53. Daño

Condición y grado de deterioro que un elemento presenta después de un impacto, algún evento, o a causa del uso que tiene.

54. Decibel

Medida de sonoridad o sensación sonora que es la intensidad mínima que puede ser apreciada por el oído. (Igual a la décima parte de un bel)

55. Deformación

Cambio en la forma y/o en las dimensiones debido a los esfuerzos a que está sometido un elemento estructural.

56. Derecho de vía

Franja de terreno de anchura variable, cuyas dimensiones mínimas y máximas fijan las dependencias y entidades competentes de la Administración Pública Federal o del Distrito Federal, que se requiere para la ampliación, conservación, construcción, protección y, en general, para el uso adecuado de las líneas de infraestructura, instalación especial o vialidad.

57. Descimbrar

Desmante o desmantelamiento de la cimbra.

58. Destroza

Área de barrenos comprendidos entre el contracuele y el recorte.

59. Detonación

Reacción de materiales explosivos que al explotar se descomponen a una velocidad superior a la velocidad sónica. (Supersónicas; generan ondas de choque)

60. Detritus

Resultado de la descomposición de una masa sólida en partículas o fragmentos más pequeños que su composición previa.

61. Diafragma

Elemento estructural diseñado para soportar esfuerzos cortantes paralelos a su plano. Placa, muro u otra estructura rígida en su plano, que evita la distorsión de un piso o marco.

62. Dosificación

Pesado, o medición volumétrica, de los ingredientes para introducir a la mezcla de concreto o mortero según el proporcionamiento estipulado.

63. Dovela

Elementos estructurales prefabricados de concreto armado en forma de arcos, que cuando están montados en conjunto forman un anillo troncocónico, que es el soporte inicial del túnel, y también llamado revestimiento primario; este anillo lo conforman seis dovelas: "A1", "A2", "A3", "B", "C", y "K". Sirviendo a la vez de apoyo para la TBM en la fase del avance de la excavación una vez finalizada el habilitado de cada anillo.

64. Dren

Tubo o conducto enterrado o una zanja, que da salida a aguas superficiales o subterráneas (De la Lanza et al. 1999).

65. Elemento estructural

Unidad básica constitutiva de una estructura, capaz de soportar y transmitir las cargas a sus apoyos u otros elementos a los que está conectada (arco, viga, columna, bóveda, losa, etc.); los elementos estructurales son las partes en que puede ser dividida una estructura a efectos de su diseño que sirven para darle resistencia y rigidez.

66. Elevación

Altura de un lugar por encima del nivel del mar.

67. Empotramiento

Apoyo rígido de un elemento estructural de modo que impide la rotación y el desplazamiento en el extremo del elemento.

68. Empuje

Fuerza aplicada sobre las dovelas por medio de cilindros hidráulicos (gatos) cuyo movimiento es horizontal y hacia el frente de excavación, permitiendo el desplazamiento del escudo.

69. Emulsión

Un material explosivo que contiene cantidades sustanciales de oxidantes suspendidos en gotas de agua rodeados por un combustible inmiscible.

70. Endorreico

Fenómeno que consiste en la afluencia de las aguas de un territorio hacia el interior de este, sin desagüe o salida.

71. EPB (*Earth Pressure Balance*)

Máquina tuneladora a presión de tierra de forma cilíndrica utilizada para la excavación de túneles, caracterizada por la presurización controlada del frente de excavación para equilibrar los efectos de excavación sobre el terreno. Equipada con una cabeza giratoria con herramientas de corte y un sistema erector que permite colocar el soporte inicial del túnel formado por dovelas prefabricadas de concreto. El diámetro de excavación para esta máquina en particular (utilizada en TCX) de marca “Herrenknecht” es de 6.30 m.

72. Erector (de dovelas)

Dispositivo presente en el interior de la tuneladora mediante el cual las dovelas de cada nuevo anillo de revestimiento son levantadas y se colocan en sus respectivas posiciones.

73. Escarificación (o “*Ripping*”)

Se denomina así a la acción de desgarrar de suelo por medios mecánicos regularmente mediante un implemento bifurcado o punteado.

74. Esfuerzo

Fuerza por unidad de área. Los esfuerzos normales a la superficie son de compresión y de tensión y los paralelos a ella son esfuerzos cortantes.

75. Esfuerzos efectivos

Es el resultado de la diferencia entre el esfuerzo total ( $\sigma$ ) y la presión intersticial o de poro ( $u_w$ ); un esfuerzo efectivo es aquel que controla tanto la resistencia al cortante como el comportamiento volumétrico de un material.

76. Espacio anular

Separación entre la excavación (del túnel o lumbrera) y el terreno natural.

77. Esquema de tiro

Es la disposición en el frente de un túnel, y el orden en el que se van a perforar y detonar cada barreno, en una excavación con explosivos.

78. Estable (estabilidad)

Condición de equilibrio que no es alterada por pequeños cambios en el estado de esfuerzos y/o deformaciones.

79. Estado Límite

Es aquella etapa del comportamiento de una estructura o parte de ella, a partir del cual deja de cumplir con alguna función para la que fue proyectada. Se consideran dos categorías de estado límite: los de falla y los de servicio.

### 80. Estado Límite de Falla

Corresponderá al agotamiento definitivo de la capacidad de carga de la estructura o cualquiera de sus miembros; o cuando aquella y éstos, sufran daños irreversibles que afecten su resistencia ante nuevas aplicaciones de carga. Pueden ser de dos formas: como falla frágil o como falla dúctil.

### 81. Estado Límite de Servicio

Se considera así, cuando ocurren desplazamientos, agrietamientos, vibraciones o daños que afecten el funcionamiento de la estructura, pero no su capacidad para soportar cargas. Bajo el efecto de las combinaciones de acciones clasificadas en este Reglamento, la respuesta de la estructura no excederá los límites de deformaciones, vibraciones, grietas, desprendimientos y otros daños.

### 82. *et alii*

Equivalente en español del latín “y otros” refiriéndose a otros autores de la misma obra o libro; y su abreviación “et al.” correspondiente para citar lo referido.

### 83. Exotérmico

Proceso o reacción que se produce con desprendimiento de calor.

### 84. Explosión (o voladura)

Proceso exotérmico que genera un aumento repentino en el volumen y liberación energía de manera instantánea y violenta, formando altas presiones y liberación de calor; comúnmente usado para reducir un cuerpo sólido, como una roca a fragmentos, mediante el uso de un explosivo.

Las explosiones se clasifican como deflagraciones si sus ondas son subsónicas y detonaciones si son supersónicas.

### 85. Explosivo

Cualquier sustancia o dispositivo que al iniciarse por medios mecánicos (impacto o fricción), la acción del calor (chispas, llama abierta, objetos al rojo vivo), o una carga eléctrica, reacciona produciendo una rápida expansión de volumen en un período extremadamente breve. Hay tres tipos fundamentales: mecánico, nuclear y químico.

### 86. Factor de carga

Factor de seguridad parcial mayor que la unidad que se aplica a las cargas calculadas para cubrir la incertidumbre que se tiene para su determinación.

### 87. Factor de resistencia

Factor de seguridad parcial menor que la unidad que se aplica a la resistencia calculada (o nominal) para cubrir las incertidumbres que se tienen en su determinación.

### 88. Falla Dúctil

Se da cuando la capacidad de carga de la sección, elemento o estructura en cuestión se reduzca paulatinamente al alcanzar el estado límite.

### 89. Falla Frágil

Se da cuando la capacidad de carga de la sección, elemento o estructura en cuestión se pierde bruscamente al alcanzar el estado límite.

### 90. Fisura

Aberturas incontroladas que afectan solamente a la superficie del elemento o a su acabado superficial.

### 91. Flexión

Un tipo de deformación en la cual las secciones transversales de un elemento estructural que eran inicialmente paralelas se inclinan unas hacia las otras. También se denomina así a la acción estructural que produce dicho efecto.

92. Fluencia

Estado de un material en que éste pierde totalmente rigidez y se deforma plásticamente. Se llaman esfuerzos de fluencia y fuerza de fluencia a las condiciones para las que se produce este fenómeno, y que se consideran como límite para la resistencia de una estructura.

93. Fluidez

Propiedad de una mezcla de mortero, o concreto fresco la cual indica su plasticidad y trabajabilidad.

94. Flujo plástico

Deformación con el paso del tiempo de un material debido a la permanencia de las cargas. Esta deformación es adicional a la elástica que se produce por la aplicación inicial de la carga.

95. Fraguado

Proceso químico de una mezcla de cemento, adhesivo o resina, que resulta del desarrollo gradual de rigidez, y conlleva una pérdida de plasticidad.

96. Fresado (o "Milling")

Es el proceso de mecanizado utilizando cortadores rotativos con giro perpendicular al frente de excavación para la propia excavación.

97. Fricción

Fuerza que existe entre dos superficies en contacto, que se opone al movimiento relativo entre ambas superficies (fuerza de fricción dinámica) o a la fuerza que se opone al inicio del deslizamiento (fuerza de fricción estática).

98. Gasto

Cantidad de agua que pasa por unidad de tiempo por la sección de un río (CONAGUA, 2006)

99. Grado de saturación (de un suelo)

Relación entre el volumen de agua que contiene un suelo y su volumen de vacíos.

100. Grava

Término para designar los fragmentos de roca cuyo tamaño se encuentra en el rango de 4.75 mm (tamiz #4) a 3 pulgadas (7.62 cm).

101. Grieta

Abertura o hendidura incontrolada que se presenta en un elemento estructural afectando su desempeño cuando los esfuerzos exceden la resistencia a este efecto.

102. Grúa

Máquina compuesta de un brazo montado sobre un eje vertical giratorio, que con una o varias poleas, que, a través de un cable y un gancho, sirve para elevar y distribuir objetos, llevándolos de un punto a otro, dentro del círculo que el brazo describe o del movimiento que pueda tener la misma.

En general cuentan con poleas, contrapesos, mecanismos simples, etc. para crear ventaja mecánica y poder levantar y mover grandes cargas.

103. Hidrogel

Una solución acuosa de amonio y nitrato de sodio con un combustible sensibilizado por aditivos explosivos y/o aire microencapsulado, espesado y reticulado para proporcionar una consistencia gelatinosa; es usado como explosivo.

104. Hundimiento

Movimiento vertical de la superficie del suelo, como consecuencia de la excavación del túnel; ver también "Asentamiento"

105. ICA

Ingenieros Civiles Asociados S.A. de C.V., Construcción especializada.

### 106. Indentación

Muesca, abertura, incisión, hendedura o corte semejante o similar a la marca o la señal que deja la mordedura de un diente.

### 107. Inserto

Elementos que quedan embebidos en el concreto fresco de las dovelas, que proporcionan los medios para su ensamble final.

### 108. Instrumentación

Combinación de conocimientos teóricos-prácticos que están enfocados al uso de dispositivos y técnicas especiales que nos permiten obtener información cualitativa y cuantitativa de las variables que caracterizan el comportamiento de una estructura, con el fin de evaluar su seguridad, y en su caso tomar acciones preventivas o correctivas, tanto en la etapa constructiva como de operación.

### 109. Intemperismo

Proceso fisicoquímico de descomposición, erosión o desgaste, como respuesta a la exposición a agentes de la naturaleza, como son el agua, viento, el sol, la humedad, o las variaciones de temperatura. También llamado “meteorización”

### 110. Intersticio

Espacio pequeño entre dos cuerpos o entre dos partes de un mismo cuerpo.

### 111. Ladrillo

Pieza de arcilla cocida con forma de prisma rectangular. Véase también “Tabique”

### 112. Lechada

Mezcla cementante fluida con la que se llenan cavidades o espacios en un elemento de mampostería. Generalmente constituida de cemento y/o cal y agua, con la adición de arena cuando los huecos son de cierto tamaño.

### 113. Liner

Láminas de Cloruro de polivinilo que se adhieren a la pared interior del concreto del túnel, proporcionando una barrera contra la corrosión.

### 114. Límites de Atterberg

También conocidos como límites de plasticidad o límites de consistencia, se utilizan para caracterizar el comportamiento de los suelos finos, aunque su comportamiento varía a lo largo del tiempo. El nombre de estos es debido al científico sueco Albert Mauritz Atterberg (1846-1916); lo conforman el límite líquido, límite plástico y el límite de contracción o retracción.

### 115. Límite líquido

Cuando el suelo pasa de un estado plástico a un estado líquido. Para la determinación de este límite se utiliza la cuchara de Casagrande.

### 116. Límite plástico

Cuando el suelo pasa de un estado semisólido a un estado plástico.

### 117. Límite de retracción o contracción

Cuando el suelo pasa de un estado semisólido a un estado sólido y se contrae al perder humedad.

### 118. Limo

Término para designar los fragmentos de roca cuyo tamaño se encuentra en el rango de 0.0625 mm (tamiz #230) a los 0.002 mm.

### 119. Lodo Bentonítico

Es la mezcla de bentonita y agua cuya densidad deberá ser de 1.07 ton/m<sup>3</sup> o lo que indique el proyecto ejecutivo, cuya función principal es estabilizar las paredes y el fondo de excavación.

### 120. Losa

Elemento estructural plano horizontal para cubrir un claro.

### 121. Lumbrera

Elemento estructural circular de concreto reforzado cuya función principal es acceder con los recursos necesarios para la construcción de un tramo de túnel.

### 122. Método de Diseño Estructural

Es el conjunto unificado de criterios y procedimientos con los que se garantizan los requisitos de seguridad y servicio de una estructura. Se considerarán métodos aceptables de diseño, los métodos de diseño por resistencia, por esfuerzo de trabajo o cualquier método alternativo que proporcione niveles de seguridad equivalentes a los que se obtendrían por los métodos anteriores.

### 123. Módulo de Elasticidad

Relación entre el esfuerzo y la deformación del material considerado, en su rango de comportamiento elástico.

### 124. Molde

Estructura metálica auxiliar empleada en el proceso de fabricación de dovelas, para conformar adecuadamente la geometría de las piezas mientras el concreto logra su consolidación.

### 125. Momento flexionante

Es la reacción (interna) inducida en un elemento estructural cuando se aplica una fuerza o un momento externo al elemento, haciendo que dicho elemento se doble (flexione) respecto a un eje.

### 126. Monolítico

Compuesto de un solo gran bloque de un solo colado de concreto. También es una estructura en que no hay discontinuidades entre sus elementos.

### 127. Mortero

Mezcla de cementante, agregado fino (usualmente arena) y agua.

### 128. Municipio

Entidad local básica de la organización territorial del estado. Institución política representativa dotada de autonomía para la gestión de los intereses de la colectividad correspondiente y, en consecuencia, de personalidad jurídica y plena capacidad para el desempeño de sus funciones. La atribución de sus competencias emana de la legislación del estado y de las comunidades autónomas (INEGI, 2007).

### 129. Muro Milán

Pared de concreto reforzado conformado en el suelo

### 130. Nivel freático

Límite superior de la zona saturada del suelo, en el cual el agua contenida en los poros se encuentra sometida a la presión atmosférica.

### 131. Normas Técnicas Complementarias (NTC)

La descripción detallada de aspectos regulados por el Reglamento, que constituye una referencia importante para evaluar, dictaminar y en su caso autorizar acciones urbanas.

### 132. Pantalla

Es la sustitución de suelo existente por una mezcla de lodo fraguante compuesto por agua, cemento y bentonita, con una resistencia de 10 Kg/cm<sup>2</sup> o lo que indique el proyecto ejecutivo.

### 133. Paramento

Cada una de las dos caras de una pared.

### 134. Parteaguas

Línea poligonal imaginaria del contorno de una cuenca hidrográfica, que la divide de las adyacentes y distribuye el escurrimiento originado por la precipitación en el sistema de cauces que fluye hacia un punto de dicha cuenca (De La Lanza et al. 1999); suele estar conformada por los puntos de mayor relieve.

135. Pendiente

Relación entre el aumento vertical o la altura y la distancia horizontal. (BATF/EUA)

Ángulo que forma el terreno con respecto a la horizontal o grado de inclinación del suelo (CONAGUA).

136. Permeabilidad

Capacidad de un material de permitir el flujo de líquidos o gases.

137. Pierna o pata de brocal

Es la parte vertical que integra al brocal.

138. *Plenum*

Cámara de excavación de una tuneladora en contacto con la cara del túnel; debe estar presurizado cuando la excavación se realiza en "modo cerrado". (También llamada "pleno" o "cámara de trabajo")

139. Poro

Intersticio entre las partículas o moléculas que constituyen un cuerpo sólido.

140. Porosidad (del suelo)

Relación entre su volumen de vacíos y el volumen total de su masa.

141. Pozo indio

Se define como una cimentación realizada a base de cajones sin fondo, que se van hincando en el terreno por su propio peso o mediante lastre, a medida que se excava en su interior, mientras se recrecen sus paredes. Este proceso continúa hasta alcanzar la profundidad deseada.

142. Precipitación (lluvia)

Agua en forma líquida o sólida, procedente de la atmosfera, que se deposita sobre la superficie de la tierra; incluye el rocío, la llovizna, la lluvia, el granizo, la aguanieve, y la nieve (INEGI, 2000)

143. Presión de poro

Es aquella a la cual se encuentran confinados los fluidos en el espacio poroso del suelo.

144. Probeta

Parte de una muestra preparada, o no, con las dimensiones y características adecuadas para someterla a una prueba determinada.

145. Procedimiento

Método, modo de efectuar, ejecutar, o desarrollar algo de una manera determinada.

146. Proceso

Ejecución y secuencia de acciones o conjunto de fases sucesivas, que se llevan a cabo para lograr un fin u objetivo determinado.

147. Proporcionamiento

Acción de seleccionar las cantidades de los ingredientes para generar la mezcla, de mortero o concreto, más eficiente y con las propiedades requeridas con los materiales disponibles.

148. Pumítica

Roca ígnea volcánica vítrea, con baja densidad y muy porosa, contiene feldespatos, cuarzo. (También llamada piedra pómez, jal o liparita).

149. Refuerzo

Elementos como barras, alambres, hebras, fibras, mallas u otros elementos, que son embebidos o anclados o sujetas en el concreto o en la mampostería para que juntos resistan las fuerzas a las que están sujetas.

### 150. Región Hidrológica

Son porciones territoriales concebidas en función de sus características morfológicas, orográficas e hidrológicas, por lo que sus límites son, en general, distintos a la división política por estados y municipios. En México se ubican 37 regiones hidrológicas definidas a partir de grandes parteaguas del país. En cada una de estas regiones hidrológicas está contenida, al menos una cuenca, y a su vez, no existe cuenca alguna que esté en más de una región hidrológica. Su característica más importante es el escurrimiento ( $m^3/año$ )

### 151. Resistencia

Es la magnitud de una acción o de una combinación de acciones, que provocaría la aparición de un estado límite en la estructura. También puede ser el “ $f'c$ ” que técnicamente es el esfuerzo máximo de compresión en el concreto, medido en carga por unidad de área (con unidad de  $Kg/cm^2$  regularmente)

### 152. Revenimiento

Prueba realizada a una mezcla de concreto, o mortero fresco que permite determinar la consistencia del material.

### 153. Rezaga

Materiales excavados para ser removidos. Carga y transporte de los materiales excavados desde la zona de excavación hasta el exterior del túnel.

### 154. Riesgo

Evento que puede causar daños a personas y / o propiedades.

### 155. Rigidez

Oposición de un material o elemento estructural a ser deformado.

Carga necesaria para producir una deformación unitaria.

### 156. Sangrado

Flujo de agua proveniente de una mezcla de concreto, mortero, o lodo recién colocado y causado por el asentamiento de los agregados sólidos de la mezcla.

### 157. Sistema guiado/ Sistema guía

Es el cual direcciona la tuneladora en una alineación deseada. Por lo general, incluye un sistema de guía láser, y el uso diferencial entre los gatos principales de empuje y/o la articulación de la cabeza de corte.

### 158. *Slurry*

Su traducción sería “Lodo Líquido”. Es una suspensión viscosa de minerales (bentonita, arcilla y / o polímeros en agua [puede incluir o no aire]), que transita en los circuitos de alimentación y descarga de un escudo de lodos o bentonita; proporciona presión de a la cara de contacto y facilita la eliminación de la rezaga.

159. SUCS

Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, usado en ingeniería y geología para describir la textura y el tamaño de las partículas de un suelo; se representa mediante un símbolo con dos letras. Cada letra es descrita debajo. También se le denomina clasificación modificada de Casagrande.

Tabla. Clasificación SUCS

| Primera y/o segunda letra |            | Letra posterior |   |
|---------------------------|------------|-----------------|---|
| Letra                     | Definición | Letra           | Definición  |
| G                         | grava      | P               | pobrementemente graduado (tamaño de partícula uniforme) |
| S                         | arena      | W               | bien graduado (tamaños de partícula diversos)           |
| M                         | limo       | H               | alta plasticidad  |
| C                         | arcilla    | L               | baja plasticidad  |
| O                         | orgánico   |                 |   |

Para usar esta clasificación hay que realizar previamente una granulometría del suelo

160. Tabique

Pieza de arcilla cocida con forma de prisma rectangular. Véase también “Ladrillo”

161. Talud

Inclinación o pendiente que presenta una roca o un suelo.

162. Tamizado (o cribado)

Método mecánico para separar dos sólidos formados por partículas de tamaños diferentes; consiste en una malla de alambre o plástico sostenida en un marco, que separa partículas más gruesas de partículas más finas.

163. Tanque de Flotación

Tanque metálico fabricado a base de placa metálica y armaduras formadas a base de ángulo estructural.

164. TBM (De las siglas en inglés Tunnel Boring Machine)

Ver tuneladora

165. TCX

Túnel Churubusco - Xochiaca.

166. Tensión

Esfuerzo principal que produce el alargamiento de un elemento estructural o de las fibras de su sección transversal paralelas a su eje.

167. Tepetate

Del náhuatl “*tepetlatl*” (estera de piedra) es un material calizo, terreo amarillento blanquecino y poroso, regularmente empleado en la construcción.

168. Torsión

Estado de esfuerzos que tiende a producir rotación de la sección transversal de un elemento. En relación con estructura completa es la rotación de los sistemas de pisos y techo alrededor del eje vertical durante la vibración por el efecto de sismos.

169. Trabe de liga

Elemento de concreto reforzado que restringe el posible movimiento vertical relativo entre la lumbrera y el brocal, ya sea durante el proceso de inyección del mortero o por hundimiento regional del suelo adyacente a la lumbrera. Son vigas dispuestas de manera radial uniformemente distribuidas en el perímetro de la lumbrera, las cuales van ligadas a la pierna horizontal del brocal.

### 170. Trabajabilidad

Propiedad de una mezcla de mortero, o concreto, que indica qué tan fácilmente puede ser manejado, distribuido en la superficie de trabajo y compactado. (Ver también —fluidez).

### 171. Trazo

Proceso de definir en un terreno las dimensiones de la obra donde se realizará la construcción, partiendo de los datos del proyecto ejecutivo. Es necesario para diferenciar puntos, distancias, ángulos y cotas en el terreno.

### 172. Tubería Tremie

Tubo metálico de 6" o 8" de diámetro, que sirve para conducir mezclas bajo inmersión

### 173. Túnel

Obra subterránea de carácter lineal que comunica dos puntos para el transporte de personas o materiales. Normalmente es artificial.

### 174. Tuneladora

Máquina capaz de excavar túneles a sección completa, a la vez que colabora en la colocación de un sostenimiento si este es necesario, ya sea en forma provisional o definitiva. A veces llamado "topo", generalmente se impulsa hacia adelante levantando los soportes (gatos) de excavación colocados detrás de él o agarrando el costado de la excavación (AASHTO, 2010).

### 175. Tungsteno

Elemento químico metálico, de número atómico 74, de color gris acerado, muy duro, denso y difícil de fundir, escaso en la corteza terrestre, con el punto de fusión más elevado de todos los elementos y aleado con el acero es usado en la fabricación de herramientas; Símbolo W; sinónimo wolframio.

### 176. UTM (Universal Transversal de Mercator)

Sistema de coordenadas, universal transversal de Mercator

### 177. Vaciado

Acción de colocar el concreto fresco al interior del cimbrado.

### 178. Vibración

Fenómeno de transmisión de energía por la propagación de un movimiento ondulatorio en un medio, pudiendo recurrir grandes distancias. Está caracterizado por un emisor (generador de vibraciones), y medio de transmisión, y un receptor.

### 179. Voladura

Proceso de excavación de un túnel mediante el uso de un explosivo. Las operaciones de voladura convencionales incluyen: (1) perforar barrenos, (2) colocar una carga en cada agujero, (3) detonar la carga y (4) limpiar la rezaga o detritus. Tras la detonación, la energía química en el explosivo se libera, y el explosivo compacto se transforma en un gas incandescente con una enorme presión.

### 180. Zapatera

Algunas veces también llamada cubeta, es la parte inferior de la voladura de un túnel.

### 181. Zona III

Zona lacustre, integrada por potentes depósitos de arcilla altamente compresibles, separados por capas arenosas con contenido diverso de limo o arcilla. Estas capas arenosas son generalmente medianamente compactas a muy compactas y de espesor variable de centímetros a varios metros. Los depósitos lacustres suelen estar cubiertos superficialmente por suelos aluviales, materiales desecados y rellenos artificiales; el espesor de este conjunto puede ser superior a 50 m.

# Índice

Portada

Agradecimientos

In Memoriam y Dedicatoria

Resumen / Abstract

Definiciones

Índice

Introducción

|         |  |     |
|---------|--|-----|
| I.      | Antecedentes.....                              | 1   |
| I.1     | Túneles en México .....                        | 17  |
| I.2     | Clasificación de túneles .....                 | 33  |
| I.3     | Condiciones de diseño .....                    | 59  |
| II.     | Descripción del proyecto .....                 | 64  |
| II.1    | Aspectos generales del proyecto.....           | 66  |
| II.2    | Condiciones de diseño .....                    | 71  |
| II.3    | Maquinaria y equipo empleado .....             | 75  |
| II.4    | Dovelas.....                                   | 108 |
| II.5    | Lumbreras .....                                | 112 |
| III.    | Principales procedimientos constructivos ..... | 116 |
| III.2   | Lumbreras .....                                | 118 |
| III.1.1 | Lumbrera Flotada .....                         | 119 |
| III.1.2 | Lumbrera con muros Milán .....                 | 136 |
| III.1.3 | Elementos complementarios de lumbrera .....    | 153 |
| III.2   | Dovelas (Prefabricación).....                  | 167 |
| III.3   | Túnel (Excavación y montaje).....              | 177 |
| III.4   | Revestimiento definitivo.....                  | 188 |
| IV.     | Conclusiones .....                             | 196 |

Anexos

Referencias

Bibliografía

# Introducción

El objetivo principal de este trabajo es describir las diferentes actividades que se realizaron previas, durante, y posterior a la construcción del Túnel Churubusco - Xochiaca, describiendo de manera general sus principales procedimientos constructivos.

La intención del presente trabajo es presentar una referencia que contenga información básica de los procedimientos de construcción de túneles en la zona lacustre de la CDMX con una tuneladora tipo *EPB*, y las obras adicionales necesarias que complementan dicha obra.

El trabajo está dividido en cuatro capítulos que tienen como objetivo, lo siguiente:

- I. Antecedentes: Enunciar de manera breve el precedente histórico mundial y nacional en la construcción de túneles, exponer como se clasifican los túneles y sus condiciones de diseño.
- II. Descripción del proyecto: Detallar los aspectos generales del Túnel Churubusco – Xochiaca, sus condiciones de diseño específicas, la principal maquinaria y equipos utilizados; y además precisar el tipo de dovelas y lumbreras que complementan el túnel.
- III. Principales procedimientos constructivos: Describir de manera general los procedimientos de técnicos de construcción de los elementos que conforman el túnel, que son: Lumbreras y sus elementos complementarios, Dovelas (prefabricación), Túnel (Excavación y montaje), y el Revestimiento definitivo. .
- IV. Conclusiones: Colegir lo expuesto en la presente tesis con lo experimentado en campo, aunados a la opinión técnica personal.

# I. Antecedentes

La palabra túnel del latín “*tunna*” y en el francés antiguo “*tonnelle*” integrado por “*tonna*” con el significado de cuero o piel y el diminutivo “*elle*”, designaba una red de pesca, para luego significar “camino subterráneo”, en el siglo XVIII. (Lombardi, 2006).

En el Diccionario de la Real Academia Española, túnel se define como:

1. m. Vía subterránea abierta artificialmente para el paso de personas y vehículos.
2. m. Instalación cubierta y alargada que comunica dos puntos y sirve para distintos fines.

Los primeros túneles se remontan a principios de los descubrimientos metalúrgicos, al final de la Edad de Piedra, destinados a la explotación de los minerales como el sílex o pedernal; cuando se agotaba en la superficie se seguía la veta por medio de pozos y galerías. Este proceso debió iniciarse hace unos 15,000 años. Estos túneles se abrían con la técnica del fuego que consistía en provocar un incendio en el frente de ataque para luego sofocarlo súbitamente con agua fría: el cambio de temperatura da lugar al resquebrajamiento de la roca. Ref. [1].

Otros túneles y obras subterráneas datan de tiempos muy antiguos, en el tiempo de los egipcios. Ref. [2]. Excavaban túneles en el Valle de los Reyes y de las Reinas, así como bajo sus pirámides. Ref. [3].

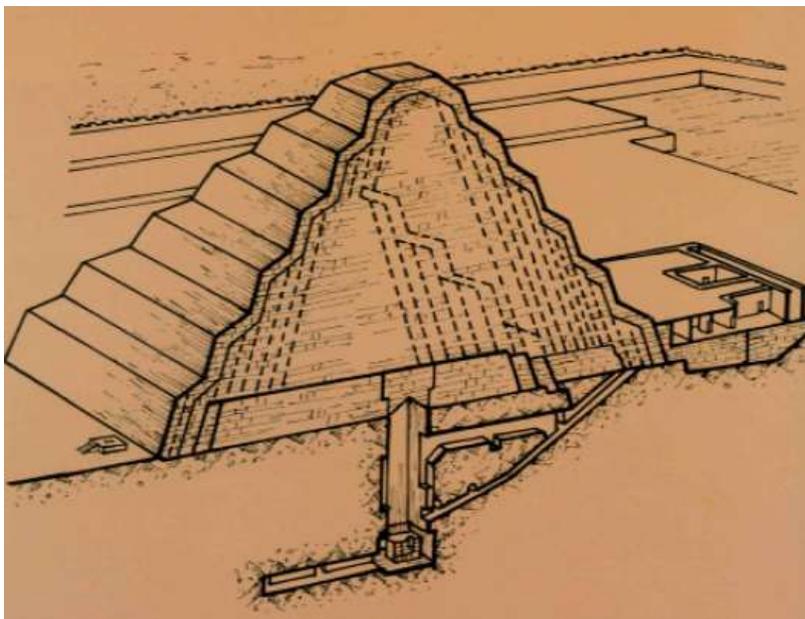


Figura 1.1 Imagen de Pirámide de Sakkara, sepultura del Rey Zoser, Egipto, ca. 2600 a.C. Ref. [4].

## Proceso Constructivo del Túnel Churubusco – Xochiaca

---

Según historiadores, existió un túnel bajo el Éufrates en Babilonia de 929 metros de longitud. Esta obra sería el primer túnel subacuático y se remonta al 2160 a.C.; fue mandado a construir por la legendaria reina Semíramis para enlazar el palacio con el templo de Belos. Ref. [5].



Figura 1.2. Construcción del túnel bajo el Éufrates en Babilonia. Ref. [6].

La mayoría de las civilizaciones han encontrado bajo el suelo el lugar propicio para instalar construcciones funerarias. Las tumbas reales del antiguo Egipto, catacumbas formadas por una red increíble de pasadizos, pisos y profundos túneles que permitían el alojamiento de cientos de tumbas, se convirtieron en un lugar de culto. Como es el caso de los túneles que se encuentran en el Valle de los Reyes en Egipto, excavados en 1500 a.C. (Santoyo *et alii*, 2013).

Hacia el año 1000 a. C. se construían túneles en Asiria, Persia y Mesopotamia para transportar en forma segura el agua, protegiéndola de la evaporación que se produciría si la conducción estuviera expuesta a los intensos rayos solares; estos primeros túneles de abastecimiento de agua, llamados “*Qanats*” (o *Ganats*). Los qanats transportaban el agua por gravedad, los pozos que delatan su existencia se utilizaban para su construcción y posteriormente para la ventilación. (Serra *et Gómez*, 2003).

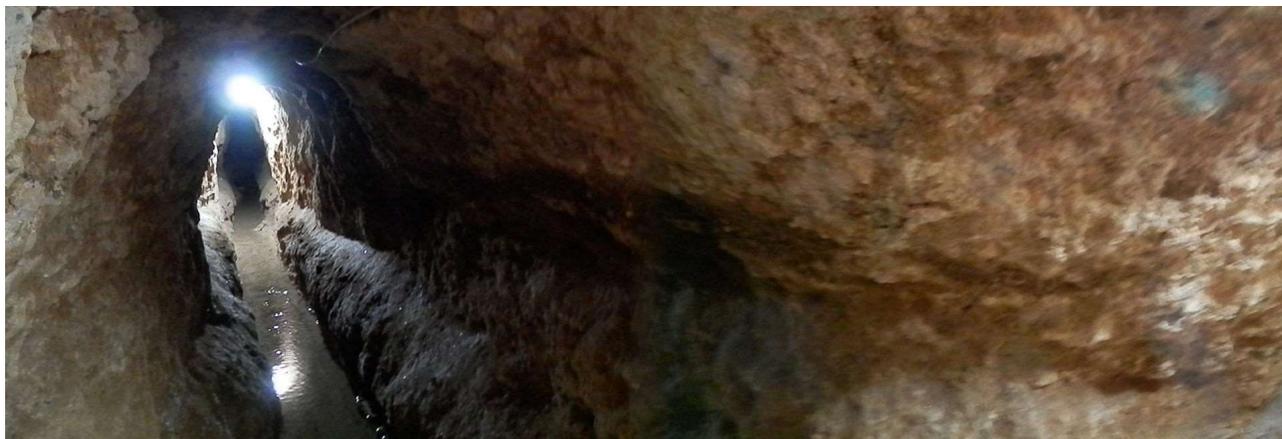


Figura 1.3. Túnel de Qanat, Ispahán (Irán). Ref. [7].

## Proceso Constructivo del Túnel Churubusco – Xochiaca

Otro motivo para la construcción de túneles era para la estrategia militar, en las antiguas ciudades amuralladas el abastecimiento de agua se conseguía mediante túneles que aseguraban el suministro en caso de asedio. Este es el caso del túnel de Siloam con 533 metros de largo, que se terminó en el año 701 a.C. y que llevaba el agua desde los manantiales de Gihon de Ophel hasta el estanque de Siloam en el interior Jerusalén. Ref. [8].

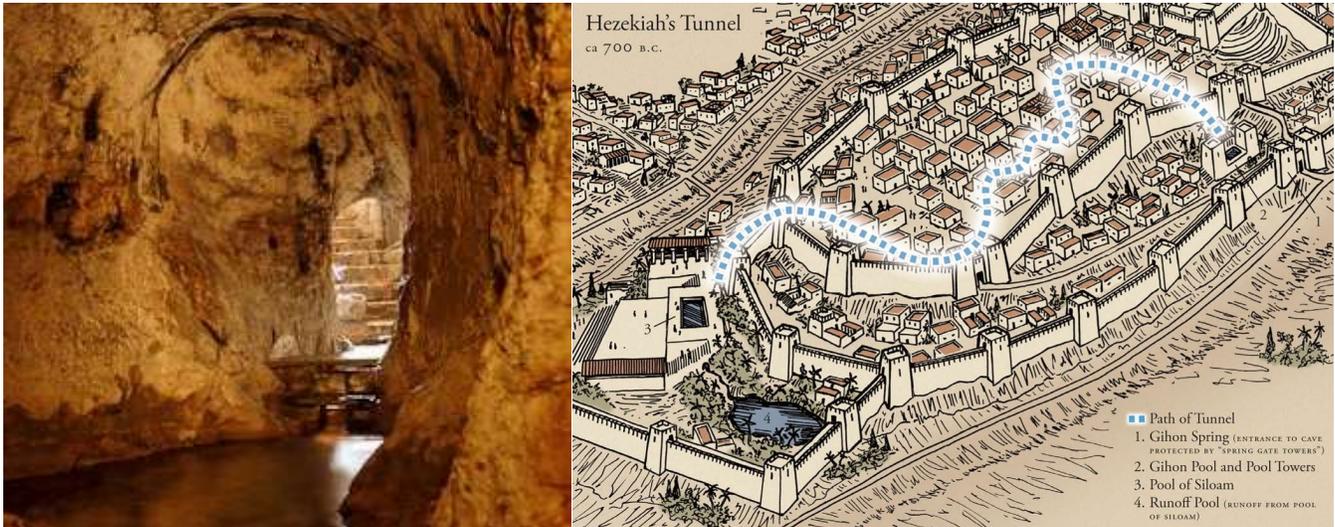


Figura 1.4. Túnel Siloé o Túnel Ezequías (Jerusalén), Israel. Ref. [9] y [10].

Una de las primeras redes conocidas de drenaje y alcantarillado en forma de túneles se construyó en Persépolis, Irán, al mismo tiempo que la construcción de su fundación en 518 a.C. Ref. [11].

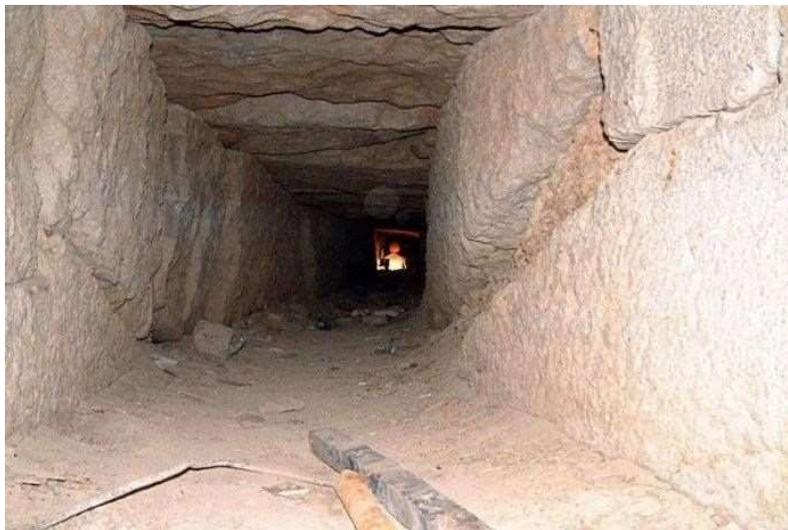


Figura 1.5. Acueducto de Persépolis (Persépolis), Irán. Ref. [12].

## Proceso Constructivo del Túnel Churubusco – Xochiaca

---

Entre 538 y 522 a.C., el arquitecto Eupalinos de Megara construyó un túnel de 1,036 metros de longitud, y una sección semicuada de aproximadamente 1.80 m para abastecer con agua a la ciudad griega de Samos. Ref. [13].

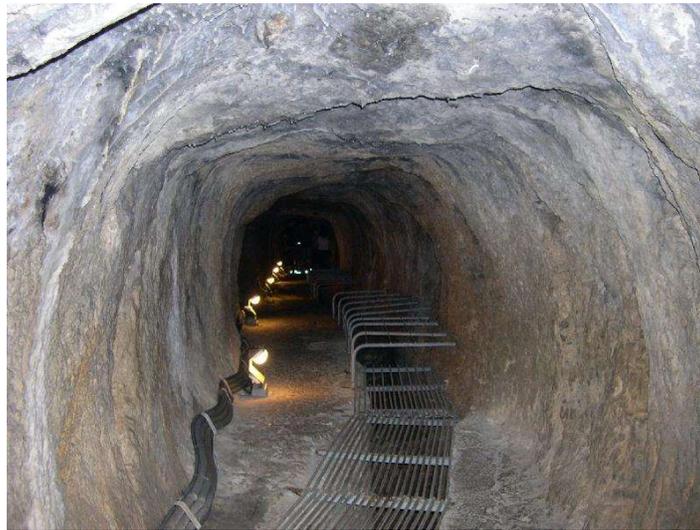


Figura 1.6. Túnel de Eupalino (Samos), Grecia. Ref. [14].

También importante el túnel de Pausilippo (Posilipo), cerca de Nápoles, construido para una calzada romana el año 36 a.C. y que tiene 1,500 m. de longitud y 4 m. de anchura que permitía el tránsito en ambas direcciones. Ref. [15].



Figura 1.7. Túnel de Posilipo (Nápoles), Italia. Ref. [16].

## Proceso Constructivo del Túnel Churubusco – Xochiaca

---

El túnel más antiguo del mundo que atraviesa un cuerpo de agua es “*Terelek kaya tüneli*” bajo el río *Kizilirmak*, al sur de las ciudades de Boyabat y Durağan en Turquía. Se encuentra actualmente en una parte estrecha de un lago formado por una presa unos kilómetros más abajo. Se estima que fue construido hace 2000 años, y que tuvo propósitos defensivos. Ref. [17].

Alrededor del siglo I d.C., siguiendo la costumbre en gestión del agua de los etruscos, desarrolló el imperio romano la construcción de acueductos y cloacas. Destaca la construcción del acueducto de Gadara también llamado “*Qanat Fir'aun*” (Ganat del faraón) con 170,000 m de longitud abastecía la decápolis y se calcula que trabajaron 120 años en él, aunque nunca fue terminado. Ref. [18].

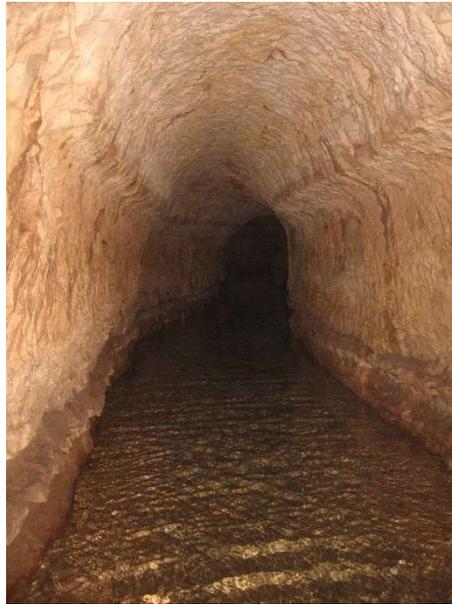


Figura 1.8. Acueducto de Gadara (actualmente *Um Qais*), Jordania. Ref. [19].

La Vía Flaminia fue una importante vía romana, penetró el paso de Furlo en los Apeninos a través de un túnel que el emperador Vespasiano había ordenado construir en 76–77 d.C. Ref. [20].



Figura 1.9. Túnel de Furlo (Nápoles), Italia. Ref. [21].

## Proceso Constructivo del Túnel Churubusco – Xochiaca

---

Hacia el siglo XIII a partir de una mezcla de nitrato potásico, azufre y carbón vegetal es descubierta la pólvora negra por alquimistas de la dinastía Tang, ya que buscaban el elixir de la inmortalidad. (Pérez Álvarez *et* Barral Ramón, 2018) y (García Bastante, 2005).

Para el año 1400, en Hungría se construyó una galería de 5,600 m. de largo con el fin de evacuar el agua de una mina en Selmechánya. En su tiempo fue la obra subterránea de mayor envergadura, y, por primera vez se empleó pólvora para realizar las voladuras en roca. (Shelton *et alii*, 1956).

De 1555 a 1560, Quinto Pierres Vedel (Ingeniero y arquitecto francés), construyó bajo el cerro de San Jorge el túnel de la mina de Daroca, y que conducía las aguas pluviales a veces torrenciales, evitando destrozos e inundaciones causadas a la ciudad antes de existir este túnel. Ref. [22].



Figura 1.10. Túnel de Mina de Daroca (Zaragoza), España. Ref. [23].

Posteriormente, iniciado en 1666 y terminado en 1681 en Languedoc, Francia se construyó túnel de Malpas, en el cual también se empleó pólvora para efectuar voladuras en roca; fue excavado por Pierre-Paul Riquet, permitiendo el paso del Canal du Midi. Ref. [24] y (García Bastante, 2005).



Figura 1.11. Túnel de Malpas (Béziers), Francia. Ref. [25].

## Proceso Constructivo del Túnel Churubusco – Xochiaca

En 1777, después de once años de iniciados los trabajos, James Bradley concluyó con la construcción de un túnel en Harecastle, Inglaterra, este túnel fue el primero de su tipo en tierras británicas; su longitud fue de 2,700 m y su gálibo horizontal de 3.7 m., y durante la excavación se presentaron diferentes problemas de estabilidad. Seis años después, Thomas Telford concluyó un túnel paralelo en tan sólo tres años. Ref. [26].



Figura 1.12. Túneles de Harecastle, izquierda túnel construido por Telford (1783) y derecha túnel construido por James Bradley (1777), Francia. Ref. [27].

El túnel del canal de Sapperton es un túnel en el canal de Támesis y Severn cerca de Cirencester en Gloucestershire, Inglaterra. Con una longitud de 3,490 metros, fue el túnel más largo de cualquier tipo, en Inglaterra desde 1789 hasta 1811. Ahora está bloqueado por derrumbe de techo. Ref. [28].



Figura 1.13. Túnel del canal de Sapperton (Gloucestershire), Inglaterra. Ref. [29].

## Proceso Constructivo del Túnel Churubusco – Xochiaca

El túnel de Fritchley es un túnel ferroviario en desuso en Derbyshire, Inglaterra, es reconocido como túnel ferroviario más antiguo que ha sobrevivido en el mundo; fue construido en 1793 por Benjamín Outram como parte de Butterley Gangroad, se modificó en la década de 1840 y se mantuvo en uso hasta que se cerró en 1933. Ref. [30].

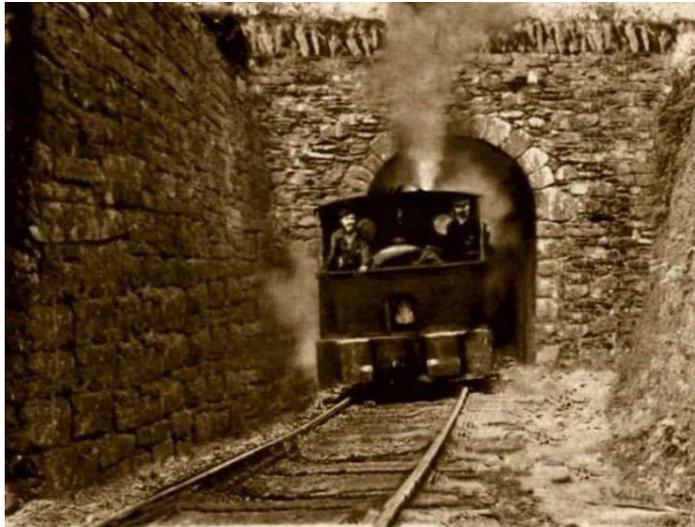


Figura 1.14. Túnel de Fritchley (Derbyshire), Inglaterra. Ref. [31].

En 1821 se construyó la primera lumbrera en suelos blandos para el proyecto del túnel del Támesis; su diámetro fue del orden de 15.2m y su profundidad de 23m. El proceso constructivo fue el que hoy se conoce como pozo indio. (Zaldívar, 2013).

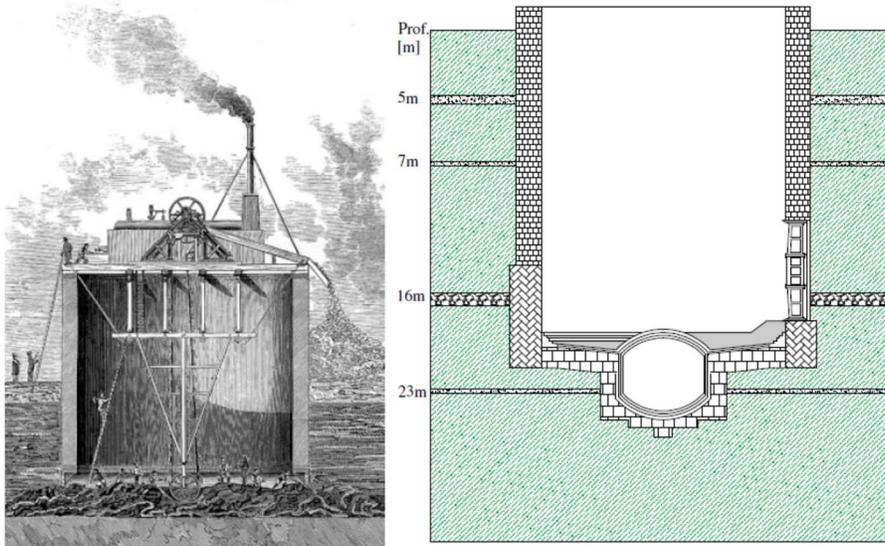


Figura 1.15. Lumbrera del Támesis, primera construida con el método de pozo indio. [Cortesía: Ing. Sergio F. Zaldívar Reyes].

La nitroglicerina es descubierta en 1842 por el italiano Ascanio Sobrero, en un pequeño taller en Suecia. (García Bastante, 2005).

## Proceso Constructivo del Túnel Churubusco – Xochiaca

Para 1843 es inaugurado el primer túnel bajo el Támesis, entre las ciudades de Rotherhithe y Wapping, en el que por primera vez se utiliza la técnica del escudo que patentase *Sir Marc Isambard Brunel*; dicho escudo fue construido por "*Maudslay, Sons & Field*", que también construyeron las bombas de vapor para desaguar el túnel. Y fue de las primeras veces que se empleó cemento Portland conocido también como "piedra artificial". (Juncá, 1997).

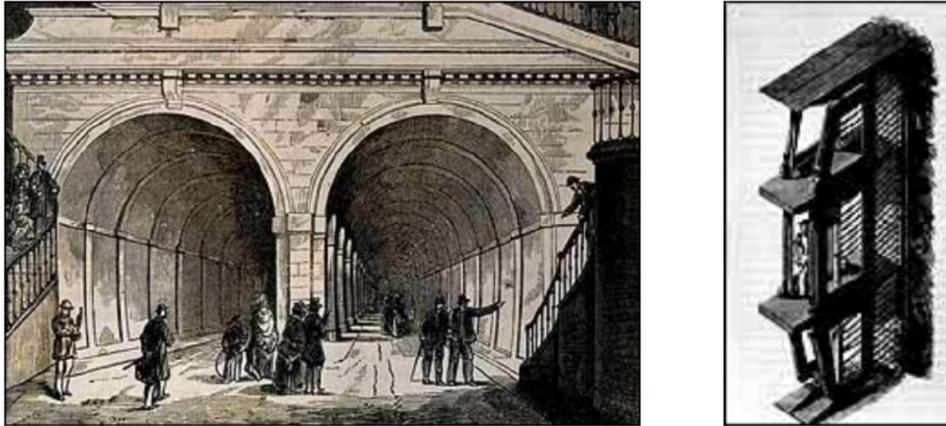


Figura 1.16. Imágenes de época de la construcción de los túneles el río Támesis y el escudo de Brunel, Inglaterra. Ref. [32].

La construcción de túneles cada vez más grandes exigió la creación de nuevas herramientas, así en 1857, fue introducido el taladro hidráulico y seguido por la pistola neumática (de aire comprimido), que fue perfeccionada por el ingeniero saboyardo Germain Sommeiller. Ref. [33].



Figura 1.17. Grabado de perforadora neumática. Ref. [34].

En el Túnel Ferroviario de Fréjus (también llamado "*Mont Cenis*") se excavaron 13,700 m de longitud en los Alpes europeos, utilizando una máquina de perforación construida por Henri-Joseph Mauss la "*Mountain Slicer*". La construcción, dirigida por Sommeiller, tenía una duración programada de 25 años, pero se completó en solo 14 años (de 1857 a 1871) gracias a las máquinas de perforación neumáticas y la ignición eléctrica de cargas explosivas. Ref. [35].



Figura 1.18. Túnel Fréjus (Modane), Francia. Ref. [36].

Peter W. Barlow en 1864 hizo la recomendación de rellenar el espacio anular de excavación de un túnel: “...el espacio que queda entre la tierra y la extensión del túnel puede/debe llenarse inyectando o haciendo correr lechada de cemento...”. (Guglielmetti et alii, 2007).

En Suecia se patentó el primer explosivo ANFO (del inglés: *Ammonium Nitrate Fuel Oil*) Fuelóleo nitrato de amonio en 1867 (Pérez Álvarez et Barral Ramón, 2018); en este mismo año la dinamita fue inventada por Nobel, utilizándose por primera vez en el túnel Hoosac construido de 1851 a 1875 marcando un hito a nivel de explosivos; además del uso de perforadoras neumáticas. (Juncá, 1997).

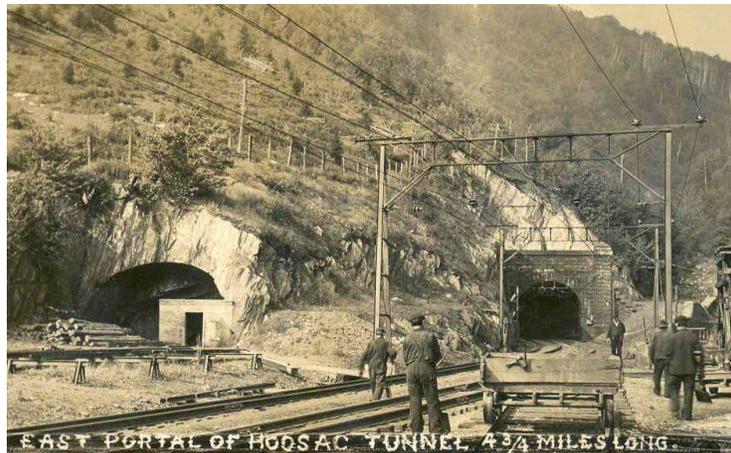


Figura 1.19. Portal este del Túnel Hoosac de 7,640 m de longitud (Massachusetts), EUA. Ref. [37]

Para el subterráneo “*Tower Subway*”, se excavó a través de la arcilla de Londres utilizando un escudo de hierro fundido, una idea de Peter W. Barlow, llevada a cabo por su pupilo James Henry Greathead en 1869 excavando un diámetro de 2m a través de 410 m de longitud. Un carro de madera transportado por cable transportaba a los pasajeros de un extremo a otro. El túnel se convirtió para el tránsito de peatones, después fue utilizado para la red de agua y hoy en día es usado por cables de telecomunicaciones. Ref. [38].

## Proceso Constructivo del Túnel Churubusco – Xochiaca

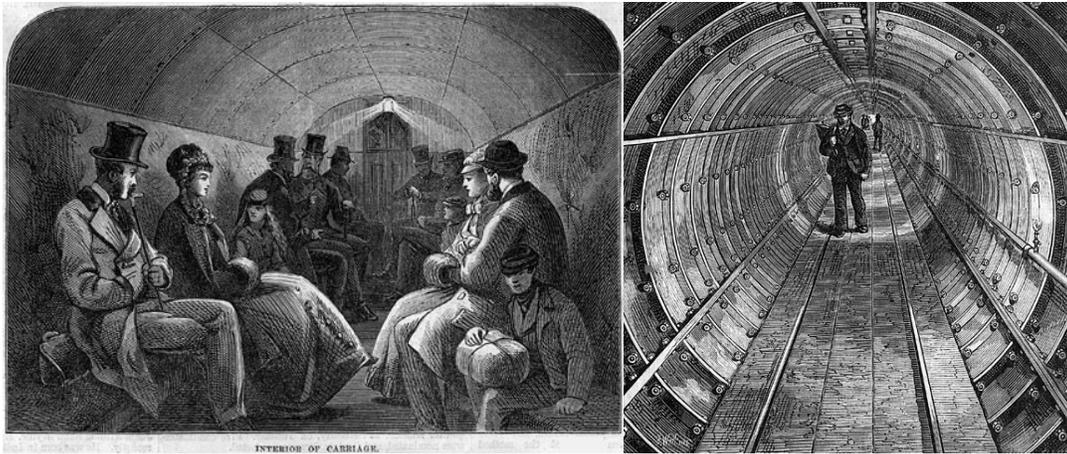


Figura 1.20. A la izquierda interior de carruaje de “Tower subway”; a la derecha “Tower subway” usado para tránsito de peatonal. Ref. [39].

H. Lorenz en 1874 propone estabilizar el frente de excavación aplicándole mezcla de bentonita y agua a presión. (Cornejo Álvarez, 2000)

La construcción del túnel del río Hudson en 1880, condujo a los ingenieros Sir. B. Baker y James Henry Greathead a combinar la técnica de escudo con la del aire comprimido. Este método resultó ser eficaz para la construcción de túneles, pero su aplicación tenía consecuencias importantes en la salud de los trabajadores y era obsoleto para túneles de gran diámetro. (Guglielmetti, Shulin Xu *et alii*, 2007).

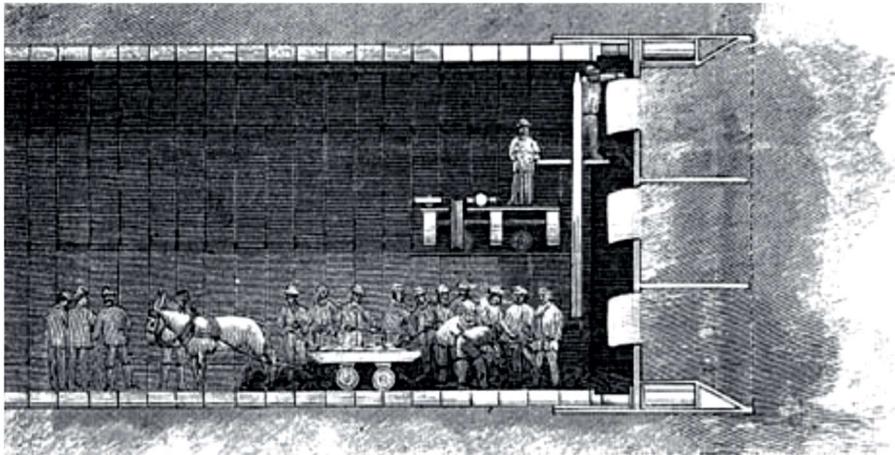


Figura 1.21. Escudo de aire comprimido de Greathead en acción en el depósito de limo debajo del río Hudson en Nueva York. Ref. [40].

El químico francés Paul Marie Eugène Vieille, obtuvo en 1884 pólvora “sin humo”, con una energía tres veces superior a la pólvora negra, a pesar de su nombre no está completamente libre de humo y tampoco tiene forma de polvo, sino que es un material granular. Ref. [41].

Mientras tanto, en 1887, Alfred Nobel obtuvo una patente inglesa para una pólvora sin humo que llamó “Balistita”. (García Bastante, 2005).

## Proceso Constructivo del Túnel Churubusco – Xochiaca

---

El ferrocarril de “*City and South London Railway*” fue el primer metro en el mundo; inaugurado en 1890, recorrió 5,100 m con un par de túneles entre la Ciudad de Londres y Stockwell, pasando por debajo del río Támesis. Ref. [42].

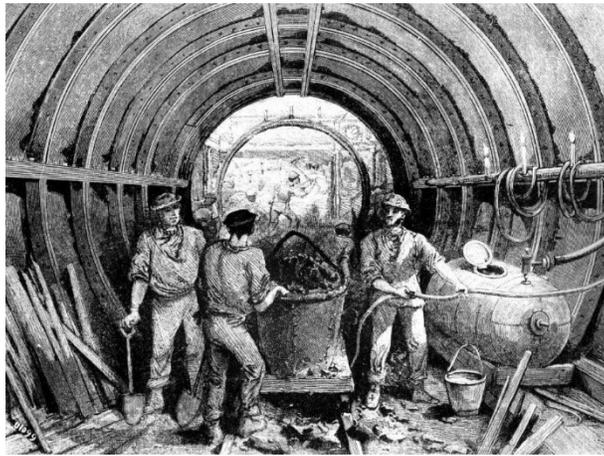


Figura 1.22. Dibujo de trabajadores de “*City and South London Railway*”, en el siglo XIX de Londres, Inglaterra. Ref. [43].

Uno de los primeros camiones de volteo en aparecer fue gracias al fabricante Gottlieb Daimler en 1896. Ref. [44].



Figura 1.23. Camión Daimler Motoren, de 2 cilindros y capacidad de carga de 1,500 kilos. Ref. [44].

En 1909, Howard Robard Hughes desarrolla la primera broca de dientes de acero de 2 conos rodantes. (Ramos, 2011).

Se tiene noción que el empleo de bentonita como estabilizador de pozos de agua y petroleros se remonta a 1910. Ref. [45].

El primer *lowboy* fue utilizado en 1920. Este tipo de remolque es adecuado para cargas pesadas y de gran tamaño. Ref. [46].

Para 1935 Dupont desarrolla comercialmente los explosivos ANFO (Nitrato de Amonio Fuelóleo). (Pérez Álvarez et Barral Ramón, 2018).

El Acueducto de Delaware fue construido entre 1939 y 1945, y lleva aproximadamente la mitad del suministro de agua de la ciudad de Nueva York de (4, 900,000 m<sup>3</sup> por día). Con 4.11 m de diámetro y 137,000 m de largo, es hasta el día de hoy el túnel más largo del mundo. Ref. [47].



Figura 1.24. Fotografía del túnel del acueducto Delaware, (Nueva York), E.U.A. Ref. [48].

Se dieron en 1943 las primeras pruebas de hidrogeles explosivos, iniciando su empleo en 1957, pero comercializándose hasta 1971. (Pérez Álvarez *et* Barral Ramón, 2018).

Después de investigaciones y estudios del efecto estabilizador de la bentonita, el ingeniero austriaco Christian Veder con el apoyo del ingeniero italiano Aldo Belini, desarrollan formalmente el método de muro diafragma o muro Milán, en el año de 1948. Ref. [49].

A partir de los años cuarenta se incorporaron los inhibidores a la masa del explosivo, mejorando la seguridad; en los años cincuenta aparecen los explosivos de intercambio iónico. (Pérez Álvarez, 2016). Se desarrolla en 1951 la primera broca tricónica con insertos de carburo de tungsteno. (Ramos, 2011).

En busca de mejoras de los compuestos tipo ANFO, el Dr. Melvin A. Cook, preparó en 1956 el primer Hidrogel. Ref. [50].

El primer empleo de los muros “diafragma” se realiza en la primera línea del metro de Milán, que comenzó el 4 de mayo de 1957. Ref. [45].

El primer escudo de lodos, con la excavación del frente por rueda de corte y remoción hidráulica del lodo fue una máquina fabricada en 1966 en Japón. Y en 1967, Robert L. Priestly desarrolló la máquina llamada “*Shielded Tunneling Machine*”, consiguiendo un récord mundial bajo el río Essex (Massachusetts) con un avance de 434 metros en una semana. (López Fernández, 2012).

## Proceso Constructivo del Túnel Churubusco – Xochiaca

---

En 1968 H. F. Bluhm consigue formar una emulsión explosiva estable a partir de una solución en caliente de nitrato amónico y sódico, aceite mineral y un emulgente. Ref. [50].

Para 1974 es diseñado el primer equipo excavador de frente cerrado con lodos presurizados (EPB), con un diámetro exterior de 3.72 m, fue manufacturado por una empresa japonesa llamada *Ishikawa-jima-Harmia*, para la excavación del túnel de 1,900 m de colector en Tokio. Ref. [51].

Mejor conocido como “*EuroTunnel*”, el Túnel Canal de la mancha es construido de 1987 a 1994, para unir Inglaterra con Francia; tiene una longitud de 50,000 m, 39,000 de ellos submarinos, siendo así el túnel submarino más largo del mundo, con 7.6 metros de diámetro y una profundidad de 40 a 75 metros bajo el lecho marino. Ref. [52].



Figura 1.25. Fotografía del Túnel Canal de la mancha (Eurotunnel), Francia. Ref. [53].

“*Lærdalstunnelen*” (El túnel de Lærdal) de 24,500 m, es el túnel de carretera más largo del mundo, conecta Lærdal y Aurland, en Noruega; su construcción comenzó en 1995 y finalizó en 2000. Debido a su gran extensión, su diseño considera el estrés mental en los conductores, e iluminación que permiten descansar la vista y romper la monotonía. Ref. [54].



Figura 1.26. Fotografía del túnel Laerdal, Noruega. Ref. [55].

## Proceso Constructivo del Túnel Churubusco – Xochiaca

---

El túnel Eiksund (“*Eiksuntunnelen*”) es el túnel de carretera más profundo del mundo, con 287 m bajo el nivel del mar, empezó a construirse en 2003 y abrió en febrero de 2008, tiene una longitud de 7,765 m. Ref. [56].



Figura 1.27. Fotografía del túnel Eiksund, Noruega. Ref. [57].

De 2003 a 2016 es construido el Túnel base de San Gotardo, bajo los Alpes Lepontinos en Suiza, es el túnel ferroviario más largo y profundo del mundo con 9.2 m de diámetro, 57,090 m de longitud, y una cobertura máxima de 2,450m. Ref. [58].



Figura 1.28. Fotografía del túnel de base de San Gotardo, Suiza. Ref. [59].

“*Big Bertha*” es la máquina excavadora de túneles más grande del mundo, fabricada en 2013 por Hitachi, para la construcción del túnel de reemplazo del Viaducto de *Alaskan Way*, también conocido como el Túnel SR 99, fue bautizada así en honor a la ex alcaldesa de Seattle, Bertha Knight Landes, cuenta con un diámetro de 17.5 metros, 112.0 metros de largo y pesa 7,000 toneladas. Ref. [60].



Figura 1.29. Máquina excavadora “Big Bertha”. Ref. [61].

La compañía alemana Herrenknecht AG ha desarrollado una máquina para la construcción automatizada de lumbreras, llamada “*Vertical shaft sinking machine (VSM)*” o “*Shaft Boring Machine*”; con la que se han construido numerosas lumbreras con profundidades de hasta 160 metros. Capaz de funcionar adecuadamente en suelos blandos y duros, los muros de la lumbrera son colados en sitio o bien prefabricados, puede emplear lodos bentoníticos para ofrecer un funcionamiento impecable en casos de suelos blandos con un alto nivel freático. Ref. [62].

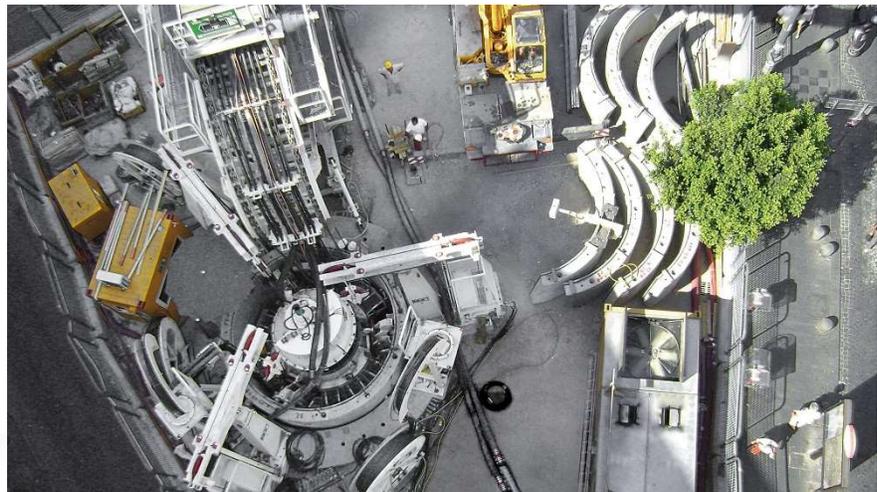
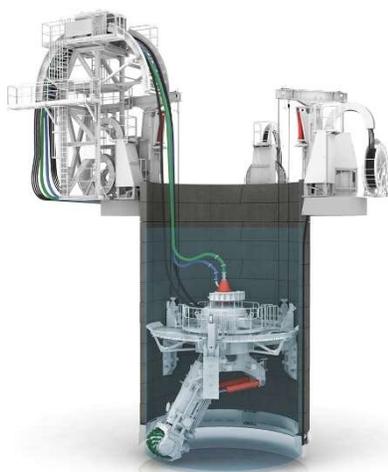


Figura 1.30. Máquina excavadora de Lumbreras “Herrenknecht”. Ref. [63].

Las mejoras en las técnicas, tecnología y procesos constructivos cada vez alcanzan un mayor grado de precisión, eficacia, así como tiempo y costo menores. Los grandes túneles que están en construcción son en su mayoría debido a la necesidad de agua como el “*Yunnan Guizhou Water Tunnel*” planeado de 660,000 m. Y para un transporte rápido a un costo menor, como los trenes de alta velocidad por levitación.

## I.1 Túneles en México

Históricamente, en el México precolombino las oquedades de la tierra se consideraban depósitos donde se conserva la energía vital de los elementos que conforman el orden natural del cosmos. Por otra parte, los asentamientos humanos que se localizaron en México tuvieron una intrínseca convivencia con el agua. Respecto a la construcción de túneles en México, su historia se remonta a la época prehispánica en la cual se construyeron túneles a finalidad de acceso a tumbas, distribución de agua, y drenaje; entre los más importantes están:

Túnel de la Pirámide de Cholula

Túnel bajo el templo de Quetzalcóatl (pirámide del sol), Teotihuacán.

Túnel de Cuauhxicalco (Tenochtitlán/CDMX)

Acueducto subterráneo bajo la tumba de Pakál (Palenque, Chiapas)

Túneles de Zona arqueológica de Toniná (Toniná, Chiapas)

Acueducto de los jardines del palacio de Nezahualcóyotl (Texcoco, Edo. Méx.)



Figura 1.31. Fotografía del túnel de la pirámide de Cholula, Puebla, Estados Unidos Mexicanos. Ref. [64].

La actual área metropolitana, está basada en una cuenca semiendorreica; los lagos que formaban parte de este sistema hidrológico eran: Zumpango, Xaltocan, Texcoco, México, Chalco y Xochimilco. Esta cuenca (9219.29 Km<sup>2</sup>) se encuentra limitada al norte por las sierras de Tezontlalpan, Tepotzotlán y Pachuca; al sur se levantan las sierras del Ajusco y de Chichinautzin; en el oriente el límite está constituido por la Sierra Nevada, sobresaliendo el Popocatepetl y el Iztaccíhuatl con 5,747 y 5,286 m de altura, respectivamente; por último, hacia el poniente se localizan las sierras de las Cruces, Monte Alto y Monte Bajo. (Valverde *et* Aguilar, 1987) y Ref. [65].

Después de la conquista española, sin una idea clara del mecanismo de llenado de las lagunas, se dejó deteriorar los diques aztecas, y en 1555 ocurrió la primera inundación grave de la ciudad colonial; ese mismo año, los ingenieros Ruy González y Francisco Gudiel, presentaron un proyecto para construir un canal que desviara el Río Cuautitlán hacia el Río Tepeji, y de allí al Río Tula. El costo de la obra (20,000 pesos de oro) hizo que la decisión se retrasara hasta 1607. (Ramírez de Alba, 2001).

## Proceso Constructivo del Túnel Churubusco – Xochiaca

---

El 28 de noviembre 1607, el proyecto de Enrico Martínez (Heinrich Martin, cosmógrafo real, cartógrafo, ingeniero, impresor, e intérprete de origen alemán 1555-1632), fue iniciado y conocido como “Canal de Huehuetoca” o “Tajo de Nochistongo” con 6,700 m de longitud y 20 m de profundidad, seguido por un túnel de 6,600 metros con 10.5 m<sup>2</sup> de área, en lo que hoy es Hidalgo, utilizando 42 lumbreras para la perforación del túnel, a un costo estimado de 304,000 pesos oro, fue terminado en mayo de 1609.

Si bien esta obra logró desviar el caudal de los ríos Cuautitlán y de la Sierra de Pachuca fuera de la Laguna de Zumpango, no logró cumplir de drenaje y desecar los lagos según las expectativas del virreinato. (Ramírez de Alba, 2001).



Figura 1.32. Túnel de Nochistongo, Hidalgo, Estados Unidos Mexicanos. Ref. [66].

El túnel fue mandado cerrar en 1626 con el pretexto de los altos costos de mantenimiento, acto que tendría graves consecuencias en septiembre de 1628 con una fuerte lluvia, que llamaron “el diluvio de San Mateo” donde se presentaron inundaciones de grandes proporciones. Para dar idea de este desastre, se transcribe un párrafo de una carta dirigida a la Corona de España por el arzobispo Manzo y Zúñiga: “*Que murieron 30,000 indios y de 20,000 familias españolas, no le habían quedado a México 400 vecinos, quedando aquella parte como un cadáver muerto*”. (Ramírez de Alba, 2001).

Simón Méndez, humilde trabajador de Michoacán, propuso en 1630, el primer sistema para el drenaje del valle, que consistía en un gran canal por el lago de Texcoco y un túnel de 13,000 m por Tequixquiac, que desembocaría en el río Salado. Se llegó a trabajar en cuatro de las 28 lumbreras del proyecto, pero se abandonó por falta de recursos. (Ramírez de Alba, 2001).

Hasta 1650 se decidió trabajar en Huehuetoca, transformando el túnel de Enrico Martínez en tajo abierto; siendo en 1774 que el matemático, escritor, astrólogo, minero y jurisconsulto, Joaquín Velázquez de León, perfeccionó el proyecto de Simón Méndez, y en 1788 se inauguró el Tajo de Nochistongo. La obra de 16,000 m de longitud y profundidad máxima de 80 metros es ahora el Túnel Interceptor del Poniente. (Ramírez de Alba, 2001).



Figura 1.33. Túnel de Huehuetoca visitado por el superintendente Real del Desagüe, Domingo de Trespacios y Escandón, hacia 1760. Ref. [67]

Francisco de Garay presentó en 1856 el primer proyecto global que comprendía el gran canal de desagüe, el tajo de Zumpango, el túnel y el tajo de Tequisquiatic, además se harían tres canales secundarios, el del Sur, el de Oriente y el de Occidente; pero acontecimientos políticos y militares impidieron la realización de este proyecto.

Se inició en 1865 el gran canal del desagüe con 47,000 m de longitud, empezando en Lecumberri, construido con su plantilla a cinco metros abajo del nivel medio de la Ciudad, para conducir sus aguas por gravedad. Bajo el imperio de Maximiliano, en 1867, fue que las obras de Tequisquiatic se reanudaron bajo el mando del ingeniero Miguel Iglesias, y se llegaron a perforar 700 m en las 24 lumbreras proyectadas a intervalos de 400 metros.

El segundo gobierno de Juárez decidió continuar las obras, y logró construir 3,000 m de longitud, y profundizar algunas lumbreras; sin embargo, el costo de las obras y las dificultades que causó el agua freática, no permitieron avances significativos. No fue hasta 1877 que el ingeniero Luis Espinosa mejoró el proyecto, tecnificando el diseño y la construcción. (Ramírez de Alba, 2001).

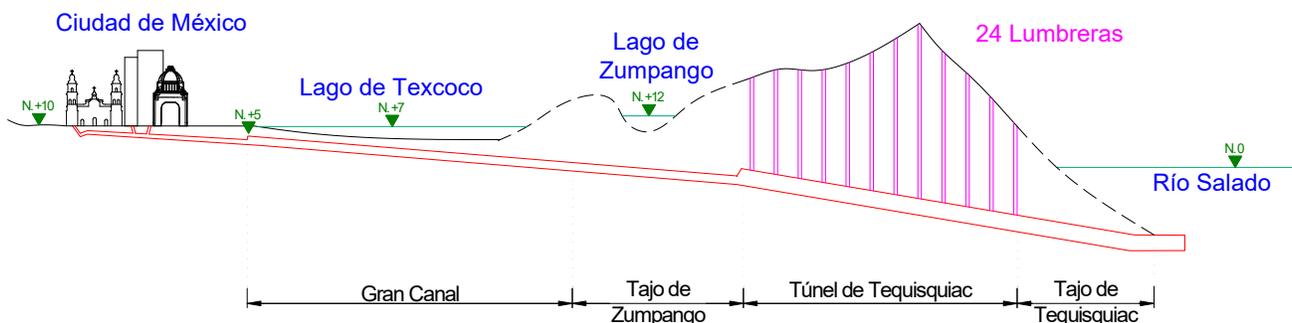


Figura 1.34. Proyecto para el drenaje de la ciudad de México, según la propuesta del ingeniero Luis Espinosa. [Elaboración propia basada en Ramírez de Alba, 1995].

## Proceso Constructivo del Túnel Churubusco – Xochiaca

En 1889 se decidió concesionar la obra a “*Mexican Prospecting and Finance Co., Ltd.*” y participaron empresas como “*Read & Campbell*”, “*Bucyrus Construction Co.*”, y “*S. Pearson & Son*”, que continuaron la obra del túnel de Tequixquiac; a pesar de la maquinaria más moderna que importaron, no pudieron concluir, y antes de dos años se declararon en quiebra. Un párrafo del informe de obra permite conocer las causas de ese fracaso: “*Estas conclusiones adversas reconocen todas el mismo origen: el agua. El agua que ha hecho y hace necesario un bombeo general e incesante; el agua que en la región de Zumpango hace hoy insuficientes las poderosas instalaciones nuevas; el agua, por último, que no permite hacer un cálculo acertado del costo de la obra en lo porvenir*”. (Junta Directiva del Desagüe del Valle de México, 1902).

Hasta febrero de 1892, la obra se reanuda encargándose nuevamente al ingeniero Luis Espinosa, quien, en lugar de pretender desaguar totalmente los tramos del túnel para seguir avanzando, construyó galerías provisionales para drenar hacia sitios estratégicos; mientras las bombas hacían su trabajo, se podía seguir trabajando en varios frentes del túnel. Otro acierto importante fue el de la construcción de un horno de cal y otro de ladrillos (tabiques), materiales que se usaron para el junteo y la construcción de la bóveda, si no se hubiesen hecho la hubieran encarecido considerablemente. (Ramírez de Alba, 1995).



Figura 1.35. Horno Continuo de Cal y Horno de tabiques para el Túnel de Tequixquiac. Ref. [68] y Ref. [69].

El revestimiento de la cubeta del túnel fue hecho con dovelas de concreto utilizando moldes metálicos con la curvatura de la sección del túnel y se apisonó el material a mano, dentro de los moldes; siendo este de los primeros usos del concreto en México. (Ramírez de Alba, 1995).

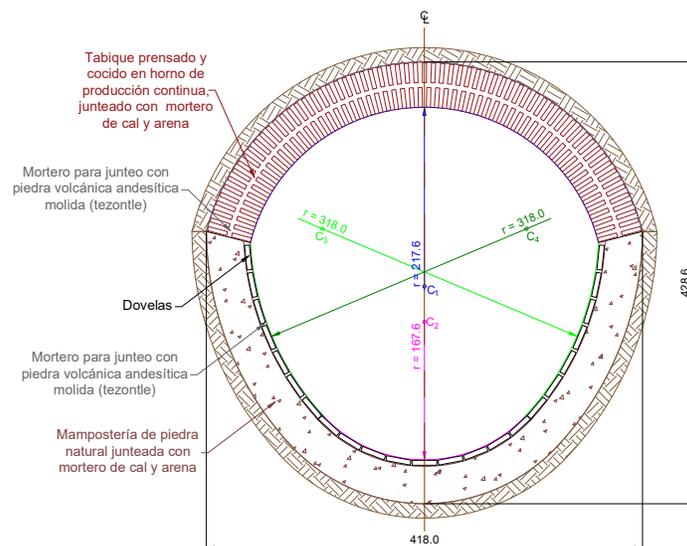


Figura 1.36. Sección transversal de túnel de Tequixquiac. [Elaboración propia basada en Ramírez de Alba, 1995].



Figura 1.37. Fotografía Gran Canal del Desagüe y Túnel de Tequixquiac. Ref. [70].

Y en diciembre de 1894 la obra se dio por concluida, con 10,021.79 metros de longitud; pero inaugurada el 17 de marzo de 1900 por el general Porfirio Díaz. (Ramírez de Alba, 1995).

La construcción del primer túnel en San Luis Potosí, el llamado Ogarrío, data del año 1902; inicialmente fue una mina, conforme se explotó se implementó el paso de un tranvía y tiempo después como paso vehicular, bajo las condiciones de los autos de aquella época. (SCT, 2016).

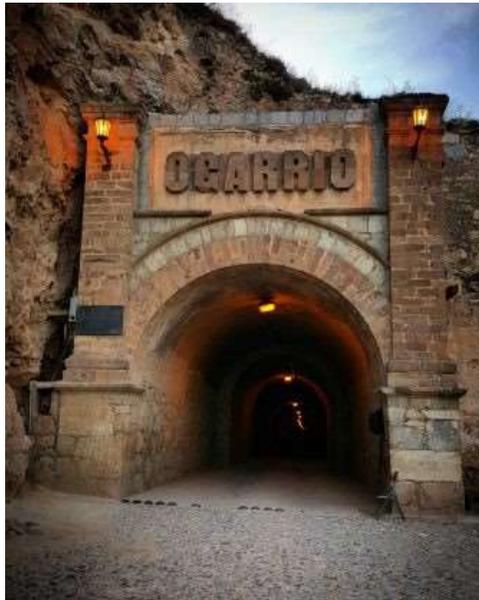


Figura 1.38. Túnel Ogarrío, San Luis Potosí, Estados Unidos Mexicanos. Ref. [71].

## Proceso Constructivo del Túnel Churubusco – Xochiaca

Se inició el segundo túnel de Tequixquiac en 1934, y concluyó en 1954. (Espinosa-Castillo, 2008).

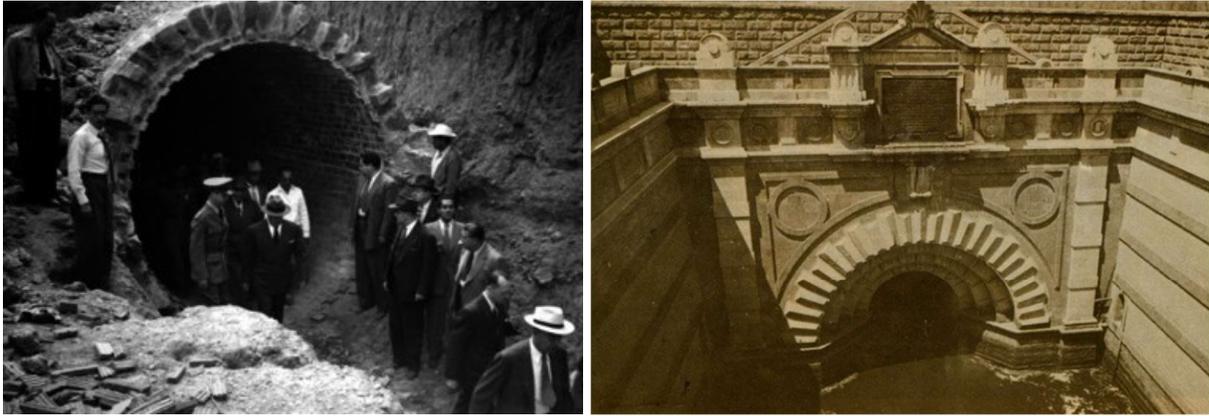


Figura 1.39. Segundo túnel de Tequixquiac (Gran canal del desagüe), Tequixquiac, Edo. de México, Estados Unidos Mexicanos. Ref. [72], y Ref. [73].

La explicación científica del fenómeno del hundimiento, debida a la consolidación del estrato arcilloso superior del subsuelo, producida por la pérdida de la presión de poro causada por la extracción excesiva de agua mediante pozos, la dio en 1947, el doctor Nabor Carrillo. La empresa Ingenieros Civiles Asociados (ICA) apoyó con los estudios geotécnicos de las obras que construía en la ciudad; los ingenieros Raúl J. Marsal y Marcos Mazarí montaron el Laboratorio ICA, y de 1947 a 1952 realizaron sondeos, pruebas de laboratorio, instalaron estaciones piezométricas y midieron los asentamientos de edificios singulares. Con esa información elaboraron el Plano de la Zonificación Geotécnica de la Ciudad de México, que con ligeras modificaciones sigue siendo una referencia actual de la estratigrafía de la Ciudad de México; difundieron los resultados de sus investigaciones en los "Cuadernos ICA". (Robledo, 2007).

Destaca también el túnel de desvío de la Central Hidroeléctrica Adolfo López Mateos, también conocida como El Infiernillo, construida por ICA de 1961 a 1963 y puesta en operación en 1964. (CFE, 2014).

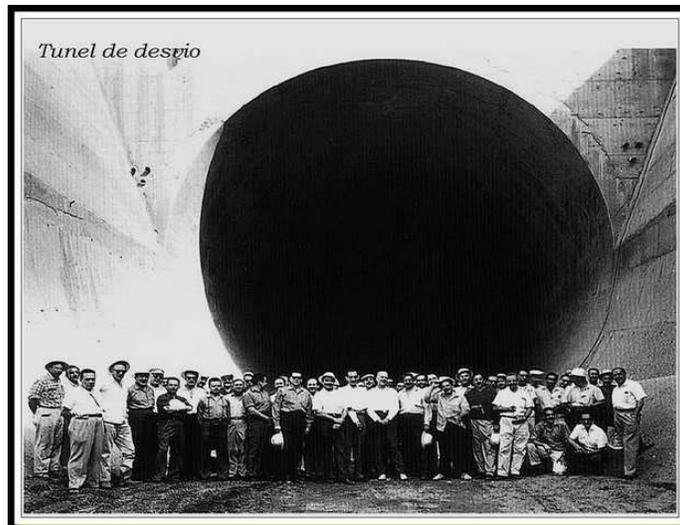


Figura 1.40. Túnel de desvío, C.H. Infiernillo, entre los límites de los municipios de Arteaga, La Huacana y Churumuco del estado de Michoacán y el municipio de Coahuayutla del estado de Guerrero, Estados Unidos Mexicanos. Ref. [74].

## Proceso Constructivo del Túnel Churubusco – Xochiaca

Inicia la construcción del túnel emisor poniente en 1961 con concreto reforzado de 0.50 metros de espesor a fin de evitar la sobrecarga del Gran Canal; cuenta con una longitud de 47,400 metros, y una capacidad de 80 m<sup>3</sup>/s. (José Muñoz, 2016).

Las primeras pruebas de estabilización con lodos se iniciaron en 1966, al año siguiente ICA realizó los primeros muros en la línea 1 del Metro de CDMX. (Manual de Diseño Geotécnico para el Metro, 1987).

En abril de 1967 se aprobó el proyecto del Sistema de Drenaje Profundo llamada “obra oculta”, la cual trabajaría por gravedad a grandes profundidades para no tener problemas de hundimiento e inundaciones, descarga en el Río del Salto; ampliando el gran canal, e instalando 29 plantas de bombeo. (Valek, 2000).

Los ingenieros mexicanos Jorge Cravioto y Abel Villareal desarrollaron una técnica especial de construcción de lumbreras que se denominó Método de Flotación, en 1969; el objetivo fue mitigar el riesgo de falla tanto por extrusión en las juntas constructivas como de fondo por subpresión. Las dimensiones máximas han sido de 19m en diámetro y 35m en profundidad. (Auvinet *et alii*, 2006).

En 1970, durante la construcción del Túnel Interceptor Oriente, al usarse un escudo de frente presurizado, ocurrió una falla asociada a la extrusión de la arcilla a través de las juntas de las dovelas. El diámetro del túnel es de 6.20m y el revestimiento primario consta de dovelas con un espesor de 0.25cm y un ancho de 0.75m. (Moreno y Schmitter, 1981).

Los primeros túneles para el Sistema de Transporte Colectivo Metropolitano (STCM) “metro” fueron construidos en el tramo comprendido entre las estaciones Juanacatlán-Observatorio; con una longitud de 1,138 m, y un el diámetro exterior de 9.15m y dovelas de 0.25m de espesor.

Entró en operación el 4 de septiembre de 1972. (Zaldívar, 2013).



Figura 1.41. Imagen de propaganda de la Línea 1 de STCM. Ref. [75].

## Proceso Constructivo del Túnel Churubusco – Xochiaca

Debido a las características del subsuelo en la zona suroriente de la ciudad obligarían a emplear presiones de aire mayores a  $1.30 \text{ kg/cm}^2$ , y se hubiera tenido como consecuencia: jornadas de trabajo de 4.0 horas por turno, altos riesgos de salud, bajos rendimientos y, por ende, altos costos; el DDF adquirió y utilizó dos "escudos de frente cerrado y lodo a presión" para la construcción del drenaje profundo en arcillas blandas de zona lacustre del valle de México. (DGdCyOH-1991).

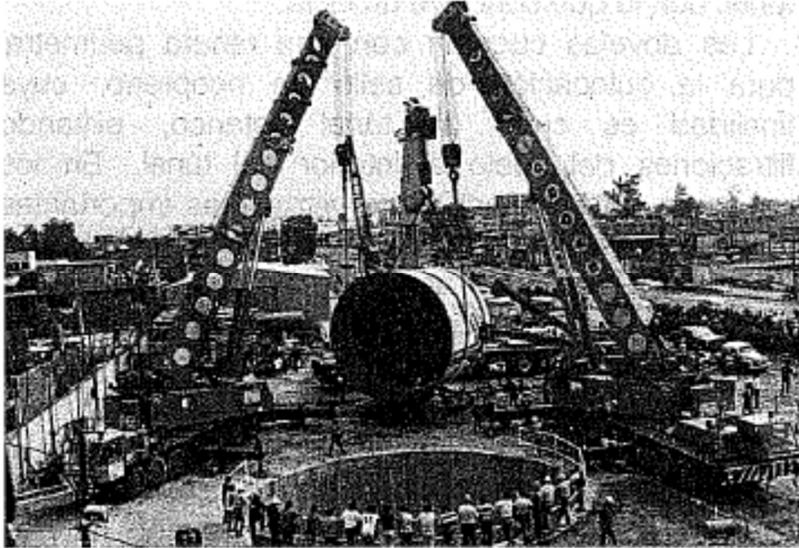


Figura 1.42. Maniobras para la bajada del escudo de frente cerrado y lodo a presión al fondo de lumbrera. Ref. [76].

Es inaugurado el 9 de junio de 1975 el túnel emisor central, con un diámetro interior de 6.50 m, y 49,721.32 metros de longitud, corriendo de 50 y hasta 227 metros de profundidad, conformado por 19 lumbreras; y al cual llegan interceptores (Poniente, Centro-Poniente, Central, Oriente, Centro-Oriente, Oriente-Sur, Oriente-Oriente, Iztapalapa, Obrero Mundial, Canal Nacional-Canal de Chalco, Ermita, y Gran Canal), formando así dicho drenaje profundo con una longitud total de 166,800 m en la actualidad. (Secretaría de Obras y Servicios - DDF, 1975).



Figura 1.43. Túnel Emisor Central. Ref. [77].

## Proceso Constructivo del Túnel Churubusco – Xochiaca

Al final de 1979 se construyó el túnel carretero Muñiz con 600 m de longitud, para el acceso a la central hidroeléctrica de Chicoasén, y, que a través de éste se realizaba el suministro de material arcilloso desde el banco de préstamo hasta donde se estaba levantando la cortina. (Suárez Fino et Guzmán, 2016).



Figura 1.44. Túnel de acceso a C.H. Chicoasén, Chiapas, Estados Unidos Mexicanos. Ref. [78].

A principios de los ochenta las obras de túneles estuvieron ligadas a la construcción de modernas autopistas, que requirieron especificaciones rigurosas; como es el caso del túnel Acopilco. (SCT, 2016).



Figura 1.45. Túneles Acopilco (Portal Oriente), Edo. de México, Estados Unidos Mexicanos. Ref. [79].

Para 1983, la construcción de la Línea 3 del STCM aprovechó los suelos firmes limo-arenosos muy compactos y se empleó el método convencional para su construcción desde la estación Viveros hasta Ciudad Universitaria. En el tramo de la estación Viveros a la estación Miguel Ángel de Quevedo se excavaron dos túneles de sección circular de 6.5m de diámetro exterior cada uno. (Zaldívar, 2013).



Figura 1.46. Túnel de la estación Miguel Ángel de Quevedo de la línea 3 del STCM. Ref. [80].

A finales de 1988, se concluye la construcción de la línea 7 del STCM, y consta de 19 km lineales de construcción de túneles. La excavación se llevó a cabo en la zona de transición de la ciudad de México. En ciertos puntos del trazo se tuvo que hacer frente a considerables filtraciones de agua durante la construcción.

En el tramo norte (tramo Tacuba-Rosario) la excavación se efectuó mediante dos escudos de frente abierto. El diámetro de cada escudo fue de 9.20m y se empujaba mediante 31 gatos cuya carrera máxima era de 1.35m. El escudo colocaba un anillo primario compuesto por siete dovelas de 0.40m de espesor.

En el tramo sur de la Línea 7 todos los túneles se excavaron con sección herradura por medio de máquinas rozadoras. (Zaldívar, 2013).



Figura 1.47. Túnel de la estación Barranca del Muerto de la línea 7 del STCM. Ref. [81].



Figura 1.48. Túnel de la estación Aquiles Serdán de la línea 7 del STCM. Ref. [82].

En los años 90 para la autopista del Sol, se realiza el túnel Los Querendes, con 100 m de longitud, el motivo de su concepción fue que se descubrió un sitio arqueológico de aproximadamente 35 hectáreas de extensión; hecho que obligó la construcción del túnel por debajo del hallazgo, a fin de no modificar la trayectoria en recta de proyecto. (AMITOS, 2013).

## Proceso Constructivo del Túnel Churubusco – Xochiaca



Figura 1.49. Túnel Los Querendes (Portal Sur), Guerrero, Estados Unidos Mexicanos. Ref. [83].

Posteriormente, en 1994 se inició la construcción del llamado Maxitúnel de Acapulco, cuenta con casi 3,000 m de longitud, 9.60 m de altura y 13.60 m de ancho; reduciendo considerablemente el tiempo de viaje de Acapulco a la Ciudad de México. (INGENET, 2009).



Figura 1.50. Maxitúnel (Portal Oriente), Guerrero, Estados Unidos Mexicanos. Ref. [84].

La Autopista Durango-Mazatlán, ubicada en la Sierra Madre Occidental, de Matamoros a Mazatlán, constituida por 60 túneles carreteros, inició la construcción el 31 de enero del 2002 y fue inaugurada el 17 de octubre de 2013. La longitud acumulada que cubren los túneles es de 26,400 m, destacando “El Sinaloense” de 2,799 m de longitud y el túnel Baluarte de 575 m; un aspecto importante es que cuenta con sistemas inteligentes de transporte “SIT”. (Suárez Fino, 2013).



Figura 1.51. Túnel “El Sinaloense”, Sinaloa, Estados Unidos Mexicanos. [Cortesía: Ing. José T. Vega Morales]



Figura 1.52. Túnel Baluarte, Sinaloa, Estados Unidos Mexicanos. Ref. [85]

## Proceso Constructivo del Túnel Churubusco – Xochiaca

---

Posteriormente, de 2004 a Julio de 2007, se construyó el Túnel Interceptor Río de los Remedios con 6 lumbreras a lo largo de 10,050 metros de longitud y 5.0 m de diámetro interior, con conexión a la planta de bombeo “Casa Colorada”. [Ref. 86].



Figura 1.53. Túnel Interceptor Río de los remedios, Estado de México. [Cortesía: CONiISA].

El túnel sumergido Coatzacoalcos-Villa de Allende iniciado en 2004, corre a 30 metros por debajo del río Coatzacoalcos; Tiene una longitud de 1,640 metros y cuatro carriles vehiculares, dos por cada sentido. Se inauguró formalmente el 27 de abril de 2017. Ref. [87].



Figura 1.54. Túnel Sumergido Coatzacoalcos-Villa de Allende, Veracruz, Estados Unidos Mexicanos. Ref. [88].

Para abril de 2006 inicia la construcción del Túnel Río de la Compañía de 5 metros de diámetro, 6,714 metros de largo, cinco lumbreras de 12 metros de diámetro y una lumbrera de captación de 5 metros de diámetro, con una capacidad de desalojo de hasta 40 m<sup>3</sup>/s corre de 25 a poco más de 35 metros de profundidad en la lumbrera 4, finalizándose en 2008. (CONAGUA, 2015).



Figura 1.55. Túnel Interceptor Río de la Compañía, Edo. de México, Estados Unidos Mexicanos. [Cortesía: SUCOCO].

El Túnel Emisor Oriente (TEO), cuyas obras iniciaron el 13 de agosto de 2008. Abarca 62,400 metros de longitud con 7.50 metros de diámetro interior y 8.4 m de diámetro exterior, desde el Valle de México (Lumbrera 2 TIRR) hasta la planta de aguas residuales Atotonilco en Tula, Hidalgo; posee 19 lumbreras de 12.0 metros y 5 lumbreras de 17.0 metros de diámetro, y sus profundidades van de 23.3 hasta los 150.0 metros. Terminado en agosto de 2019 con una capacidad de hasta 150 m<sup>3</sup>/s, es el túnel de aguas residuales más grande del mundo. (ICA, 2019).



Figura 1.56. Túnel Emisor Oriente (TEO), CDMX, Estados Unidos Mexicanos. [Cortesía: ICA]

Hacia agosto de 2010 se construyó la Supervía Poniente que une la zona de Santa Fe con el Anillo Periférico a la altura de su cruce con Av. Luis Cabrera por medio de diversos túneles, puentes y vías rápidas; es una obra vial de cuota en la Ciudad de México. Ref. [89].

## Proceso Constructivo del Túnel Churubusco – Xochiaca



Figura 1.57. Túneles de Supervía Poniente, CDMX, Estados Unidos Mexicanos. Ref. [90].

En el 2012 entró en operación la Línea 12 de la ciudad de México, la cual es la primera línea del STCM en donde se ha empleado un escudo de tierras balanceadas (EPB) para excavar un túnel en las arcillas blandas. El diámetro del escudo fue de 10.2m y el empuje para el avance del escudo se realizó mediante 28 gatos hidráulicos. Se muestra el escudo empleado en la construcción del tramo de la Línea 12 que se encuentra entre el Cad. 20+300 al Cad. 27+800. (Zaldívar, 2013).



Figura 1.58. Túnel de la línea 12 del STCM. [Cortesía ICA, Ing. Sergio F. Zaldívar Reyes]

A principios del 2014 se comienza a construir el Túnel Emisor Poniente II con de 5,573.86 metros de longitud, va de Atizapán a Cuautitlán Izcalli y cuenta con una sección 7.20 metros de diámetro interior, una capacidad de 112 m<sup>3</sup>/s corriendo de 12 a 120 metros de profundidad; se terminó en 2019. Ref. [91].



Figura 1.59. Túnel Emisor Poniente II, CDMX, Estados Unidos Mexicanos. Ref. [92].

Para agosto de 2014 es iniciada la construcción del propio Túnel Churubusco-Xochiaca, con una sección circular de 6.30 m de diámetro exterior y 5.0 m de diámetro interior, y una pendiente de 0.08%; cuenta con 7 lumbreras de 12.0 m de diámetro y profundidades desde 16.0 hasta 24.0 m. (ICA, 2019). Concluyéndose la excavación del túnel el 28 de mayo del 2020, con una longitud total de 13,341.967 metros. Destacando que se logró un récord de más metros excavados en 24 horas logrando 42 metros.



Figura 1.60. Túnel Churubusco Xochiaca, Nezahualcóyotl, Estado de México, Estados Unidos Mexicanos.  
[Cortesía ICA, Ing. Eduardo Zaragoza]

## Proceso Constructivo del Túnel Churubusco – Xochiaca

Ubicado en el municipio de Chalco-Solidaridad, Estado de México, se construyó de marzo del 2014 a octubre de 2018, el Túnel Canal General con 7,850 metros de longitud y 5.0 m de diámetro interior; inicia a la altura de la carretera Tláhuac-Chalco y se incorpora a la Lumbreira 3A del Túnel Río de La Compañía, con cuatro lumbreras de 12 metros de diámetro y una profundidad media de 18.17 metros. (ICA, 2019).



Figura 1.61. Túnel Canal General, Chalco, Estado de México, Estados Unidos Mexicanos. [Cortesía: SUCOCO].

Para el paso del Tren Interurbano México-Toluca se realizaron 2 túneles, uno de 4,719 m y otro de 4,740 m, para evitar la zona del monte de las cruces y el parque nacional “Desierto de los leones”, inician su recorrido en el Portal Poniente (Km 36+150) y emergen a la altura del parque nacional “Insurgente Miguel Hidalgo” mejor conocido como “La Marquesa” en el Portal Oriente; son conocidos también como el “Túnel bitubo”/“Bitúnel” La marquesa. Fueron iniciados en junio de 2015 y terminados en junio de 2018. (SCT, 2019).

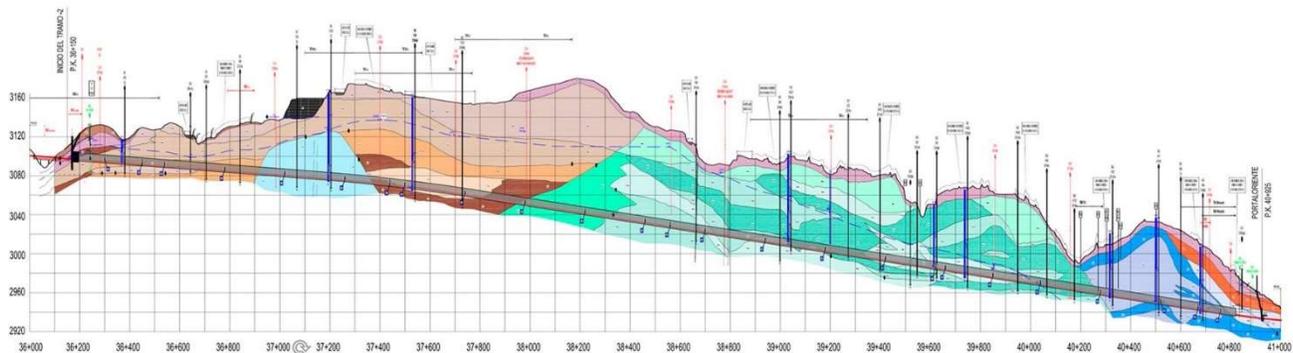


Figura 1.62. Corte transversal de Bitúnel del tren Interurbano México-Toluca, Estado de México. Ref. [93].



Figura 1.63. Plataforma del Portal Poniente del tren interurbano México-Toluca, Estado de México. Ref. [94].

## I.2 Clasificación de túneles

El propósito de la clasificación de túneles es considerar y/o seleccionar criterios en relación con sus propias circunstancias, características, condiciones particulares, y objetivo, para su correcto diseño y selección de procesos constructivos.

Los principales criterios de clasificación son: General, con base en su aplicación u objetivo, por su ubicación, de acuerdo con su geometría, y, en función de su método constructivo.

El primer orden o división general de túneles, es a partir de si son realmente excavados o cubiertos después de su construcción. Se ilustra lo descrito con anterioridad a continuación:

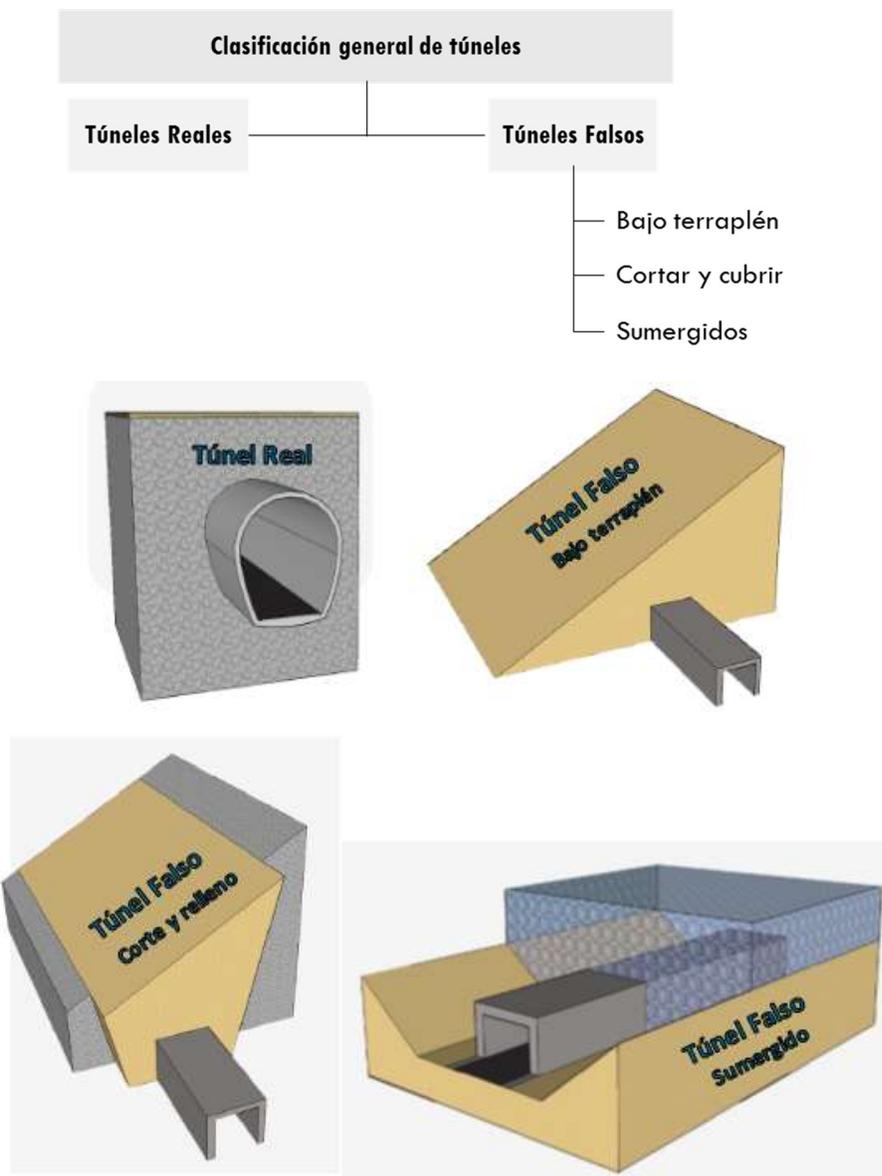


Figura 1.64. Clasificación general de túneles. Ref. [95].

### Clasificación de acuerdo con su aplicación/objetivo

- Túneles para minas
- Túneles para ferrocarril
- Túneles para carretera
- Túneles para transporte urbano subterráneo (Metro)
- Túneles para conducción de agua
- Túneles para centrales hidroeléctricas
- Túneles para sistemas de alcantarillado
- Túneles para cableado y servicios
- Túneles para instalaciones especiales (investigaciones, estacionamientos, depuradoras de aguas residuales, almacenes, y para protección de ataques nucleares)

(Soto, 2004)

### Clasificación de acuerdo con su ubicación

Se clasifica con base al tipo de suelo a excavar; se pueden clasificar de la siguiente manera:

- a) Túneles en suelo blando (arcillas y limos)
- b) Túneles en suelos friccionantes [Dureza media] (arenas, tobas, gravas, boleos, etc.)
- c) Túneles en suelo firme/duro (roca)
- d) Túneles en suelo mixto

Una subclasificación de acuerdo con su ubicación es debido a las dificultades naturales que hay que proteger o librar, como son: montañas, ríos, pantanos, mares, diferentes tipos de subsuelo, edificios y otras estructuras.

- a) Túneles de montaña
- b) Túneles subacuáticos
- c) Túneles urbanos

Dependiendo de la profundidad, denominada cobertura o techo, los túneles también se subclasifican en:

- a) Subsuperficiales. Si la cobertura no supera 5 m.
- b) Poco profundos. Si la profundidad se encuentra entre 5 y 50 m.
- c) Medianamente profundos. Cuando la cobertura está entre 50 y 500m.
- d) Profundos. Construidos con coberturas de 500 a 2000 m.
- e) Muy Profundos. Cuando las profundidades de construcción superan 2000 m.



Figura 1.65. Cobertura o techo de Túnel San Pedro-Loma larga. Ref. [96].

### Clasificación de acuerdo con su geometría

Las principales formas de la sección transversal son: Circular, Herradura, Bóveda, Rectangular, y de geometría mixta o compuesta

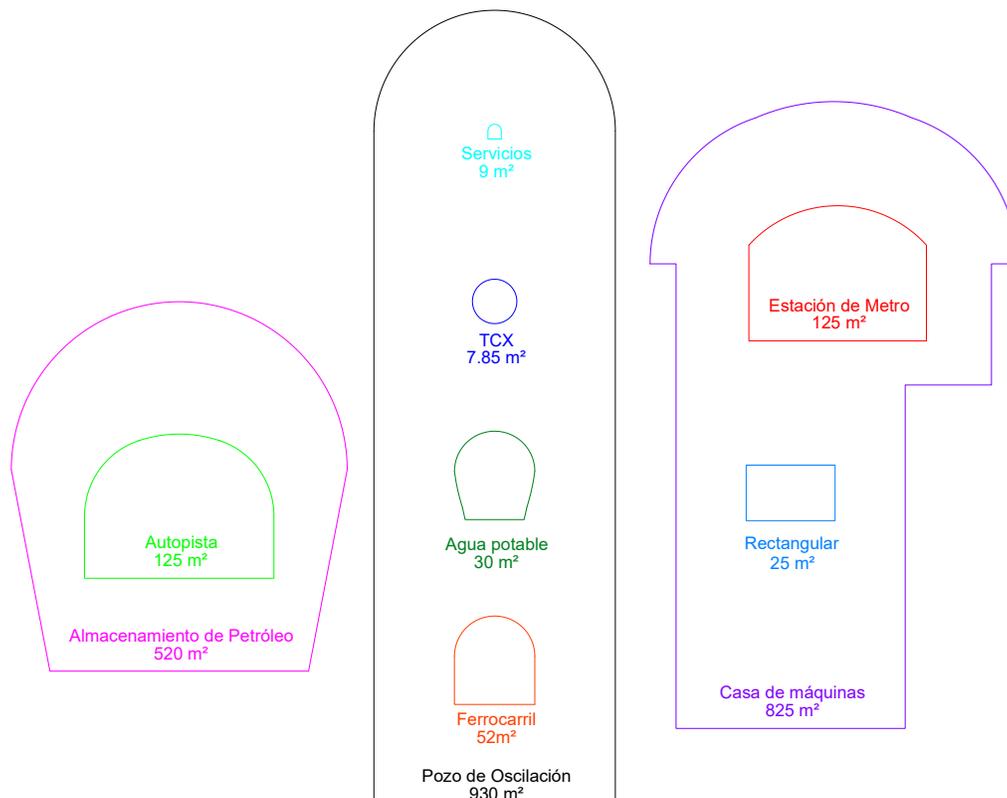


Figura 1.66. Secciones transversales comunes de túneles. [Elaboración propia basada en Hernández Soto, 1998]

## Proceso Constructivo del Túnel Churubusco – Xochiaca

En la sección transversal de un túnel se distinguen los siguientes elementos geométricos:

Hastiales. - Son la parte lateral de la sección. También se les denomina paredes.

Clave. - Es la parte superior de la sección. También se le denomina bóveda.

Cubeta. - Es la parte inferior de la sección. También se le denomina piso o solera.

También pueden tener zapatas o apoyos anchos.

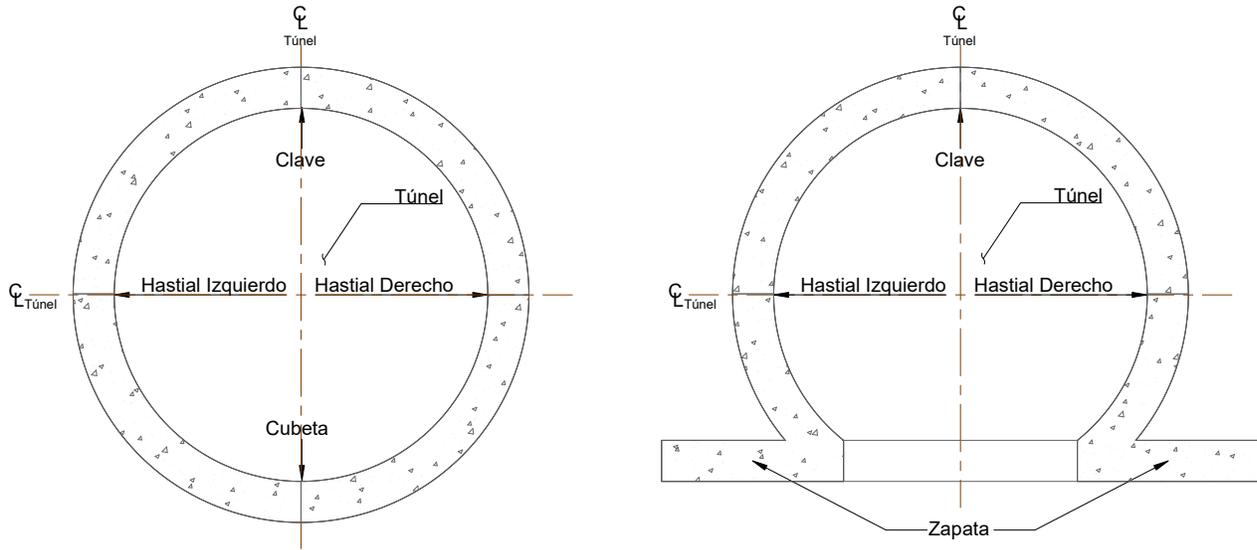


Figura 1.67. Elementos geométricos típicos de túneles. [Elaboración propia basada en Pérez Álvarez, 2016]

En relación con su longitud, los túneles pueden clasificarse como:

- Cortos. Si la longitud no supera 400 m.
- Medianos. Cuando la longitud se encuentra en el rango de 400 a 2,000 m.
- Largos. Cuando la longitud tiene supera 2,000 m.

Clasificación por su método de excavación

Esta clasificación se subdivide en 3 (Convencional, mecanizada y con explosivos):

1. Métodos convencionales o secuenciales.
  - a. Avance y destroza
  - b. Sección plena

Se considera al tuneleo falso como parte de los métodos convencionales de excavación.

Se ilustran algunos métodos convencionales de excavación de avance y destroza a continuación:

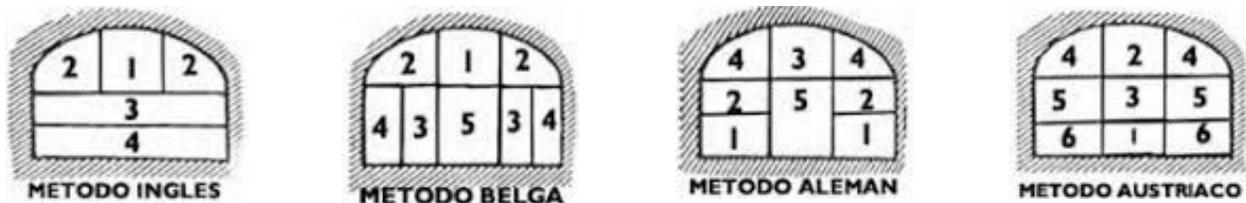


Figura 1.68. Sección transversal de métodos convencionales de excavación de avance y destroza. Ref. [97].

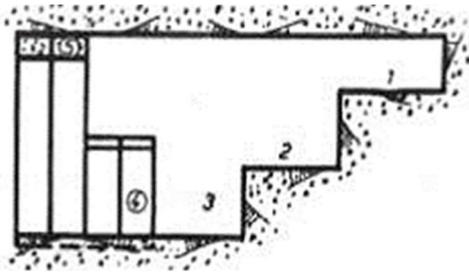


Figura 1.69. Vista en corte de método inglés de excavación de avance y destroza. Ref. [98].

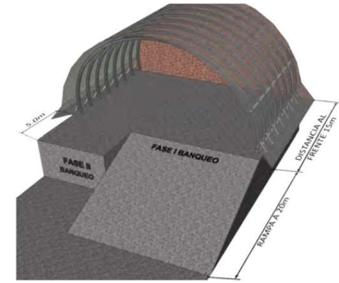


Figura 1.70. Ejemplo de excavación, media sección superior en una fase y banco en fases. Ref. [99].

### 2. Excavación mecanizada

#### a. Sección completa

- i. Topos, Escudos, Hidroescudos, Escudo de lodos de frente presurizado, Escudo dobles, y Empuje de tubos o Hincado de Tubería (*"pipe jacking"*).

#### b. Ataque puntual

- i. Rozadoras y excavadoras neumáticas.



Figura 1.71. Equipos de excavación mecanizada a sección completa (Topo, escudo y empuje de tubos).

Ref. [100], [101] y [102].

Las máquinas integrales para la excavación de túneles se conocen habitualmente por las siglas en inglés T.B.M. (*Tunnel Boring Machines*), sus partes fundamentales son: la cabeza, los cilindros de empuje, el back-up, y el sistema de guiado; son capaces de excavar un túnel a sección completa, y algunas a la vez colaboran con la colocación de sostenimiento o revestimiento.

Todos los datos y mandos requeridos para el funcionamiento de las tuneladoras se encuentran en la cabina de mando. La velocidad de avance, la velocidad de la rueda de corte y la velocidad del tornillo sinfín pueden especificarse desde la cabina de mando.

La dirección de avance también se controla desde la cabina de mando, mediante la regulación de la presión de los grupos de cilindros de propulsión se puede conducir el escudo conforme a las direcciones emitidas por el sistema de mando.

Las tuneladoras constan de una cabeza giratoria, dotada de cortadores, accionada mediante motores y que avanza mediante empuje de unos gatos que reaccionan sobre los *"grippers"* (que están fijados contra la pared del túnel) o sobre las dovelas. (Carrasco, Ortiz et Ruiz, 2003).

## Proceso Constructivo del Túnel Churubusco – Xochiaca

La rueda de corte es la parte móvil que realiza la excavación en la roca; está dotada de cortadores, estos cortadores son de mayor diámetro cuanto mayor sea la dureza de la roca, con resistencia en el entorno hasta los 2,500 Kg/cm<sup>2</sup>. (Carrasco, Ortiz et Ruiz, 2003).



Figura 1.72. Rueda de corte y desmontaje de la rueda de corte de la TBM S-948(TIMT) Ref. [103].

El proceso de corte mecánico se produce inicialmente por rotura frontal originado por la presión que el cortador ejerce sobre el terreno, y posteriormente, en el resto de la sección, la rotura entre los círculos concéntricos anteriormente aludidos se produce por indentación, formando un escombro lajoso típico de este tipo de máquinas. (Carrasco, Ortiz et Ruiz, 2003).

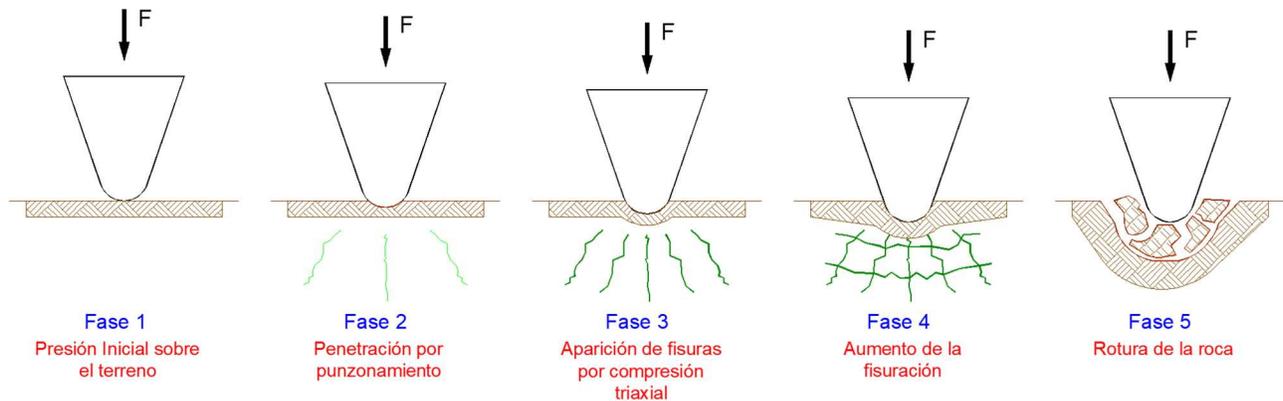


Figura 1.73. Fases de rotura frontal por cortadores. [Elaboración propia basada en Jimeno *et alii*, 1998].

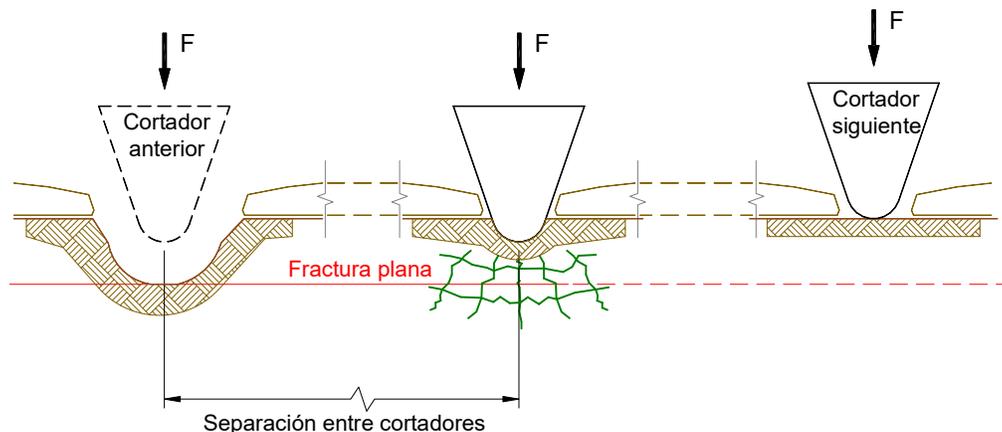


Figura 1.74. Rotura por Indentación entre cortadores. [Elaboración propia basada en Jimeno *et alii*, 1998].

Las herramientas de corte o picas son las encargadas de efectuar la rotura y/o desgarramiento de la roca, al aplicar en un punto de esta la energía desarrollada por la máquina. Las picas están compuestas por un vástago o mango de acero, con formas diferentes según los tipos, que es la parte que se introduce en el bloque portapicas, y por la punta, en el extremo opuesto, que es el elemento de metal duro que va a estar en contacto con la roca.

Existen dos clases:

- Picas radiales se utilizan casi exclusivamente en el arranque de rocas blandas, y se caracterizan por tener un filo de corte constituido por una pastilla de carburo de tungsteno.
- Picas tangenciales tienen una forma cónica, y están especialmente diseñadas para soportar la fricción con la roca, de ahí que también se denominen picas lapicero o autoafilantes.

La elección del tipo de pica depende de la dureza y abrasividad de la roca, así como de la potencia de la cabeza de corte.

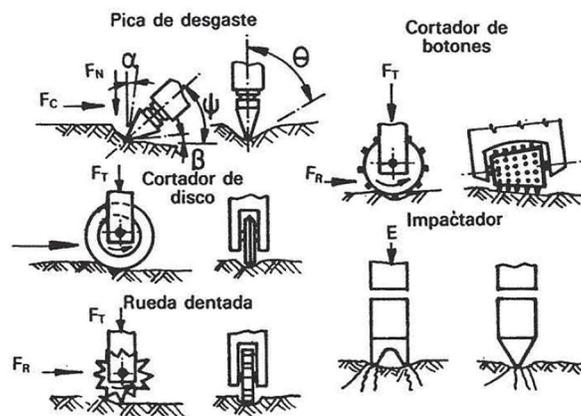


Figura 1.75. Tipos de cortadores. (Serra et Gómez, 2003).

Para los “topos” los “grippers” son normalmente 2 o 4, y proporcionan a la máquina el empuje necesario contra el frente para realizar la excavación. Su recorrido, comprendido entre 1.50 y 2.00 m, marca la longitud de cada ciclo de avance, ya que una vez agotada su carrera es necesario soltar los “grippers” y retraer los cilindros de empuje para conseguir el avance de la parte fija de la máquina. (Carrasco, et alii, 2003).

La función de las zapatas es fijar la máquina, permitiendo el avance de la cabeza de corte, en su diseño deberá considerarse una superficie que resulte mayor cuanto menor sea la resistencia del terreno. Por lo general su anchura no suele sobrepasar los 0.70 m, con objeto de permitir su apoyo entre cerchas. (Carrasco et alii, 2003).

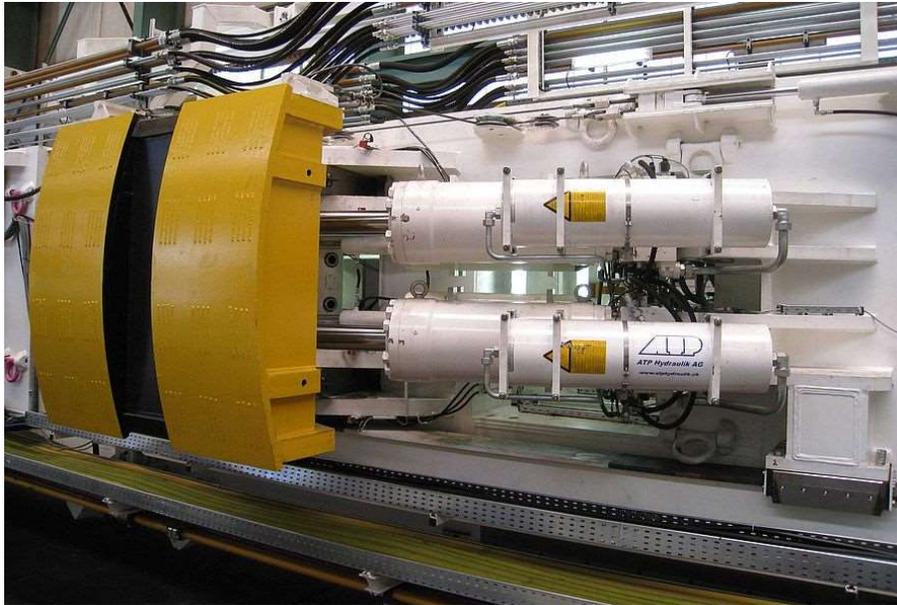


Figura 1.76. Cilindros de empuje y Zapata o “gripper” de TBM. Ref. [104].

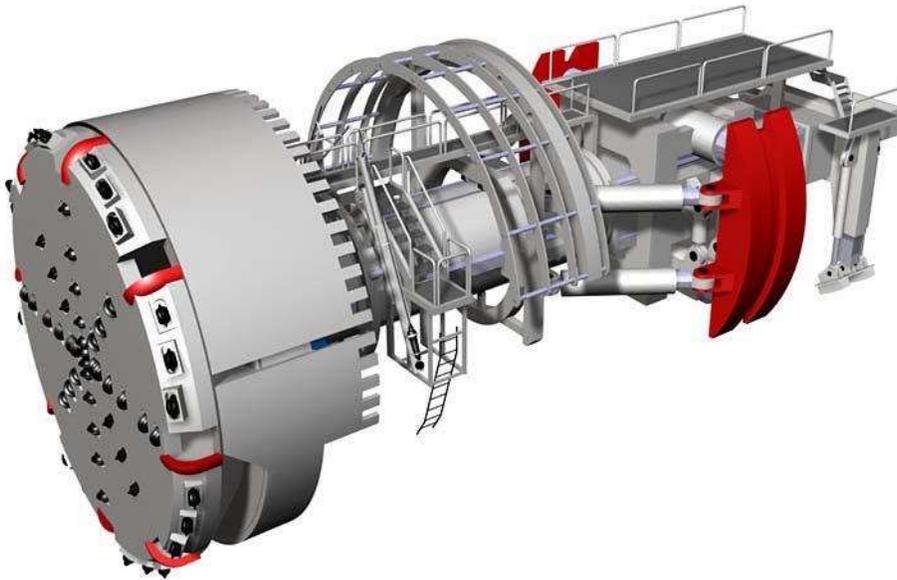


Figura 1.77. Vista en perspectiva de tunelador “topo”. Ref. [105].

Se denomina “*back-up*” al conjunto de plataformas posteriores que arrastra la TBM simultáneamente a su avance; normalmente incorpora los transformadores, casetes de cable y ventilación, depósitos para el mortero de inyección, y el sistema de evacuación de escombros o sistema de rezaga que normalmente está formado por una cinta de transporte, o bien, por bombeo, captadores de polvo, polipastos (para manejo de vía y dovelas), el sistema de aire neumático y el sistema de agua. (Carrasco *et alii*, 2003).

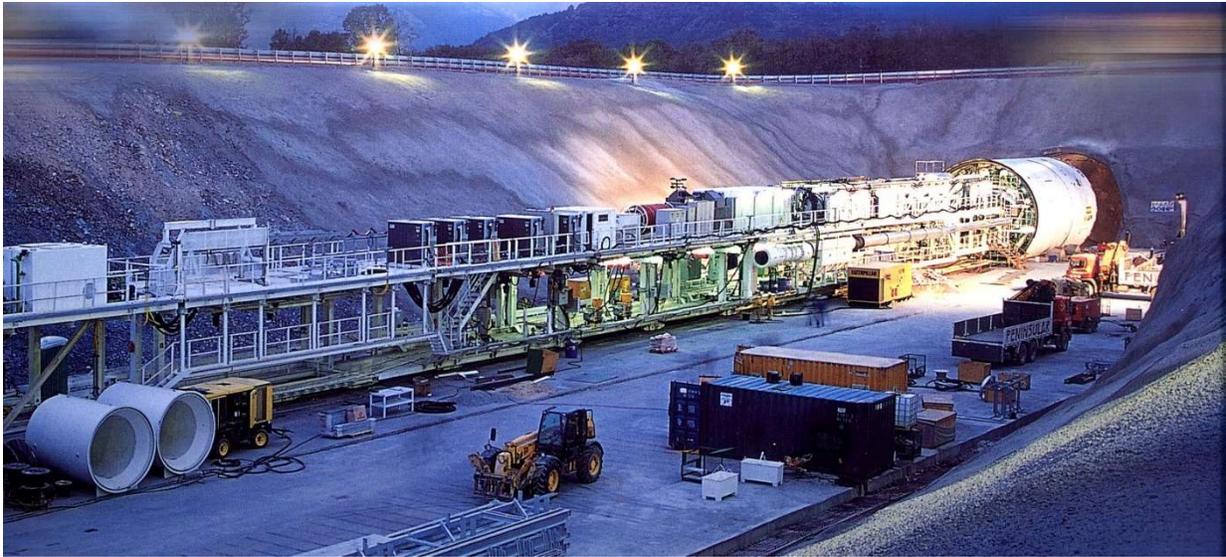


Figura 1.78. "Back-up" de Túnel de Guadarrama, España. Ref. [106].

El sistema de evacuación de escombros, de importancia primordial en el método, ya que es necesario evacuar con rapidez grandes cantidades de material. Los modernos sistemas de evacuación de escombros pueden adoptar diversas configuraciones, siendo las más frecuentes:

- Tren de tolvas: está constituido por una batería de tolvas en número igual al de los vagones de cada tren y con idéntica geometría y colocación; sirven como regulación y acopio, y se cargan mediante una cinta repartidora del material, no siendo necesaria la presencia del tren que puede estar viajando. Cuando el tren regresa vacío, se sitúa debajo de las tolvas y mediante la apertura simultánea de todas ellas se carga éste de forma prácticamente instantánea, repitiéndose el ciclo.
- Cinta puente: puede alojar en su interior el tren y lo carga mientras éste pasa por debajo de la misma. Un cambio californiano, previo a la cinta, permite la espera de un segundo tren.
- Sistema Rowa: consiste en un conjunto de dos vías paralelas, una para vagones vacíos y otra para vagones cargados. Los vagones se mueven sin la locomotora mediante cadenas de arrastre y el cambio de vía se efectúa mediante un sistema hidráulico. El sistema se controla por un operador situado ante un monitor de TV.
- Cintas convencionales: que transportan el escombros desde la máquina hasta el exterior, eliminándose el transporte sobre vía. Este procedimiento de transporte continuo cada vez se utiliza más frecuentemente, porque aumenta el rendimiento, al eliminarse tiempos muertos.



Figura 1.79. Sistema de rezaga. Ref. [107] y [108].

Para el sistema de guiado suele emplearse un rayo láser que establece la dirección de un eje paralelo al del túnel, que puede observarse de forma constante en una pantalla cuadrículada, si bien es conveniente garantizar mediante topografía convencional eje y rasante.



Figura 1.80. Láser de sistema de guiado en túnel. [Cortesía: Ing. Isaías Hernández Soto].

Dadas sus características, las tuneladoras únicamente proporcionan secciones circulares, radios de curvatura mínimos entre 300 y 500 m, pendientes máximas limitadas por lo general entre un 3.5% a 4%.

Los escudos cerrados son empleados principalmente en rocas blandas o suelos inestables y/o saturados; generalmente presentan la cabeza o rueda de corte, los cilindros de empuje, el erector de dovelas y el back-up.

La rueda de corte, en este caso, normalmente monta cinceles o picas, y en ocasiones puede incluso incorporar discos. En terrenos muy variables se pueden colocar discos y picas a la vez, aunque siempre los primeros adelantados 2 o 3 cm sobre las picas. La rueda de corte de los escudos dispone de una serie de aberturas frecuentemente regulables (formando una cámara o Plenum), por las que el escombros o material producto de la excavación pasa a una cámara en la que un rodillo sin fin lo evacua hasta un sistema de rezaga.



Figura 1.81. Fotografía de rueda de corte en Lumbrera L2-TCX. [Propia].

## Proceso Constructivo del Túnel Churubusco – Xochiaca

Para los escudos, los cilindros de empuje están distribuidos en toda la periferia de la máquina, también llamado cola del escudo, y están equipados con zapatas articuladas que permiten un apoyo uniforme sobre las dovelas del revestimiento, donde su recorrido marca el ciclo de avance.



Figura 1.82. Cilindros de empuje en tuneladora. Ref. [109] y [Propia].

Las dovelas después de ser llevadas por una locomotora u otro transporte hasta la cola del escudo, y son posicionadas por un polipasto en un sistema de cuña llamado mesa de dovelas, que llevará las dovelas por debajo, hasta llegar al sitio donde se encuentra el erector.



Figura 1.83. Cama o mesa de traslado dovelas. [Cortesía ICA, Ing. Eduardo Zaragoza]

El erector de dovelas es el mecanismo que coloca una a una cada dovela en la posición deseada, hasta completar el anillo. El accionamiento del erector suele ser hidráulico, muy sensible y preciso, de velocidad variable para poder aproximar correctamente cada dovela a su situación definitiva.



Figura 1.84. Erector de tuneladora colocando una dovela. Ref. [110], y Ref. [111]

Como en el caso de los topes, para el guiado de los escudos suele emplearse un sistema láser que establece la dirección de un eje paralelo al del túnel, también es conveniente la comprobación de la alineación mediante topografía convencional.



Figura 1.85. Sistema de guiado de escudo. Ref. [112]

La coraza del escudo, en la zona en que se coloca el anillo de dovelas, lleva en toda su periferia unos sellos, que impiden que la inyección de mortero que rellena el hueco existente en el trasdós de la dovela pase al interior de la máquina.



Figura 1.86. Sello para escudo y su colocación en el frente y en la parte posterior de la excavación. Ref. [113], y [114]

## Proceso Constructivo del Túnel Churubusco – Xochiaca

---

Una primera y muy importante diferenciación entre los diferentes tipos de escudos estriba en las características del frente de excavación y sobre todo en la estabilidad o inestabilidad de este. La fórmula de Peck aplicada a suelos establece que el factor de estabilidad  $n$ , se puede calcular de la siguiente forma:

$$n = \frac{\Sigma_0 - P_f}{c}$$

donde:

- $\Sigma_0$  - Presión en el eje del túnel
- $P_f$  - Presión que se ejerce contra el frente de excavación
- $c$  - cohesión

Si  $n < 5$  el frente es estable / si  $n > 5$  el frente es inestable.

En función de este coeficiente se elegirá entre escudos abiertos para frentes estables y de escudos cerrados para aquellos frentes que puedan presentar señales de inestabilidad. En la Tabla I.2.1 se representa la tipología actual e indica además las características principales en cada uno de ellos.

Tabla I.2.1 Tipología actual de escudos (Fernández, 1997).

| TIPO DE FRENTE | MÉTODO DE EXCAVACIÓN     | ESTABILIZACIÓN DE FRENTE               | SISTEMA DE REZAGA              |
|----------------|--------------------------|--|--------------------------------|
| Abierto        | Manual                   | Paneles y/o rejillas<br>Rueda de corte | Equipo y/o maquinaria o cintas |
|                | Semimecanizado           |  |                                |
|                | Mecanizado               |  |                                |
| Cerrado        | Mecanizado (sin presión) | Aire comprimido                        | Maquinaria o cintas            |
|                | Presurizados             | Presión equilibrada de tierras (EPB)   | Cintas o bombeo                |
|                |                          | Lodos bentoníticos y emulsiones        |                                |

Los escudos abiertos se utilizan normalmente cuando el frente del túnel es estable y las afluencias de agua reducidas, bien por trabajarse por encima del nivel freático o bien por ser terrenos impermeables.



Figura 1.87. Escudos abiertos y sus tipos de brazos. [Cortesía Ing. Isaías Hernández Soto].

El elemento excavador puede ser semimecánico (rozadoras, y palas), en estos casos es frecuente disponer de paneles o rejillas que pueden colaborar en la estabilidad del frente.



Figura 1.88. Escudos abiertos y sus tipos de brazos. Ref. [115] y [116].

Los escudos cerrados están diseñados para trabajar en terrenos **difíciles, sueltos**, y frecuentemente bajo el nivel freático, o saturados de agua, en frentes claramente inestables. Es necesario de un revestimiento de dovelas de hormigón atornilladas entre sí, con garantías de impermeabilidad.

Se distinguen de este tipo de escudos:

A.- Escudos presurizados con aire comprimido - En desuso debido a que la fuga de aire ya sea en el frente del túnel o a través del propio revestimiento, podría originar una catástrofe; además, el cumplimiento de las normas vigentes en materia de salubridad, que regulan las horas de trabajo y de descompresión, encarecerían notablemente el proceso.

B.- Hidroescudos o escudos de bentonita (*“Slurry shield”*) - Utilizan la propiedad tixotrópica de los lodos bentoníticos para conseguir la estabilización del frente del túnel, son adecuadas para trabajar en terrenos difíciles, constituidos principalmente suelos granulares (limos y arenas), y bajo presión de agua, en los que la inyección de lodos, además de contribuir a la estabilidad del terreno, ayuda al transporte mediante bombeo de los productos de excavación; su campo de aplicación óptimo se relaciona con granulometrías comprendidas entre 0.1 y 60 mm, que conjuguen una eficaz recuperación de la bentonita con la facilidad del transporte hidráulico.

C.- Escudos de frente en presión de tierras (EPB – *“Earth Pressure Balance”*) - enfocado en la excavación de túneles que involucran problemas de estabilidad en el frente, y/o en condiciones donde la excavación se realiza por debajo del nivel freático.

En este tipo de tuneladoras, el manejo de la inestabilidad generada en el frente es controlada mediante el propio material excavado. La presión ejercida por el terreno circundante y el agua existente es equilibrada por la presión ejercida por la cabeza de corte y el mamparo, en sentido contrario (Véase Figura 1.88), de ahí su denominación de Presión de Terreno Balanceado (o Presión de Tierras Balanceadas).

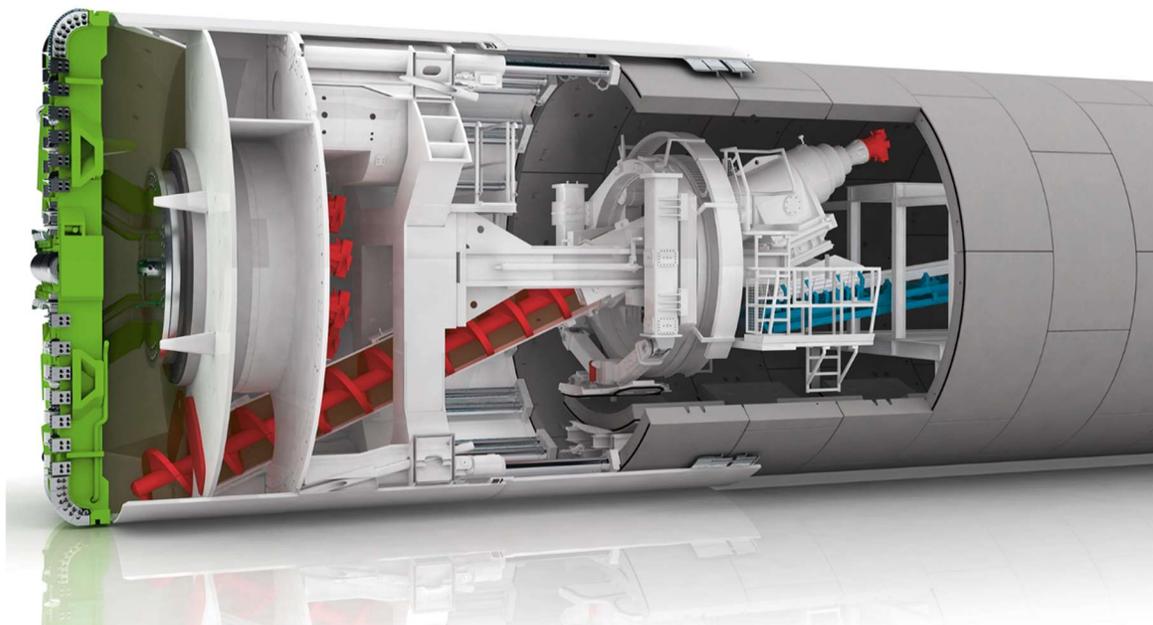


Figura 1.89. Vista en corte de escudo cerrado. Ref. [117]

El escudo doble es básicamente un escudo telescópico articulado en dos piezas, que además de proporcionar un sostenimiento continuo del terreno durante el avance del túnel, permite en aquellos casos en que el terreno puede resistir la presión de unos *grippers*, simultanear las fases de excavación y sostenimiento, con lo que se puede conseguir rendimientos muy elevados.

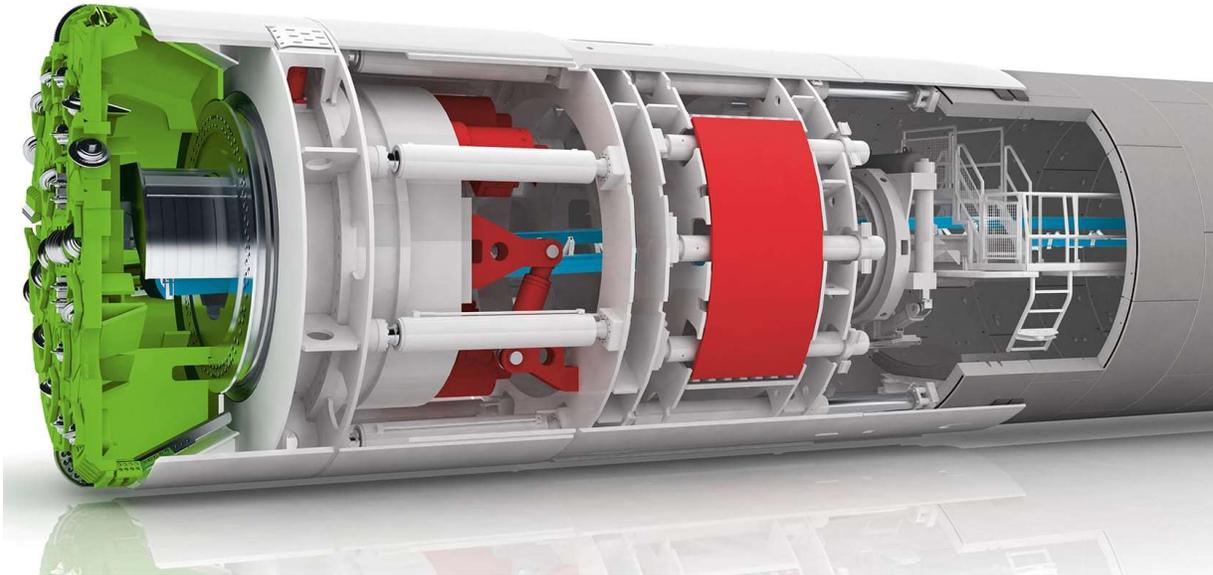


Figura 1.90. Vista en corte de escudo doble. Ref. [118]

En el caso de terrenos incapaces de absorber la reacción al empuje con los “*grippers*”, el avance se realiza mediante el empuje de los cilindros auxiliares que reaccionan contra el obligado revestimiento prefabricado del túnel.

El empuje o hincado de tubos, o “*Pipe jacking*” también llamado microtuneleo, es un método que consiste en empujar la tubería desde una lumbrera, mediante un muro de reacción, e ir “hincándola” en el terreno a la vez que un elemento excavador por delante excavando, aprovechando el empuje transmitido, con una mínima afección al terreno. Se emplea para diámetros entre 0.50 m hasta 4.0 m; perforados con medios mecanizados o semimecanizados, con guiado y seguimiento teledirigido desde superficie.

El ciclo de trabajo del hincado de tuberías es el siguiente:

- a. Los gatos hidráulicos empujan la tubería colocada en el bastidor de empuje mientras se perfora el frente.
- b. Los cilindros de empuje se retraen. (Posterior al frenado)
- c. Se desciende por la lumbrera el nuevo tramo de tubería y se coloca en el bastidor.
- d. Se vuelve a empujar mientras se perfora, iniciando un nuevo ciclo.

Se tendrá que alargar las conexiones, rezaga y circuitos, reconectando de nuevo según se requiera.



Figura 1.91. Hincado de tubería o microtuneleo, o "Pipe jacking". Ref. [119] y [120].

La extracción del material excavado es realizada desde métodos semimanuales hasta por bombeo, en consecuencia, de la elección del elemento excavador (manual, maquinaria y *TBM's*)

Para el sistema de guiado es utilizado de manera frecuente equipos láser, aunque se recomienda ratificar la alineación mediante topografía convencional.

Una variante de la excavación en este método es realizando un vacío o succión en la tubería, aunque debido a su costo y complejidad no es muy utilizado.

Es importante mencionar que, para los métodos de excavación con escudo, se debe construir previamente en la lumbrera correspondiente el muro de reacción, el muro de entrada (o ataque), y el correspondiente muro de salida.

También se debe tener noción de los radios de curvatura de los escudos; a su vez la extracción del detritus o rezaga juega un papel importante en fijar pozos de extracción o la ubicación de las lumbreras



Figura 1.92. Equipos de excavación mecanizada de ataque puntual (Rozadoras). Ref. [121], y [122].

Las rozadoras, que son también conocidas como minadores, rasuradoras o máquinas de ataque puntual, excavan generalmente en terrenos de resistencia media-blanda y obras de longitudes inferiores a los

## Proceso Constructivo del Túnel Churubusco – Xochiaca

2,000 m, donde no son rentables los escudos por la reducida dimensión de los proyectos, y en zonas de rocas medias-duras, cuando existen restricciones ambientales que impiden la aplicación de explosivos.

Básicamente, realizan su trabajo mediante una cabeza giratoria, provista de herramientas de corte o picas que inciden sobre la roca, que van montadas sobre un brazo monobloque o articulado. Además, cuentan con un sistema de recogida y transporte de material que lo evacua desde el frente hacia la parte trasera de la máquina. Todo el conjunto va montado sobre un chasis móvil de orugas.

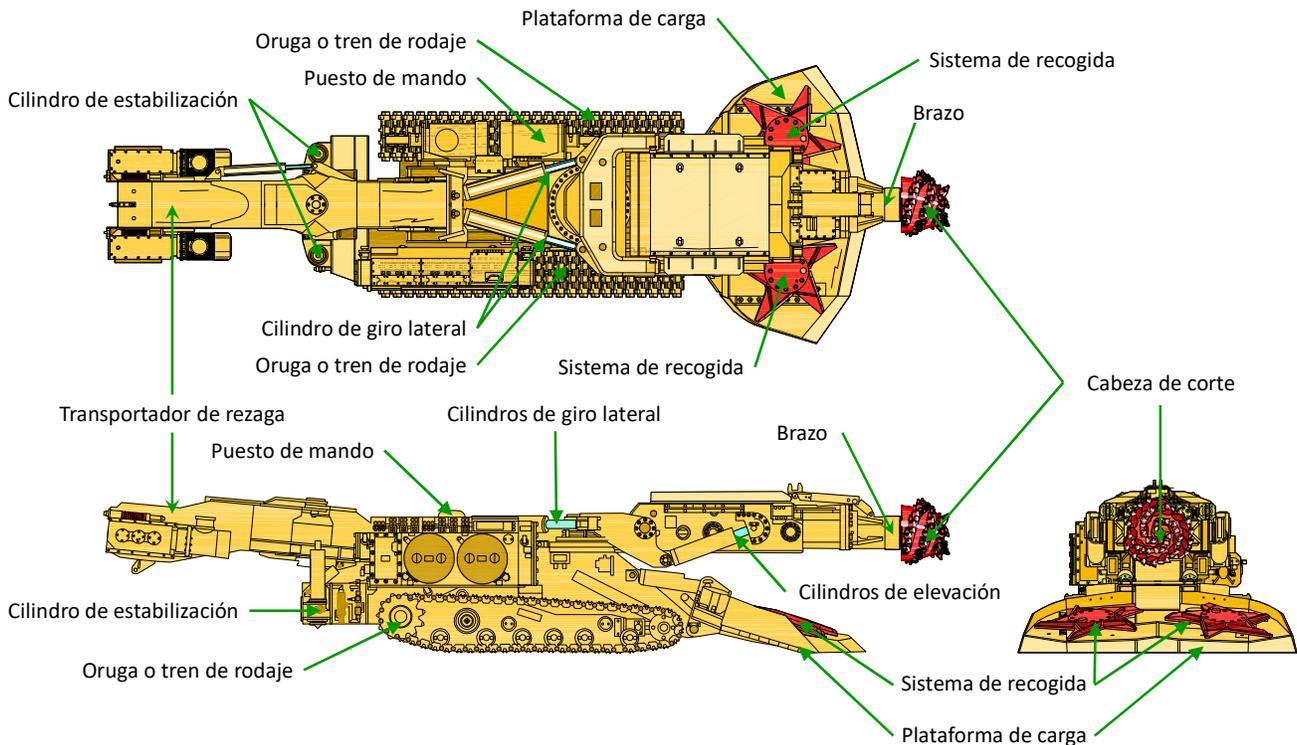


Figura 1.93. Elementos típicos que constituyen una rozadora. [Elaboración propia basada en Jimeno *et alii*, 1998].

Se distinguen 2 tipos de rozadoras:

- Cabeza de eje longitudinal o axial ("*milling*"): El eje de giro es perpendicular al frente de excavación; las velocidades típicas de la cabeza cortadora varían entre 20 y 65 RPM. La fuerza de corte se aplica lateralmente, por lo que no se aprovecha todo el peso del equipo; En rocas duras se debe disponer de unos gatos de apoyo o cilindros de estabilización para absorber los momentos de giro producidos por el brazo de corte.
- Cabeza de eje transversal ("*ripping*"): Las cabezas giran alrededor de un eje paralelo al frente de excavación; las velocidades típicas de las cabezas varían entre 45 y 100 RPM. La fuerza horizontal se ejerce con el giro del brazo y la fuerza vertical con el peso de la rozadora.

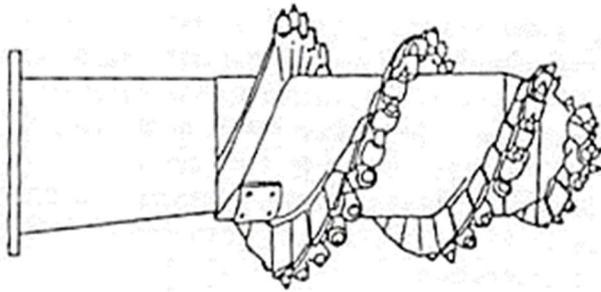


Figura 1.94. Cabeza de eje longitudinal o axial ("milling").  
Ref. [123].

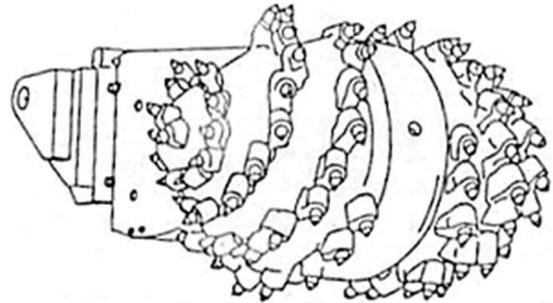


Figura 1.95. Cabeza de eje transversal ("ripping").  
Ref. [124].

En las cabezas de corte, las picas están montadas sobre una hélice o de manera cicloidal.

Debido a la forma diferente de corte, cada tipo de cabeza presenta una serie de ventajas e inconvenientes. Desde el punto de vista de la estabilidad, en las cabezas transversales no existe casi empuje lateral, la reacción precisa para el corte, que tiende a limitar al equipo en dicha dirección. Si no es suficiente la proporcionada por la propia fricción del tren de rodaje con las orugas será necesario, por ejemplo, disponer de cilindros hidráulicos estabilizadores, que anclen la máquina a los hastales. Por este motivo, si no se cuenta con esos cilindros horizontales, los equipos de cabeza axial requieren un 20% más de peso que los de cabeza transversal para la misma potencia de corte.

El perfilado de las excavaciones es mucho más perfecto con las cabezas axiales que con las transversales, ya que éstas producen pequeñas sobrexexcavaciones por la propia geometría de las cabezas y, consecuentemente, un contorno menos regular.

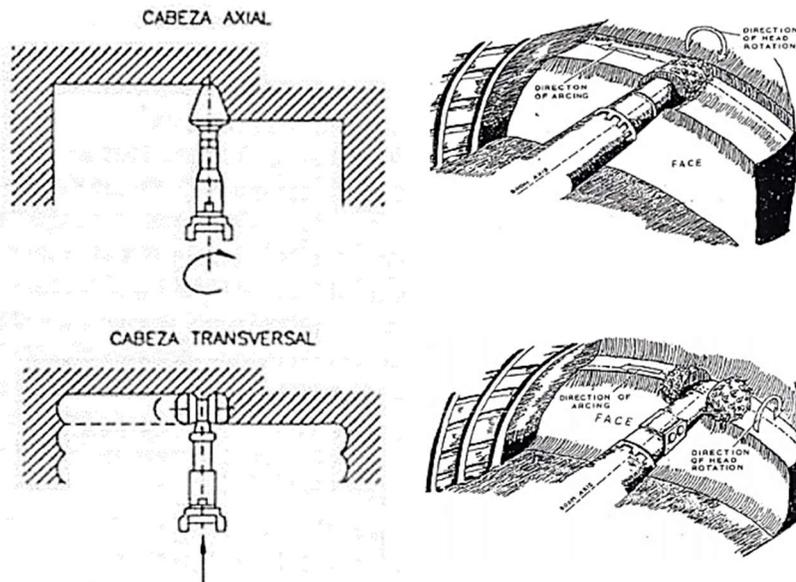


Figura 1.96. Forma de corte con minadores axial y transversal. Ref. [125].

Las picas de las rozadoras también pueden contar con un sistema de agua a chorro o aspersion de agua, con el fin de reducir el polvo generado durante la excavación, reducir la probabilidad de ignición por

chispas, y pueden aumentar la duración de las picas gracias a la refrigeración de las mismas. (Carrasco et alii, 1998)

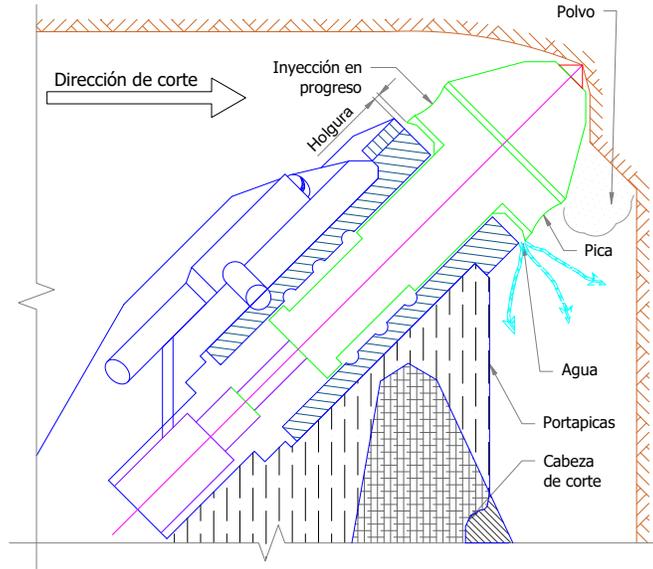


Figura 1.97. Vista en perspectiva de sistema de agua en pica. [Elaboración propia basada en Carrasco et alii, 1998].

Las fases de trabajo del rozador son:

1. Penetración de la cabeza.
2. Corte del frente.
3. Perfilado (en caso de requerirse).

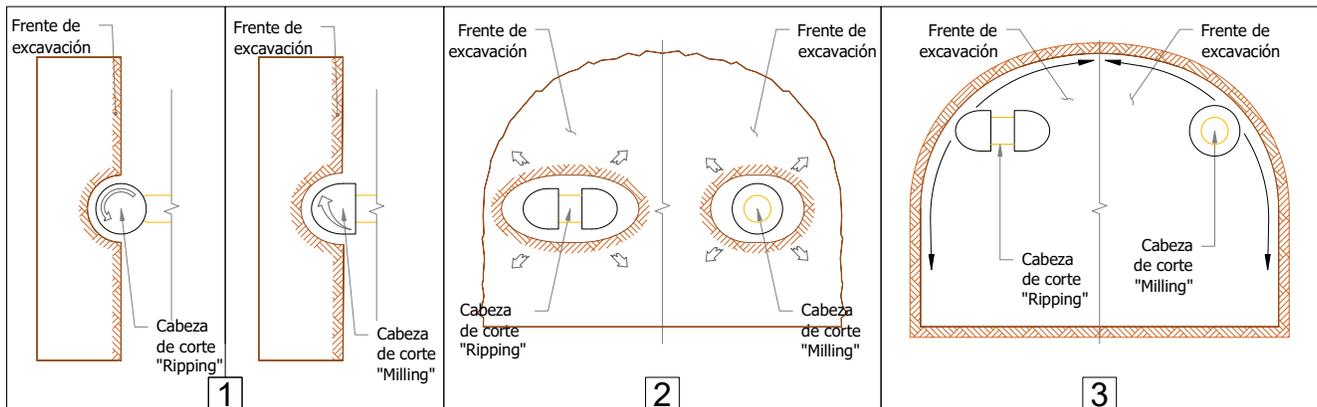


Figura 1.98. Fases de trabajo de un rozador. [Elaboración propia basada en Pérez Álvarez, 2016].

Los sistemas de rezaga son distintos en las diferentes rozadoras que existen, pero básicamente se dispone de cuatro tipos:

- Brazos recolectores: el material arrancado cae sobre una plataforma y es dirigido mediante unos brazos hacia el transportador de racletas que lo evacua. Es adecuado para materiales húmedos y pegajosos, entrelazados y en forma de bloques.

- Ruedas recolectoras: Es un dispositivo de ruedas giratorias con varios brazos en posición radial, que, al girar entre sí, en sentido contrario dirigen el material rozado hacia el transportador.
- Discos giratorios: Consisten en dos discos con nervaduras que al girar en sentido contrario envían al material suelto hacia el transportador. Sus aplicaciones son las mismas que las del sistema de ruedas giratorias con brazos.
- Cargador de racletas: El material suelto si es poco abrasivo y presenta pocos bloques puede ser cargado con uno o dos carruseles continuos de racletas unidas por cadenas.
- Sistemas especiales: Existen rozadoras con brazo rozador y recolector, en el que la cabeza de corte al irse desplazando de abajo a arriba, a la vez que corta, carga el material sobre un transportador central de racletas montado sobre el mismo brazo.



Figura 1.99. Dispositivos típicos de recolección de rezaga de rozadoras. Ref. [126]

La rezaga es puesta por la rozadora en camiones o cajas, para su posterior disposición.

### 3. Voladura o explosivos.

Los explosivos más comunes, son:

Explosivos tipo A: Dinamitas

Explosivos tipo B-b: ANFO

Explosivos tipo E-a: Hidrogeles

Explosivos tipo E-b: Emulsiones

Las partes o trabajos elementales de que consta el ciclo de trabajo característico de las excavaciones mediante explosivos son las siguientes:

- Planteo/Replanteo en el frente del esquema de tiro
- Perforación
- Carga
- Voladura
- Ventilación
- Retirada la rezaga o Desescombro
- Saneamiento del frente, bóveda y hastiales o Revestimiento

El esquema de tiro es la disposición en el frente del túnel de los barrenos que se van a perforar, la carga de explosivo que se va a introducir o no en cada uno, y el orden en que se va a hacer detonar cada barreno; diseñándose al principio de la obra en base a la experiencia y a una serie de reglas empíricas, ajustándose posteriormente en función de los resultados obtenidos en cada voladura.

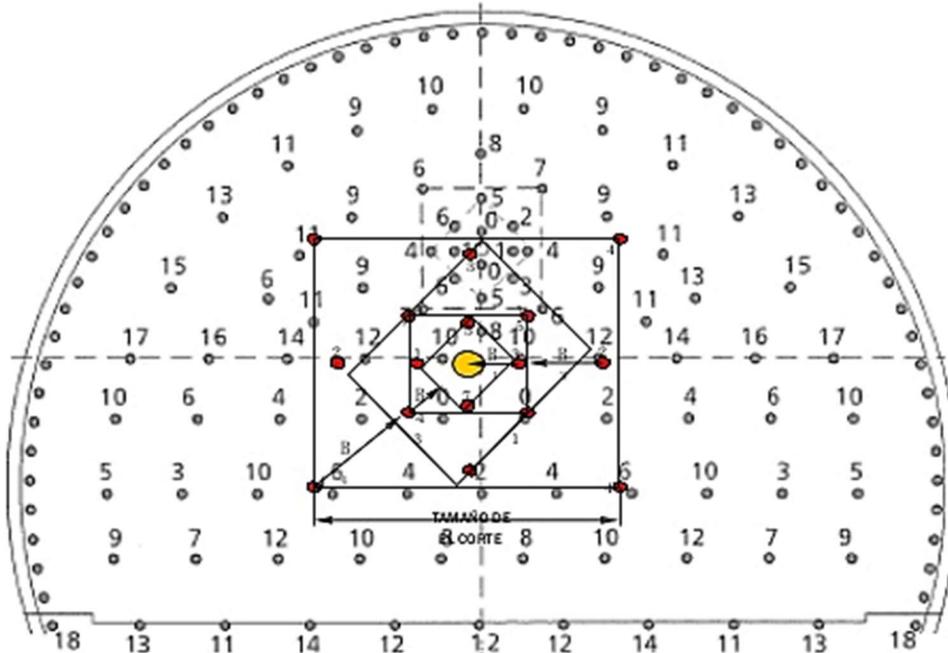


Figura 1.100. Esquema de tiro o disparo de voladura a sección completa. Ref. [127].

La perforación de los barrenos se puede hacer por dos procedimientos: el primero es mediante el uso de martillos manuales accionados por aire comprimido, y el segundo es mediante una maquina denominada “jumbo”.

La máquina “jumbo”, consta de uno o más brazos articulados, según los modelos; en cada brazo puede montarse un rotomartillo de perforación (perforadora) o una cesta donde pueden alojarse uno o dos operarios y que permite el acceso a cualquier parte del frente. El arrastre de la rezaga o detritus y la refrigeración se consiguen igualmente con agua.

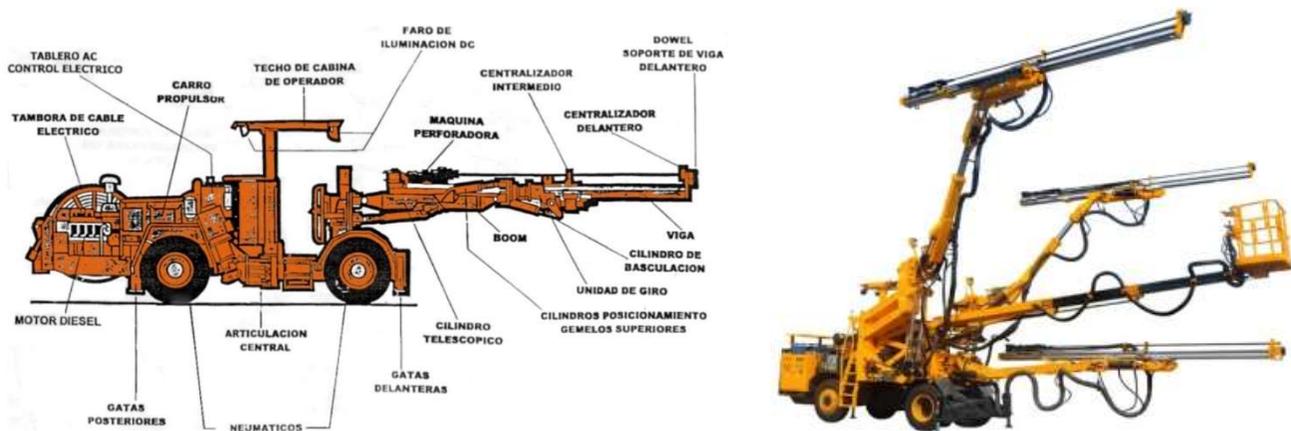


Figura 1.101. Unidad de perforación “Jumbo”. Ref. [128] y [129].

Para la perforación y voladura, la sección teórica del túnel se divide en zonas o fases, en las que las exigencias, tanto de densidad de perforación, como de carga específica de explosivo y secuencia de encendido son distintas. Estas zonas o fases son:

- A - Cuele
- AA - Contracuele
- B - Destroza
- C – Cubeta/Zapatera
- D - Contorno

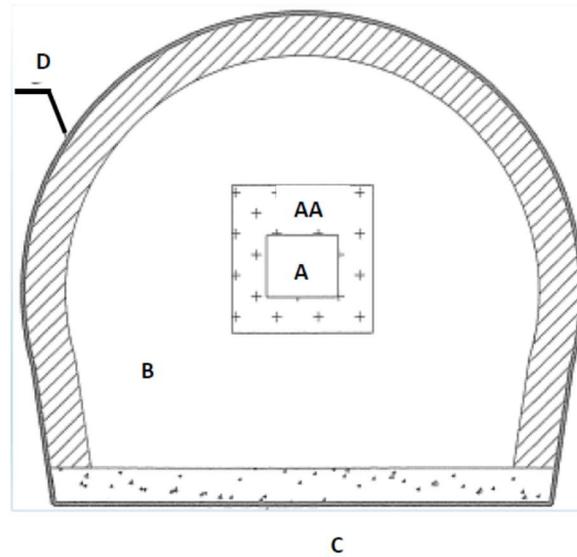


Figura 1.102. División de zonas o fases de perforación y voladura. Ref. [130].

El cuele es la fase de la voladura que dispara en primer lugar, su finalidad es crear una primera abertura en la roca que ofrezca al resto de las fases espacio más libre hacia la que puede escapar la roca; con lo cual se facilita su salida. Es la más importante de todas las fases en relación con el avance de la voladura.

Existen distintos tipos de cuele:

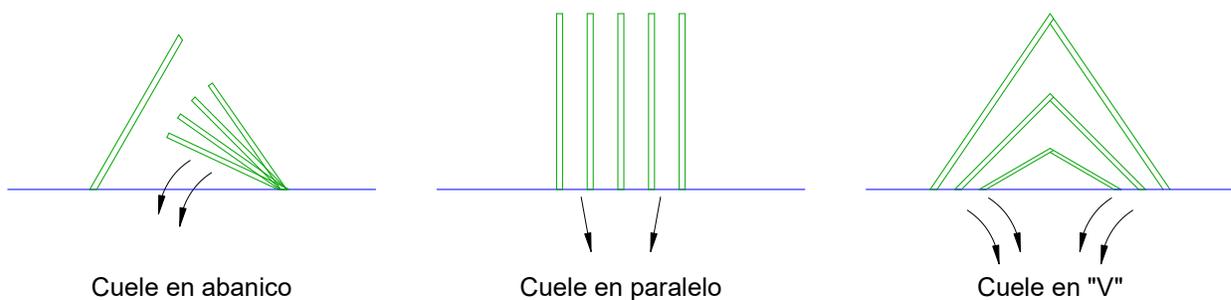


Figura 1.103. Tipos de cueles. [Elaboración propia basada en Carrasco et alii, 1998].

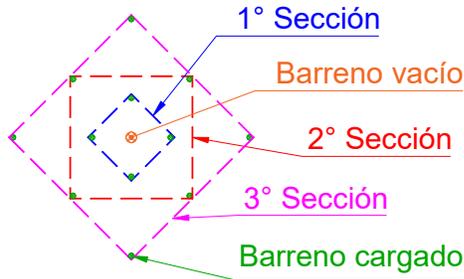


Figura 1.104. Vista frontal de cuele. [Elaboración propia basada en Carrasco *et alii*, 1998].

El contracuele es la corona de barrenos que circundan a los del cuele; ensancha el hueco creado por el cuele, y no presenta barrenos vacíos; se emplean secuencias de milisegundos en sus barrenos.

La destroza es la parte central y más amplia de la voladura, cuya eficacia depende fundamentalmente del éxito de la zona del cuele y contracuele, que es la zona crítica de la voladura.

Los barrenos perimetrales o de contorno dan la forma perimetral de la excavación resultante. Lo ideal es que la forma real del perímetro del túnel sea lo más parecida posible a la teórica, aunque las irregularidades y discontinuidades de la roca dificultan dicho objetivo.

La zapatera es la zona de la voladura situada en la base del frente, a ras de la cubeta del túnel; los barrenos de las zapateras son los que más explosivo contienen ya que, aparte de romper la roca han de levantar ésta hacia arriba; y son disparados en último lugar.

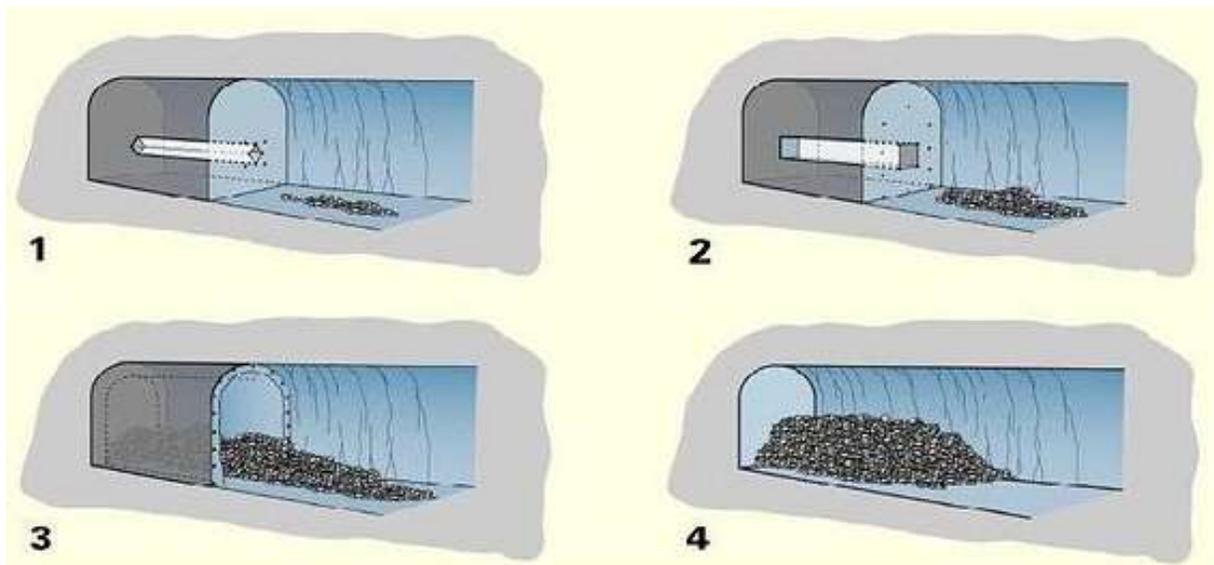


Figura 1.105. Fases y secuenciación de ejecución de detonación y voladura. Ref. [131].

Los tipos de explosivo que deben utilizarse en túneles dependen de las características de la roca, principalmente de su densidad, su humedad, resistencia a compresión y velocidad de propagación de onda de la roca. Además, la generación de gases tóxicos, altas temperaturas, decibeles y polvo limita los explosivos. (Pérez Álvarez *et Barral Ramón*, 2018).

## Proceso Constructivo del Túnel Churubusco – Xochiaca

Los tipos de explosivos más comunes en túneles se distinguen entre:

- ANFO (Nitrato de Amonio + Aceite Combustible)
- Hidrogeles o papillas (Oxidante, agua y un sensibilizador); (mezclas con sólidos solubles o insolubles)
- Emulsiones (mezcla de dos o más líquidos generalmente insolubles entre sí, pero que se mantienen en suspensión mediante pequeñas cantidades)
- Gelatinas o geles
- Granulares



Figura 1.106. Explosivo ANFO Ref. [132].



Figura 1.107. Explosivo Hidrogel Ref. [133].



Figura 1.108. Explosivo Emulsión Ref. [134].



Figura 1.109. Gel Explosivo Ref. [135].



Figura 1.110. Explosivo Granular Ref. [136].



Figura 1.111. Explosivo TNT Ref. [137].

El diámetro de los cartuchos explosivos deberá ser lo más próximo al diámetro de los barrenos, compatible con su introducción dentro del barreno. La iniciación de la explosión en cada barreno se realiza en el cartucho cebo instalado en el fondo del barreno y que contiene un detonador.

## Proceso Constructivo del Túnel Churubusco – Xochiaca

Para los detonadores se adscribe entre ordinarios, eléctricos, no eléctricos y electrónicos; su activación puede ser eléctrica o por impacto dependiendo el caso. (Pérez Álvarez *et* Barral Ramón, 2018).

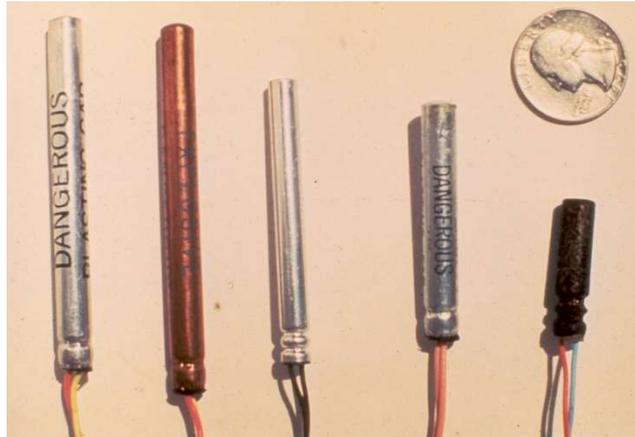


Figura 1.112. Detonadores. Ref. [138].

El resto de los elementos que se pueden utilizar para la voladura son los siguientes:

- Cañas. Son tubos en cuyo interior se colocan los explosivos, cordón detonante, etc. Permiten introducir fácilmente todos los elementos en su disposición correcta dentro del barreno.
- Retacador. Es el material que cierra o tapona el barreno y de este modo impide que la energía debida a la explosión se escape por la boca de este.
- Explosor. Es el mecanismo que produce la corriente eléctrica que da lugar a la explosión. Suelen estar basados en un condensador que se va cargando con una manivela o una batería y que cierra el circuito manual o automáticamente
- Cables o mechas. Transmiten la energía desde el explosor hasta los detonadores.

Las vibraciones producidas por las voladuras se transmiten por el terreno y pueden llegar a producir daños en edificios y estructuras próximas al túnel, así como a la roca circundante y al revestimiento. El factor principal que provoca los daños es la Velocidad Pico de Partícula, que se define como la velocidad máxima que alcanzan las partículas del terreno al vibrar por acción de la onda sísmica. El registro de vibraciones se desarrolla con geófonos, aparatos que transforman las vibraciones del terreno en impulsos eléctricos, e irán conectados al sismógrafo. (Pérez Álvarez *et* Barral Ramón, 2018).

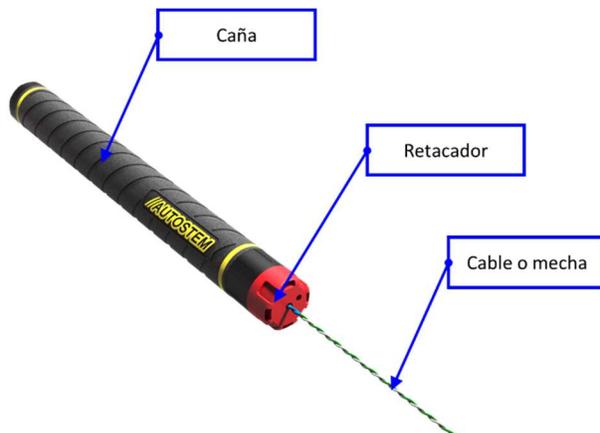


Figura 1.113. Explosivo armado. Ref. [139].



Figura 1.114. Explosor. Ref. [140].

### I.3 Condiciones de diseño

Las condiciones o criterios de diseño son, la naturaleza o conjunto de características propias y definitorias de un proyecto; se usan también como herramienta para evaluar el éxito del proyecto y que tan bien se ajusta a los objetivos. [MIT - Perelman, Barrett, et Paradis, 2000].

El diseño de túnel requiere la participación interdependiente de las condiciones hidrogeotécnicas, los métodos constructivos y tecnologías de excavación; y se debe tener especial cuidado si el túnel debe pasar por debajo o cerca de edificios, cimentaciones, otras estructuras y otros túneles. La construcción de un túnel se determinará por las condiciones de diseño. (Guglielmetti, Grasso, Mahtab & Xu, 2007).

En la tabla I.3.1 se proporciona una lista de los principales parámetros geológicos y geotécnicos necesarios para el diseño de túneles, e identifica los símbolos utilizados para ellos. La correspondencia entre los parámetros y las variables relacionadas se proporciona en la Tabla I.3.2.

Tabla I.3.1 Parámetros geológicos y geotécnicos relevantes para el diseño de túneles mecanizados. \* Ref. [141].

|                              |   |
|------------------------------|---|
| Propiedades mecánicas        | Cohesión ( $c_u, c'$ )<br>Ángulo de fricción ( $\varphi_u, \varphi'$ )<br>Módulo de deformación ( $E_t, E_s$ )  |
| Propiedades sedimentológicas | Contenido mineralógico (cuarzo y arcillas) (MC)<br>Distribución del tamaño de grano (GSD)<br>Porosidad ( $n$ )  |
| Propiedades hidrogeológicas  | Contenido de agua natural ( $W_n$ )<br>Grado de saturación ( $S$ )<br>Coeficiente de permeabilidad ( $K$ )  |
| Propiedades índices          | Límites Atterberg (LL, LP), (adhesión, cohesión y contracción)<br>Índice de plasticidad ( $I_p$ ); Índice de consistencia ( $I_c$ )<br>Índice de actividad ( $I_A$ )<br>Densidad ( $\rho_w, \rho_s, \rho_d$ ) |

Tabla I.3.2 Parámetros geológicos y geotécnicos y su influencia en aspectos de túneles. \*\* Ref. [141]

|                                   |  |
|-----------------------------------|--|
| Presión del suelo                 | $c_u, \varphi_n, \varphi_u, \varphi_w, \rho_w, (E_t, E_s)$ |
| Hundimiento                       | $c_u, c', \varphi_u, \varphi', E_t, E_s, n, S$             |
| Estabilidad de la cara del túnel. | $c_u, \varphi_u, GSD, n, IB, K, (E_u, E_s)$                |
| Excavabilidad                     | $c_u, \varphi_u, GSD, IB, IC, IP$                          |
| Alteración / intemperie           | MC, GSD, IB, $W_n$   |
| Rezaga                            | $\rho_s, GSD, W_n, \varphi', S$                            |
| Adhesividad                       | MC, $W_n, W_L, W_P, I_p, I_c, I_A, GSD$                    |
| Separación                        | GSD, MC, IB, IP, IC  |
| Abrasividad                       | MC, GSD, $n, IB$   |

(\*, \*\*) Definición de los símbolos dados en la Tabla II.3.1 y la Tabla II.3.2:

$c_u$  = Cohesión no drenada,  $c'$  = Cohesión efectiva,

$\varphi_u$  = Ángulo de fricción no drenado,  $\varphi'$  = Ángulo de fricción efectivo,  $\varphi_n$  = Ángulo de fricción natural,

$E_t$  = Módulo de elasticidad tangencial,  $E_s$  = Módulo de elasticidad secante

MC = Contenido mineral, GSD = Distribución de grano,  $n$  = Porosidad

$W_n$  = Contenido de agua natural,  $S$  = Grado de saturación,  $K$  = Coeficiente de permeabilidad,

$W_L$  = Límite de Atterberg para el estado líquido,  $W_P$  = Límites Atterberg para estado plástico

$I_A$  = Índice de actividad,  $I_C$  = Índice de consistencia,  $I_P$  = Índice de Plasticidad

$\rho_w$  = Densidad del agua,  $\rho_s$  = Densidad de la partícula del suelo,  $\rho_d$  = Densidad drenada,

Si se encuentra el nivel de aguas freáticas por arriba del nivel del túnel, la excavación del túnel estará profundamente condicionada por su presencia en las fases de diseño y construcción.

El estudio geohidrológico debe incluir un análisis de los estratos permeables, y se considera definido cuando se conocen los parámetros hidrodinámicos (el flujo de agua subterránea), las características geométricas y el campo de flujo. La circulación subterránea del agua, dentro del sistema de acuífero, se rige por la permeabilidad.

Los principales factores que se deberán considerar en el diseño de un túnel son:

- Definir las condiciones geológicas regionales y locales
- Definir las condiciones hidrológicas, y las características fisiográficas de la zona.
- Establecer una ubicación y geometría de anteproyecto
- Identificar las acciones y sollicitaciones de las estructuras sobre el terreno.
- Identificar las acciones del terreno y las acciones hidráulicas hacia las estructuras.
- Seleccionar los métodos, y el cálculo de volúmenes necesarios y adecuados.
- Establecer el presupuesto y tiempos de entrega.

El trabajo de diseño incluye en general, determinar:

- Geometría, alineación horizontal y vertical, y pendiente del túnel;
- Método de excavación;
- Presión en el frente de excavación;
- Geometría y distancia de lumbreras;
- Medidas de revestimiento temporal;
- Medidas de revestimiento definitivo;
- Fases y procedimientos constructivos, y medidas auxiliares de construcción;
- Manejo de rezaga/destroza/detritus, o residuos de la excavación;
- Mejoramiento del suelo (de ser el caso);
- Relleno del espacio anular de la excavación;
- Posibles asentamientos, emersiones y/o desplazamientos;
- Contramedidas de seguridad y mitigación de fallas o riesgos.

La sección transversal de un túnel determina los volúmenes de la excavación y del revestimiento, es decir, los costes más significativos en la construcción, además del gasto o flujo a cubrir, por lo que su correcta elección será de vital importancia.

Los principales criterios para el diseño de un túnel son:

- Tipo de suelo a excavar
- Resistencia a la compresión del suelo a excavar (Dureza)
- Resistencia al corte del suelo a excavar (Estabilidad)
- Presencia del nivel de aguas freáticas
- Nivel de saturación del suelo
- Permeabilidad del suelo
- Profundidad del túnel
- Longitud del túnel
- Forma de la sección transversal del túnel
- Pendiente del túnel
- Curvaturas del trazo del túnel
- Forma de trabajo del túnel (Presión)
- Tipo de revestimiento del túnel

A continuación, en la tabla I.3.3 se proporciona una lista de los principales parámetros en la elección del método de excavación.

## Proceso Constructivo del Túnel Churubusco – Xochiaca

Tabla I.3.3 Principales parámetros en la elección del sistema de excavación

| Método                                  |                                    | Resistencia a la compresión [Kg/cm <sup>2</sup> ] |        |        |       | Presencia de NAF | Longitud del túnel |       |       | Sección transversal |            |
|---|------------------------------------|---|--------|--------|-------|------------------|--------------------|-------|-------|---------------------|------------|
|   |                                    | < 7000  | < 2500 | < 1000 | < 500 |                  | Corta              | Media | Larga | Circular            | Cualquiera |
| Método convencional                     | Inglés                             |   |        | X      | X     | Nó               | X                  |       |       |                     | X          |
|   | Belga                              |   |        | X      | X     |                  | X                  |       |       |                     | X          |
|   | Alemán                             |   |        | X      | X     |                  | X                  |       |       |                     | X          |
|   | Austriaco                          |   |        | X      | X     |                  | X                  |       |       |                     | X          |
|   | Sección Completa                   |   |        | X      | X     |                  | X                  |       |       |                     | X          |
|   | Túnel Falso                        |   |        | X      | X     |                  | X                  | X     | X     |                     |            |
| Mecanizado                              | Ataque Puntual (Milling o Ripping) |   |        | X      |       | Nó               | X                  | X     |       |                     | X          |
|   | Topo                               |   | X      |        |       | Nó               |                    |       | X     | X                   |            |
|   | Escudo Abierto                     |   | X      |        |       | Nó               |                    |       | X     | X                   |            |
|   | Escudo cerrado                     |   | X      |        | X     | Sí               |                    |       | X     | X                   |            |
|   | Hidroescudo                        |   |        |        | X     | Sí               |                    |       | X     | X                   |            |
|   | Escudo de lodos o EPB              |   |        |        | X     | Sí               |                    |       | X     | X                   |            |
|   | Escudo Doble                       |   | X      |        | X     | Sí               |                    |       | X     | X                   |            |
|   | Hincado de tubería                 |   |        | X      | X     | Sí               |                    |       | X     | X                   |            |
| Con Explosivos (Perforación y voladura) | ANFO                               | X   |        |        |       | Posible          | X                  | X     |       |                     | X          |
|   | Emulsion o suspensión              | X   |        |        |       |                  | X                  | X     |       |                     | X          |
|   | Gel o gelatinas                    | X   |        |        |       |                  | X                  | X     |       |                     | X          |
|   | Granular                           | X   |        |        |       |                  | X                  | X     |       |                     | X          |
|   | Hidrogel                           | X   |        |        |       |                  | X                  | X     |       |                     | X          |

Dentro del diseño geotécnico de las lumbreras se debe realizar, al menos los trabajos que se listan a continuación:

Diagramas de esfuerzos y empujes

Análisis de la falla de fondo por el cortante

Revisión de la flotación de las lumbreras (final y durante su construcción)

Revisión de la estabilidad de la zanja para el muro Milán

Análisis geotécnicos de lumbrera utilizando métodos de elementos finitos

Análisis de estabilidad de talud, cercano a la lumbrera

Procedimiento constructivo.

Finalmente, y también importante, se debe considerar el espacio requerido de todos los sitios de trabajo.

## II. Descripción del proyecto

El Túnel Churubusco-Xochiaca se planteó como una medida adicional para contrarrestar las inundaciones en la cuenca del Valle de México; está ubicado en la fracción del municipio de Nezahualcóyotl adyacente a la delegación Venustiano Carranza, en la zona nororiente de la Ciudad de México.

En esta zona se presenta clima templado subhúmedo, con una temperatura media anual de 16°C, la temperatura más alta, mayor a 25°C se presenta en los meses de marzo a mayo, y la más baja alrededor de 4°C, en los meses de diciembre y enero. Las lluvias se presentan en su mayoría en verano, la precipitación total anual es variable de 600 mm a 1, 200 mm anuales. Ref. [142].

El túnel inicia sobre Av. Bordo de Xochiaca, cerca del estadio Nezahualcóyotl, continúa hacia el norponiente hasta entroncarse con el Periférico Oriente pasando por debajo del parque Alameda Oriente y prolonga su recorrido bajo Periférico Oriente hacia el noreste hasta descargar en la lumbrera 5 del Túnel Interceptor Río de los Remedios (L5-TIRR).

El túnel consiste en una sección circular de 6.30 m de diámetro exterior y 5 m de diámetro terminado interior, con una pendiente de 0.08%(=0.0008); a lo largo del trazo cuenta con 7 lumbreras de 12 m de diámetro terminado y profundidades desde 16 hasta 24 m, inicia en la Lumbrera L-0 (Cad. 13+354.189) hasta la Lumbrera L-7 (Cad. 0+967.346), y termina su descarga en la Lumbrera 5 del Interceptor Río de los Remedios (Cad. 0+000.000), tendrá una capacidad de conducción de hasta 40 m<sup>3</sup>/s.

A continuación, se enlistan cada una de las lumbreras del proyecto con respecto a sus características en la Tabla II.1. y su ubicación en la figura II.1.

Tabla II.1 Descripción topográfica y geométrica de las lumbreras del proyecto, [Cortesía ICA].

| SECCION            | CADENAMIENTO | COORDENADAS |             |          | N.R.H.<br>(m) | Ø<br>(m) | PROFUNDIDAD<br>(m) |
|--------------------|--------------|-------------|-------------|----------|---------------|----------|--------------------|
|                    |              | X           | Y           | Z        |               |          |                    |
| Lumbrera L-05 TIRR | 0+000.00     | 496807.216  | 2154444.637 | 2224.719 | 2202.199      | 12.0     | 22.52              |
| Lumbrera L-7       | 0+967.34     | 496561.071  | 2153553.944 | 2226.216 | 2,202.396     | 12.0     | 23.82              |
| Lumbrera L-6       | 2+924.78     | 495961.947  | 2151714.035 | 2225.116 | 2203.473      | 12.0     | 21.64              |
| Lumbrera L-5       | 5+211.28     | 495126.255  | 2149671.202 | 2224.352 | 2205.302      | 12.0     | 19.05              |
| Lumbrera L-4       | 7+503.86     | 495206.094  | 2148236.259 | 2224.761 | 2207.122      | 12.0     | 17.64              |
| Lumbrera L-3       | 8+980.16     | 496624.172  | 2147851.877 | 2225.140 | 2208.303      | 12.0     | 16.84              |
| Lumbrera L-2       | 11+445.15    | 498,997.635 | 2147209.769 | 2228.225 | 2210.275      | 12.0     | 17.95              |
| Lumbrera L-0       | 13+354.19    | 500830.595  | 2146711.286 | 2228.323 | 2211.803      | 12.0     | 16.52              |

(Diferencia de rasantes hidráulicas entre L0 y L-5 TIRR = 9.60 m)

El sistema de coordenadas se apoya en el punto GPS-01, con coordenadas Universal Transversal de Mercator (UTM)

X=496621.0571, Y=2147874.7157 y la línea GPS-01 al VL-1, con un azimut de: 285°18'14.56";

(Fecha de levantamiento: diciembre 2011)

La altimetría (Z) está apoyada en m.s.n.m (metros sobre el nivel medio del mar)

## Proceso Constructivo del Túnel Churubusco – Xochiaca

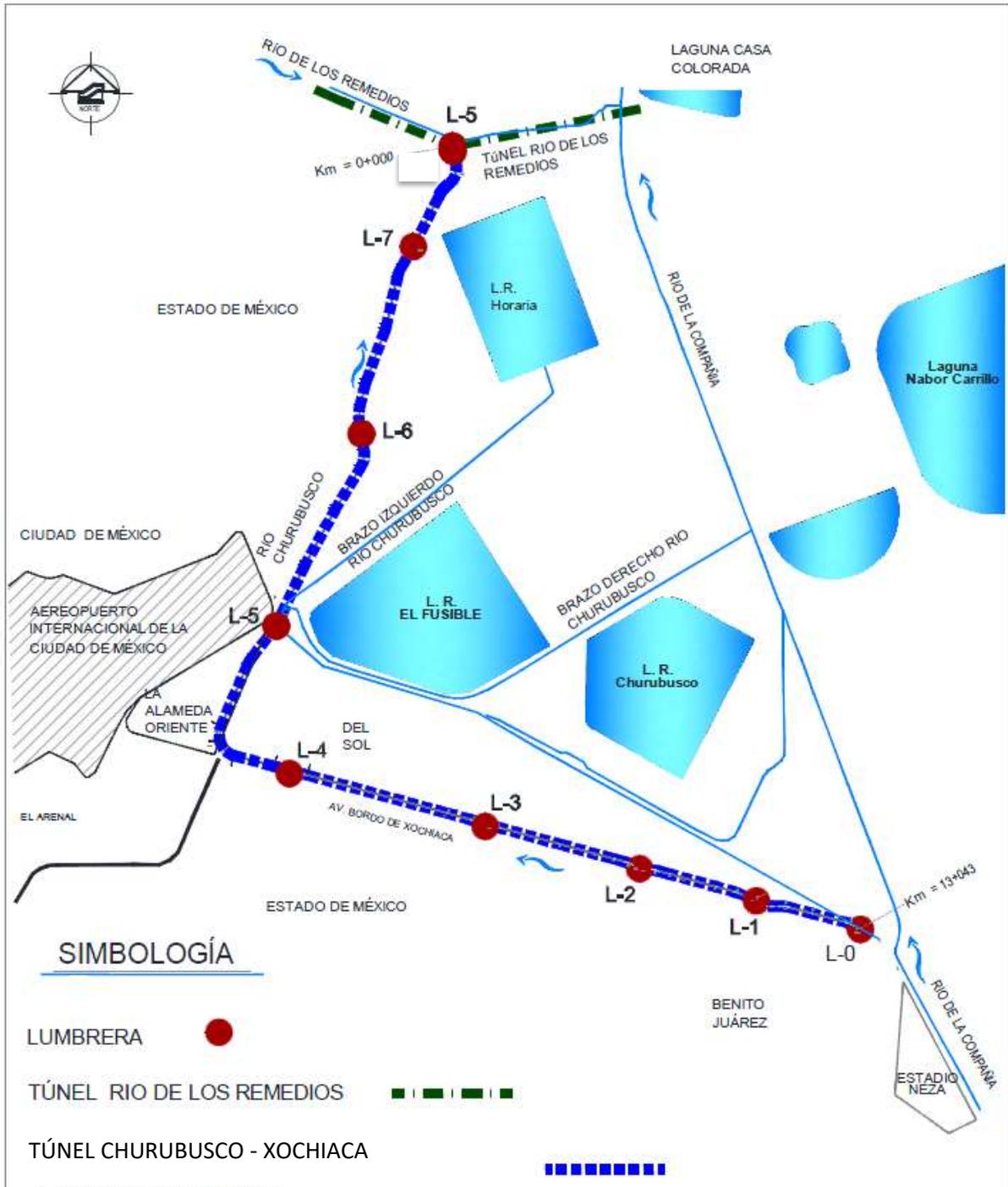


Figura II.1 Trazo de proyecto en planta del Túnel Churubusco – Xochiaca, [Cortesía ICA].

## II.1 Aspectos generales del proyecto

El Túnel Churubusco Xochiaca se desarrolla sobre la denominada zona III-d (Lacustre) acorde al RCDF, alojándose en depósitos de arcilla altamente compresible, con nivel freático subsuperficial, altos contenidos de agua, y por registrar importantes hundimientos totales y diferenciales regionales.

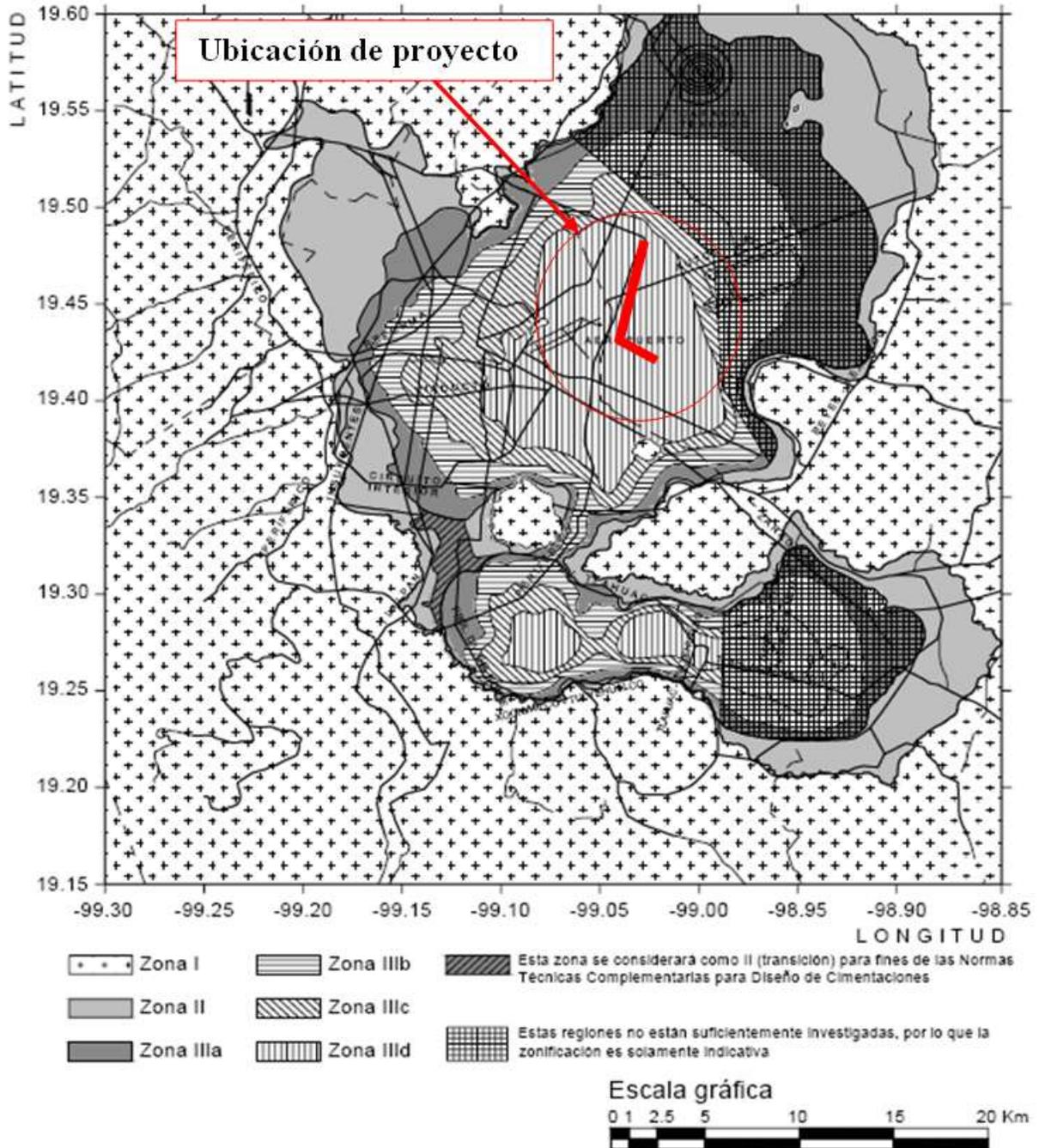


Figura II.2 Zonificación geotécnica y sísmica de la zona de estudio, [Cortesía ICA (Exploración geofísica: TRCH-GEO-GF-00)].

Aspectos generales de las condiciones hidrogeológicas:

### Costra o Manto Superficial (MS)

Estrato correspondiente a la capa más superficial, se detectó en promedio hasta los primeros 5.0 m de profundidad; se encuentra constituido por rellenos (basura), arcillas, arenas, y limos.

Dentro de este se encuentra el nivel de aguas freáticas (NAF) a una profundidad nominal de 1.60 m.

### Formación Arcillosa Superior (FAS)

Corresponde a la formación a través de la cual se excava el túnel. En promedio se detectó a partir de los 5.0 m de profundidad y alcanza espesores variables de 30.0 a 35.0 m, presenta intercalaciones de lentes de arena principalmente compuestas de ceniza y vidrio volcánico; entre estos lentes destaca un estrato de ceniza y arena volcánica fina, localizada aproximadamente a los 10.0 m de profundidad y con espesores de hasta 1.20 m. A este estrato se le conoce como la “Negra Durazo” y es uno de los marcadores estratigráficos a lo largo de todo del trazo del túnel. Las arcillas de la FAS presentan mayor contenido de agua que las FAI, desde 294% a 600% y presentan menor resistencia al corte.

### Capa Dura (1<sup>er</sup>CD)

La primera capa dura está compuesta por una serie de erupciones pumíticas relacionadas con una de las grandes erupciones del Popocatepetl; su presencia se detectó a profundidades variables que van desde los 39.0 hasta los 42.0 m, con espesores de hasta 2.0 m, y en algunos casos presenta interestratificaciones de arcillas de la FAI alcanzando espesores de hasta 6.0 m.

### Formación Arcillosa Intermedia (FAI)

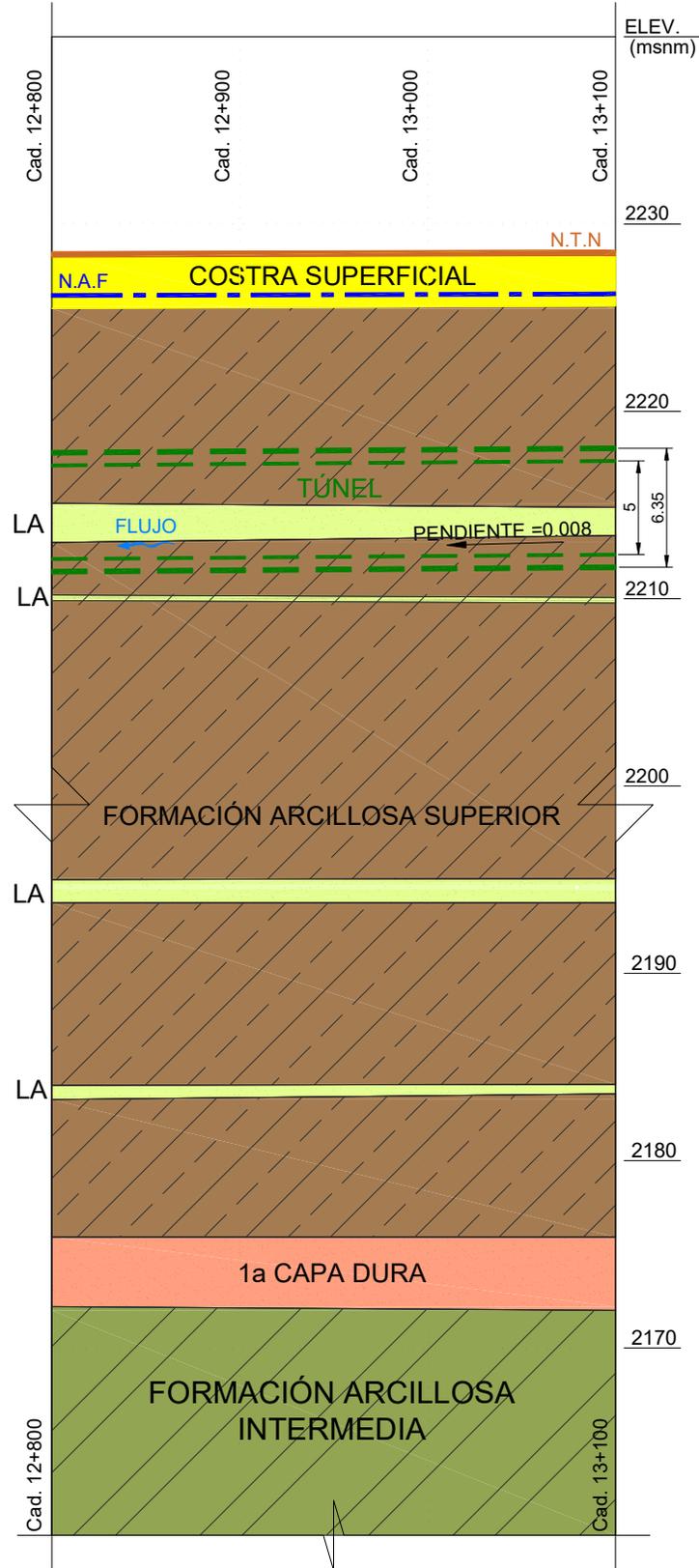
Consiste en arcillas de origen volcánico-lacustre, poco compresibles y con contenidos de agua promedio de 255%; se encuentra entre 40 y 55 m de profundidad, con espesores que oscilan desde 12 m en la zona de Periférico Oriente y Río de los Remedios, hasta más de 20 m después del Cadenamiento 11+400, interestratificada con lentes de vidrio volcánico y estratos limos-arenosos muy compactos, relacionados con la Capa Dura.

### Depósitos Profundos (2<sup>da</sup>CD)

La Segunda Capa Dura está constituida por limos, arenas finas y limosas muy compactas, de composición pumítica; se localizaron a partir de los 55 m de profundidad, posee una inclinación que la profundiza hacia el Sureste.

El área de estudio corresponde a la Región Hidrológica Núm. 26 “Pánuco”, en la que además se ubican los dos principales acuíferos relacionados: el Acuífero de la Ciudad de México, que abarca el 22% del trazo del túnel; así como el Acuífero Texcoco que abarca el 78% restante del trazo; ambos acuíferos son de tipo semiconfinado. [ICA, Estudio Geohidrológico: TRCH-GEO-GH-00,2014].

# Proceso Constructivo del Túnel Churubusco – Xochiaca



## Proceso Constructivo del Túnel Churubusco – Xochiaca

Figura II.3 Perfil estratigráfico del Cadenamiento 12+800 al 13+100, [Cortesía ICA].

La excavación del Túnel Churubusco – Xochiaca se realizó a sección circular completa (6.30 m de diámetro), empleando una tuneladora o *TBM*, este escudo tipo “EPB” (“*Earth Pressure Balance*”), que por medio de una cámara presurizada en la cabeza de la máquina, mantiene a presión una mezcla de lodo bentonítico, estabilizando así el frente de excavación; de manera paralela coloca el soporte inicial mediante segmentos de concreto ( $f'c = 350 \text{ kg/cm}^2$ ) armado prefabricados conocidos como “dovelas”, a partir de seis piezas (A1, A2, A3, B, C, y K), que forman anillos con diámetros exterior de 6.10 m e interior de 5.60 m; dichos anillos tienen 16 puntos de conexión entre anillos y, 2 entre dovela y dovela.

Las dovelas para el Túnel Churubusco-Xochiaca son prefabricadas en una planta de dovelas automatizada, ubicada en la colonia Potrero, en Ecatepec, Estado de México.

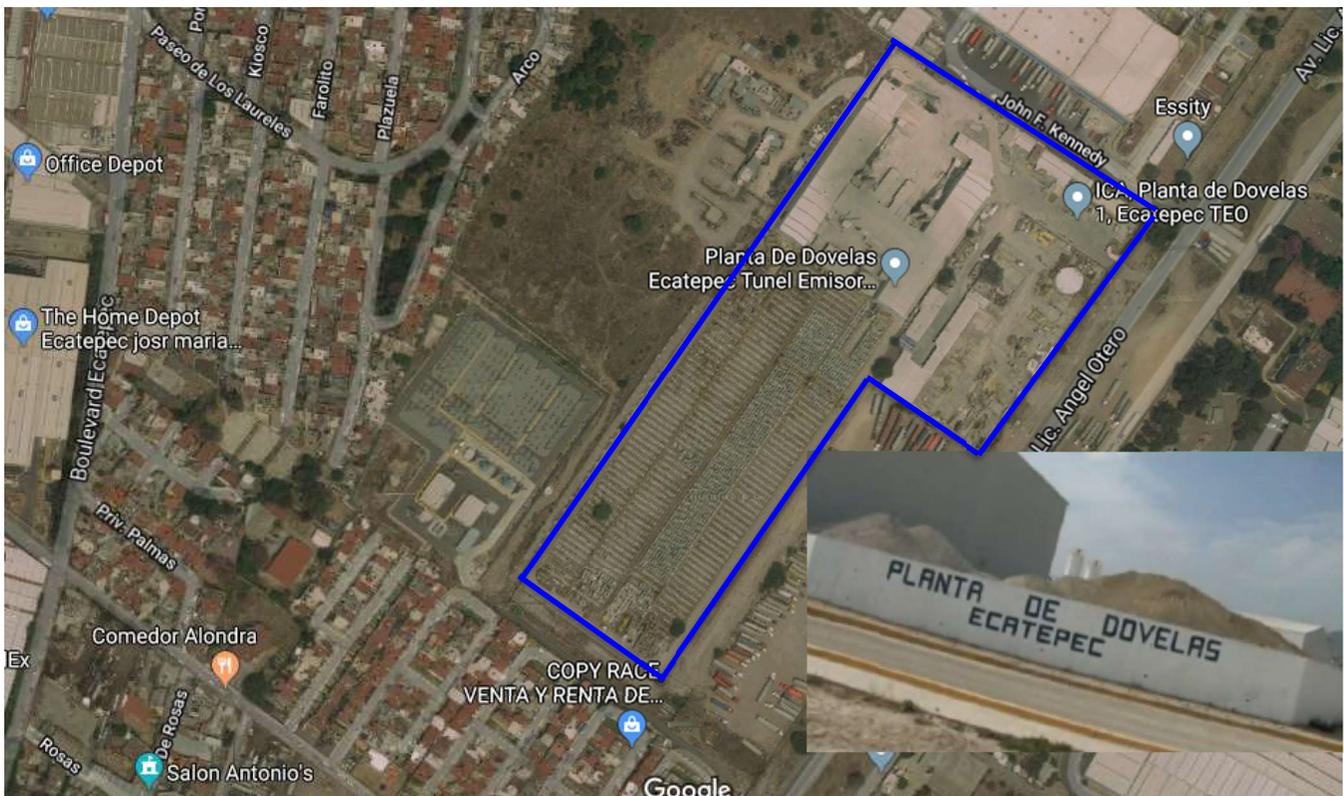


Figura II.4. Ubicación de la planta de dovelas para TCX, Ecatepec, Edo. de México, México. [Propia]

Inmediatamente después de la excavación y después simultáneamente a la misma, es inyectada una mezcla de lechada en el espacio anular generado por la excavación, entre el terreno circundante y el revestimiento de dovelas. Para la inyección de contacto (lechada) se utilizó una mezcla de mortero compuesta por cemento, agua potable, bentonita y tepetate, con una resistencia de  $2 \text{ Kg/cm}^2$ , de la cual se anexa un ejemplo (Véase Anexo).

El revestimiento final es de concreto armado con  $f'c = 350 \text{ kg/cm}^2$ , es armado y colado “*In situ*” mediante una cimbra telescópica; y su espesor es de 0.30 m, con un diámetro interior de 5.0 m y exterior de 5.60m.



## II.2 Condiciones de diseño

Basándose en la información sobre los impedimentos y solicitaciones estructurales, hidrogeológicas, y geotécnicas, a lo largo del trazo del túnel, se definieron las siguientes condiciones de diseño:

- Excavación en arcillas de alta plasticidad de baja resistencia al corte con lentes de arena  
Clasificación SUCS = CH; Cohesión  $c = 400$  a  $1500 \text{ Kg/m}^2$ ; Ángulo de fricción  $\phi = 4^\circ$  a  $10^\circ$ ;  
Módulo de elasticidad  $E = 108.3$  a  $341 \text{ ton/m}^2$ ; Contenido de agua  $w = 294\%$  a  $600\%$ ;  
Permeabilidad =  $1.91 \times 10^{-08}$  a  $3.13 \times 10^{-06} \text{ cm/s}$ ; Peso volumétrico =  $1.15$  a  $1.26 \text{ ton/m}^3$ ;  
Módulo de Poisson  $\nu = 0.33$  a  $0.45$
- NAF de 0.5 a 2.7 m de profundidad
- Gasto  $Q = 40 \text{ m}^3/\text{s}$  de aguas grises a negras;
- Longitud de túnel = 13,350 m aprox.; con  $\varnothing_{\text{ext}} = 6.10 \text{ m}$  y  $\varnothing_{\text{int}} = 5.0 \text{ m}$ ;
- Pendiente = 0.08% (=0.0008); Profundidad = 16 a 24 m; Techo o cobertura = 10.20 a 18.35 m
- Presión piezométrica al eje del túnel de 10.37 a 24.56  $\text{ton/m}^2$

[Ref. Sondeos de exploración geotécnica y Estudio Geohidrológico: TRCH-GEO-GH-00,2014, cortesía ICA].

Por a las anteriores condiciones de diseño, se eligió el procedimiento constructivo de Lumbrera por el método de flotación, debido a que con este método se controlan mejor los mecanismos potenciales de falla que afectan a las excavaciones profundas en suelos blandos arcillosos como el de la zona del túnel.

Se seleccionó el método de excavación mediante tuneladora tipo EPB, debido a que las características ideales que el suelo debe tener para que la EPB trabaje adecuadamente son las propias del suelo a excavar:

- Alta deformación plástica
- Consistencia pastosa a suave
- Baja fricción interna
- Baja permeabilidad

Para la elección del escudo se consideran varios parámetros, que nos ayudarán para seleccionar claramente cuál es el ideal, ya que cada túnel tiene características propias.

Se considerarán los siguientes parámetros:

- Trazo y Perfil: Indica la longitud total a excavar por el escudo, el ángulo de giro (tanto horizontal como vertical) que debe ser capaz de brindar el escudo, tomando en cuenta:
  - Distancia entre lumbreras (TCX= de 960 metros a 2465 metros)
  - Profundidad de lumbreras (TCX= de 16 metros a 24 metros)
  - Radios de curvatura mínimos horizontales y verticales (TCX  $r_{\text{ch}} = 300 \text{ m}$   $r_{\text{cv}} = 0 \text{ m}$ )
  - Pendiente (TCX=0.0008)

- Geométrico: Ayudará en el dimensionamiento adecuado del escudo, tomando en cuenta:
  - Diámetro de excavación (TCX=6.30 m)
  - Diámetro exterior de dovela (TCX=6.30 m)
  - Diámetro interior de dovela (TCX=5.60 m)
  - Espesor de dovela (TCX=0.25 m)
  - Ancho de dovela (TCX=de 1.45 a 1.50 m)
  - Número de segmentos del anillo de dovelas (TCX=6 piezas)
  - Diámetro interior terminado del túnel (TCX=5.0 m)
  - Espesor del revestimiento definitivo (TCX=0.30 m)
  - Diámetro de lumbreras (TCX=12.0 m)
  
- Geotécnico: Con base en la información geotécnica podemos elegir el tipo de tuneladora, tomando en cuenta:
  - Perfil geológico.
  - Características físicas y mecánicas del suelo o rocas.
  - Presiones de agua y tierra en el frente de excavación.
  - Tamaño máximo de suelo.
  - Mineralogía del suelo.
  - Grado de abrasión del suelo.

Además de tomar en cuenta estos parámetros debemos de realizar diversos análisis que nos ayudarán a elegir al adecuado de entre varios fabricantes, como los siguientes:

### Análisis de la Propuesta Económica del Fabricante.

- Precio del escudo. (\$166' 468,760.00)
- Precio de los diferentes sistemas y equipos opcionales.
- Fletes.
- Impuestos de importación.
- Valor de recompra.
- Forma de pago o Financiamiento.
- Servicios post venta.
- Capacitación.
- Viáticos, transportes y hospedajes (de ser el caso).
- Garantías.

### Análisis de la propuesta técnica de los Fabricantes

- Componentes y mecanismos.
- Capacidades y rendimientos
- Consumos. (electricidad, combustibles y lubricantes, herramientas de corte, etc.)
- Versatilidad para incrementar capacidad.
- Componentes incluidos y adicionales.
- Sistemas de control.
- Tiempos de fabricación.
- Tiempos de ensamble del escudo.
- Tiempos de excavación
- Tiempos de mantenimiento preventivo y correctivo.

Una vez que se seleccionó el tipo de escudo y se finalizó el análisis (técnico y económico) se empieza con el diseño de las instalaciones requeridas para el buen funcionamiento de la tuneladora elegida.

De acuerdo con el tipo de tuneladora elegida y sus demandas, es necesario determinar las instalaciones que se requieren para su operación, como:

- Energía eléctrica (Subestación eléctrica, transformadores y planta generadora de emergencia),
- Iluminación
- Ventilación
- Aire comprimido
- Agua
- Durmientes y vías
- Cárcamo y tuberías de rezaga
- Tolvas en superficie
- Instalaciones de control y comunicación
- Elevador de personal y equipo
- Muros de reacción.

Es conveniente determinar dichas instalaciones en conjunto con el fabricante y revisar el equipo auxiliar que se requiere para la adecuada operación de la máquina y sus capacidades.

El no realizar los análisis antes mencionados de manera minuciosa puede traer como consecuencia:

- Mal funcionamiento del escudo.
- Falta de capacidad en las instalaciones.
- Sobre costos en el total de maquinaria auxiliar requerida.
- Sobre costo en las instalaciones en túnel, lumbrera y superficie.
- Sobre costo en los consumos.
- No lograr los rendimientos esperados.
- No soportar adecuadamente los precios unitarios durante su elaboración.

Con la elección del tipo de excavación se determinaron también los revestimientos:

## Proceso Constructivo del Túnel Churubusco – Xochiaca

---

- Revestimiento primario con dovelas – Ya que el escudo considerado tiene la capacidad de colocar las dovelas al mismo que tiempo que va excavando, y su avance es óptimo.
- Revestimiento final con cimbra telescópica – Se desliza este tipo de cimbra generando la opción más eficaz en este tipo de túnel.

Dichos revestimientos fueron diseñados bajo su análisis con software como SAP2000, y Plaxis, teniendo en cuenta los tiempos entre el revestimiento inicial y el final; siguiendo las normas establecidas en el RCDF y sus normas técnicas complementarias. (Límite máximo permisible = 3.166 cm)

Además, se debe considerar un tramo inicial que suele tener una longitud de 200 a 250 m y constituye la denominada sección de "curva de aprendizaje", donde todo el equipo de TBM obtendrá un aprendizaje práctico del proceso de excavación y el control de la TBM.

## II.3 Maquinaria y equipo empleado

Como ya se mencionó, para la excavación del túnel se utilizó una tuneladora o *TBM* tipo *EPB*, de sección circular ( $\varnothing= 6.30$  m), marca Herrenknecht AG, modelo HK-S364, caracterizada por la presurización controlada del frente de excavación para equilibrar los efectos de la excavación sobre el terreno; equipada con una cabeza giratoria con herramientas de corte de tungsteno, y un sistema erector que permite colocar el soporte inicial del túnel formado por dovelas prefabricadas de concreto reforzado.

A continuación, se presentan las características más importantes (Ver Tabla II.2).

Tabla II.2. Ficha técnica del escudo (HK-S364) del Túnel Churubusco – Xochiaca, [Cortesía ICA].

|                                  |                                  |
|----------------------------------|----------------------------------|
| 1. Cuerpo del escudo             |                                  |
| a) Diámetro                      | 6.30 metros                      |
| b) Longitud total                | 12.55 metros                     |
| c) Sello del faldón              | Cepillo de Alambre               |
| a. Filas                         | 3                                |
| 2. Empuje                        |                                  |
| a) Número de cilindros           | 16 piezas                        |
| b) Extensión máxima de cilindros | 2.30 metros                      |
| c) Velocidad máxima de extensión | 2.0 m/min                        |
| 3. Cabeza cortadora              |                                  |
| a) Tipo                          | Dentada<br>(Cuchillas rozadoras) |
| b) Sentido de rotación           | Derecha o Izquierda              |
| c) Diámetro de excavación        | 6.30 metros                      |
| d) Herramientas                  |                                  |
| Cuchillas rozadoras              | 116 piezas                       |
| Sobresaliente de cuchillas       | 0.10 m                           |
| Rastrillos                       | 16 piezas                        |
| 4. Articulación                  |                                  |
| a) Tipo                          | Con cilindros                    |
| b) Carrera de cilindros          | 1.50 metros                      |
| c) Número de cilindros           | 14 piezas                        |
| 5. Radios de curvatura (máximos) |                                  |
| a) Horizontal                    | 300 metros                       |
| b) Vertical                      | 800 metros                       |

## Proceso Constructivo del Túnel Churubusco – Xochiaca

---

### 6. Especificaciones de la cabeza cortadora

|                                 |           |
|---------------------------------|-----------|
| a) Tipo de energía              | Eléctrica |
| b) Potencia eléctrica instalada | 450 KW    |
| c) (6x 75KW)                    |           |
| d) Velocidad máxima             | 1.7 rpm   |
| e) Fuerza de torsión máxima     | 2814 KN·m |

### 7. Tornillo sin fin

|                                      |                                |
|--------------------------------------|--------------------------------|
| a) Ángulo (respecto a la horizontal) | 24°                            |
| b) Tipo de manejo                    | Hidráulico                     |
| c) Ancho nominal                     | 0.70 metros                    |
| d) Longitud total                    | 10.80 metros                   |
| e) Velocidad máxima                  | 22 rpm                         |
| f) Fuerza de torsión máxima          | 217 KN·m                       |
| g) Capacidad                         | 197 m <sup>3</sup> /h (η=100%) |
| h) Compuerta                         | 1 – hidráulica                 |

### 8. Erector de dovelas

|                          |  |
|--------------------------|--|
| a) Tipo                  | Hidráulico de brazo telescópico (centro libre) |
| b) Sistema de agarre     | Mecánico                                       |
| c) Velocidad máxima      | 2 rpm  |
| d) Grados de libertad    | 6  |
| e) Ángulo de giro        | ± 220°   |
| f) Mecanismo de sujeción | Placa auxiliar y cilindro tensor               |

### 9. Puertos de inyección de lodo bentonítico

|                     |                        |
|---------------------|------------------------|
| a) Plenum/mamparo   | 12 puertos de Ø=0.05 m |
| b) Tornillo sin fin | 5 puertos de Ø=0.04 m  |

La figura II.6 muestra los componentes del escudo EPB (HK-S364) utilizado en la excavación del Túnel Churubusco-Xochiaca.

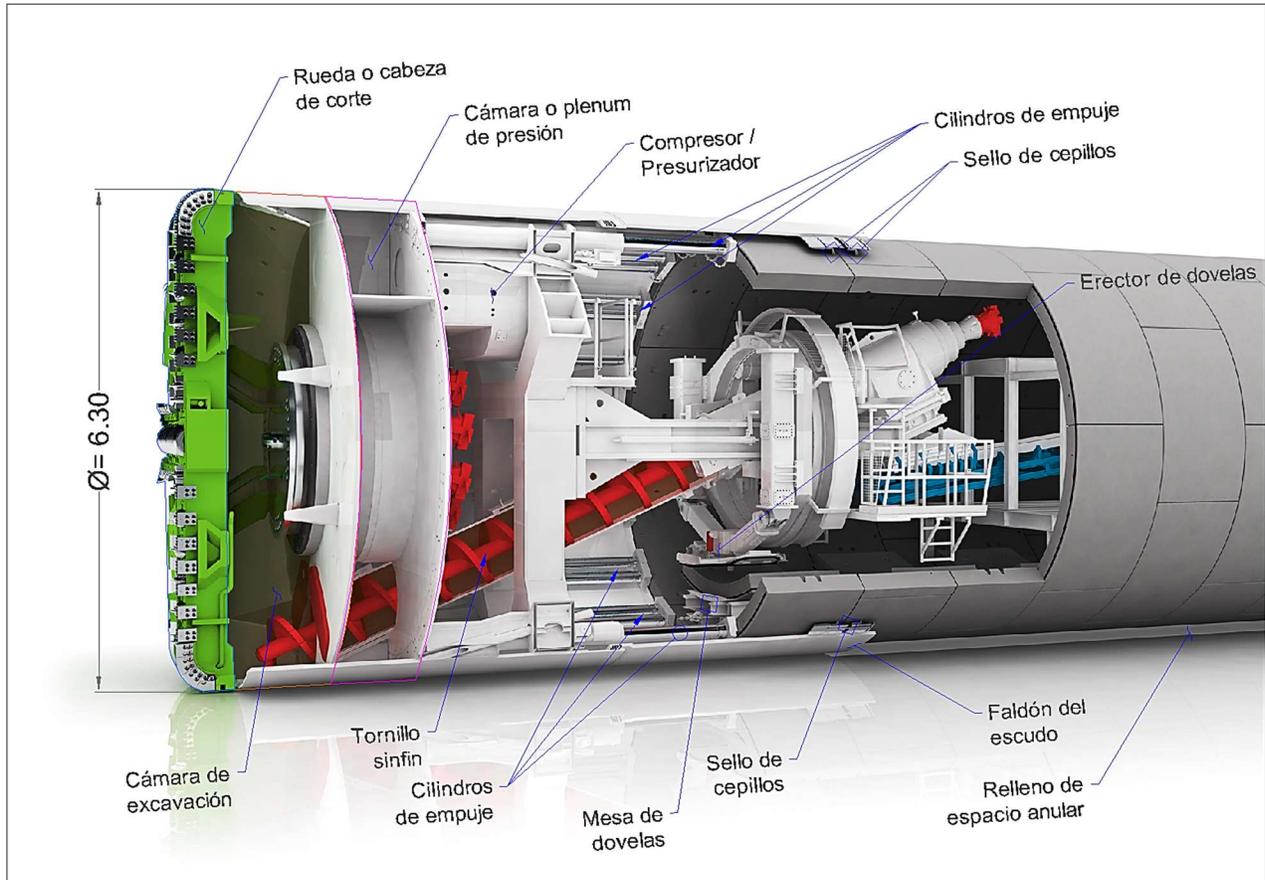


Figura II.6. Componentes del escudo EPB (HK-S364), [Elaboración propia, basado en cortesía de Herrenknecht].

### Subestación eléctrica para tuneladora

Esta subestación para intemperie cuenta con capacidad total de 21612.5 KVA repartida en 3 transformadores de 2000 KVA, 112.5 KVA, y 500 KVA, y voltaje de 10,000 V, 220 V, y 440 V respectivamente; a su vez cada transformador cuenta con su respectivo tablero eléctrico.



Figura II.7. Subestación eléctrica, ubicada en patio de Lumbraera, [Cortesía Ing. Daniel Lara].



Figura II.8. Subestación eléctrica, ubicada en patio de Lumbraera, [Cortesía Ing. Jairo Trujillo].

## Proceso Constructivo del Túnel Churubusco – Xochiaca

---

Los componentes del Back-up y sus características principales se muestran en la Tabla II.3.

Tabla II.3. Componentes del back-up del escudo del Túnel Churubusco – Xochiaca, [Cortesía ICA].

|                                |             |  |
|--------------------------------|-------------|--|
| <b>1. Carros</b>               |             |  |
| a) Cantidad                    | 5 piezas    |  |
| b) Longitud total              | 75.0 metros |  |
| <b>2. Grúa de dovelas</b>      |             |  |
| a) Carga útil                  | 5,000 Kg    |  |
| b) Velocidad de elevación      | 7.60 m/min  |  |
| c) Recorrido                   | 3.0 m       |  |
| d) Velocidad de desplazamiento | 40.0 m/ min |  |



Figura II.9. Grúa (Polipastos de cadenas) para dovelas del escudo EPB (HK-S364), [Propia]

### 3. Sistema de Inyección

|                    |                                      |
|--------------------|--------------------------------------|
| a) Tipo            | Inyección simultanea                 |
| b) Mortero         |                                      |
| a. Tanque agitador |                                      |
| Cantidad           |                                      |
| Capacidad          | 1 pieza                              |
| b. Bomba           | 4.0 m <sup>3</sup>                   |
| Cantidad           |                                      |
| Gasto máximo       | 2 piezas<br>25.0 m <sup>3</sup> /hr. |



Figura II.10. Tanque de mortero de inyección del espacio anular del escudo EPB (HK-S364), [Propia]



Figura II.11. Bomba de inyección del escudo EPB (HK-S364) bajo el tanque de mortero, [Propia]

#### 4. Sistema de agua

---

|              |                        |
|--------------|------------------------|
| a) Capacidad | 9.0 m <sup>3</sup>     |
| b) Bomba     |                        |
| Cantidad     | 2 pieza                |
| Capacidad    | 12.0 m <sup>3</sup> /h |



Figura II.12. Sistema de agua del escudo EPB (HK-S364), ubicado en patio de Lumbrera 2, [Propia]

### 5. Sistema de aire comprimido

---

a) Compresor

|                  |                                     |
|------------------|-------------------------------------|
| Potencia         | 30 KWatts                           |
| Presión del aire | 8 bar (81577.30 kg/m <sup>2</sup> ) |
| Gasto            | 5.0 m <sup>3</sup> /min             |
| Depósito         | 1.0 m <sup>3</sup>                  |



Figura II.13. Sistema de aire comprimido del escudo EPB (HK-S364), [Propia]

### 6. Ventilación (KORFMANN)

---

|             |                         |
|-------------|-------------------------|
| a) Flujo    | 5.0 m <sup>3</sup> /min |
| b) Diámetro | 0.81 metros             |

---

El cassette de ventilación suministra el ducto circular de lona para la extensión del TBM.



Figura II.14. Sistema de ventilador "Korfmann" del escudo EPB (HK-S364), [Propia]



Figura II.15. Cassete de ventilación del escudo EPB (HK-S364), [Propia]

Para los casos donde el suministro de flujo de aire es rebasado debido a la longitud del túnel, es necesaria la instalación de otro ventilador para que el aire llegue hasta donde está el TBM; como fue el caso del tramo de Lumbrera 2 a Lumbrera 0



Figura II.16. Ventilador intermedio ubicado en el Cad. 12+400 (tramo L2-L0), [Propia]

7. Electricidad

|                              |           |
|------------------------------|-----------|
| a) Tensión de mando          | 18.5 KW   |
| b) Iluminación               | 110 V     |
| c) Batería de emergencias    | 24 V      |
| d) Potencia de transformador | 2000 KV·A |
| e) Tensión primaria          | 10KV      |
| f) Tensión secundaria        | 460 V     |
| g) Frecuencia                | 60 Hz     |



Figura II.17. Carretes de extensión de las líneas eléctricas del escudo EPB (HK-S364), [Propia]



Figura II.18. Carretes de extensión de las líneas eléctricas del escudo EPB (HK-S364), [Propia]

### 8. Bomba de rezaga

|                     |                      |
|---------------------|----------------------|
| a) Tipo             | Pistón               |
| b) Cantidad         | 2                    |
| c) Capacidad máxima | 60 m <sup>3</sup> /h |



Figura II.19. Bomba de extracción de rezaga del escudo EPB (HK-S364), [Propia]



Figura II.20. Sistema de extensión de tubería de rezaga del escudo EPB (HK-S364), también llamada “Snorkels” [Propia]

Se describirá a continuación cómo es que funciona una *EPB*, para entender un poco más su forma de trabajo.

El proceso de excavación se inicia cuando gira la rueda de corte, penetra y rompe el suelo del frente de excavación, gracias al empuje transmitido desde los cilindros de empuje del escudo; inmediatamente

## Proceso Constructivo del Túnel Churubusco – Xochiaca

tras ser cortado, el material excavado debe ser capaz de fluir a través de las aberturas de la cabeza de corte hacia la cámara de excavación (en esta cámara el terreno se mezcla con lodo bentonítico).

En suelos con baja resistencia cortante es necesario aplicar presión en la cámara de excavación con objeto de estabilizar el frente (como es caso del suelo en la zona del Túnel Churubusco-Xochiaca).

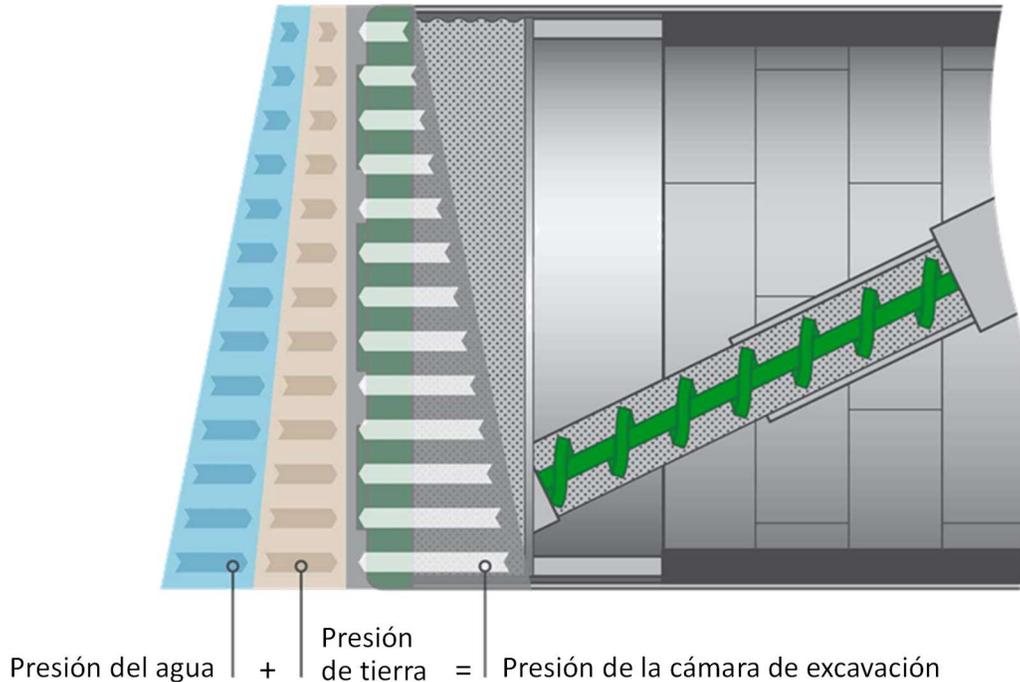


Figura II.21. Esquema del balance de presiones del escudo EPB (HK-S364), [Cortesía Herrenknecht]

La presión de la cámara de excavación se controla en el puesto de mando sirviéndose de los sensores de presión, y corresponderá a la presión de suelo a excavar.



Figura II.22. Interior de la cabina de control del escudo EPB (HK-S364), [Propia]

### Presiones de frente

Si la presión de la cámara de excavación se incrementa por encima del estado de equilibrio, podría tener lugar una elevación del terreno delante del escudo; en cambio sí se reduce la presión, el suelo podría penetrar descontroladamente la cámara de excavación y ocurrir asentamientos en la superficie.

El material excavado se transporta por medio del tornillo sinfín fuera de la cámara de excavación hasta la bomba de extracción, de ahí a superficie a un cárcamo de rezaga (275 m<sup>3</sup>) para su disposición final.

Una forma usual para regular la presión de tierra durante el avance es cambiando la velocidad del tornillo sinfín, la presión de tierra baja cuando la tierra se transporta el material excavado a una alta velocidad del sinfín, y se incrementa cuando se transporta más lento; debido a que la fuerza resultante de presión depende de que tanto material es removido, y también de la densidad del material excavado.

Por ello, es de crucial importancia mantener la densidad del material suficientemente baja en la cámara, para minimizar la fuerza de empuje.

Para el avance de la tuneladora se dispone en la estructura del escudo de un total de 16 cilindros (gatos hidráulicos) ordenados en la periferia del escudo, y actúan a través de una zapata sobre la estructura del anillo de dovelas.



Figura II.23. Cilindros superiores del escudo EPB (HK-S364), [Propia]

Al ir avanzando se efectúa la colocación de las dovelas sirviéndose del erector, que sujeta un perno roscado montado en la dovela mediante una placa auxiliar y un cilindro tensor; la dovela a ser colocada se coloca en su posición y se une con pernos al último anillo, antes de que el erector suelte la dovela deberán extenderse los cilindros aprisionando la dovela. Siguiendo este mismo proceso se colocan todas las dovelas que conforman un anillo.



Figura II.24. Colocación de dovela con el erector del escudo EPB (HK-S364), [Propia]



Figura II.25. Perno roscado del escudo EPB (HK-S364), [Propia]

Dado que regularmente se produce una sobrexcautación (también denominada “gap”), dicho espacio es rellenado inmediatamente con mortero por medio de inyectoros embebidos en la cola del escudo.

Al final de la cola del escudo una junta de cepillos obtura a la TBM entre el escudo y el último anillo de dovelas construido. Las tuberías de inyección de mortero integradas en la camisa de la cola del escudo procuran la inyección del espacio anular de excavación. La inyección de mortero permite controlar la deformación del suelo, y ofrece a las dovelas el confinamiento necesario para trabajar como un anillo estanco.

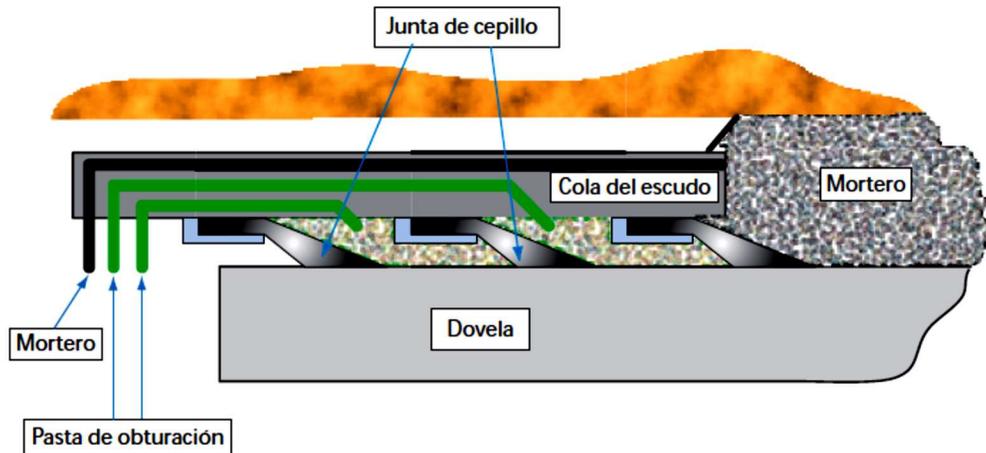


Figura II.26. Inyección de mortero y sello de cepillos del escudo EPB (HK-S364), [Cortesía Ing. Eduardo Zaragoza]

La posición y dirección del escudo es controlada por el equipo de guiado VMT y verificada por topografía convencional.

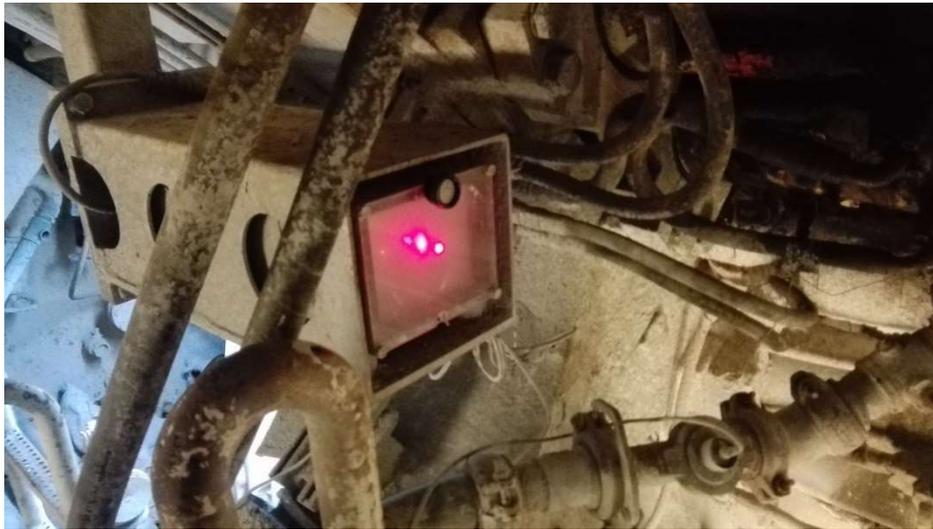


Figura II.27. Equipo de guiado del escudo EPB (HK-S364), [Propia]

El primer objetivo del proceso de excavación es que se haga con el menor desgaste de herramientas; cuanto mayor es la presión de la cámara de excavación, mayores serán el torque de la rueda de corte y el desgaste de herramientas, lo que puede repercutir en una disminución de la velocidad de avance.

Es importante mencionar que en el tramo del túnel donde en la zona de excavación se encuentra con un lente de arena de espesor mayor a 0.50 m (Cad. 11+012.5 hasta Lumbrera 0), se agregó un polímero líquido de base orgánica, con elevada capacidad de absorción de agua hasta 200 veces su propio peso llamado “Mapedrill SA1”; confiriendo al material de excavación la plasticidad adecuada para proceder fácilmente a la manipulación y traslado de rezaga.

Se utilizó en una relación de 5 litros de Mapedrill por cada 1000 litros de agua, para esto se usaron recipientes tipo “tótem”.



Figura II.28. Tótems de polímero Mapedrill, [Propia]

La tubería de atraque sirve para dar apoyo a la tuneladora mientras transita el interior lumbrera y continuar con la excavación; se observará en la figura siguiente que se arma también un medio túnel para no interrumpir el acceso al frente de trabajo.



Figura II.29. Tubos de atraque [Cortesía ICA]

En la planta de dovelas, para los trabajos de soldadura en el habilitado de armado del acero de refuerzo de las dovelas, se cuenta con una planta para soldar de la marca Miller, modelo Deltaweld 452 y un alimentador de alambre de la misma marca.



Figura II.30. Capacitor de soldadura Miller, modelo Deltaweld 452. [Cortesía ICA]



Figura II.31. Alimentador de alambre Miller. [Cortesía ICA]

Una grúa viajera tipo monopunte con capacidad para 5 toneladas, marca HAWI traslada el armado listo de la dovela, de la mesa en que fue construida hacia una mesa giratoria tipo "Carrusel", en donde se apila de acuerdo con su tipo; la mesa contiene 6 divisiones, una para cada tipo de dovela (A1, A2, A3, B, C, K) a fin de facilitar su transporte e instalación en los moldes correspondiente.



Figura II.32. Grúa viajera HAWI tipo monopunte. [Cortesía ICA]

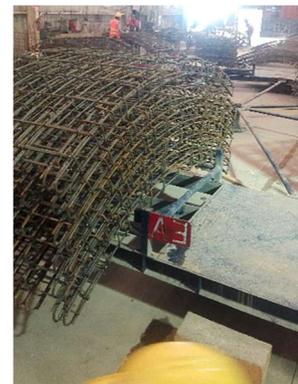


Figura II.33. Carrusel de dovelas, [Propia]

Con la ayuda una grúa de menor tamaño (capacidad para 1.5 toneladas), se toma el acero requerido de la mesa giratoria y se coloca dentro del molde correspondiente.



Figura II.34. Grúa transportadora de armado de dovelas a moldes correspondientes, [Propia]

En el cuarto para caldera se encuentra con un espacio reservado para el compresor de aire, marca KAESER modelo DSD 200, el cual suministra aire a las diferentes estaciones de trabajo de la planta.



Figura II.35. Compresor de aire marca KAESER, modelo DSD 200, [Cortesía ICA]

Para el cerrado de los moldes se utilizan pistolas neumáticas de 3/4", marca Chicago Pneumatic, modelo CP772H.



Figura II.36. Pistola neumática de aire, marca Chicago Pneumatic, modelo CP772H [Cortesía Chicago Pneumatic]

Para la generación de concreto en la planta de dovelas se cuenta con dos plantas de concreto, marca ODISA 5LP de procedencia mexicana, pudiendo alcanzar una capacidad de producción de 75 m<sup>3</sup>/hr.

La planta dosificadora está compuesta por tolvas de almacén de agregados (12 m<sup>3</sup>), silo almacén de cemento (20 Toneladas), báscula para pesaje de agregados, báscula para pesaje de cemento, báscula para pesaje de agua o contenedor de agua, banda transportadora, compresor de aire, tablero de fuerza y control, así como la estructura donde se localizan todos los componentes.

## Proceso Constructivo del Túnel Churubusco – Xochiaca

Se cuenta además con 2 silos para cemento con capacidad de 100 Toneladas cada uno, de la marca Hércules, fabricados en México.



Figura II.37. Planta móvil para la fabricación de concreto [Cortesía ICA]

Para el proceso de colado se cuenta con una cámara diseñada especialmente para este fin, sus dimensiones son de 7.0 m x 5.6 m, cuenta con puertas automáticas, instalaciones de aire a presión, y aislamiento acústico entre la cámara y la cabina de mando.

En la cabina de mando se tiene el control sobre la dosificación y vaciado del concreto, también se encuentran los controles del sistema de vibrado, y de las temperaturas de la cámara de curado.



Figura II.38. Cámara de colado de dovelas. [Propia y Cortesía ICA, Ing. Eduardo Zaragoza]

## Proceso Constructivo del Túnel Churubusco – Xochiaca

Las dimensiones de la cámara de curado son de 53.0 m x 10.0 m con capacidad para 30 moldes. Y funciona a través de un generador de vapor, el cual a su vez cuenta con dos tanques de almacenamiento para diésel de 40,000 litros y 25,000 litros de agua.



Figura II.39. Entrada de moldes a la cámara de curado de dovelas. [Cortesía ICA]



Figura II.40. Reingreso de etapas y salida de moldes a la cámara de curado de dovelas. [Cortesía ICA]

Para la generación de vapor se cuenta con una caldera (vaporizador), marca “Clayton”, Modelo E100

Tabla II.4. Características principales del Vaporizador Clayton E100, [Cortesía ICA].



Figura II.41. Caldera o Vaporizador Clayton, mod. E100. [Cortesía ICA]

|                                  |      |
|----------------------------------|------|
| Modelo                           | E100 |
| Flujo de Vapor [Kg/hr]           | 1566 |
| Suministro neto de calor [Watts] | 981  |
| Largo [m]                        | 2.13 |
| Ancho [m]                        | 1.50 |
| Altura [m]                       | 2.51 |
| Peso [Kg]                        | 2175 |

Con el apoyo de la grúa con ventosas se procede a retirar la dovela del molde asegurándose que el equipo funcione correctamente y verificando que los brazos laterales de la ventosa abracen la dovela para prevenir la caída de ésta en caso de desprendimiento, posteriormente se envía al equipo volteador.



Figura II.42. Grúa con ventosas. [Propia]

Después del desencofrado de la pieza, esta es transportada hacia un volteador de dovelas, el cual le da un giro de 180°.



Figura II.43. Equipo volteador de dovelas. [Propia]

Una vez girada se coloca en un carro de desalajo con elevador que recibe la dovela y la transporta a los siguientes puntos de revisión.



Figura II.44. Carro con elevador para desalojo de dovelas. [Cortesía ICA]

Una grúa tipo monopunte de la marca HAWI, 10 toneladas de capacidad, con una pinza para 1 dovela, realiza un pre-acopio de las dovelas, estribando 3 dovelas, y preparando así su transporte al patio de pre-almacenamiento.



Figura II.45. Grúa monopunte con pinza para dovela. [Cortesía ICA]

Una grúa tipo portal (o pórtico) de 50 m de claro, 24 toneladas de capacidad, es operada con mando inalámbrico a lo largo de 250.0 m para el almacenamiento “X” en el patio de dovelas de la planta y para la colocación en los camiones de transporte que llevarán las dovelas a las diferentes lumbreras.



Figura II.46. Grúa tipo portal de 50 m de claro, 24 toneladas de capacidad, [Cortesía ICA]

Para la energía eléctrica de planta de dovelas se cuenta con una subestación que tiene 3 transformadores, dos de ellos con capacidad de 1000 KVA y voltaje de 240 V y 440 V, y uno más de 500 KVA con voltaje 220 V y 110 V.

Los transformadores de 1000 KVA están asignados a cada una de las naves de la planta, lo que incluye el funcionamiento de los generadores de vapor, plantas dosificadoras, plantas de soldar, carrusel de fabricación de dovelas, compresores, grúas pórtico y viajeras.

Mientras que el de 500 KVA es destinado a la iluminación de la planta y las oficinas, así como para los servicios generales e iluminación de los patios de almacenaje.

A su vez cada transformador cuenta con su respectivo tablero eléctrico para el control de cada una la maquinaria de las naves.



Figura II.47. Subestación de energía eléctrica de la planta de dovelas, [Cortesía ICA]

Para la manipulación de cargas en los diversos frentes de obra se utilizaron grúas con capacidad de hasta 80 toneladas, las cuales se describen a continuación.

Grúa marca Liebherr, modelo HS-853 HD, ancho ajustable de 4.60 m a 4.90, largo de 11.86 m más el largo de la pluma, y 3.45 m de alto; cuenta con una capacidad de carga útil máxima de 80.0 ton



Figura II.48. Grúa Liebherr HS 853 HD, [Cortesía ICA]

Grúa marca Linkbelt, modelo 138 HSL, ancho ajustable de 4.23 m a 5.97, largo de 11.43 m más el largo de la pluma, y 3.35 m de alto; cuenta con una capacidad de carga útil máxima de 80.0 ton



Figura II.49. Grúa Liebherr 138 HSL, [Propia]

La almeja guiada (bivalva) es una cuchara formada por dos quijadas accionada hidráulicamente, fijada a una barra metálica deslizante llamada “Kelly” que sirve de guía control de la verticalidad del sistema. Este equipo va montado sobre grúas de 45 o más toneladas de capacidad y puede alcanzar profundidades del orden de los 30 m.

El cucharón está equipado con dientes que facilitan la penetración en el terreno, así como su disgregación y piezas de desgaste fáciles de cambiar; el cierre debe ser perfecto para evitar que se vacíe. Con este tipo de maquinaria no se permite ni la rotación del cucharón, ni la desviación de la verticalidad. Se deja caer abierta sobre el material a excavar, hincándose así; se cierran las quijadas, tomando dentro de ellas el material a excavar y se extrae.

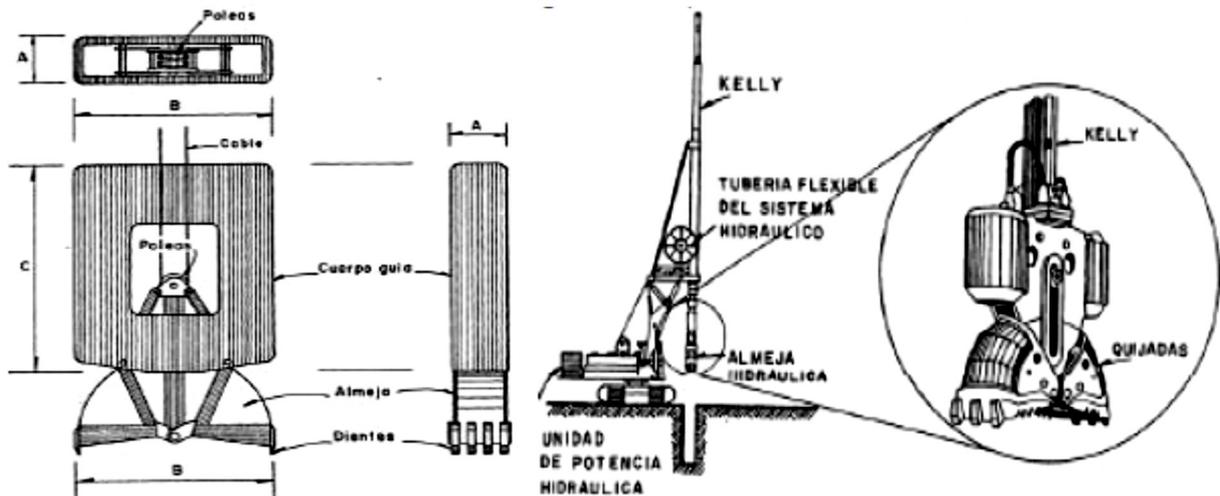


Figura II.50. Almeja guiada [Cortesía ICA]

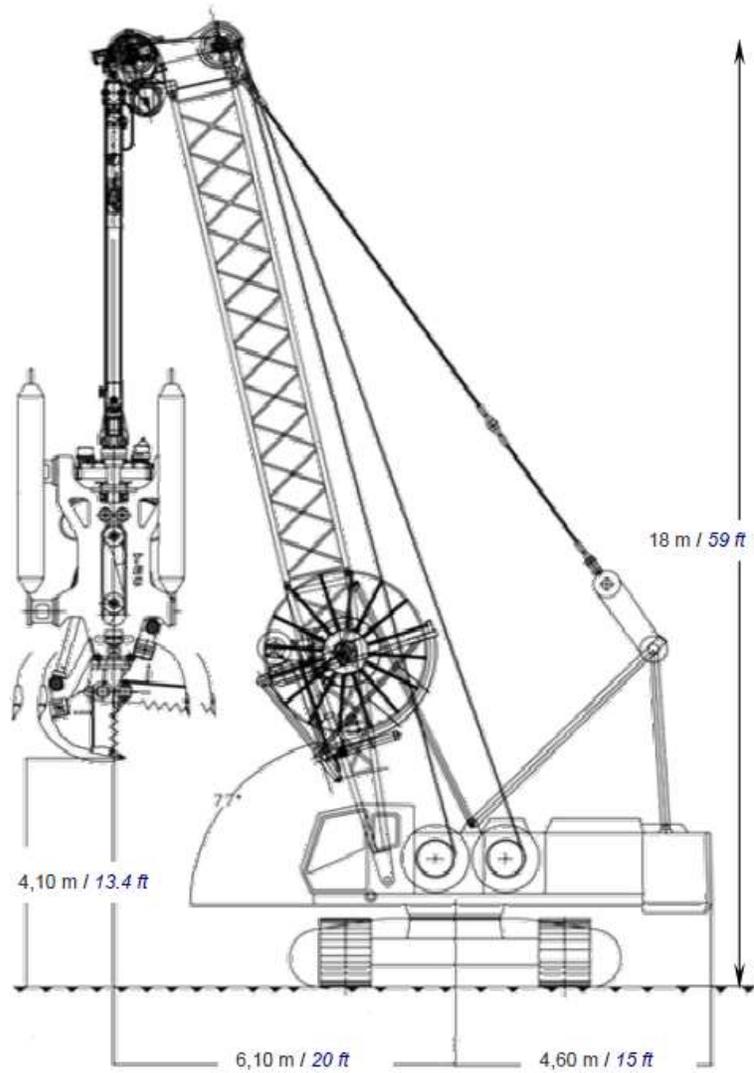


Figura II.51. Grúa con equipo guiado “Kelly” y almeja hidráulica BAYA de TEC Systems, [Cortesía ICA]



Figura II.52. Almeja guiada [Cortesía ICA, Ing. Daniel Falcao]



Figura II.53. Almeja guiada, [Cortesía ICA, Ing. Victor Yeo]

La almeja “loca” se utiliza para el proceso de excavación del núcleo de la lumbrera, donde al caer por gravedad se entierra al terreno natural, para después escarbar el terreno cerrando la almeja (y posteriormente retirar el material excavado al cárcamo de rezaga).



Figura II.54. Almeja loca, [Cortesía ICA, Ing. Daniel Falcao]



Figura II.55. Almeja loca, [Cortesía ICA, Ing. Daniel Falcao]

La excavadora marca Caterpillar (CAT), modelo 320, es utilizada principalmente para cargar los camiones de volteo, con el material producto de la excavación que se encuentra en el cárcamo de rezaga. Además de excavar los primeros metros de los núcleos de lumbreras y zanjas; también es conocida como “mano de chango”.



Figura II.56. Excavadora Caterpillar 320, [Cortesía Catterpillar]

Las retroexcavadoras son utilizadas de múltiples maneras, como el acarreo, carga de materiales a camiones, excavación de zanjas diversas (máx. 4.3 m Prof.), movimiento de tierras, preparación del terreno; también es conocida como “Páchara”.



Figura II.57. Retroexcavadora marca Caterpillar, modelo 416F, [Cortesía ICA]



Figura II.58. Retroexcavadora marca Komatsu, modelo 13X, [Cortesía ICA]

## Proceso Constructivo del Túnel Churubusco – Xochiaca

Para el control riguroso de la resistencia a la compresión y calidad del concreto en sitio, se tiene una planta de concreto, marca CIFA , modelo FIVETECH 2330, en la cual los agregados se introducen a través de un sistema de cintas transportadoras hasta las tolvas de alimentación, y les se descargan en la báscula según la computadora de la planta, y se transportan por otra cinta hasta la mezcladora, el agua y los aditivos se añaden mediante alimentadores controlados automáticamente, el cemento pasa de los silos a la báscula de dosificación situada bajo el silo principal y controlada por la computadora de la planta; comenzando el mezclado de todos los materiales de la mezcla.

Esta planta de concreto puede producir 130 m<sup>3</sup>/h, y tiene una mezcladora de doble eje horizontal y cuatro tolvas de agregados en línea con una capacidad de almacenamiento de 95 m<sup>3</sup> y un silo divisible de 100 toneladas.



Figura II.59. Planta de concreto, [Propia]

### Bomba de concreto

Una bomba de alto alcance suministra el concreto desde la superficie hacia el interior del túnel por medio de una línea de conducción, este equipo debe estar orientado en dirección a donde se realizará el colado. De marca Putzmeister, modelo BSA-14000, cuenta con una fuerza de 630 HP dando una capacidad de 37 a 88 m<sup>3</sup>/hr, puede bombear hasta 1200 m en horizontal y 600 m en vertical.



Figura II.60. Bomba de concreto Putzmeister BSA 14000, [Propia]

## Proceso Constructivo del Túnel Churubusco – Xochiaca

La grúa HIAB es una grúa articulada de capacidad de 6 toneladas montada sobre camión con plataforma de 6 m, utilizada para el transporte de diversos materiales y equipos.



Figura II.61. Grúa HIAB, modelo 6 ton, [Propia]

Se utilizaron camiones de volteo con una caja (14 m<sup>3</sup>) donde se conecta un sistema hidráulico para poder rotar dicha caja, para transportar y descargar, una cantidad muy diversa de materiales.



Figura II.62. Grúa HIAB, modelo 6 ton, [Cortesía ICA]

Las motobombas sumergibles, utilizadas para el achique del agua, también llamadas tipo “becerro”; puede mover un caudal de hasta 15.5 m<sup>3</sup>/hr.

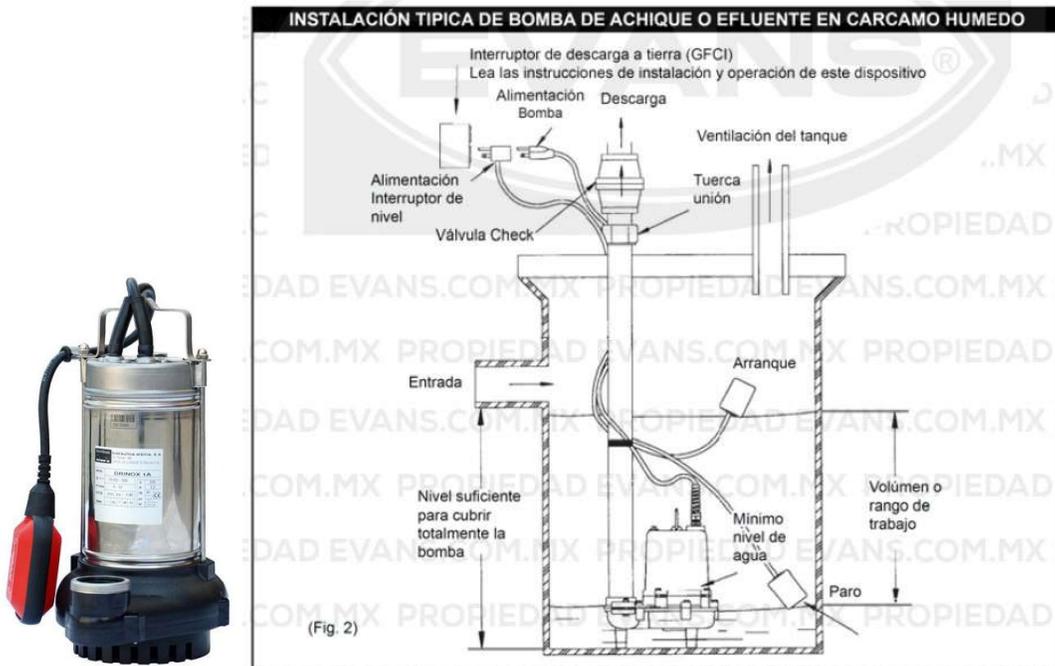


Figura II.63. Motobomba sumergible, [Cortesía ICA].

El sistema de Tubería “Tremie” (Tubo-embudo) consiste en una tubería estanca, generalmente de unos 0.25 m de diámetro interior, con una tolva cónica en su extremo superior; puede tener un tapón suelto o una válvula en el extremo inferior. Se utiliza para colocar el lodo fraguante o concreto a la parte inferior y este va desplazando por densidad el material.

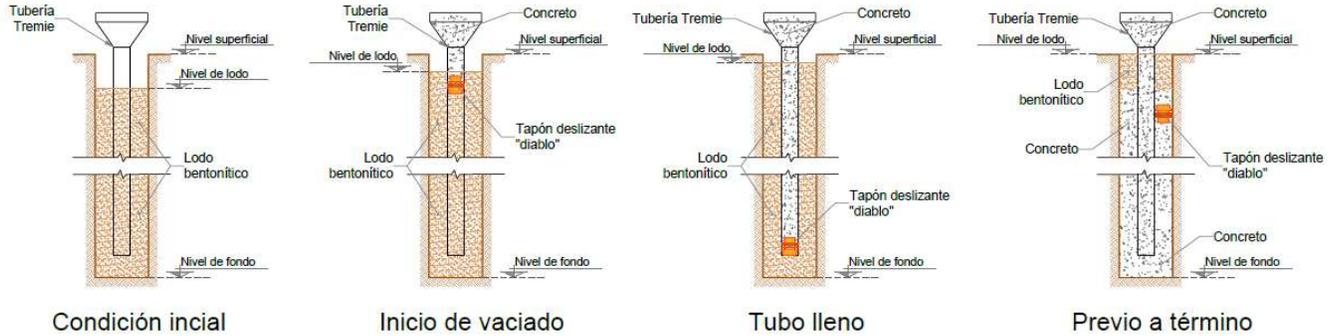


Figura II.64. Esquema de proceso de colado con Tubería Tremie y ademe de lodo bentonítico, [Propia].

Se introduce un tapón o vejiga deslizante llamado también “diablo”, en el extremo superior de la tubería Tremie antes de empezarlo a llenar con concreto; tiene la función primordial de evitar el deslavado, la segregación y contaminación del concreto.

Se usa una bola de espuma de poliuretano para limpiar la tubería al finalizar cada utilización.



Figura II.65. Tapón Suelto “Diablo”, [Cortesía ICA].



Figura II.66. Bola de poliuretano, [Cortesía ICA].



Figura II.67. Tubería Tremie, [Cortesía ICA].

## Proceso Constructivo del Túnel Churubusco – Xochiaca

### Locomotora

Para el transporte de personal, dovelas, y materiales y equipo diverso en el interior del túnel, se utiliza una locomotora, Marca Schöma (Lokomotiven), modelo CEL-40, no. de serie 6687; con un largo de 5.0 m más los brazos de conexión, y un peso de 9.5 toneladas, cuenta con sistema de manejo eléctrico, útil para un sistema de rieles de 36" y convertible a 24".

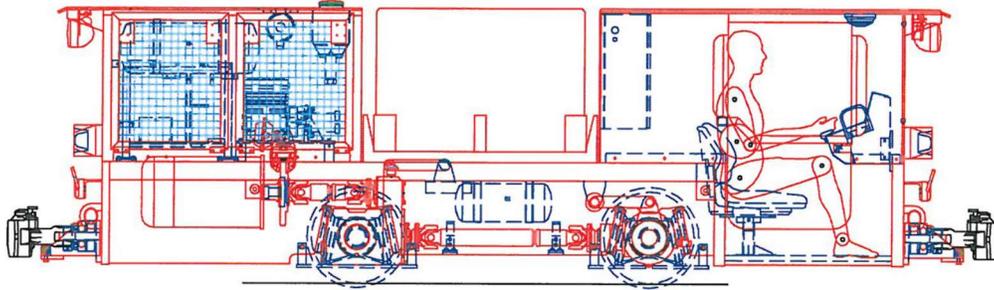


Figura II.68. Locomotora eléctrica Schöma, modelo Cel-40, [Cortesía ICA, Ing. Eduardo Zaragoza]



Figura II.69. Locomotora eléctrica Schöma, modelo Cel-40, [Cortesía ICA, Ing. Eduardo Zaragoza]

La plataforma “lowboy” también conocido como remolque de cama baja, es una plataforma que nos ayuda a transportar o remolcar objetos pesados, gracias a su especial forma; tienen una gran capacidad de carga, soportan desde 10 toneladas hasta 100 toneladas.



Figura II.70. Plataforma tipo “Lowboy”, [Propia]

El camión revolvedora (conocido también como “mixer”/ mezclador), consiste en un camión equipado con un tambor en el cual por medio de aspas se mezclan y homogenizan el cemento, grava, arena y agua; elaborado el concreto se descarga por la tolva o canal de descarga, tiene una capacidad de 7 m<sup>3</sup>.



Figura II.71. Revolvedora de concreto de camión, [Propia]

Las mezcladoras de concreto tienen una olla de 0.25 a 0.38 m<sup>3</sup> de capacidad, también es conocida como “trompo”, la cual vierte el concreto a tiro directo bajo la olla.



Figura II.72. Revolvedora de concreto CIPSA, [Propia]

Para la generación de energía eléctrica se usó un equipo electrógeno marca Cummins, que genera hasta 300 KW por medio del trabajo de un motor a base de diésel; se utilizan como una alternativa a la energía suministrada por el cableado, cuando esta falla o existe algún déficit.



Figura II.73. Generador de energía eléctrica Cummins, [Propia].

Para la iluminación de algunos frentes de trabajo se utilizaron torres de iluminación marca: Wacker Neuson, modelo LTV6, equipadas con cuatro bombillas de 1,100 watts.



Figura II.74. Planta eléctrica, [Propia]

El compresor de marca Gardner Denver que se encargó de suministrar el aire comprimido hacia la cimbra para el funcionamiento de los vibradores, pistolas neumáticas y limpieza de la línea de colado.



Figura II.75. Compresor Gardner Denver, [Cortesía ICA].

Para el colado del revestimiento definitivo se empleó una cimbra telescópica, Marca MOLDEQUIPO, Modelo MEI-7344/2017. El molde es metálico totalmente auto soportable y está fabricado para las siguientes presiones hidrostáticas de concreto:

- Arco superior 7,500 Ton/m<sup>2</sup>.
- Cubeta y paneles laterales 5,000 Ton/m<sup>2</sup>.

Esta estructura en general se caracteriza por los siguientes componentes, y/o características:

1. Longitud total ensamblada: 45 m (formado por cinco módulos).
2. Longitud total de cada módulo: 9 m.
3. Número de articulaciones (en el sentido transversal, ensamblado cada módulo): 3.
4. Número de secciones para desplazamiento, por módulo y ya ensamblado: 2 (uno lo conforman las “cubetas” y el segundo los hastiales en conjunto con la clave).
5. Grúa pórtico.
6. Una trabe carril sobre grúa pórtico; estos dos elementos conforman el “Transportador”.
7. Piernas de apoyo colocadas radialmente.
8. Ventanas para vaciado de concreto, colocadas en hastiales y clave en tresbolillo.

Como se indica, cada módulo de 9 m se forma por una la sección superior (hastiales y clave), y la sección inferior (únicamente cubeta). Como se muestra en la Figura II.76, la sección inferior tiene una articulación sobre el eje de la cubeta que permite cerrar hacia adentro las piezas (en la Figura II.77 se muestra el pasador de sujeción para esta acción, y en la Figura II.78 el paso de ensamble y desmolde). En la misma Figura II.76 se muestra la sección superior con dos articulaciones que en el mismo modo cierra los hastiales hacia el centro (Figura II.78), mientras que la clave es soportada por la grúa pórtico y trabe carril. Para el trabajo de cimbra, cuando se ensamblan las secciones superior e inferior, estas se conectan como se indica en la Figura II.76 (conexión fija atornillada).

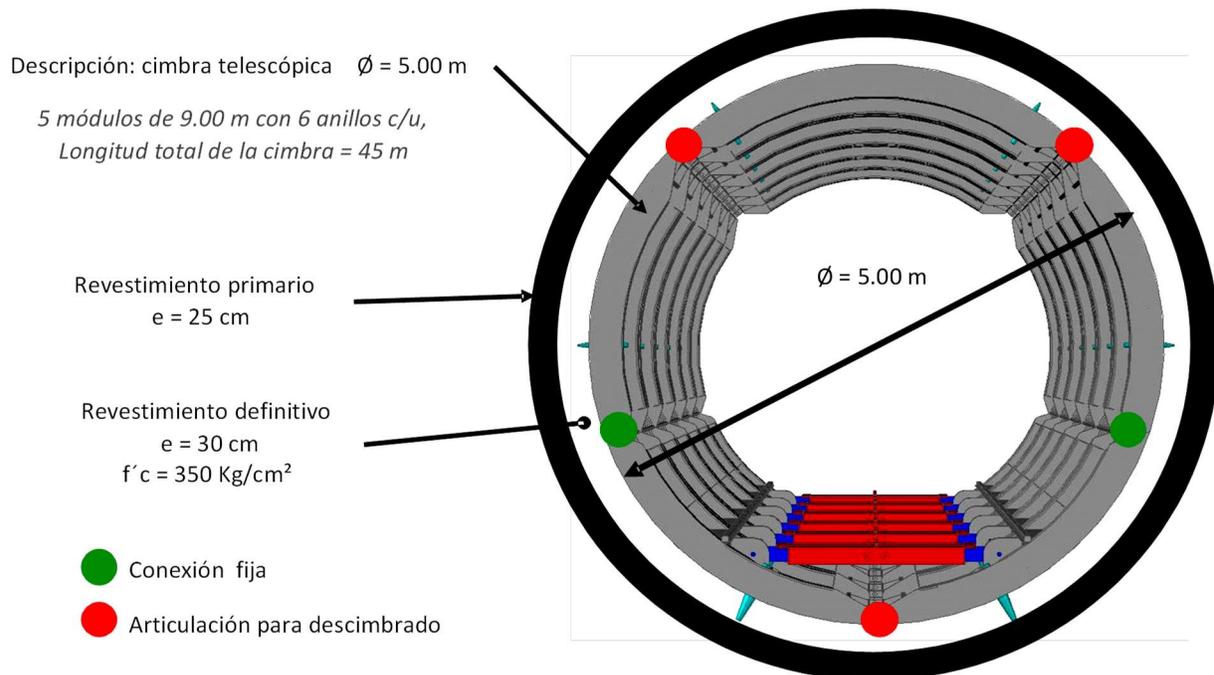


Figura II.76. Cimbra telescópica (Sección frontal, identificación de juntas articuladas y conexiones fijas), [Cortesía ICA]

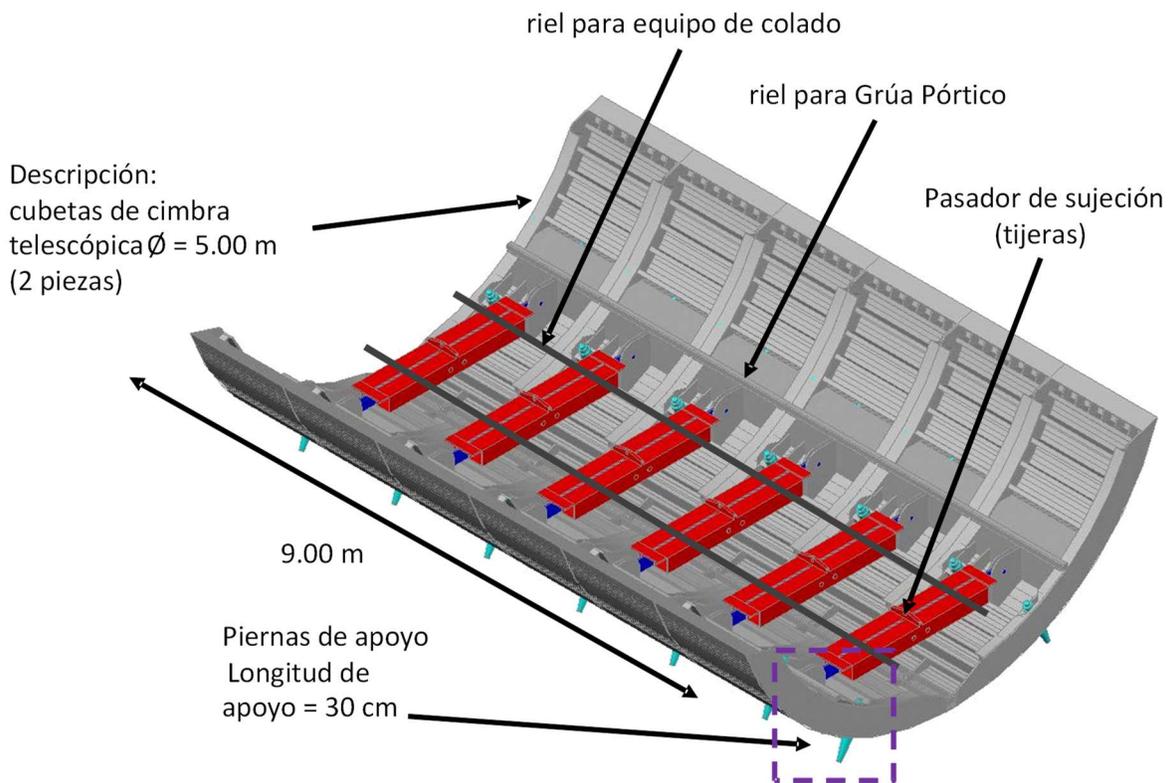


Figura II.77. Módulo inferior (cubeta) de la cimbra telescópica, [Cortesía ICA]

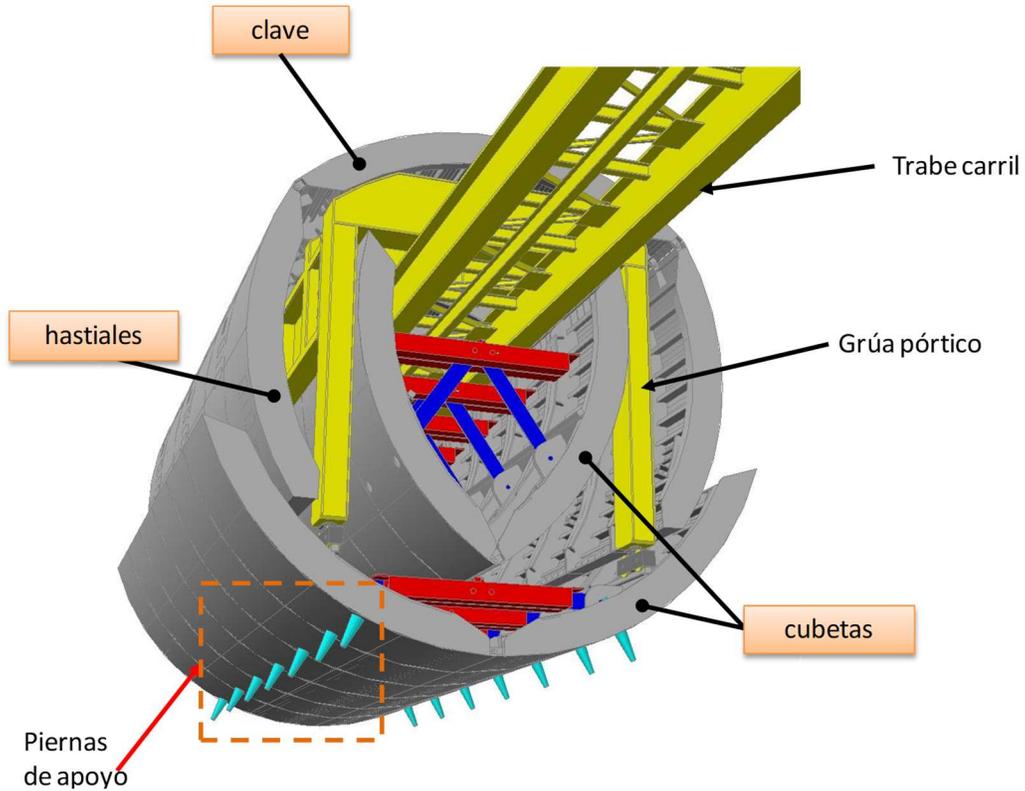


Figura II.78. Cimbra telescópica en posición de desmolde, [Cortesía ICA]

Como resumen de la cimbra telescópica, se enlista como sigue:

- 90 ventanas de inspección y vibrado localizadas en forma alternada en los paneles laterales y de clave en diferentes alturas y posiciones.
- Conexión atornillada entre panel lateral y cubeta, contando con pernos de cortante encasquillados.
- 30 escotillas de inspección y vibrado localizadas en todos los paneles de cubeta en forma alternada.
- Soportes para vibradores ubicándolos a cada 1.50 metros aproximadamente cada uno de ellos.
- 75 boquillas para inyección de concreto, incluyendo válvulas de guillotina en cada una de ellas.
- 70 puntales cónicos ajustables de apoyo inferior, montados sobre camisas roscadas de barra hueca localizados en los paneles de cubeta de forma alternada.
- 30 puntales cónicos ajustables para evitar la flotación del Molde, localizados alternadamente en los paneles laterales.
- 30 puntales verticales superiores para evitar la flotación del Molde, localizados alternadamente en los paneles de clave.
- Pernos de alineación, ubicados en el perímetro de conexión entre módulos para facilitar la maniobra de interconexión de módulos entre sí, se incluyen 6 pernos por cada módulo.

### Grúa pórtico y trabe carril

Es el equipo integrado a la cimbra metálica que permite el armado y traslado de los componentes de esta (laterales o muros, clave y cubeta) hacia su nueva posición colado tras colado.



Figura II.79. Grúa pórtico y trabe carril, [Cortesía ICA]



Figura II.80. Grúa pórtico y trabe carril, [Propia]

Las plumas de izaje y control para el tanque de flotación se fabricaron con tubería de acero de 6" de diámetro, en las cuales se instalaron un sistema de polipastos, controlados por un malacate manual para poder maniobrarlo de acuerdo con las necesidades de cada etapa de inmersión de la lumbrera; estas plumas van ancladas al brocal exterior.

## Proceso Constructivo del Túnel Churubusco – Xochiaca



Figura II.81. Plumas de izaje y control,  
[Cortesía ICA, Arq. Lizbeth Vazquez V.]



Figura II.82. Plumas de izaje y control,  
[Cortesía ICA, Arq. Lizbeth Vazquez V.]

El Tanque de flotación es una estructura metálica de forma cilíndrica, utilizada para la construcción de la lumbrera flotada; se fabricó a base de ángulos de  $2\frac{1}{2}''$  y  $4\frac{1}{4}''$ , reforzados en cada nodo o intersección con placas circulares de  $\frac{1}{4}''$  de espesor de 0.60 m de diámetro, y se forró en su exterior con placa de  $\frac{1}{4}''$  de espesor.

Como complemento a la fabricación del tanque se colocan ménsulas de apoyo en el perímetro superior del tanque a base de placas de  $0.20 \times 0.20$  m y  $7/8''$  de espesor, en estos puntos se colocaron las traveses de sujeción.



Figura II.83. Fabricación de tanque de flotación,  
[Cortesía ICA, Arq. Lizbeth Vazquez V.]



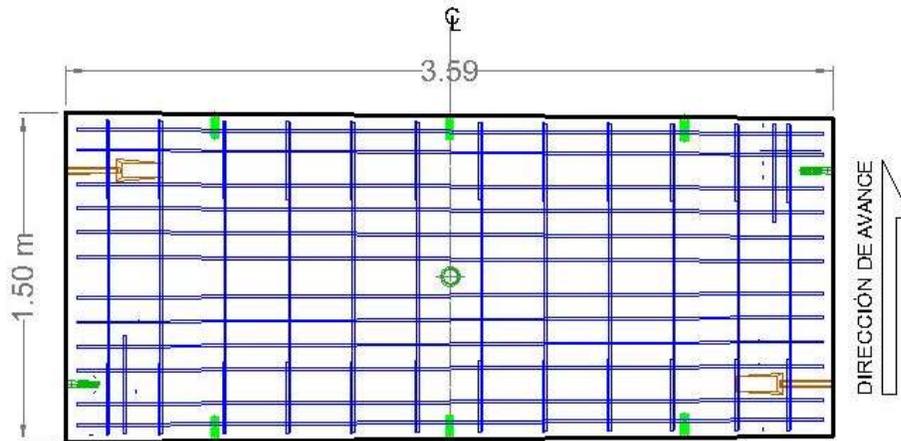
Figura II.84. Ménsula de tanque de flotación,  
[Cortesía ICA, Arq. Lizbeth Vazquez V.]



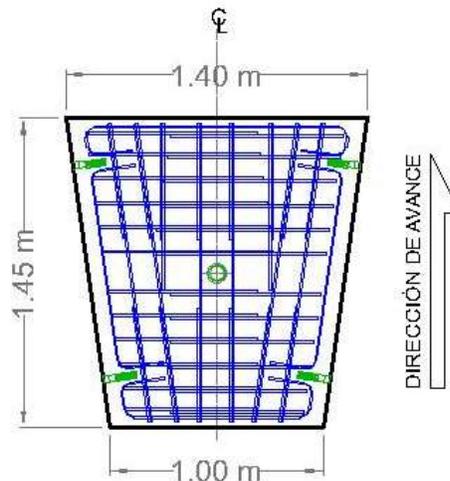
Figura II.85. Tanque de flotación, [Cortesía ICA, Arq. Lizbeth Vazquez V.]

## II.4 Dovelas

Las dovelas son elementos estructurales prefabricados de concreto armado en forma de arcos, que montadas en conjunto forman anillos troncocónicos, lo que permite el trazado de curvas, tanto horizontales como verticales, gracias a las diferentes posiciones en las que se puede colocar este anillo; a este anillo lo conforman seis dovelas: “A1”, “A2”, “A3”, “B”, “C”, y la dovela llave (Key) “K” o cuña, las cuales se fabricaron de 0.25 m de espesor, formando un anillo de 6.10 m de diámetro exterior y 5.60 m de diámetro interior.



DOVELA A1, A2 y A3. Planta (Vista Superior)



DOVELA K. Planta (Vista Superior)

Figura II.86. Geometría de dovelas “A1”, “A2”, “A3”, y “K”) del Túnel Churubusco-Xochiaca [Cortesía ICA].

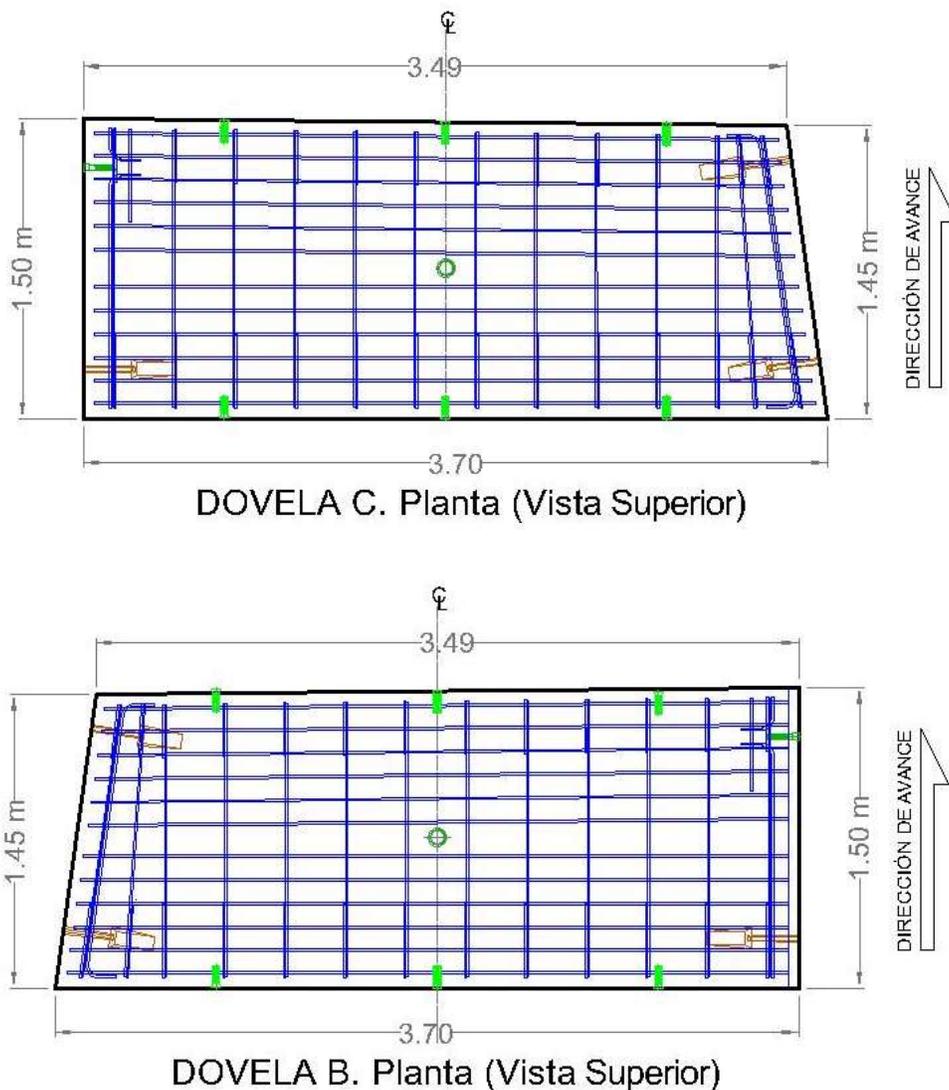


Figura II.87. Geometría de dovelas “B” y “C” del Túnel Churubusco-Xochiaca [Cortesía ICA].

La tabla II.4.1 desglosa el tipo, y características de un anillo de dovelas.

Tabla II.4.1 Características de anillos de dovelas, [Cortesía ICA].

1. Dovelas de concreto reforzado

|                                 |                    |
|---------------------------------|--------------------|
| a) Diámetro externo             | 6.10 metros        |
| b) Diámetro interno             | 5.60 metros        |
| c) Espesor                      | 0.25 metros        |
| d) Ancho                        | 1.45 a 1.50 metros |
| e) Número de dovelas por anillo | 5 piezas + 1 K     |
| f) Peso máximo por anillo       | 19, 000 Kg         |

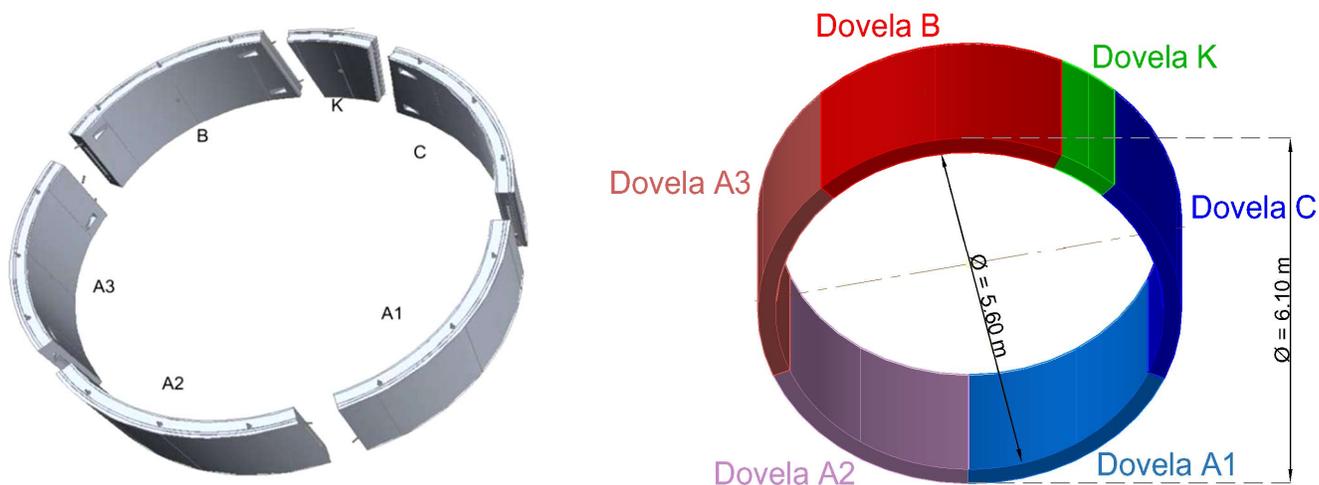


Figura II.88. Conformación de anillo de dovelas del Túnel Churubusco-Xochiaca [Cortesía ICA].

Los anillos de dovelas son el sistema de revestimiento primario, y apoyo de la TBM en la fase del avance de excavación; una vez finalizado el habilitado de cada anillo, se realiza un empuje sobre el anillo de dovelas por medio de cilindros hidráulicos hacia el frente en excavación, avanzando así del escudo.

Como se mencionó, la planta de dovelas cuenta con un conjunto mecánico de moldes que se desplazan sobre rieles de manera cíclica, lo que permite la rotación de los moldes entre una línea de trabajo y tres líneas paralelas de curado a vapor; permitiendo una producción continua de dovelas, de 16 a 18 anillos diarios (en dos turnos por día), con un total de 42 moldes (7 anillos completos). El ciclo total de un molde es de poco más de 8 horas, de las cuales permanece aproximadamente 6 horas en la cámara de curado.

Dentro de la línea de trabajo se destacan estaciones de trabajo con actividades diferentes en cada una de ellas, en donde a través de una cadena y trinquetes, los moldes se van moviendo en forma automática y pasan por cada una de las etapas del proceso. Este sistema consiste en las actividades siguientes:

1. Limpieza del molde
2. Colocación del desmoldante
3. Habilitado del acero de refuerzo
4. Colocación de insertos, separadores, y armado dentro del molde.
5. Colocación de concreto hidráulico
6. Enrasado y pulido de la cara externa de la dovela
7. Lavado exterior del molde.
8. Curado a vapor.
9. Desmolde de la pieza y retiro de la dovela.
10. Girado de la pieza para después ser estribadas.
11. Aparentado y colocación de número, tipo de pieza y fecha de producción.
12. Estribado de 3 dovelas y pre-almacenaje de la pieza en el patio de la planta.
13. Estribado de anillo completo y almacenaje en patio central.

A continuación, se muestra el esquema del funcionamiento de la planta y sus ciclos de trabajo.

## Proceso Constructivo del Túnel Churubusco – Xochiaca

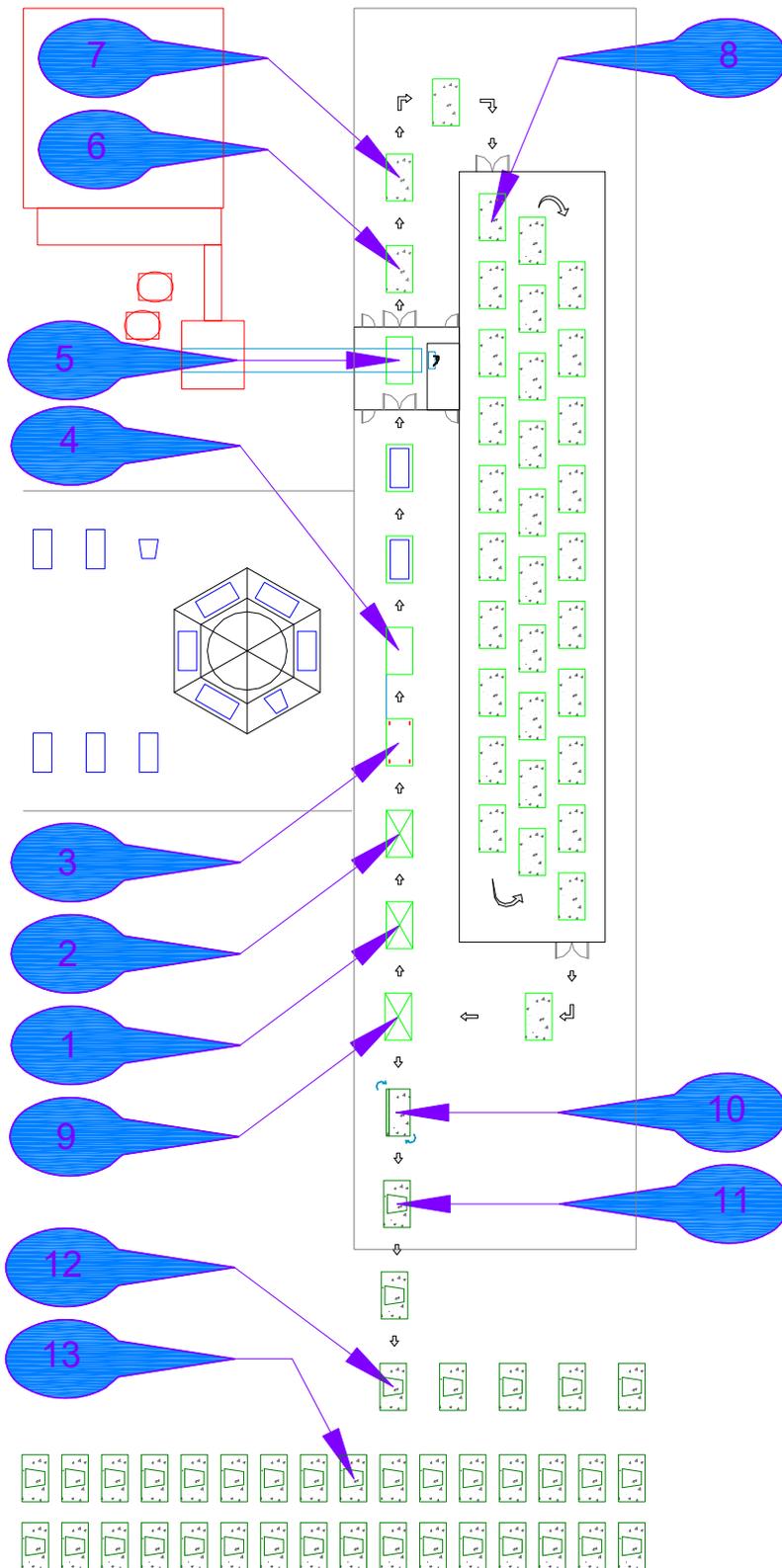


Figura II.89. Esquema de proceso y estaciones de trabajo de la planta de dovelas para el Túnel Churubusco-Xochiaca [Elaboración propia].

1. Limpieza del molde
2. Colocación del desmoldante.
3. Colocación de insertos dentro del molde.
4. Colocación de armado y separadores del armado.
5. Colocación de concreto hidráulico.
6. Enrasado y pulido de la cara externa.
7. Lavado exterior del molde.
8. Curado a vapor.
9. Desmolde de la pieza y retiro de la dovela.
10. Girado de la pieza para después ser estribadas.
11. Aparentado y colocación de número, tipo de pieza y fecha de producción.
12. Estribado de 3 dovelas y pre-almacenaje de la pieza en el patio de la planta.
13. Estribado de anillo completo y almacenaje en patio central.

### III.5 Lumbreras

Las lumbreras son estructuras que se construyen por medio de excavaciones verticales o inclinadas, y por las cuales se tiene acceso a instalaciones, al frente de excavación o estructuras subterráneas; debido a la longitud y profundidad de los túneles, hay necesidad de dividir en tramos la excavación y proyectar para su ataque lumbreras; estas sirven para que a través de ellas se realicen todas las operaciones necesarias para la construcción del túnel como las instalaciones de ventilación, bombeo, rezaga, eléctricas y de aire comprimido. Por la lumbreira se introduce la tuneladora (de ser el caso), los materiales, equipos necesarios, y es el acceso al frente de excavación.

Además, sirven para la conexión entre túneles, conectar captaciones, y para dar cambios de dirección del túnel; en la etapa operacional, funcionan como tanques de alivio, y acceso para inspección y mantenimiento del túnel.

Las lumbreras 0, 2, 3, 4, 5 y 6 del Túnel Churubusco-Xochiaca fueron construidas bajo el método lumbreira flotada, tienen un diámetro exterior de 15.20 m y 12.00 m de diámetro interior; y la lumbreira 7 fue construida con muros Milán, con un diámetro exterior de 15.00 m y 12.00 m de diámetro interior. Las profundidades de las lumbreras van de los 16.0 hasta 24.0 metros de profundidad.

Las principales características en común de estos métodos de construcción de lumbreras son:

- a) Buen comportamiento estructural ante las condiciones de suelos blandos arcillosos.
- b) Acondicionamiento de una plataforma de trabajo.
- c) Instalación de la instrumentación geotécnica (Véase Anexo).
- d) Construcción de brocales perimetrales.
- e) Ademar la excavación mediante lodo bentonítico durante el proceso de construcción.
- f) Colocación de una pantalla perimetral a la excavación, para que sirva de refuerzo al suelo como soporte de los esfuerzos generados por efecto del corte de la excavación.

Al procedimiento de lumbreira flotada se le llama así porque se instala un tanque metálico circular que flotará sobre el lodo de ademe; y mientras se va construyendo la estructura de la lumbreira sobre este tanque, va descendiendo conforme a las etapas de avance de la misma.

Los componentes de estas lumbreras de flotación son (véase Figura II.77):

1. Brocal exterior/definitivo
2. Brocal interior/provisional
3. Muro pantalla de lodo bentonítico
4. Tanque de flotación
5. Losa de fondo
6. Muro de Lumbreira
7. Relleno anular con mortero
8. Trabes de liga entre la estructura de la lumbreira y el brocal externo.

## Proceso Constructivo del Túnel Churubusco – Xochiaca

Los brocales de la lumbrera flotada tienen las siguientes características:

- Brocal Exterior – Contiene las preparaciones para la colocación de la viga de sujeción/cerrojo, y los muertos de anclaje para las plumas de malacates para el control de la verticalidad de la lumbrera durante su inmersión.
- Brocal Interior – Es provisional, ya que es demolido.

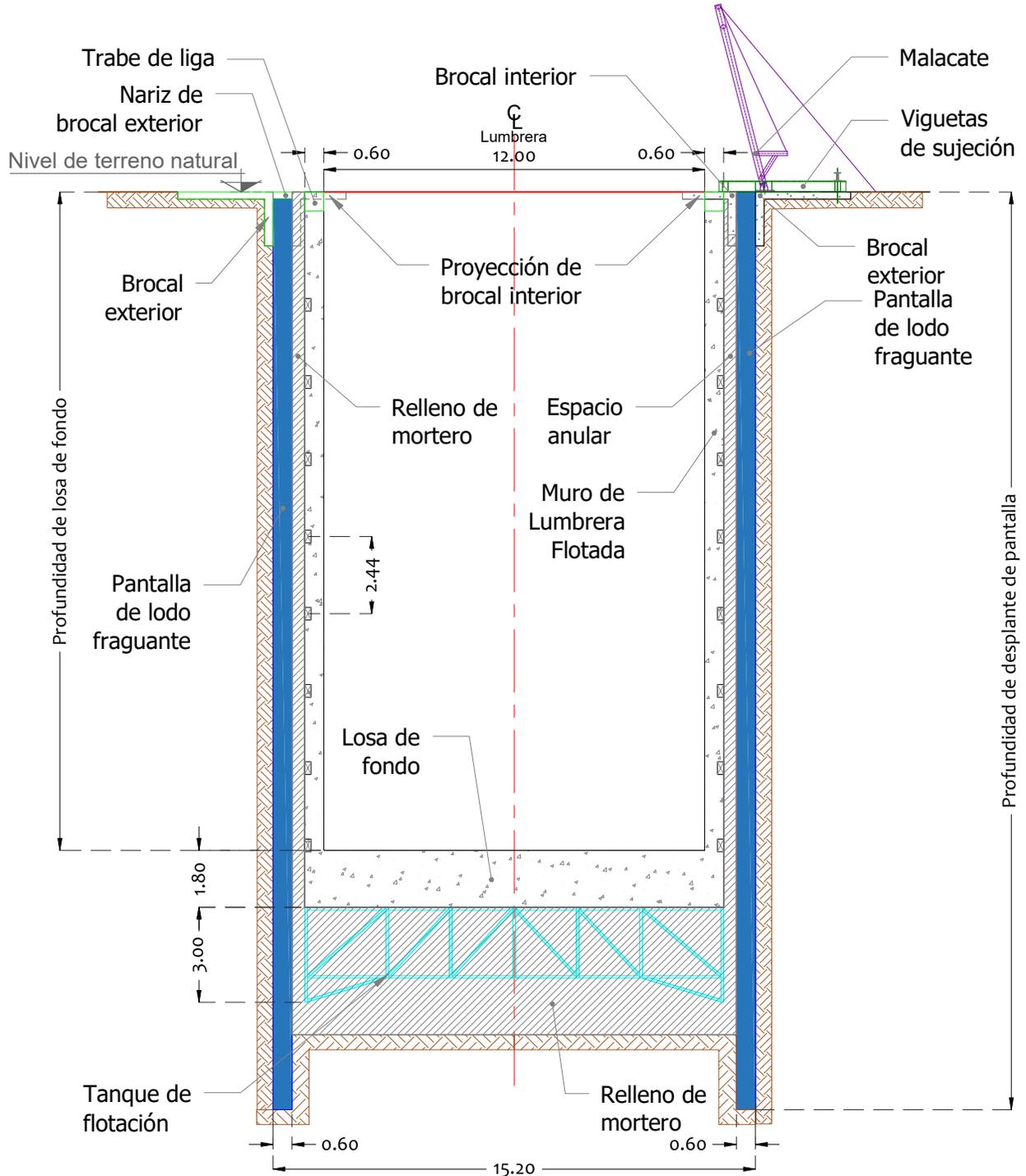


Figura II.90. Geometría y principales componentes de Lumbreras flotadas en elevación. [Elaboración propia]

El muro Milán o muro diafragma es una estructura de contención, usualmente de concreto armado colado en sitio; sus diversas aplicaciones son: cimentaciones, pasos a desnivel, sótanos, estacionamientos subterráneos, protección de márgenes, muelles o presas, y lumbreras, entre otras.

Los componentes de la lumbrera de muro Milán son (véase Figura II.7):

1. Primer Brocal exterior (puede o no ser demolido)
2. Primer Brocal interior
3. Pantalla perimetral de lodo fraguante
4. Segundo Brocal exterior
5. Segundo Brocal interior
6. Paneles de muro Milán  
(Un panel de muro Milán está compuesto por 3 tableros, formándose así 6 paneles de 3 tableros.)
7. Tapón de fondo
8. Losa de fondo
9. Anillo de rigidez
10. Revestimiento definitivo de lumbrera
11. Trabe de coronamiento

Se utilizaron los muros Milán en la lumbrera 7, compuesta de 18 tableros, de tal manera que forman un prisma apuntalante o de retención de concreto reforzado conformado en el subsuelo, este prisma está inscrito en un círculo de 12.60 m de diámetro interior; hasta la profundidad a nivel de desplante de muros de m. y que forma parte de la estructura en el caso de la lumbrera.

Se excavó el núcleo de hasta una profundidad de 14.0 m a cielo abierto, en los metros consecuentes se estabilizó la excavación con lodo bentonítico hasta alcanzar la profundidad de proyecto; posteriormente se coló bajo lodo bentonítico un tapón de fondo. Terminado el tapón se retiró el lodo bentonítico y se construyó la losa de fondo, consecuentemente se construyó un revestimiento definitivo de 0.3 m de espesor, un anillo de rigidez a los 14.0 metros de profundidad, y la trabe de coronamiento para obtener un diámetro interior libre de 12.0 m.

## Proceso Constructivo del Túnel Churubusco – Xochiaca

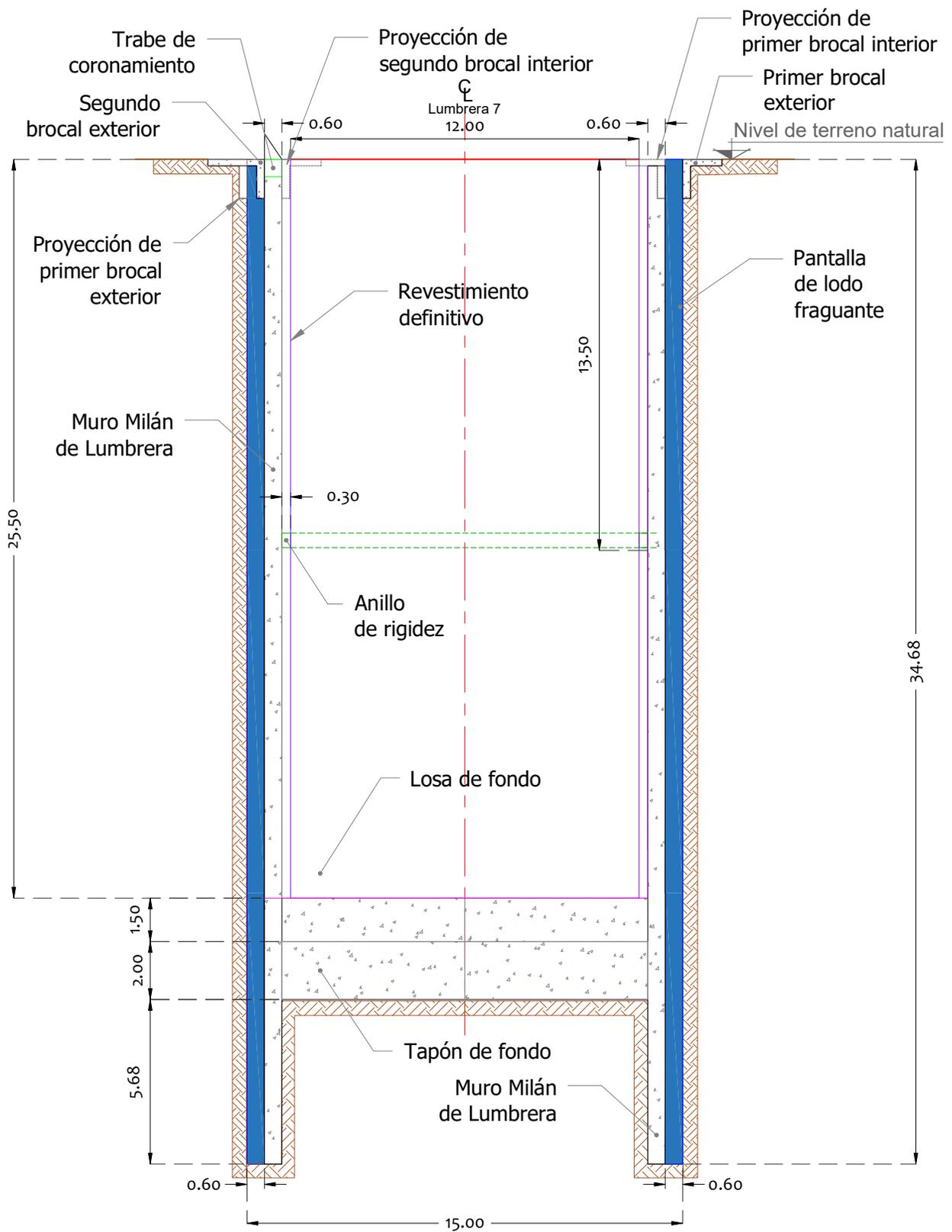


Figura II.91. Geometría y principales componentes de Lumbera 7 (muros Milán) en elevación, [Elaboración propia]

### III. Principales procedimientos constructivos

Los procedimientos constructivos son la metodología y/o secuencia de acciones que nos llevan a construir de un modo determinado, programado y controlado, de manera eficiente; es importante conocerlos para conseguir calidad, seguridad, optimizar los recursos y reducir eventualidades.

De los procedimientos constructivos obtenemos la siguiente información:

- Orden de ejecución.
- Detalles constructivos.
- Necesidades de cada ejecución.
- Tiempo de ejecución estimado.

En el sistema de construcción del Túnel Churubusco-Xochiaca encontramos las siguientes etapas constructivas, emitiendo el comentario de que se trata de enlistarlas en un orden cronológico, aunque se aclara que algunas de estas etapas se realizan en forma simultánea:

1. Trabajos preoperativos (aspectos jurídicos, permisos, liberación de derechos de vía, estudios complementarios, recorrido de recepción, capacitaciones/cursos, podas, etc.)
2. Trabajos preliminares (Planta de concreto, planta de mezcla de inyección, tanques de lodo bentonítico, y cárcamo de rezaga)
3. Puesta en marcha de plantas de dovelas
4. Instalación de instrumentación en dovelas para la auscultación del comportamiento de túnel, durante la etapa de construcción
5. Trazo de lumbreras
6. Instalación de instrumentación para la auscultación del comportamiento de lumbreras, durante la etapa de construcción
7. Construcción de lumbreras
8. Construcción de mejoramientos de suelo adosado a la lumbrera
9. Construcción de muro de reacción y cuna de recepción
10. Transporte y ensamblado de tuneladora tipo EPB
11. Demolición de parte del muro de lumbrera para salida de tuneladora
12. Puesta en marcha de tuneladora
13. Excavación del terreno y colocación de revestimiento de dovelas
14. Transporte de rezaga a cárcamo, y posteriormente a bancos de tiro
15. Instalación de instrumentación superficial para la auscultación del comportamiento de túnel, durante la etapa de construcción
16. Construcción de portales de entrada, cunas y portales de salida
17. Demolición de parte del muro de lumbrera para entrada y salida de tuneladora
18. Colocación de revestimiento definitivo de túnel
19. Construcción de trabes de borde y medias cañas
20. Construcción de lumbreras adosadas y conexiones de captaciones
21. Construcción de losas tapa y bardas perimetrales

De las etapas anteriores, destacan de ellas los siguientes elementos estructurales de los que consta el sistema de construcción del Túnel Churubusco-Xochiaca:

1. Lumbreras
2. Dovelas (Prefabricación)
3. Túnel (Excavación y montaje)
4. Revestimiento definitivo del túnel

Se da a continuación una explicación de los procedimientos constructivos de cada uno de los elementos anteriores.

### III.2 Lumbreras

Las lumbreras son estructuras auxiliares para la construcción de túneles, aunque también son fundamentales durante la operación del túnel, ya que en algunos casos funcionan como captación, proveen ventilación, funcionan como accesos de emergencia ante eventualidades, o bien para efectuar tareas de mantenimiento y monitoreo del comportamiento del túnel.

Para el caso de las lumbreras del Túnel Churubusco – Xochiaca sus elementos principales son:

1. Plataforma de trabajo
2. Brocales
3. Pantalla de lodo fraguante
4. Losa de fondo
5. Muro de Lumbreira

Las profundidades de proyecto para las pantallas perimetrales de lumbreira fueron las siguientes:

Tabla III.1 Profundidad[m] de desplante de pantallas perimetrales de las lumbreras en TCX, [Cortesía ICA].

| Lumbreira 0 | Lumbreira 2 | Lumbreira 3 | Lumbreira 4 | Lumbreira 5 | Lumbreira 6 | Lumbreira 7 |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 23.94       | 28.66       | 27.86       | 28.66       | 35.42       | 31.82       | 34.68       |

Se tienen elementos complementarios de las lumbreras (Ver III.1.3 Elementos complementarios de lumbreira), los cuales son:

- Mejoramiento del terreno a la entrada y salida de la lumbreira
- Cuna de arrastre
- Muro de reacción
- Portal de entrada y salida
- Trabe de borde
- Mediacaña
- Losa Tapa
- Muro Tapón

Como ya se mencionó, las lumbreras 0, 2, 3, 4, 5, y 6 fueron construidas bajo el procedimiento constructivo de lumbreira flotada (Ver III.1.1 Lumbreira Flotada); y la lumbreira 7 con muros Milán (Ver III.1.2 Lumbreira 7 [con muros Milán]); los cuales se detallan a continuación.

### III.1.1 Lumbrera Flotada

Es llamada lumbrera flotada debido a que se integra en ella un tanque que flota en una etapa de su construcción, y su procedimiento constructivo consiste en:

1. Preliminares: Localización y trazo de la lumbrera; instalación de planta de concreto y lodos (ver Figura III.7); fabricación del tanque metálico de flotación; realización de calas para identificar posibles interferencias de instalaciones existentes; e instalación de la instrumentación (Ver apartado “Anexos”) para la medición de los movimientos, deformaciones y asentamientos.
2. Construcción de plataforma de trabajo plana y competente
  - a. Se debe realizar la limpieza y despalme de la zona de trabajo, con una profundidad mínima de 20 cm. Está profundidad se ajustará de acuerdo a las condiciones en sitio.
  - b. Construcción de plataforma de trabajo plana y competente para soporte de los equipos de construcción y el correcto desarrollo de los trabajos de excavación de aproximadamente 27.0 x 27.0 m. Formada por material fino arenoso con grava (tezontle y/o grava) en proporción 20:80, compactado al 95% de la prueba Proctor, hasta alcanzar el espesor requerido.

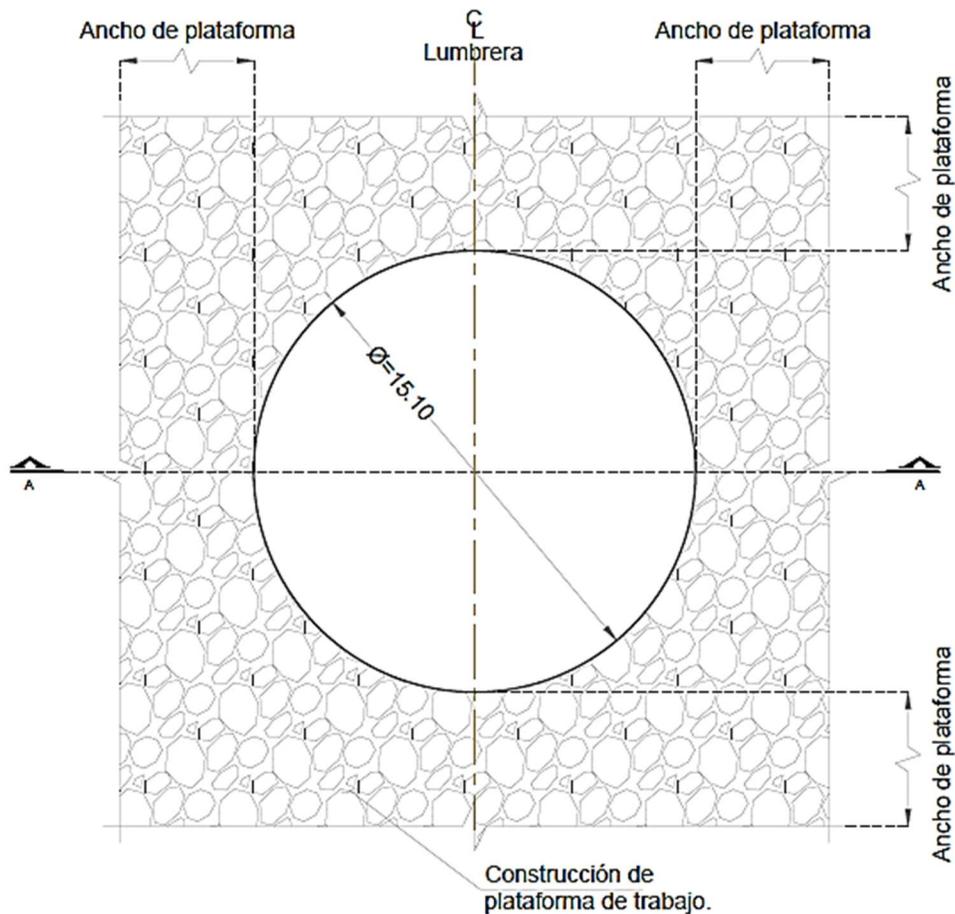


Figura III.1 Construcción de plataforma de trabajo en planta para Lumbreras del TCX. [Cortesía ICA].

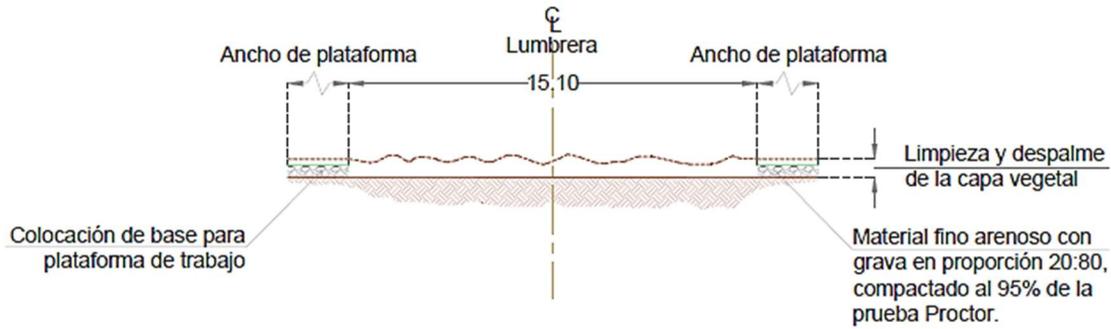


Figura III.2 Construcción de plataforma de trabajo en corte A-A para Lumbreras del TCX, [Elaboración propia]

3. Construcción de brocales (para pantalla perimetral)

Los brocales sirven en primera instancia como guías para la excavación de la zanja anular; posteriormente el brocal exterior contendrá las vigas cerrojo, además dará apoyo para el proceso de inmersión del tanque de flotación, también confinará la excavación del núcleo de la lumbrera, y al final de la inmersión total se conecta mediante traveses de liga a la lumbrera, junto con el muro de revestimiento definitivo.

- a. Se trazan dos polígonos paralelos de 20 lados iguales circunscritos, con una separación de 0.60m, la longitud de los tableros cubre la abertura de la “almeja” guiada.

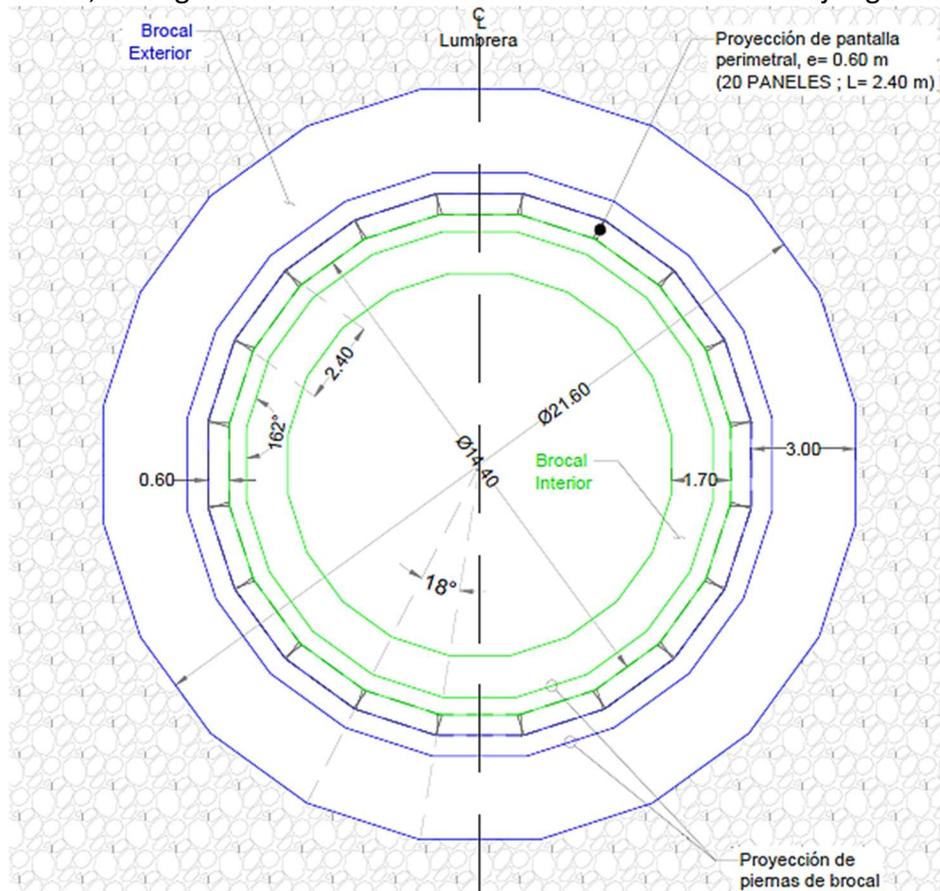


Figura III.3 Construcción de brocales temporales - Planta, [Elaboración propia].

## Proceso Constructivo del Túnel Churubusco – Xochiaca

- b. Se excava lo correspondiente para desplantar el acero de refuerzo de los brocales
- c. Colocación de acero de refuerzo y cimbra de acuerdo al proyecto; dejando en el brocal exterior 0.60 metros adicionales en cada varilla para el posterior aumento (nariz).

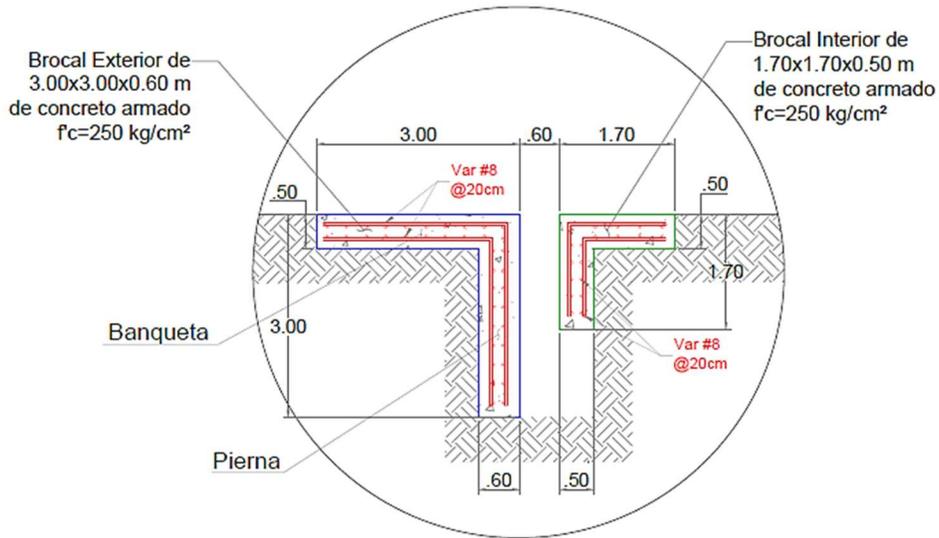


Figura III.4 Construcción de brocales temporales - Corte, [Cortesía CONIISA].

- d. Previo al colado del brocal exterior se dejan ancladas una serie de varillas de 1" de diámetro, colocadas en todo el perímetro del brocal, cuya posición es definida por la ubicación radial de las viguetas metálicas de anclaje/cerrojo.

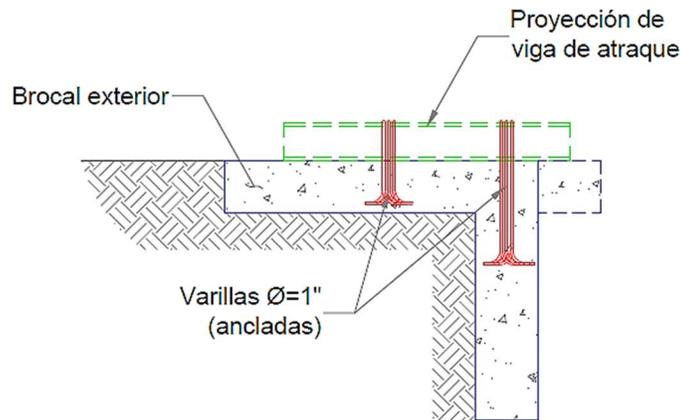


Figura III.5 Construcción de brocales temporales - Corte, [Cortesía CONIISA].

- e. Suministro y colocación de cimbra
- f. Suministro, colocación y vibrado de concreto hidráulico
- g. La cimbra se retira una vez que el concreto pueda autosoportarse
- h. Al momento de descimbrar, se colocan troqueles en sentido radial para evitar que las piernas de los brocales se acerquen.



Figura III.6 Troquelado de brocales, [Cortesía Ing. Guadalupe Jiménez S.].

El colado de cada brocal se hace de forma monolítica, y de manera casi paralela a la construcción de los brocales se habilitaron los tanques de almacenamiento y reposo del lodo bentonítico.



Figura III.7 Tanque de lodos, [Cortesía ICA].

#### 4. Perforación previa a la excavación de la zanja anular

Como una consideración particular en el caso de las lumbreras 3 y 6, se realizaron perforaciones previas a la excavación de la zanja anular para facilitar la excavación de los tableros de la zanja anular, y evitar deformación excesiva de los tableros.

- a. Se denominaron de manera secuencial en sentido de las manecillas del reloj a cada tablero con una letra (de la "A" a la "T").
- b. Se realizan las perforaciones a los extremos de cada tablero de manera secuencial en sentido contrario a las manecillas del reloj de manera alternada.
- c. Una vez perforados los extremos, se iniciaron las perforaciones de los centros de cada tablero, en sentido de las manecillas del reloj, iniciando con los tableros con numeración non; finalmente se realizaron los barrenos de centros de tableros con numeración par.

## Proceso Constructivo del Túnel Churubusco – Xochiaca

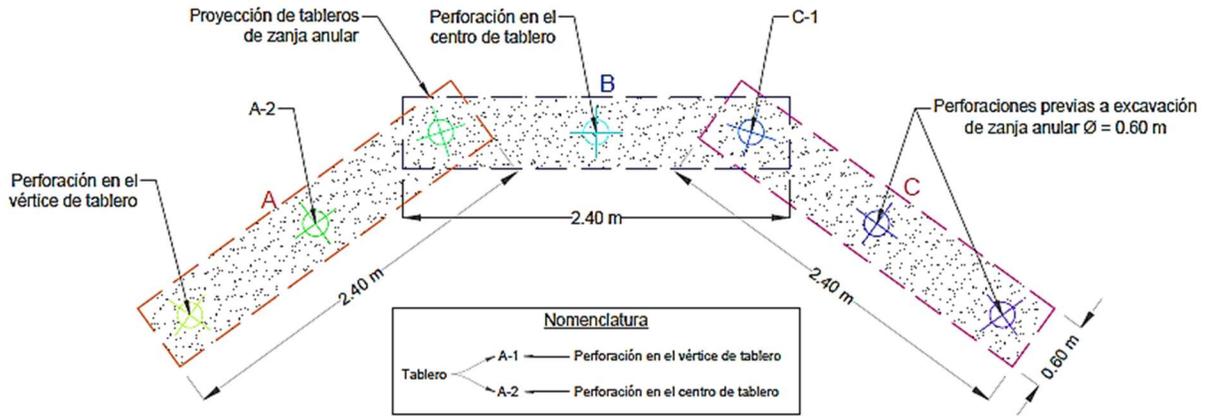
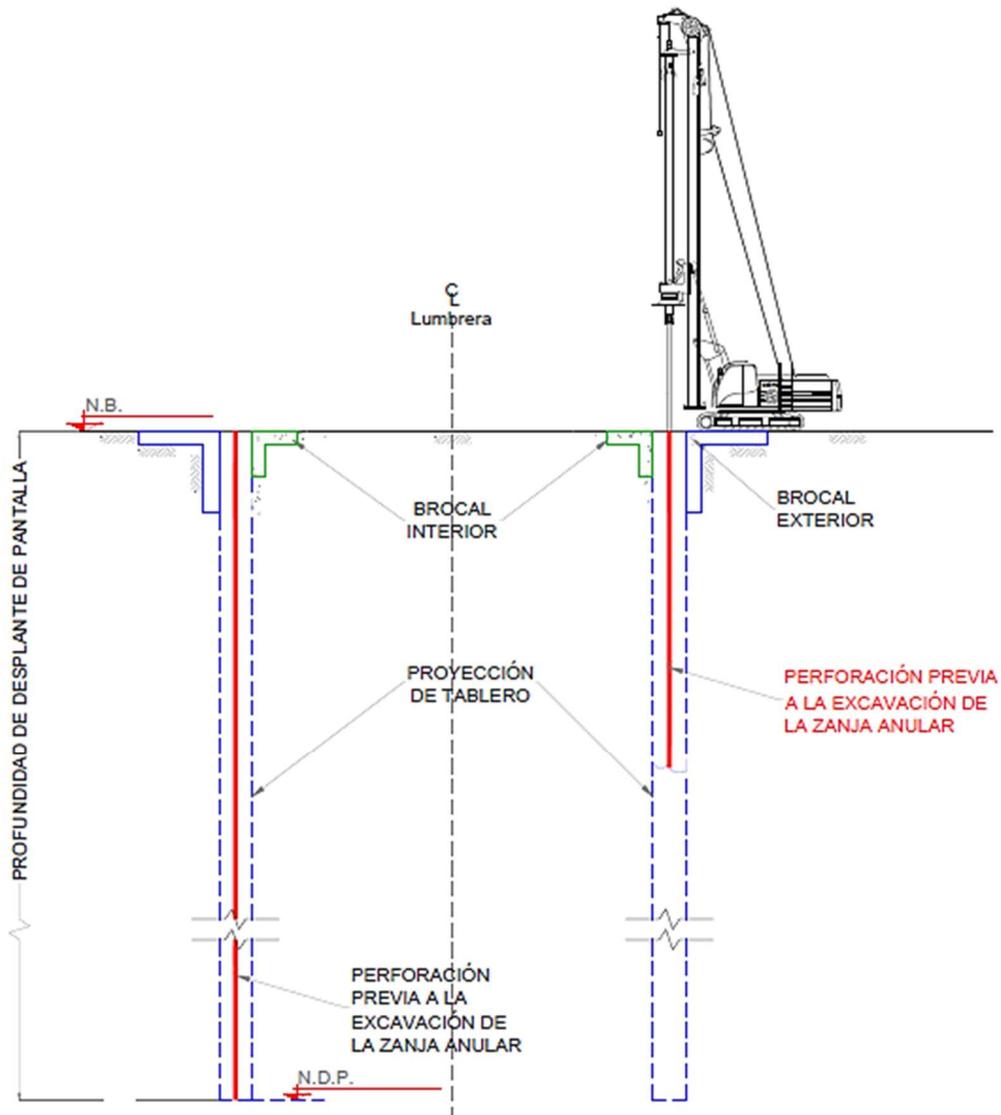


Figura III.8 Detalle de perforaciones previas a excavación de zanja anular perimetral, [Elaboración propia].



## Proceso Constructivo del Túnel Churubusco – Xochiaca

Figura III.9 Perforaciones previas a excavación de zanja anular perimetral, [Elaboración propia].

### 5. Excavación de pantalla anular perimetral con relleno simultáneo de lodo bentonítico

- a. El equipo guiado excava paneles de 0.60 x 2.40 m y son rellenos inmediatamente con lodo bentonítico.

La excavación y relleno de paneles se realiza de manera alternada o intercalada (uno si, hasta el quinto), hasta terminar con la construcción de los tableros.

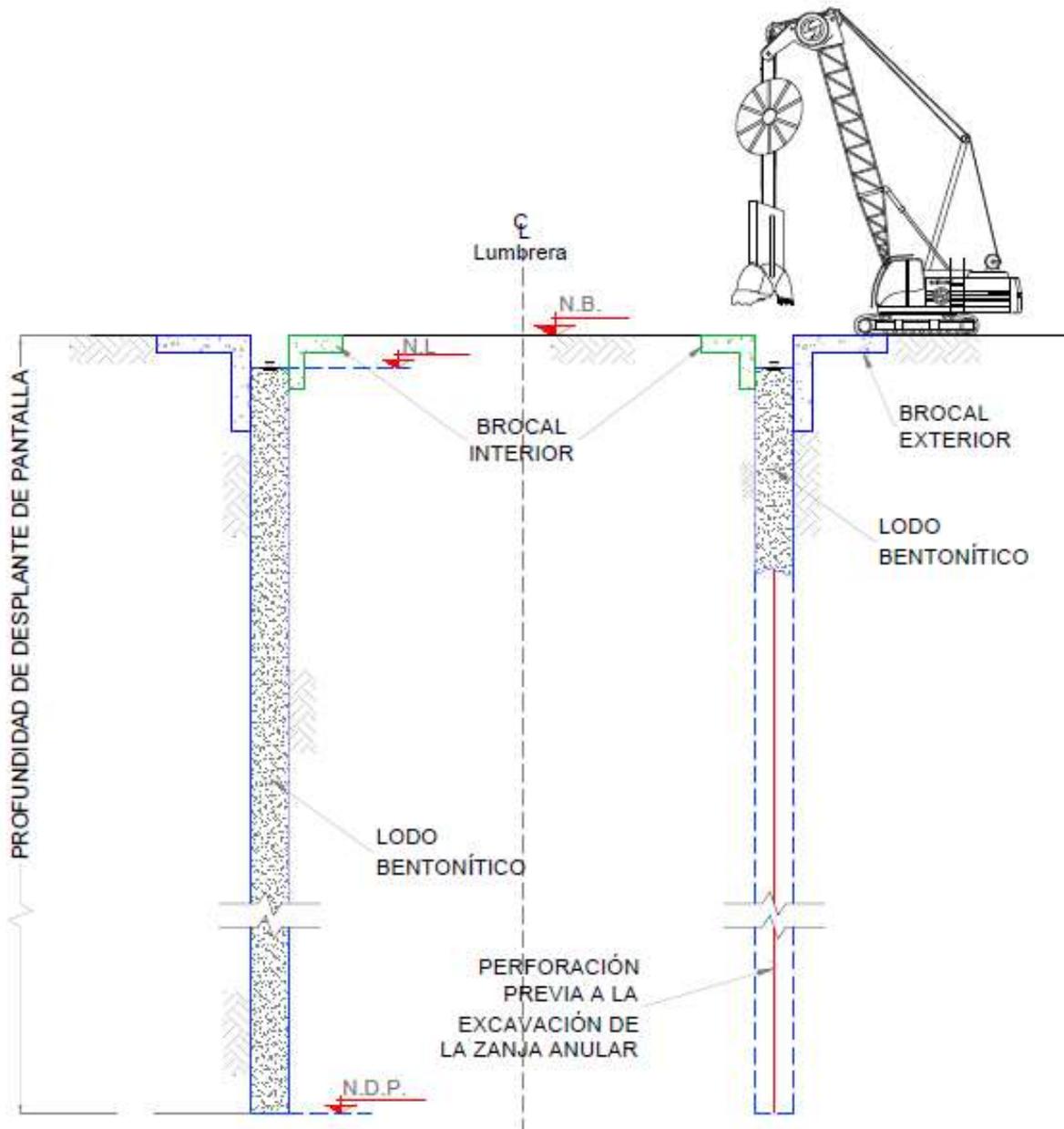


Figura III.10 Excavación de zanja anular perimetral, [Elaboración propia].

6. Sustitución de lodo bentonítico por lodo fraguante

- a. Se sustituye el lodo bentonítico por lodo fraguante  $f'c = 20 \text{ Kg/cm}^2$  usando tubería Tremie.

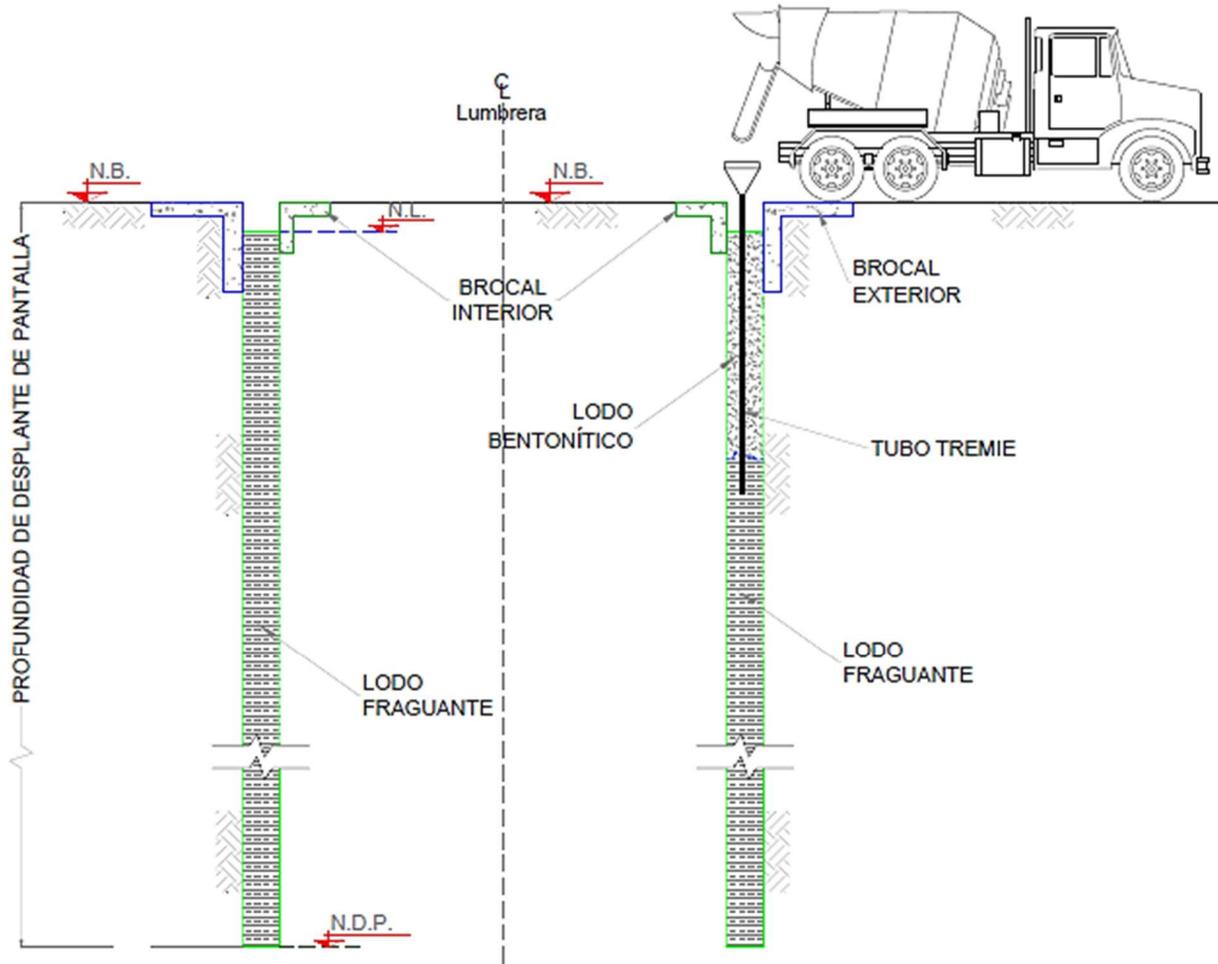


Figura III.11 Sustitución de lodo bentonítico por lodo fraguante, [Elaboración propia].

7. Construcción de nariz de brocal exterior.

Habiéndose sustituido el lodo bentonítico por lodo fraguante se procede a la construcción de la “nariz” del brocal exterior

- a. Es demolido el brocal interior
- b. Se escarifican 0.60m de la pierna del brocal exterior para la realización de una nariz
- c. Cimbrado y colocación de concreto para el incremento del brocal exterior
- d. Se construye un nuevo brocal interior separado 0.60 m del brocal exterior

## Proceso Constructivo del Túnel Churubusco – Xochiaca

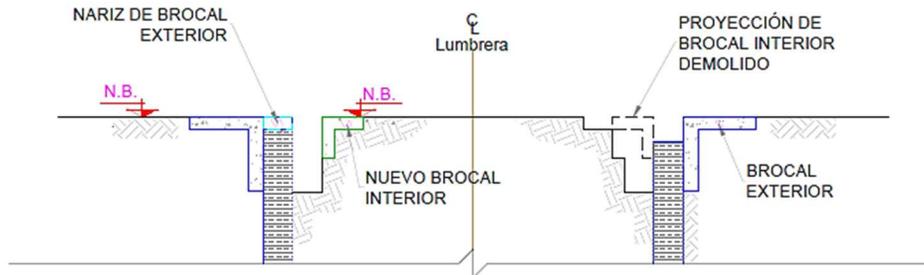


Figura III.12 Sustitución de lodo bentonítico por lodo fraguante, [Elaboración propia].

### 8. Excavación del borde de lumbrera

- a. El equipo guiado excava paneles de 0.60 x 2.40 m hasta el nivel máximo de excavación y se rellenan al momento con lodo bentonítico. Cuidando el porcentaje de finos y arena contenido en el lodo bentonítico, reemplazándolo de ser necesario.

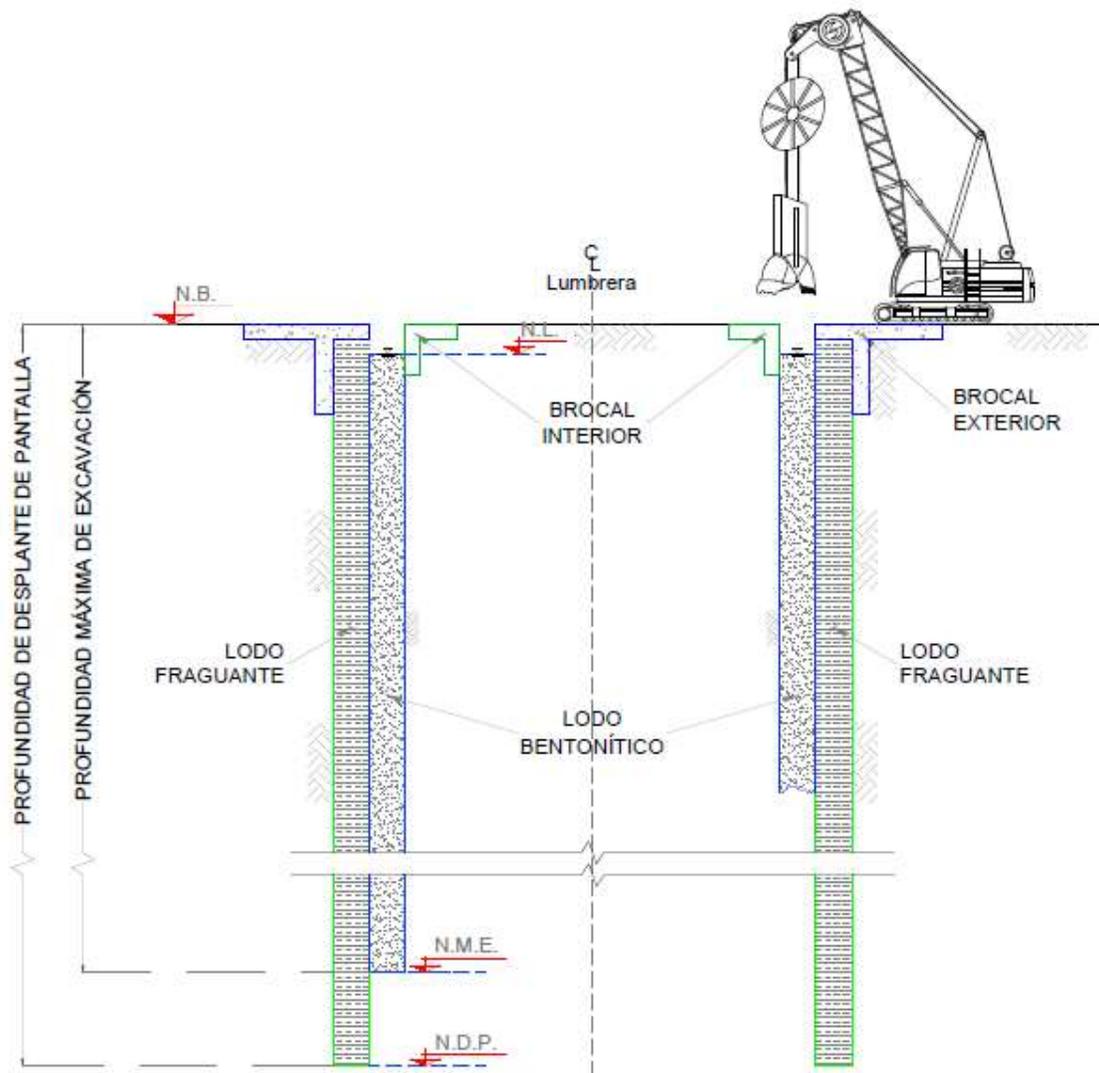


Figura III.13 Sustitución de lodo bentonítico por lodo fraguante, [Elaboración propia].

### 9. Excavación del núcleo de lumbrera

- a. El brocal interior es demolido
- b. Utilizando la almeja “loca” de excava el núcleo de la lumbrera, estabilizando la excavación con lodo bentonítico, cuyo peso volumétrico sea entre  $1.06 \pm 0.02 \text{ ton/m}^3$ . Recirculando el lodo y controlando su densidad y contenido de arena en suspensión.

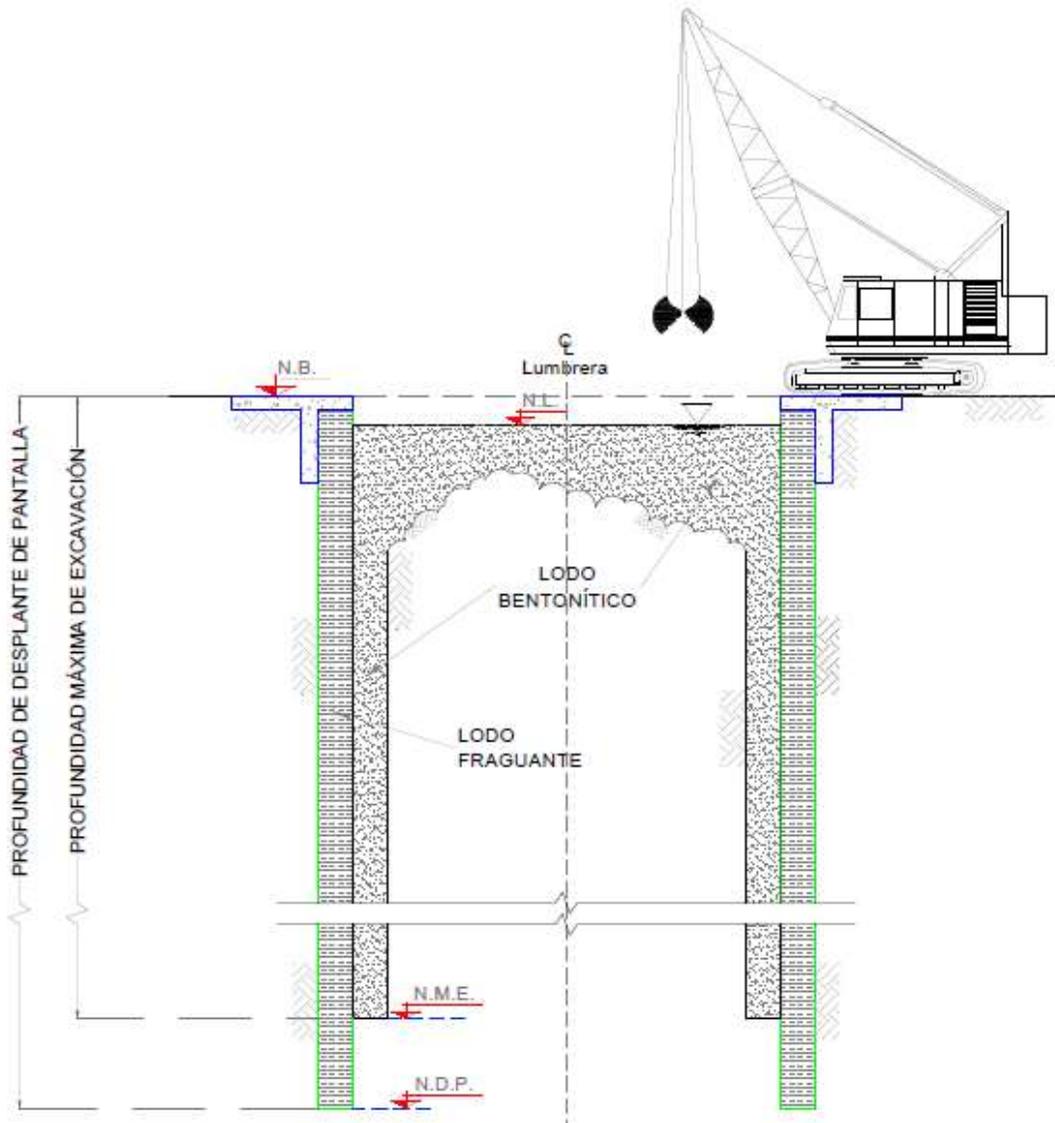


Figura III.14 Excavación del núcleo de la lumbrera con estabilización de lodo bentonítico. [Elaboración propia].

Concluida la excavación del núcleo de la lumbrera, se revisa la geometría de sus paredes para asegurar que no existan protuberancias hacia el interior de la lumbrera que impidan o dificulten el descenso del tanque y la estructura de la propia lumbrera. Ejecutándose un “barrido” con un escantillón cubriendo toda el área excavada, y rectificando la profundidad; en el caso de encontrarse protuberancias se utiliza un trépano para que este rompa, corte o muela dichas protuberancias.

## Proceso Constructivo del Túnel Churubusco – Xochiaca



Figura III.15 Verificación de profundidad y verticalidad con escantillón. [Cortesía M.I Mario Aguilar].



Figura III.16 Trépano. [Cortesía Ing. Daniel Falcao].

Se fabricaron los tanques circulares metálicos conforme a proyecto y especificaciones en los planos, programando su fabricación de tal manera que antes de que se termine la excavación del núcleo de la lumbrera, el tanque ya se encuentra totalmente habilitado y en obra.



Figura III.17 Tanque de flotación. [Cortesía Arq. Lizbeth Vázquez V.].

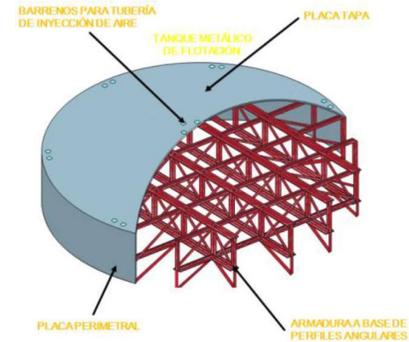


Figura III.18 Isométrico de esqueleto y placas del tanque de flotación. [Cortesía Ing. Luis Adrian Palomino Cortés].

Concluido lo anterior, se procede con la colocación del tanque de flotación en la lumbrera soportándolo mediante viguetas metálicas al brocal externo de la lumbrera.



Figura III.19 Viguetas metálicas de atraque. [Cortesía Arq. Lizbeth Vázquez V.].

10. Colocación de tanque de flotación

El tanque funciona como una cámara de aire y base para la construcción de la lumbrera

- a. Se coloca el tanque con apoyo de una grúa, para su fijación se utilizan 20 viguetas de sujeción formadas por IPR de 14", ubicadas en el perímetro de la lumbrera.



Figura III.20 Izaje y colocación de tanque de flotación en lumbrera [Cortesía Ing. Pedro Barrios].

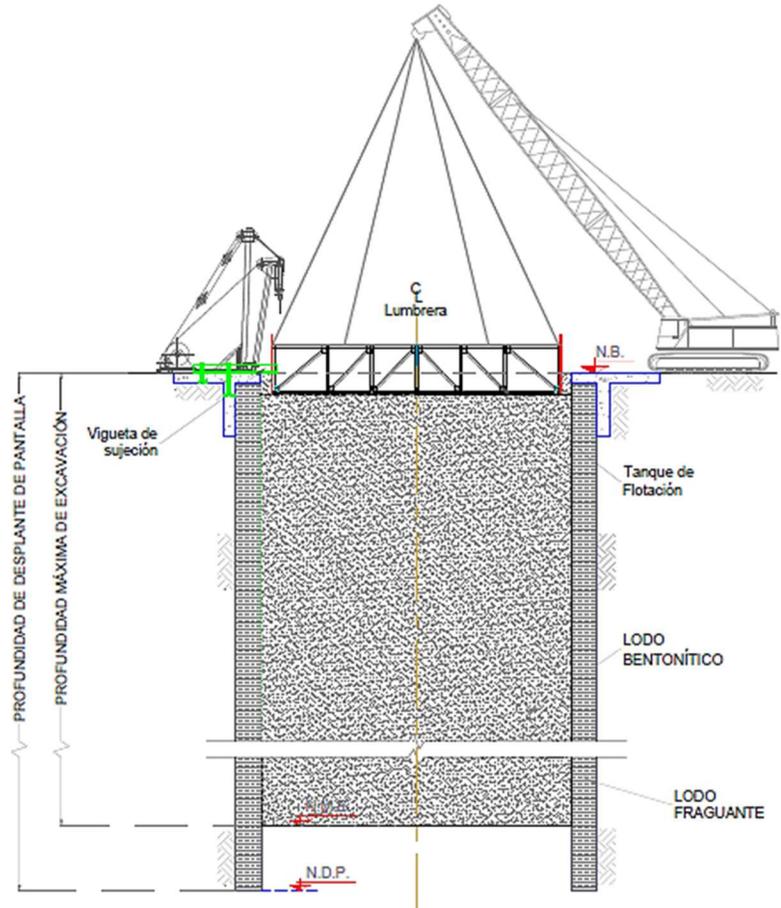


Figura III.21 Izaje y colocación de tanque de flotación en lumbrera, [Elaboración propia].



Figura III.22 Sujeción de tanque de flotación, [Cortesía Arq. Lizbeth Vázquez V.].

11. Colocación de plumas de izaje

Posterior a la fijación del tanque de flotación, para complementar las maniobras de inmersión y anclar las “plumas” de izaje y malacates se 4 construyen dados de concreto armado adyacentes al brocal exterior de la lumbrera, y ortogonales entre sí.

- Se excavan cuatro secciones de 1.25 x 2.50 x 1.50 m, donde se arman y cuelan dados de anclaje de concreto, con el objeto de anclar las “plumas” para los malacates.
- Es instalado el sistema de fijación de las plumas de izaje sobre el brocal exterior.
- Con ayuda de una grúa se realiza la colocación de las plumas de izaje.
- Se habilita el cable entre el ancla, la pluma de izaje, el malacate y el tanque de flotación.

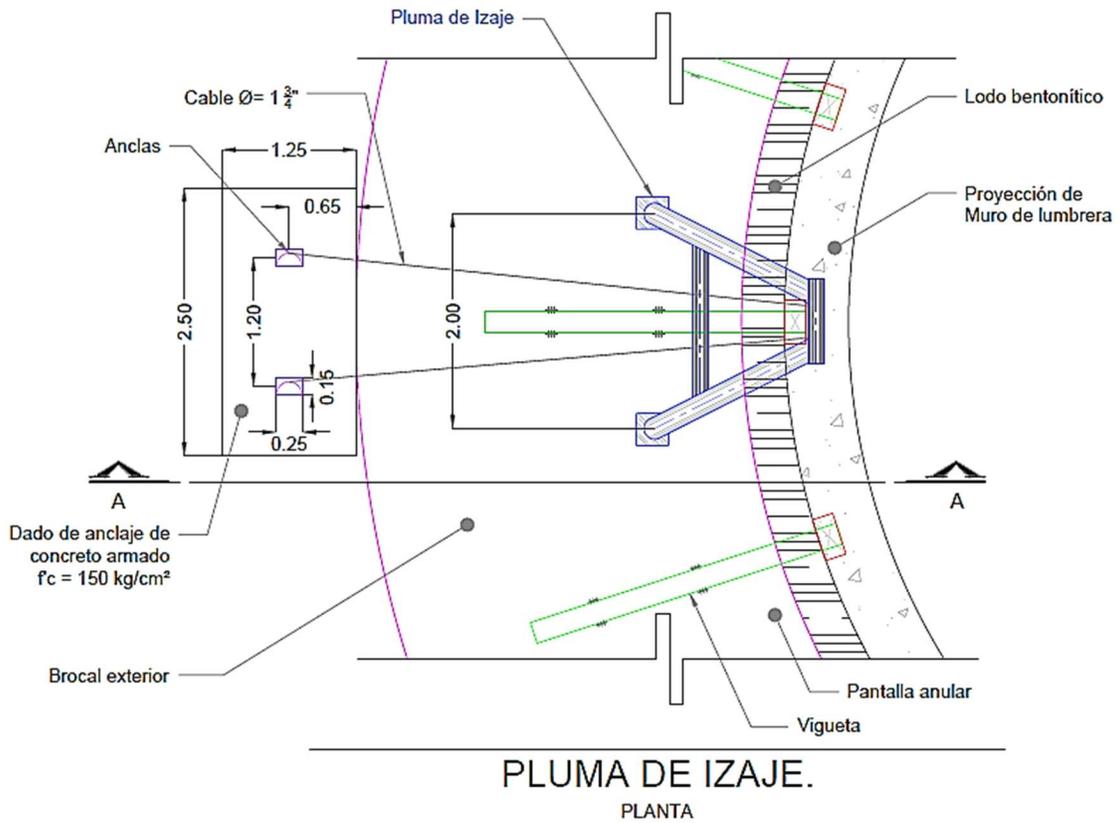


Figura III.23 Pluma de Izaje en planta, [Cortesía ICA.].

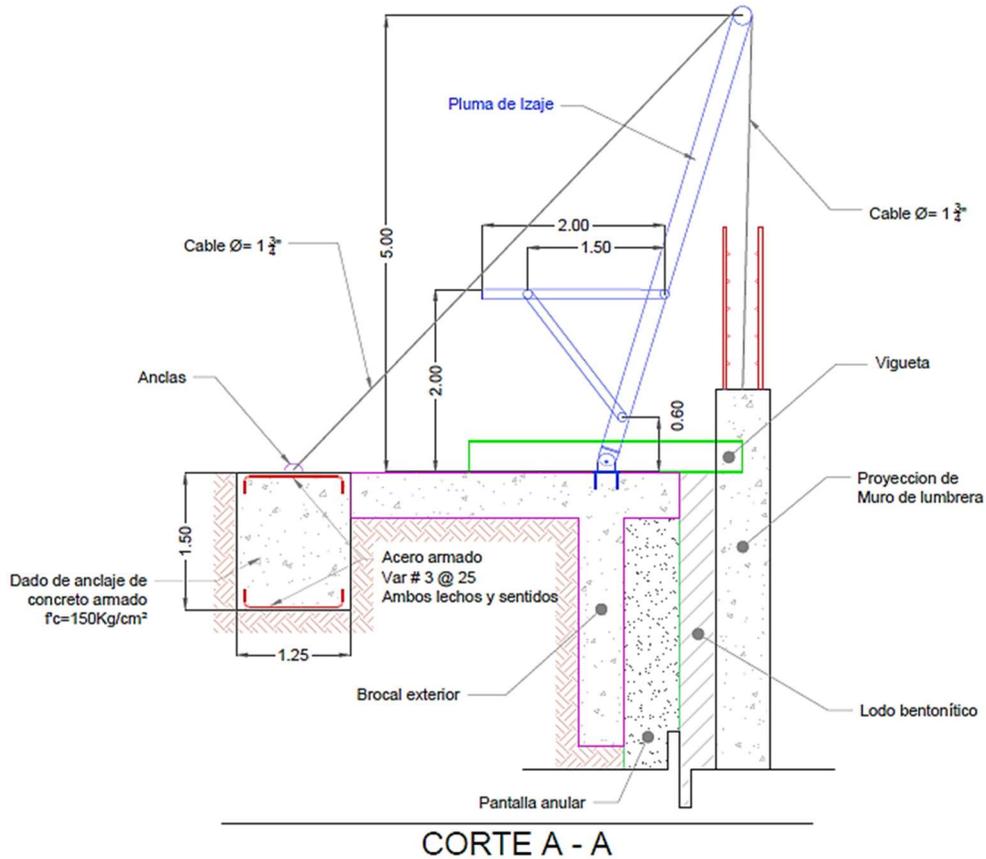


Figura III.24 Pluma de Izaje en corte (A-A), [Cortesía ICA.].

## 12. Construcción de Lumbraera

- a. Se inicia el proceso de construcción de la estructura cilíndrica de la lumbraera, iniciando por su losa de fondo de 1.80 m de espesor, y siguiendo por su fuste mediante ciclos de avance de 2.44 m que incluyen: colocación acero de refuerzo, cimbra, desmoldante, concreto por bombeo, vibradores de inmersión, y descimbrado.



Figura III.25 Habilitado y colocación del acero de refuerzo de losa de fondo de lumbraera, [Cortesía Arq. Lizbeth Vázquez V.].



Figura III.26 Habilitado y colocación del acero de refuerzo de muro de lumbraera flotada, [Cortesía Arq. Lizbeth Vázquez V.].



Figura III.27 Cimbrado de una lumbrera flotada,  
[Cortesía Arq. Lizbeth Vázquez V.].

- b. Habiéndose realizado el colado, se dejará que cumpla su fraguado inicial, de aproximadamente 12 hrs. para así proceder a descimbrar e iniciar los ciclos de inmersión.



Figura III.28 Conclusión de primer ciclo de avance, [Cortesía Arq. Lizbeth Vázquez V.].

- c. A medida que se va avanzando, se va lastrando el interior de la lumbrera con lodo bentonítico para contrarrestar la flotación que se va generando con la sumergencia; el volumen de lastre de lodo bentonítico depende del nivel necesario durante la etapa de inmersión de la lumbrera. Se pone como ejemplo a continuación los niveles indicados para la Lumbrera 3

Tabla III.2 Nivel de lastre de lodo bentonítico de la Lumbrera 3 del TCX, [Cortesía ICA].

|                                     | ETAPA 4   |           | ETAPA 5   |           | ETAPA 6   |           | ETAPA 7   |           | ETAPA 8   |           |
|-------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                                     | Flotación | Inmersión |
| Nivel de lastre de lodo bentonítico | 0.00 m    | 1.70 m    | 1.70 m    | 3.50 m    | 3.50 m    | 5.30 m    | 5.30 m    | 7.10 m    | 7.10 m    | 10.00 m   |

13. Inmersión del tanque de flotación junto con la losa de fondo y las paredes de la lumbrera
  - a. Después del fraguado se descimbra y, se inyecta aire comprimido al interior del tanque, mediante un sistema de válvulas, mangueras y un compresor, logrando así su flotabilidad hasta liberar las viguetas de sujeción, es decir unos 0.05 m por arriba del nivel que se encuentren.
  - b. Liberada la lumbrera por medio de flotación y con el apoyo de los cuatro malacates se nivela en caso de ser necesario, para así proceder a la siguiente inmersión (desplazando la bentonita de la excavación).
  - c. Entonces se separan las viguetas de sujeción y, controlando verticalidad y nivel por medio de plumas con malacate, se lastra con el lodo bentonítico necesario para poder seguir aplicando el método, y se sumerge lo construido (al extraer el aire de forma lenta), hasta que queda en posición adecuada para ser sujetado, nuevamente, por las viguetas del brocal.

Los ciclos de colado de tramos e inmersión del conjunto flotante se repiten hasta alcanzar la profundidad proyectada.



Figura III.29 Conclusión de primer ciclo de colado, [Cortesía Arq. Lizbeth Vázquez V.].



Figura III.30 Proceso de inmersión, [Cortesía M.I. Erick Melvin García Fuentes].

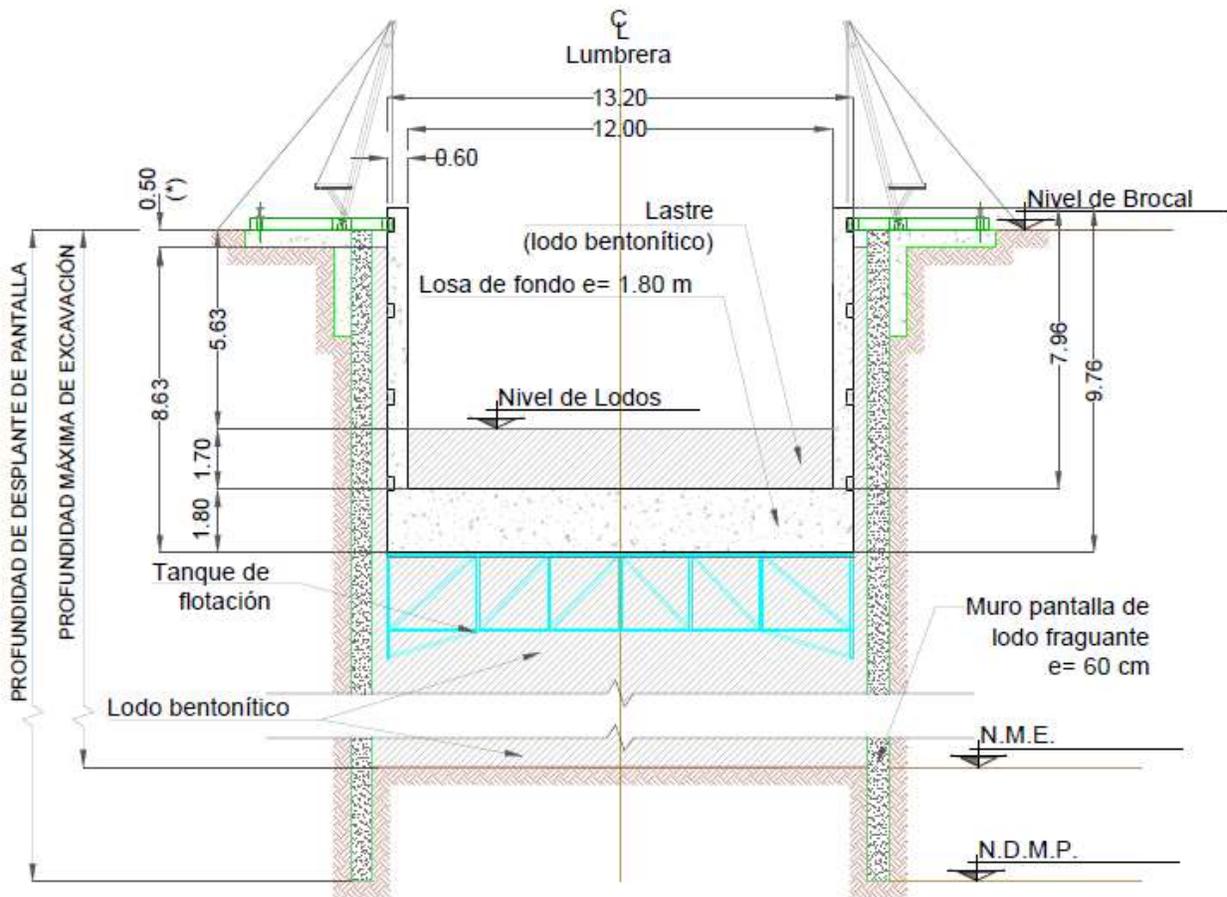


Figura III.31 Conclusión de ciclo de avance, [Cortesía ICA].

En el último colado del muro son construidas las ménsulas de apoyo sobre las que se desplantarán los elementos prefabricados y rejillas de la losa tapa.

#### 14. Relleno del tanque de flotación y de la zanja anular interior con mortero

Una vez alcanzado la profundidad de proyecto es rellenado el tanque de flotación y la zanja anular.

- a. En el fondo de la lumbreira se inyecta mortero con una resistencia  $f'c=30 \text{ kg/cm}^2$  que substituye a la bentonita remanente en el tanque con un equipo de bombeo a través de los tubos de 4" instalados previamente en el tanque de flotación.
- b. El relleno por debajo del tanque se considera terminado cuando el mortero emerge por las líneas de 4" instaladas en el perímetro de la lumbreira.
- c. Cuando se tenga el fraguado del relleno por debajo del tanque, se inicia el relleno de la zanja, a gravedad por 4 líneas Tremie, el lodo de ademe desplazado por el mortero se verterá al interior de la lumbreira, este servirá de lastre permitiendo contrarrestar el empuje ascendente generado por el mortero durante el proceso
- d. Se inyecta mortero con una resistencia  $f'c=30 \text{ kg/cm}^2$  en la zanja perimetral de la lumbreira con tubería Tremie de  $\phi=8"$  (Diámetro).

Terminados los rellenos con mortero, se construye la trabe de liga de concreto reforzado con resistencia  $f'c=350 \text{ kg/cm}^2$ , para interconectar y fijar la lumbreira con el brocal exterior.

### 15. Construcción de trabe de liga

Una vez colada e inmersa la lumbrera en su totalidad, se procede al colado de las trabes de liga entre el último colado de la lumbrera y el brocal exterior

- Es demolido una sección correspondiente al mortero del espacio anular y de la pantalla de lodo fraguante, así como 85 centímetros del brocal a partir de la nariz de este.
- Se habilita y se coloca el acero de refuerzo como se ve en la figura III.32
- Se coloca la cimbra respectiva al metro de la trabe de liga
- Se vierte y vibra el concreto hidráulico
- Alcanzada la resistencia del concreto se retira el cimbrado

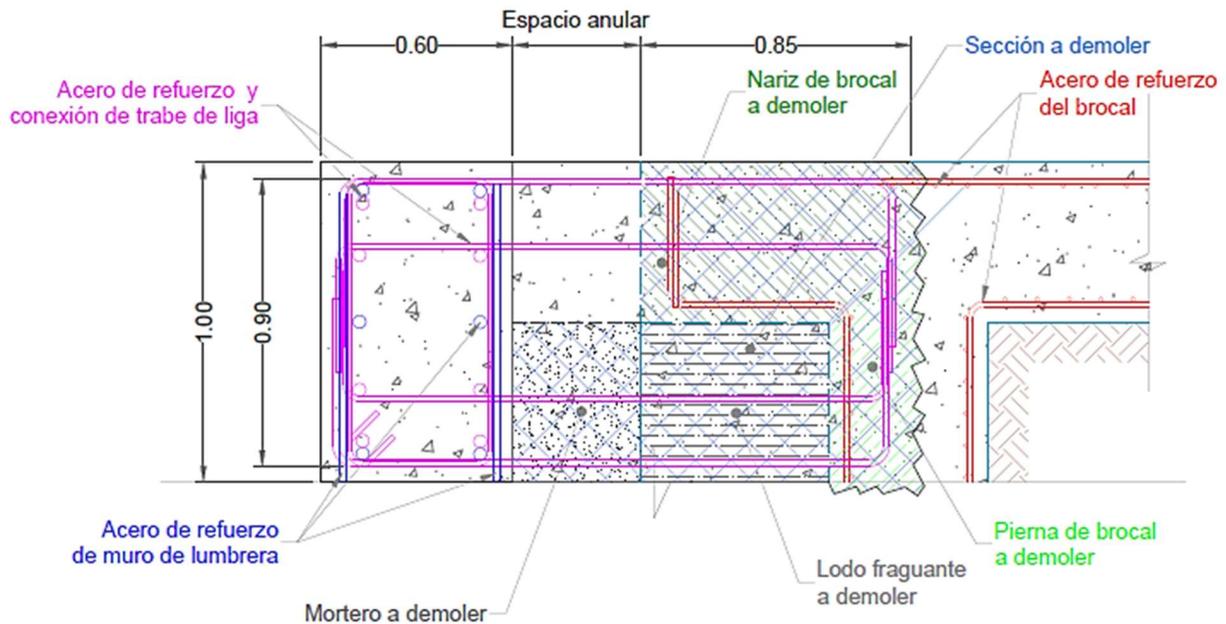


Figura III.32 Trabe de liga, [Elaboración propia].

### 16. Retiro del lastre y limpieza de la lumbrera con agua a presión.

- Una vez que el mortero alcance su resistencia se procederá al retiro del lastre (lodo bentonítico) y limpieza interior de la lumbrera.
- El retiro del lodo se ejecuta con equipo de bombeo y camiones de volteo, y si hay lodo con mayor densidad se emplea almeja o equipo manual. La limpieza en las paredes de la lumbrera se ejecuta con un equipo de agua presurizada, sobre una canastilla colgante y maniobrada con una grúa.

Concluida la limpieza de la lumbrera se realizan los trabajos de mejoramiento de suelo de entrada y/o salida de la lumbrera.

### III.1.2 Lumbreira con muros Milán

Solo la lumbreira 7 (siete) fue construida con muros Milán, a solicitud de la CONAGUA, para este procedimiento debido a las características del sitio se requirió abatimiento de nivel freático por bombeo.

El procedimiento constructivo para el caso de esta lumbreira con muro Milán consistió en:

1. Preliminares: Localización y trazo de la lumbreira; instalación de planta de concreto y lodos; realización de calas para identificar posibles interferencias de instalaciones existentes; e instalación de la instrumentación (Ver apartado “Anexos”) para la medición de los movimientos, deformaciones y asentamientos.
2. Construcción de una plataforma de trabajo plana y competente
  - a. Se debe realizar la limpieza y despalme de la zona de trabajo, con una profundidad mínima de 20 cm. Esta profundidad se ajusta de acuerdo con las condiciones en sitio.
  - b. Construcción de plataforma de trabajo plana y competente para soporte de los equipos de construcción y el correcto desarrollo de los trabajos de excavación de aproximadamente 27.0 x 27.0 m. Formada por material fino arenoso con grava (tezontle y/o grava) en proporción 20:80, compactado al 95% de la prueba Proctor, hasta alcanzar el espesor requerido.

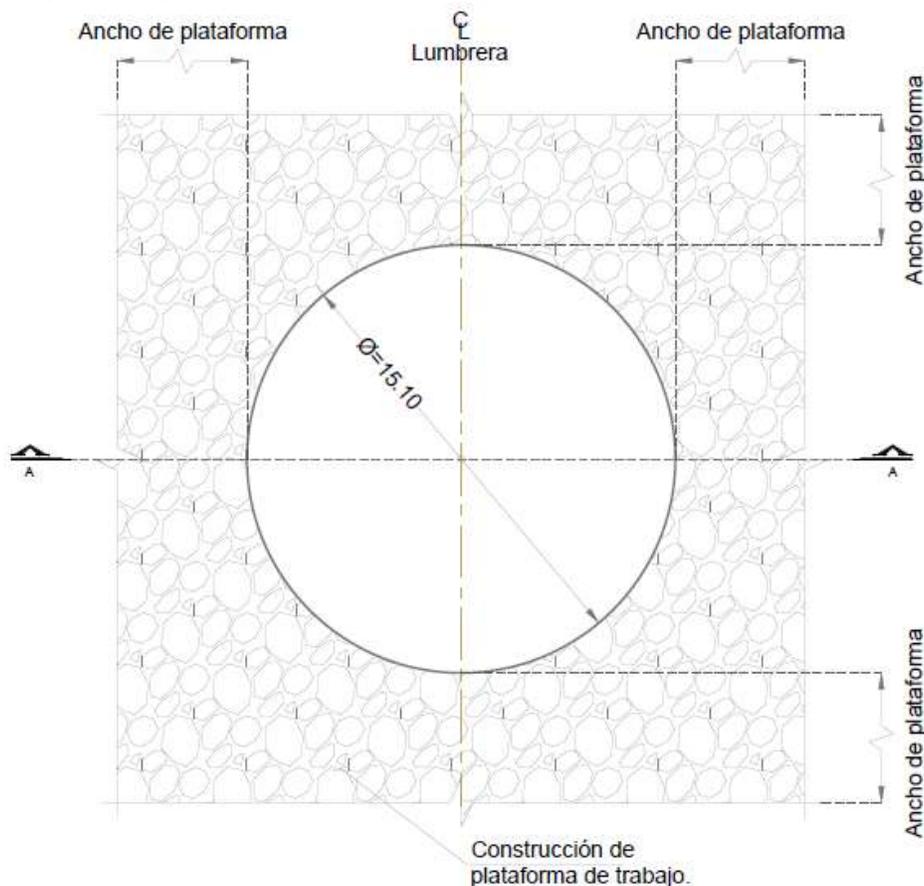


Figura III.33 Construcción de plataforma de trabajo en planta para Lumbreiras 7 TCX. [Cortesía ICA].

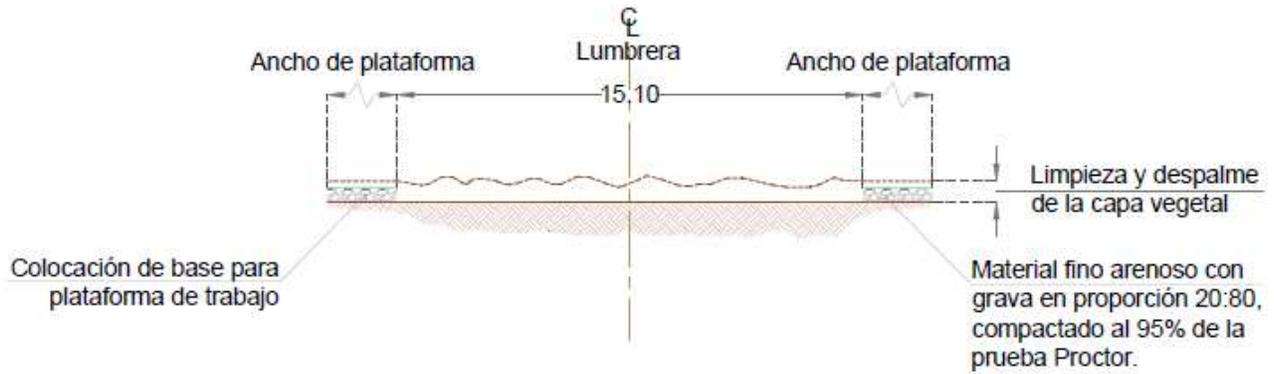


Figura III.34 Construcción de plataforma de trabajo en corte A-A para Lumbreras 7 TCX, [Elaboración propia]

3. Construcción de brocales temporales para la construcción de pantalla perimetral
  - a. Se trazan dos polígonos paralelos de 18 lados iguales circunscritos, con una separación de 0.60m, la longitud de los tableros se hace de tal forma que tengan el alcance de la abertura de la “almeja” guiada.
  - b. Excavación para la construcción de brocales exterior e interior.
  - c. Colocación del acero de refuerzo para brocales
  - d. Se coloca la cimbra para el colado de los brocales y se verifica su alineamiento.
  - e. Se realiza la colocación de concreto hidráulico con el vibrado necesario.
  - f. Retiro de cimbra una vez que el concreto pueda soportarse.
  - g. Relleno con tepetate del espacio entre brocales

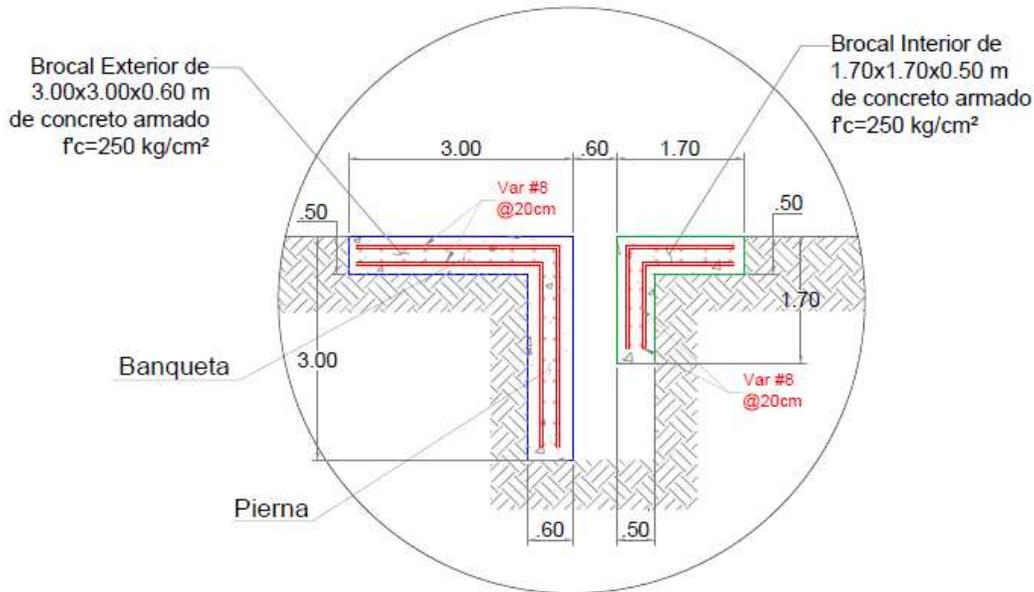


Figura III.35 Construcción de brocales temporales, [Cortesía ICA].

4. Construcción de pantalla perimetral exterior de lodo fraguante
  - a. Nivelación del equipo de excavación y se realiza una numeración de paneles en sentido horario para control de avance.
  - b. Con almeja guiada se excava la pantalla exterior de los paneles de sección 0.60 x 2.40 m de manera secuencial en sentido de las manecillas del reloj de manera alternada o intercalada (uno si, hasta el tercero).
  - c. Se realiza la sustitución del material excavado por lodo fraguante  $f'c = 5 \text{ Kg/cm}^2$ .



Figura III.36 Excavación de paneles de pantalla perimetral.  
[Cortesía Ing. Daniel Falcao].

5. Demolición de brocales temporales  
Posterior a la construcción de la pantalla de lodo fraguante se realiza la demolición de brocales temporales
  - a. Demolición de los brocales exterior e interior temporales utilizados para la construcción de pantalla perimetral, se utiliza excavadora con martillo hidráulico.
  - b. Retiro de material producto de la demolición
6. Construcción de brocales para excavación de tableros de muro Milán
  - a. Se trazan dos polígonos paralelos de 18 lados iguales circunscritos, con una separación de 0.60m, la longitud de los tableros es de 2.40 m de longitud para la abertura de la “almeja” guiada.
  - b. Excavación de la zanja para la construcción de brocales exterior e interior.
  - c. Colocación del acero de refuerzo para brocales
  - d. Se coloca la cimbra para el colado de los brocales y se verifica su alineamiento.
  - e. Se realiza la colocación de concreto hidráulico con el vibrado necesario.
  - f. Retira de cimbra una vez que el concreto pueda soportarse
  - g. Relleno de espacio entre brocales con tepetate

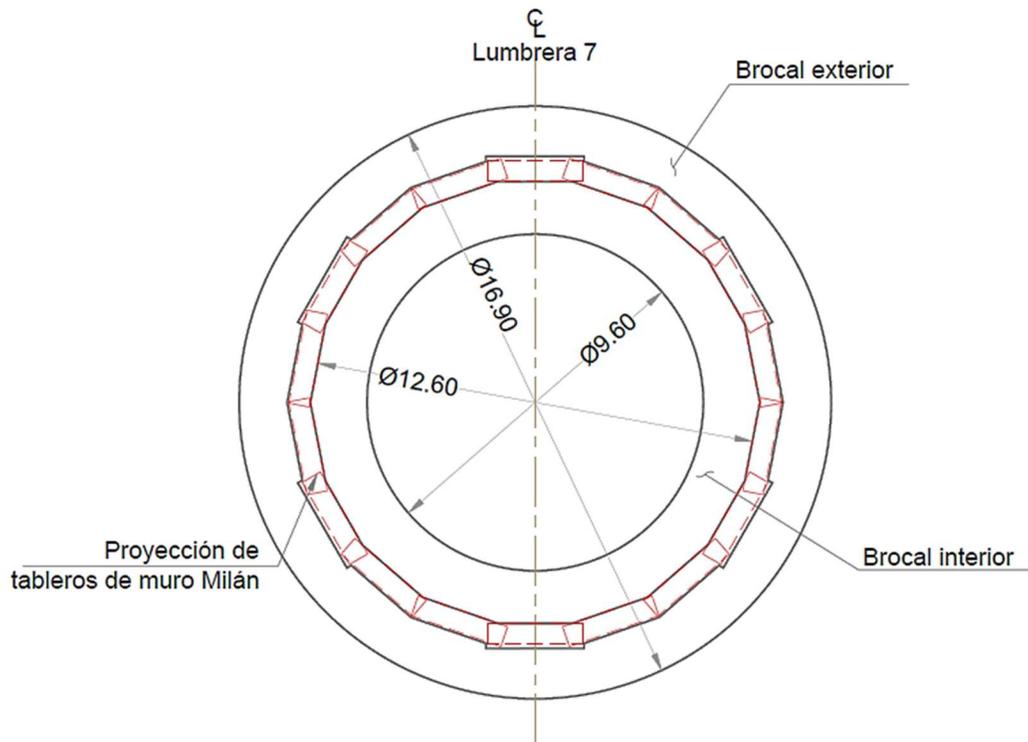


Figura III.37 Configuración de brocales para muro Milán de Lumbra 7 en planta. [Cortesía ICA].



Figura III.38 Relleno de espacio entre brocales con tepetate. [Cortesía ICA].

7. Excavación de tableros de muro Milán
  - a. Nivelación del equipo de excavación
  - b. Excavación de los tableros de manera alternada, estabilizando con lodo bentonítico al sustituir el material excavado hasta nivel máximo de excavación.

El material excavado debe sustituirse al momento por lodo bentonítico, cuidando que el nivel del lodo bentonítico nunca se encuentre a más de 0.5 m por debajo del nivel del brocal.



Figura III.39 Excavación de paneles de pantalla perimetral. [Cortesía Ing. Daniel Falcao].



Figura III.40 Excavación de paneles de pantalla perimetral. [Cortesía Ing. Daniel Falcao].

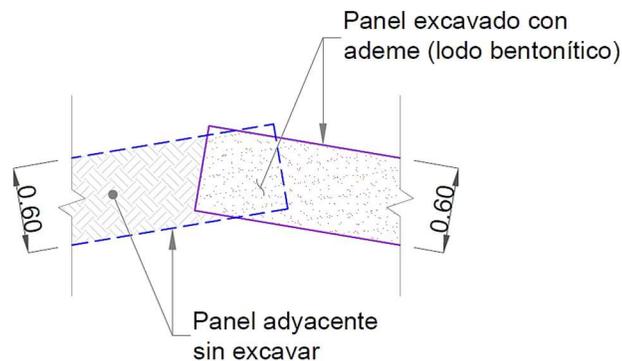


Figura III.41 Esquema de excavación de paneles de pantalla perimetral. [Elaboración propia].

Se deben mantener características originales del lodo bentonítico, el lodo contaminado o con alto contenido de finos del terreno será removido.

- Viscosidad Marsh de 32 a 50 seg.
- Densidad mínima de  $1.05 \text{ ton/m}^3$  (mínimo, medida en zanja).
- Cake a 7'30" < 3 mm.
- Ph de 7 a 11.
- Contenido de arena menor del 5%.

#### 8. Colocación las juntas metálicas

Los objetivos de las juntas es el de crear un machihembrado entre los muros Milán, formar una superficie limpia y colaborar como guía de la cuchara de bivalva el momento de realizar la pantalla siguiente. No colocar las juntas, podría formar irregularidades entre los paneles, que permitirían filtraciones que pueden llegar a ser antiestéticas y peligrosas.

Existen varios de tipos de juntas, algunas patentadas y otras de dominio público, para muro Milán colado en sitio (como nuestro caso L7) se utilizará de geometría machihembrada tipo Soletanche.

La junta plana de sección trapezoidal, en conjunto con una banda conocida como “*waterstop*” de origen a la junta CWS patentada por Soletanche.

- a. Previo al bajado de las juntas metálicas, se adhieren a ésta firmemente tacones de poliestireno de alta densidad mediante alambre recocado a todo lo largo de la junta metálica; y finalmente se cubren todos los tacones con malla tipo “gallinero”
- b. Se procederá al bajado con apoyo de grúa de las juntas metálicas que sirven de cimbra en los extremos de los tableros excavados

La junta metálica se suspenderá de los brocales y en ningún momento se apoya en el fondo de la excavación. Esta junta metálica se retira simultáneamente con la excavación del panel adyacente. (Para poder excavar el tablero contiguo deben pasar 3 días.)



Figura III.42 Colocación de juntas CWS [Cortesía Arq. Lizbeth Vázquez V.]



Figura III.43 Colocación de junta CWS [Cortesía Arq. Lizbeth Vázquez V.]

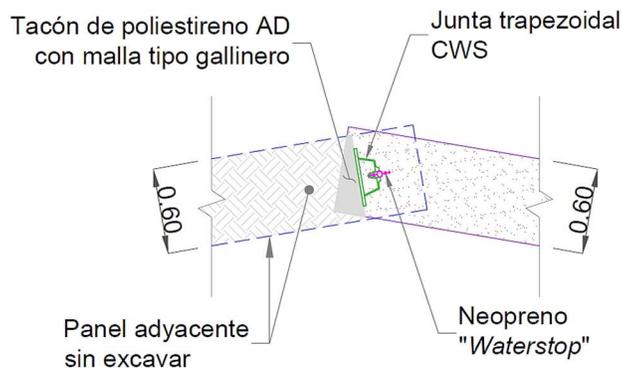


Figura III.44 Esquema de colocación de juntas CWS y neopreno “*waterstop*” para muro Milán. [Elaboración propia].

### 9. Colocación del acero de refuerzo

El armado de los tramos de acero de refuerzo deberá estar previamente habilitado en superficie; y se marca el lado que va hacia la excavación del núcleo. Todos los tramos de armado deben llevar separadores para evitar el contacto con la pared de la excavación

- a. Previamente a su descenso, se revisa que el armado de acero contenga los separadores o centradores.



Figura III.45 Habilitado de armado de acero de muro Milán [Cortesía Ing. Rosalba Trujillo Pech]



Figura III.46 Separadores circulares para armado de muro Milán [Cortesía Ing. Jaime Castañeda Martínez]

- b. Se realiza el izaje del armado estribándolo adecuadamente, con el fin de que no experimente algún desprendimiento del elemento de izaje, y su descenso.

Para la conexión mecánica del armado de acero dentro de la excavación, se sujeta el tramo en su extremo superior mediante una trampa, aparejo o mecanismo de sostenimiento, que se apoya sobre el brocal para mantenerlo suspendido, mientras se hace el izaje del segundo tramo del armado de acero de refuerzo.



Figura III.47 Colocación de acero de refuerzo en panel de lumbrera con muro Milán [Cortesía ICA].

- c. Previo a la colocación del segundo tramo, se realizará su izaje sosteniéndolo con la grúa verticalmente para permitir el acople de los conectores mecánicos roscados al 50% de traslape, con lo cual se alineará el acero en tramos de longitud de 12.0 m hasta completar toda la longitud del armado.

Una vez conectadas la totalidad de las varillas del acero de refuerzo, se aflojará la trampa y se continuará con la introducción y descenso del armado dentro de la excavación; así sucesivamente hasta finalizar la colocación de la totalidad de los tramos del armado.



Figura III.48 Conector de varilla roscada [Propia].

Notas de los conectores mecánicos:

En una misma sección no podrá unirse mecánicamente más del 33% del área de refuerzo.

La distancia mínima entre secciones de conectores mecánicos será de 20 veces el diámetro de la varilla.

El acero de refuerzo vertical sobresaldrá del muro Milán para ser ligado a la trabe de coronamiento.

- d. Unido cada módulo del armado se realiza el descenso del tablero de manera centrada, cuidando no flexionar al armado, por lo que la maniobra se realiza lentamente; al colocar en la excavación el total de tramos de armado, el armado total del tablero quedará suspendido sosteniéndose al brocal.

Previamente, dentro del muro Milán se instalaron 4 inclinómetros hasta 34.5 m de profundidad. Los inclinómetros son instrumentos que nos permiten conocer la distribución con respecto a la profundidad de los desplazamientos que se presentan en la masa de suelo cercana a la excavación.

Para el vaciado del concreto dentro de la excavación se utilizará el procedimiento conocido como tubo Tremie para colado de concreto bajo lodo.

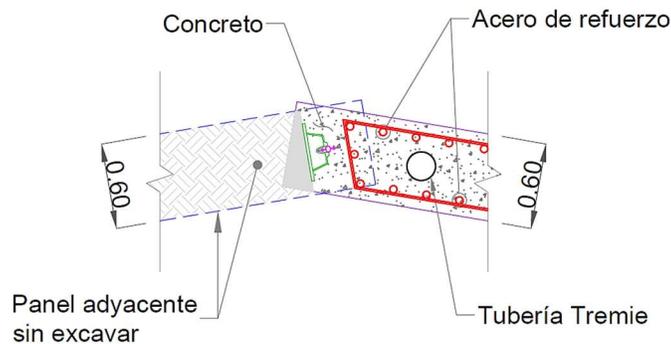


Figura III.49 Esquema de colocación de acero de refuerzo y colado con tubería Tremie. [Elaboración propia].

#### 10. Colado del muro Milán

Previo al inicio del colado, se coloca en la tubería Tremie un tapón o vejiga deslizante llamado “diablo” para evitar la contaminación del concreto durante el inicio del proceso de vaciado.

- a. Introducción de la tubería Tremie, separada de 20 cm del fondo, quedando suspendida

- b. Vaciado del concreto y elevación gradual manteniendo siempre la punta de la tubería bajo de la masa de concreto como mínimo 1.50 metros, para evitar la segregación del concreto y asegurar el correcto desplazamiento del lodo bentonítico. El objetivo principal es evitar la contaminación del concreto.
- c. Durante el progreso del vaciado se debe ir desmontando la tubería Tremie, pero controlando siempre la distancia mínima sumergida dentro del concreto ya vertido (1.50 m). Para identificar posibles fugas de concreto y/o lodo bentonítico, sobre-excavaciones o fisuras del terreno se debe llevar un control preciso de los niveles alcanzados al vaciar cada olla revolvedora, viendo que los volúmenes de lodos desplazado deben ser acorde a los volúmenes de concreto vertido.  
Durante el vaciado del concreto en la excavación, el volumen depositado desplaza el lodo bentonítico de ademe hacia la superficie, por lo que deberá recuperarse extrayéndolo mediante bombeo.
- d. El lodo bentonítico desplazado durante el colado del tablero es retirado mediante el empleo de bombas de lodos.
- e. El colado se da por terminado cuando el concreto vertido alcanza la cota superior a la prevista en proyecto tomando en cuenta la longitud de descabece para saneo. La cota se controla en los extremos de los tableros y en la zona próxima a la tubería Tremie.
- f. Cuando termina el vaciado se debe lavar cuidadosamente el tubo Tremie y en caso necesario, cambiar los sellos de hule.



Figura III.50 Colado de Muro Milán con tubería Tremie  
[Cortesía Ing. Daniel Falcao]



Figura III.51 Colado de Muro Milán con tubería Tremie  
[Cortesía Ing. Rosalba Trujillo Pech]

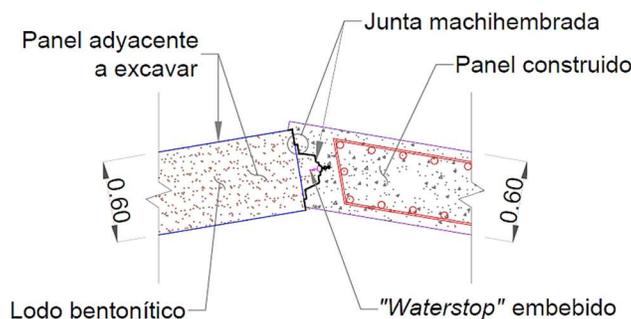
Una vez colado el tablero, se procede a la excavación del tablero siguiente de acuerdo con la secuencia determinada. Para la construcción de los tableros intermedios se repetirá toda la secuencia indicada anteriormente.

### 11. Retiro de juntas metálicas

- a. La extracción de la junta metálica se puede hacer en cualquiera de los dos siguientes casos:
  - i. Dejando transcurrir el tiempo necesario para que el concreto fragüe y quede en él la huella
  - ii. Cuando se haya finalizado (con la mayor celeridad posible) la perforación del módulo adyacente, con el fin de conservar el contacto con el concreto del tablero adyacente.

Adicionalmente, se deberán dejar tubos de reservación para la realización de pruebas de integridad tipo sónico con un total de 6 tubos en 3 tableros diferentes. Las pruebas de integridad se basan en la transmisión de ondas sísmicas producidas a lo largo del elemento y su posterior recepción por medio de geófonos mediante 2 tubos paralelos para que, simulando un efecto de "Cross hole", se pueda determinar la integridad del elemento colado desde superficie. (Estas pruebas son muy útiles y comunes en pilas, pilotes y muros Milán.)

Cabe destacar que el curado de los muros Milán suele estar exento de contracción por secado por el ambiente húmedo en que se encuentra.



Se repite el proceso conforme la secuencia indicada

Figura III.52 Esquema de colado de muro Milán. [Elaboración propia].

### 12. Construcción de la trabe de coronamiento

La trabe de coronamiento tendrá la función de ligar de forma rígida a todos los paneles del muro Milán. Posterior a la construcción de los muros, se inicia la demolición del brocal interior para la construcción de la trabe circular de coronamiento, cuya función es unir estructuralmente todos los tableros, previo descabece de éstos.

- a. Se excava hasta el nivel de desplante del brocal definitivo.
- b. Se procede al "descabece" del muro Milán, esto para quitar el concreto "contaminado/impuro" de lodo bentonítico; se retira todo el material producto del descabece.
- c. Colocación de acero de refuerzo para la trabe de coronamiento.
- d. Vaciado y vibrado de concreto.
- e. Cuando el concreto pueda autosoportarse se demuele el brocal interior

Dicha trabe de coronamiento ligará todos los tableros (o paneles) del muro Milán. Posterior a la demolición del brocal se procederá a construcción de pozos de abatimiento de nivel freático.



Figura III.53 Descabece de Muro Milán  
[Cortesía ICA]



Figura III.54 Limpieza de material producto del descabece  
[Cortesía Ing. Rosalba Trujillo Pech]



Figura III.55 Colocación de acero de refuerzo de trabe de coronamiento  
[Cortesía Ing. Rosalba Trujillo Pech]

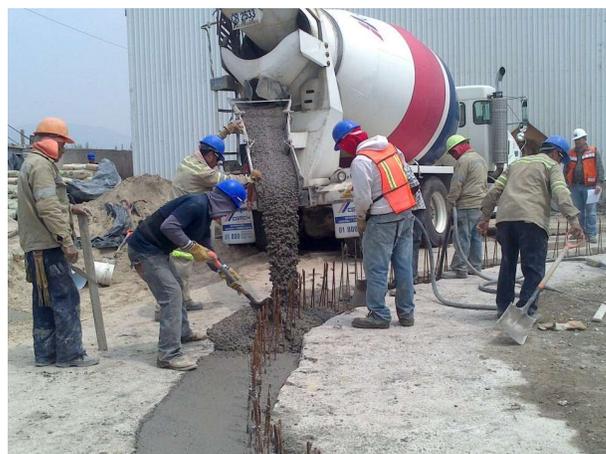


Figura III.56 Colado de trabe de coronamiento  
[Cortesía ICA]

### 13. Demolición de brocal interior

Habiendo alcanzado la resistencia el concreto de la trabe de coronamiento se demuele el brocal interior.

- a. Demolición de brocal interior utilizado para la construcción del muro Milán, usando excavadora con martillo hidráulico.
- b. Retiro de material producto de la demolición.

La excavación del núcleo de la lumbrera 7 fue realizada en dos partes, la primera a cielo abierto con excavadora, hasta una profundidad de 14.0 metros; y la segunda en los metros subsecuentes con almeja loca y ademe o estabilización con lodo bentonítico hasta alcanzar el nivel máximo de excavación.

### 14. Excavación del núcleo de lumbrera a cielo abierto

La excavación de dicho núcleo podrá iniciarse una vez que se haya terminado la demolición del brocal interior del muro Milán.

- La excavación del núcleo se llevó a cabo hasta una profundidad de 14.0 metros con excavadora
- El material producto de la excavación se retiró mediante bote de 10 m<sup>3</sup> de capacidad y grúa. Se deberá contar con los camiones suficientes retirar el material al tiro asignado.



Figura III.57 Excavación de lumbrera 7 a cielo abierto.  
[Cortesía Ing. Rosalba Trujillo Pech]



Figura III.58 Excavación de lumbrera 7 a cielo abierto.  
[Cortesía Ing. Rosalba Trujillo Pech]

Se deberá monitorear en todo momento la instrumentación colocada con el objetivo de mitigar el riesgo de una falla por subpresión. (Ver apartado “Anexos”)

### 15. Excavación del núcleo de la lumbrera con estabilización de lodo bentonítico

- Es vertido lodo bentonítico hasta que su nivel llega a 0.50 metros del nivel de brocal.
- Se inicia la excavación del núcleo utilizando almeja loca, y se va vertiendo lodo bentonítico sustituyendo el volumen de material extraído.



Figura III.59 Excavación con almeja loca  
[Cortesía Ing. Daniel Falcao].



Figura III.60 Estabilización con lodo bentonítico  
[Cortesía Ing. Daniel Falcao].

16. Construcción de tapón de fondo y retiro de lodo bentonítico

Finalizada la excavación del núcleo, se procederá a construir en el fondo un tapón de concreto.

El concreto deberá ser autocompactable, de extensibilidad inicial de 60 a 70 centímetros, y resistencia a la compresión simple a los 28 días:  $f'c = 250 \text{ kg/cm}^2$ .

- Dicho tapón se deberá colarse entre las cotas -29.00 y -27.00 metros de profundidad; éste colado se realizará en 4 sectores de  $130 \text{ m}^3$  cada uno.
- Cuando el concreto del tapón de fondo alcance el 90% de su resistencia a la compresión simple indicada, se procederá a retirar el lodo bentonítico del interior de la lumbrera mediante bombeo de manera gradual en avances de 5.0 metros.
- Verificación del estado físico del tope superior del tapón de concreto. En caso de encontrarse sobre volúmenes (protuberancias); éstas se deberán demoler para asegurar el nivel máximo de desplante de la losa de fondo.

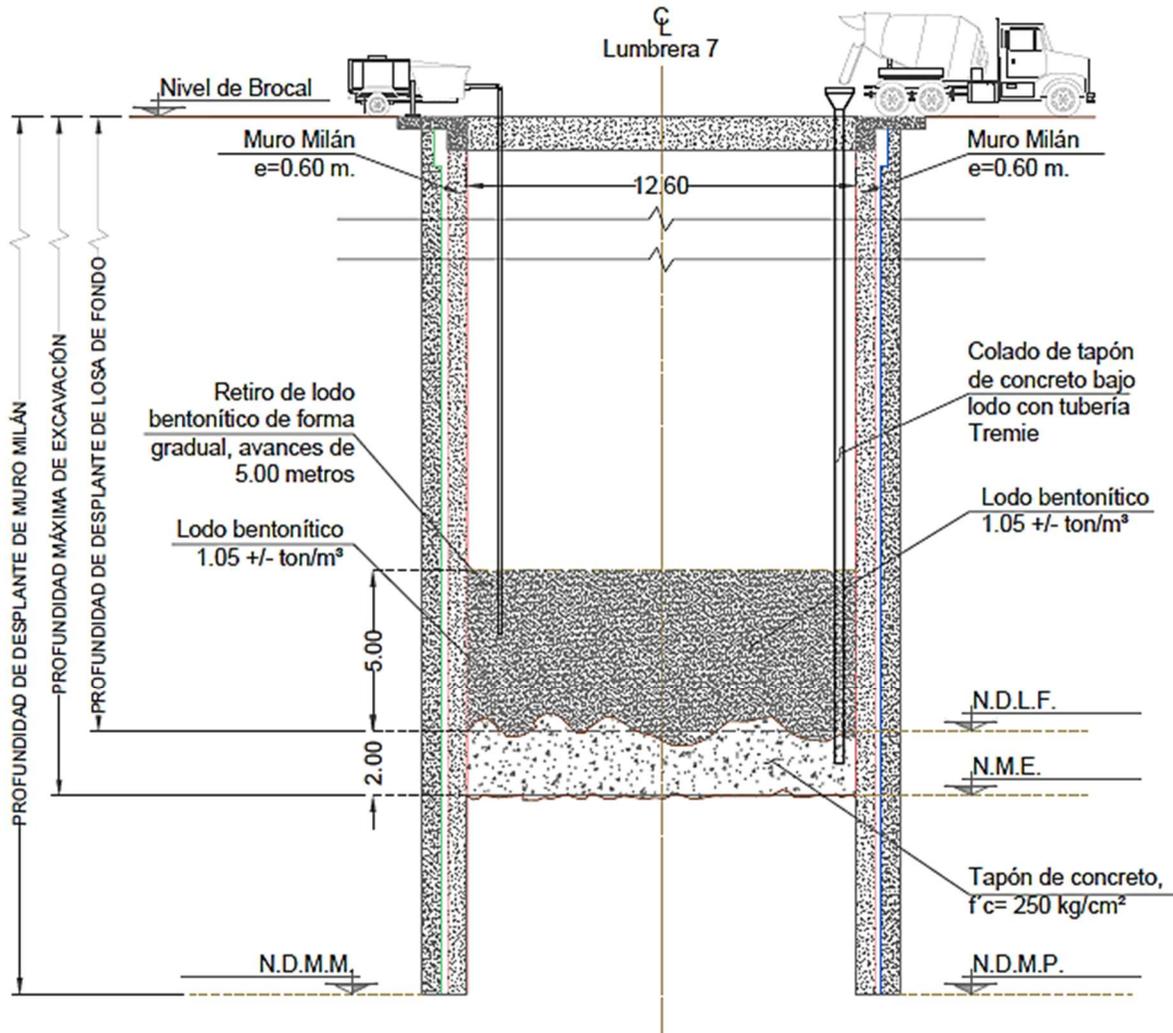


Figura III.61 Construcción de tapón de fondo y retiro de lodo bentonítico [Cortesía ICA].

### 17. Construcción de la losa de fondo

Como actividades previas a la construcción de la losa de fondo, se tiene la verificación, afine, limpieza y nivelación del tapón de fondo de la lumbrera; finalizado lo anterior, se coloca un firme de concreto pobre de aproximadamente 5 cm de espesor, previo al colado de la losa. El peralte de la losa será de 1.50 m.

- Se coloca el acero de refuerzo previamente habilitado de acuerdo al proyecto, cuidando de colocar los separadores para garantizar los recubrimientos especificados. También se habilita y coloca el acero de una parte del revestimiento definitivo
- Se realiza el colado con concreto hidráulico con resistencia  $f'c=350 \text{ kg/cm}^2$  y revenimiento de  $18 \pm 2 \text{ cm}$ , verificando el correcto acomodo del concreto mediante un vibrado competente.

Es importante que el colado se realice mediante una línea de tubería de colado con un dispositivo (tanque amortiguador) evitando la segregación del concreto en la colocación.



Figura III.62 Acero de refuerzo de losa de fondo colocado [Cortesía ICA]



Figura III.63 Acero de refuerzo de losa de fondo colocado [Cortesía ICA]

El colado de la losa de fondo se hará en forma monolítica y considerase como un colado masivo.



Figura III.65 Colado de Losa de fondo de Lumbrera 7.

## Proceso Constructivo del Túnel Churubusco – Xochiaca

Figura III.64 Colado de Losa de fondo con tubería Tremie. [Cortesía ICA].

[Cortesía ICA].

### 18. Construcción de revestimiento definitivo de lumbrera

Al finalizar la losa de fondo, se construirá el muro secundario o revestimiento definitivo de 0.30 metros de espesor.

Con ayuda de una grúa y cimbra colgante se colocará el acero de refuerzo del revestimiento definitivo de lumbrera.



Figura III.66 Izaje de cimbra colgante con grúa [Cortesía ICA]

- a. Se inicia con la colocación del acero de refuerzo, se tiene que dejar una longitud de 1.5 metros de varillas para la instalación de los conectores mecánicos que garanticen la continuidad del acero con la losa de fondo en su parte inicial o inferior. La continuidad del refuerzo vertical del muro secundario se dará mediante conectores mecánicos: Tipo 1 (roscado); mientras que el refuerzo horizontal será mediante traslapes ( $l=100$  cm).



Figura III.67 Colocación de acero de refuerzo con cimbra colgante [Cortesía ICA]



Figura III.68 Colocación de acero de refuerzo con cimbra colgante [Cortesía ICA]

- b. Una vez verificando el alineamiento y nivel de la cimbra deslizante, se procederá a realizar la colocación de acero y el colado continuo del muro, laborando continuamente hasta la terminación del revestimiento.

El tiempo máximo entre la construcción de la losa de fondo y la construcción del revestimiento definitivo será el que transcurra para que la losa de fondo alcance el 80% del f'c.

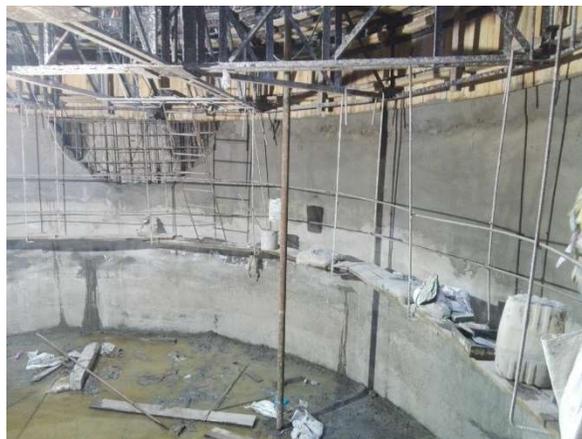


Figura III.69 Revestimiento definitivo construido bajo cimbra colgante [Cortesía ICA]

- c. Cuando se llega a la profundidad de 14.0 metros se realizan barrenos, y se colocan en ellos anclajes.
- d. Habiéndose colocado los anclajes se coloca el acero de refuerzo del anillo de rigidez



Figura III.70 Acero de refuerzo de anillo de rigidez  
[Cortesía ICA]



Figura III.71 Acero de refuerzo de anillo de rigidez  
[Cortesía ICA]

Se deben considerar las preparaciones de refuerzo adicional para la conexión Túnel-Lumbrera tanto en losa de fondo, así como en el revestimiento definitivo

### 19. Construcción de trabe de coronamiento

Finalizado el revestimiento definitivo, se procede al colado de las traves de coronamiento

1. Se habilita y se coloca el acero de refuerzo de la trabe de coronamiento
2. Se alza al nivel requerido la cimbra colgante.
3. Se vierte y vibra el concreto hidráulico
4. Alcanzada la resistencia del concreto se retira la cimbra colgante



Figura III.72 Construcción de trabe de coronamiento [Cortesía ICA]

Concluida los trabajos de la lumbrera, se construyen los elementos complementarios de la misma.

### III.1.3 Elementos complementarios de lumbrera

Los elementos complementarios de las lumbreras del Túnel Churubusco – Xochiaca son:

- A. Mejoramiento del terreno a la entrada y salida de la lumbrera
- B. Cuna de arrastre
- C. Muro de reacción
- D. Portal de entrada y salida
- E. Trabe de borde
- F. Mediacaña
- G. Losa Tapa
- H. Muro Tapón

Se describen a continuación sus procesos constructivos:

#### A. Mejoramiento del terreno a la entrada y salida de la lumbrera

El mejoramiento de suelo se realiza mediante la técnica de sustitución de material, por lo que se utiliza almeja guiada. Consiste en la sustitución de suelo por lodo fraguante, primero se excava el volumen a sustituir ademandando la excavación con lodo bentonítico; de la forma siguiente:

1. Con apoyo de topografía, se marca en superficie tanto en la entrada como en la salida del túnel, zona donde se deberá construir el mejoramiento de suelo.
2. Marcada la zona de trabajo de construcción del mejoramiento, se demuele parte del brocal exterior.

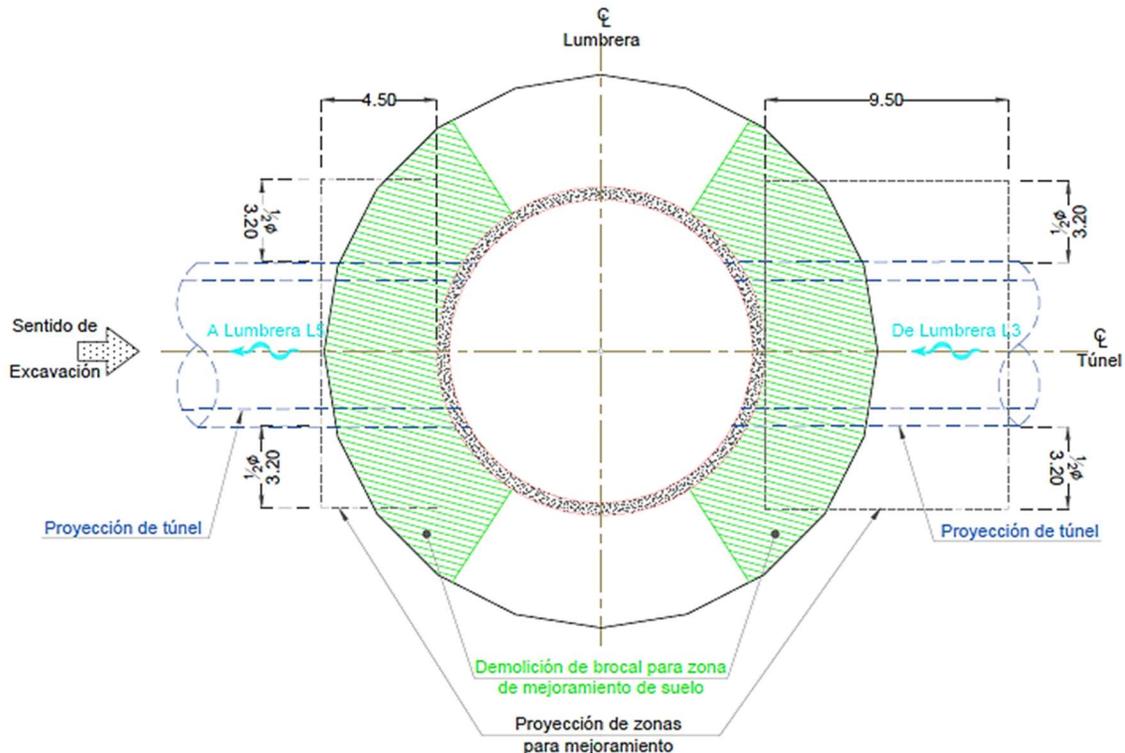


Figura III.73 Demolición de parte del brocal de Lumbrera 4 para mejoramiento de suelo (Planta) [Cortesía ICA].

El área por mejorar consiste en 9.50 m de longitud a partir del paño exterior de la lumbrera, y se toma medio diámetro de túnel (3.15 m) adicional de cada lado para la zona de salida, quedando un área de 9.50 x 12.6 metros; y para la zona de entrada 4.50 m de longitud por 12.60 metros. Y hasta una profundidad de 3.20 metros por debajo de la proyección del túnel.

3. Con apoyo de topografía, se trazan en superficie los tableros de mejoramiento para la entrada y salida del túnel, donde se construye el mejoramiento de suelo.

Los tableros tienen un área de 2.40 m de largo por 0.60 de ancho, se configuran 9 hileras para la zona de salida; y se configuran 5 hileras para la zona de entrada, conformadas por un número de 6 a 8 tableros por hilera como se observa en la siguiente figura:

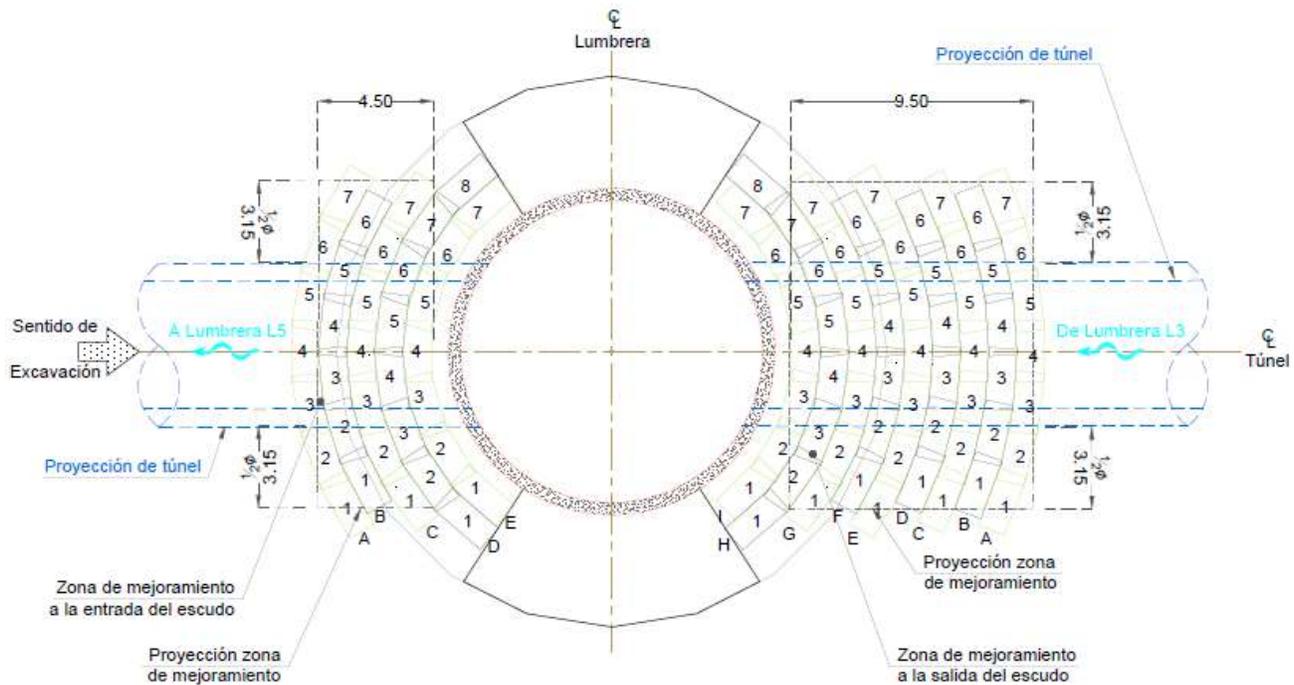


Figura III.74 Trazo de tableros de mejoramiento de entrada y salida de la lumbrera 4 TCX (Planta) [Cortesía ICA].

4. Se excava de manera alternada en los tableros próximos al muro de la lumbrera (iniciando con la hilera "I" para la zona de salida, e iniciando con la hilera "E" para la zona de llegada del escudo), a fin de formar una hilera paralela y de similar resistencia a la pantalla impermeable, para que durante la construcción de las hileras contiguas (la hilera "I" para el área de salida, y la hilera "E" para el área de entrada) se disminuya el "pateo".
5. Para el ademe de la excavación se utiliza lodo bentonítico con densidad mínima de 1.07ton/m<sup>3</sup>, dicho lodo reemplaza el volumen de suelo extraído conforme avance la excavación, cuidando que el nivel de lodo se localice a 0.50 m. respecto al nivel del brocal.
6. La profundidad de la excavación se verifica por medio del dispositivo que tiene el equipo guiado; al llegar al fondo de la se verificará la profundidad mediante una sonda.
7. El lodo fraguante de sustitución se coloca utilizando la técnica de colado bajo lodo con tubo Tremie.

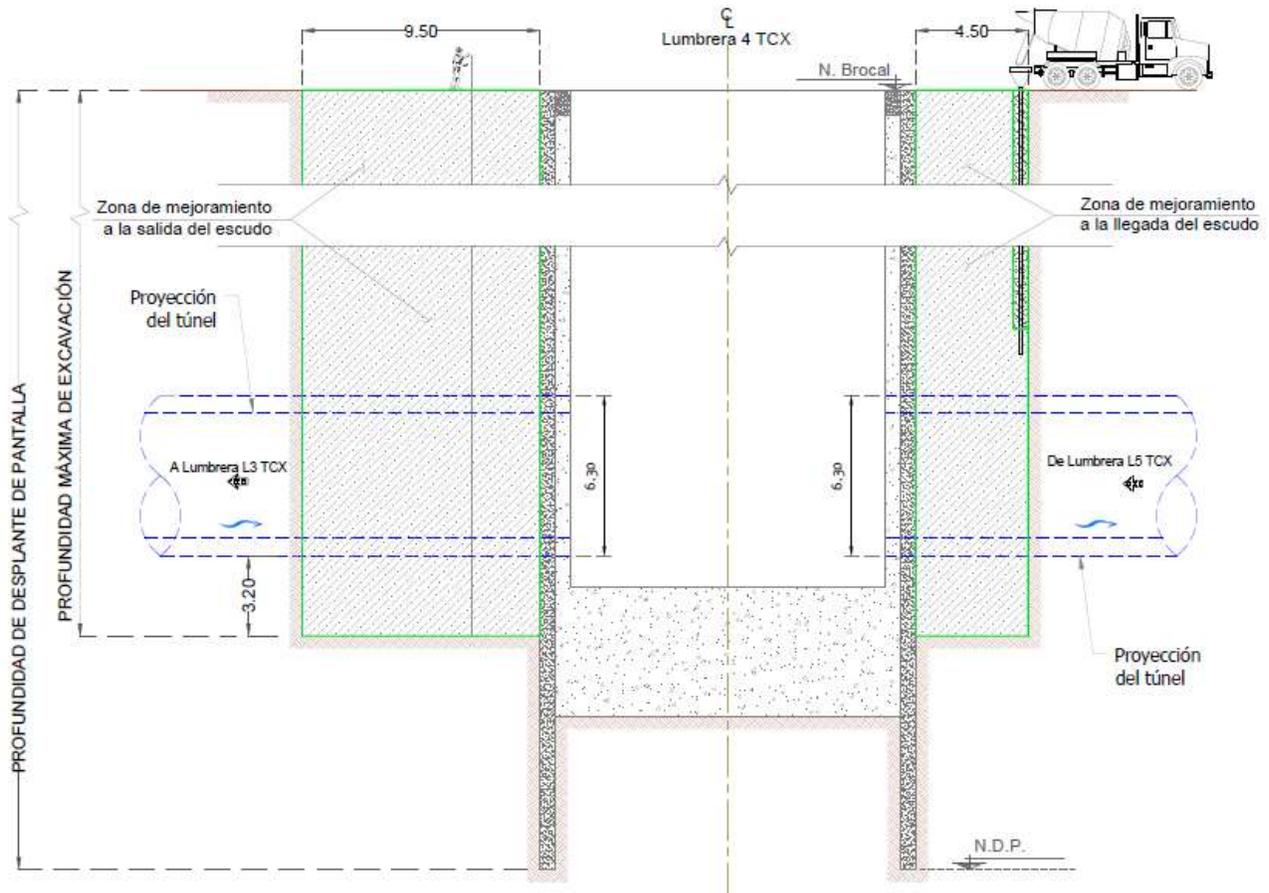


Figura III.75 Construcción de mejoramiento de entrada y salida de la lumbrera (Perfil) [Elaboración propia].

8. Concluidos los tableros de mejoramiento, habiendo fraguado el lodo, se comienza a demoler los muros de lumbrera en los portales de llegada y salida del escudo; finalizado esto, se realizan ventanas de inspección en la zona de los portales, para determinar si hay flujos de agua que impidan los trabajos de excavación, en caso de encontrar dichos flujos se realiza una serie de inyecciones horizontales de mortero, utilizando el método de manguitos.

### B. Cuna de arrastre

La cuna de arrastre es el elemento el cual da apoyo a la tuneladora por medio de rieles, desplazándose sobre estos en su paso por la lumbrera

1. Mediante el apoyo de la brigada de topografía se verifican y marcan en sitio, los puntos donde se harán barrenos, y se pueden ajustar en campo de acuerdo con las condiciones reales, previo visto bueno de la dirección del proyecto.
2. Se realizan barrenos sobre la losa de fondo conforme a proyecto

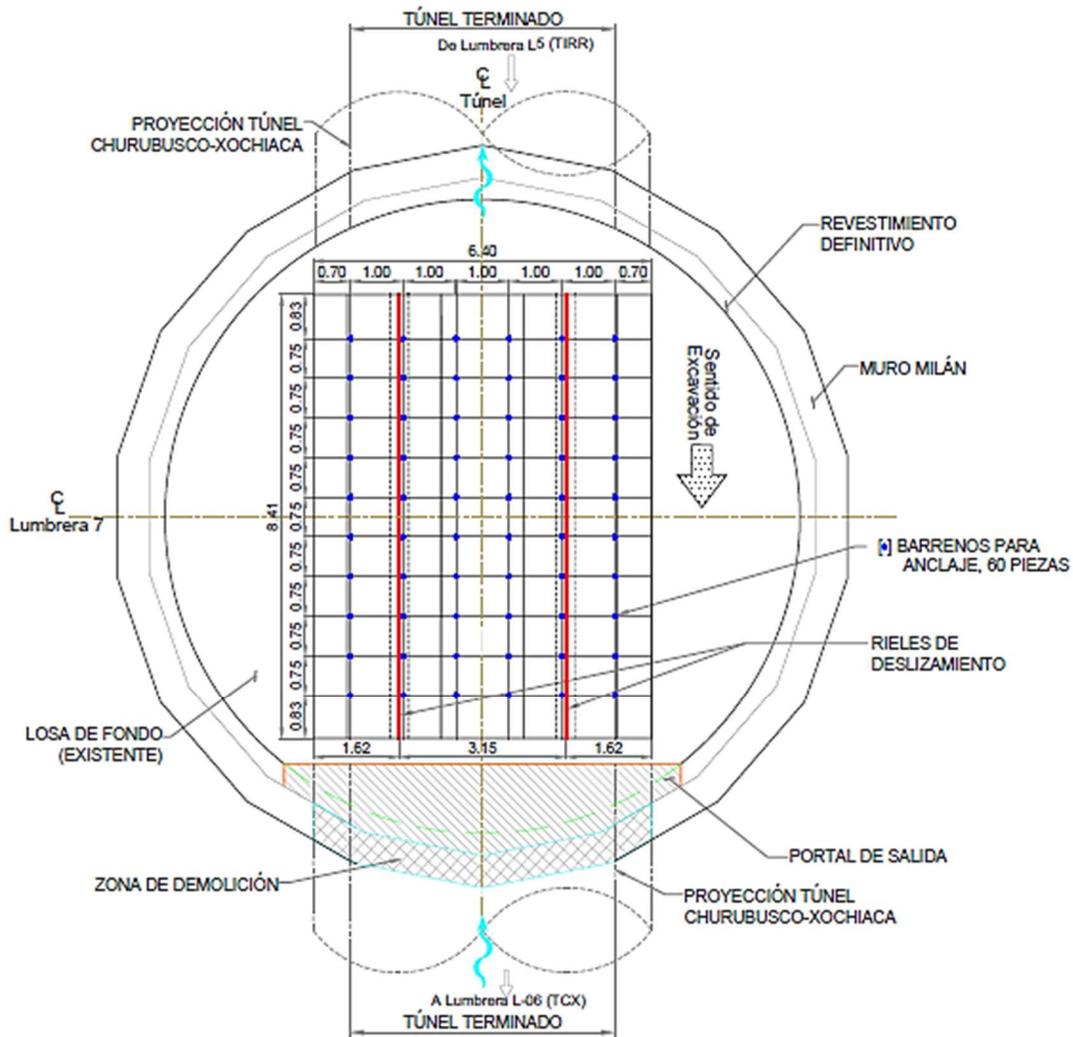


Figura III.76 Distribución de anclajes en losa de fondo para cuna de arrastre de Lumbra 7 (Planta) [Cortesía ICA].

3. Se coloca el grout y acero de refuerzo de anclaje.

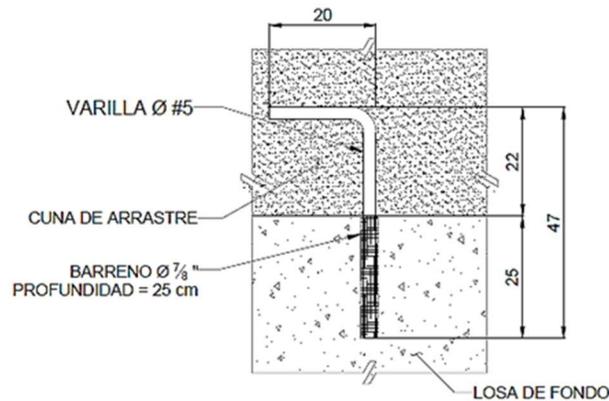


Figura III.77 Detalle de anclajes en losa de fondo para cuna de arrastre [Cortesía ICA].

4. Es habilitado y colocado el acero de refuerzo de la cuna

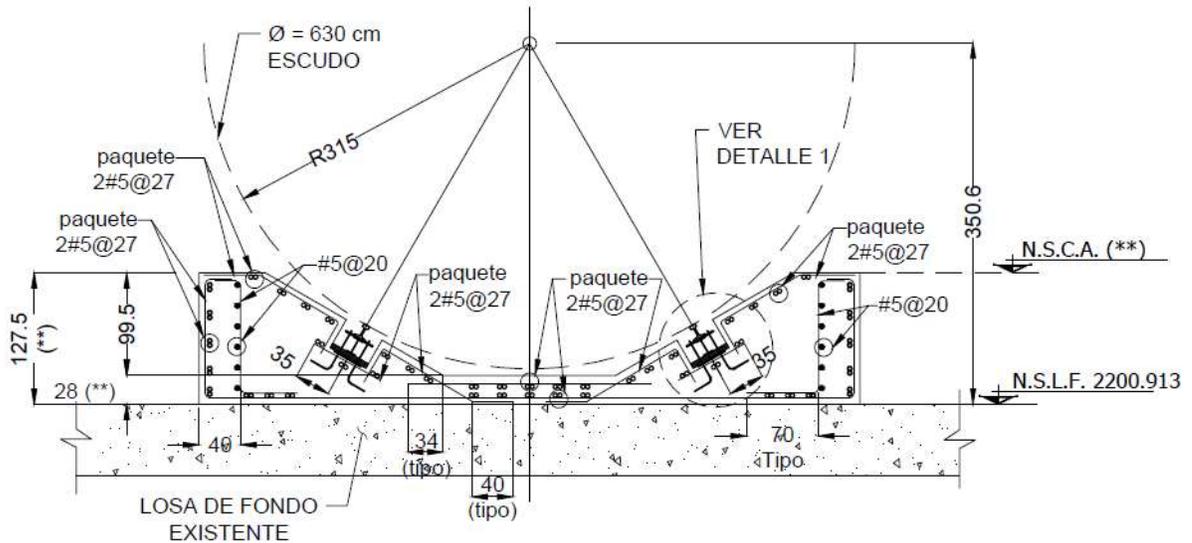


Figura III.78 Acero de refuerzo para cuna de arrastre (Perfil) [Cortesía ICA].

5. Se coloca la cimbra y es vaciado y vibrado el concreto
6. Son distribuidas y acomodadas o calzadas las placas de ajuste con grout
7. Se realiza la colocación de los rieles y su nivelación en sentido de la salida del escudo

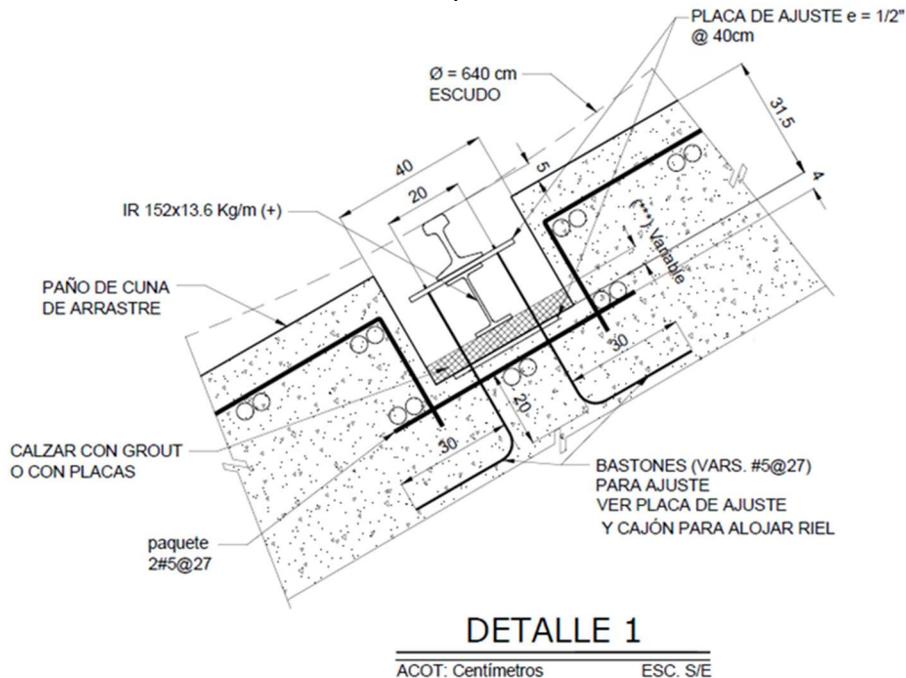


Figura III.79 Detalle de riel en cuna de arrastre [Cortesía ICA].

### C. Portal de entrada y salida

Los portales de entrada y salida ayudan a rigidizar y confinar el espacio en el momento que la tuneladora excava al paso por la lumbrera.

1. Se instalan andamios y es demolido el muro de la lumbrera hasta dejar descubierto el armado del lecho interior, y del lecho superior respectivamente
2. Se coloca el acero de refuerzo de acuerdo al proyecto, “anclándolo” al acero de refuerzo expuesto (del muro de lumbrera) por la demolición.



Figura III.80 Acero de refuerzo colocado para portal [Propia].

3. La colocación de la cimbra se realiza de manera circular, se realiza su habilitado en superficie y posteriormente teniendo los elementos completos, se bajan al fondo de lumbrera, donde se procede a su colocación y su detallado.

Durante el habilitado de cimbra se dejan ventanas, dichas ventanas deben ser de fácil acceso, y tener las dimensiones necesarias para no derramar concreto fuera de la cimbra durante su vaciado, y ser de cerrado y sellado rápido. Las ventanas utilizadas para el colado de los portales de salida y entrada son de 0.30 m x 0.30 m

4. Se vierte en concreto con el vibrado necesario, colando así el portal de forma monolítica

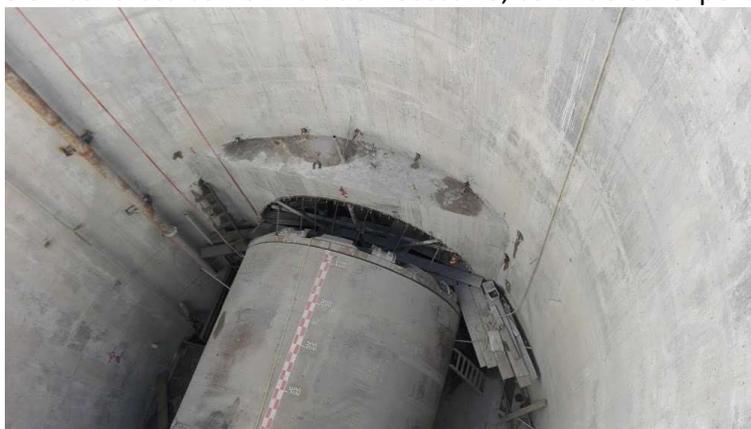


Figura III.81 Portal de entrada construido [Propia].

### D. Muro de reacción

En la lumbrera donde se inicia la excavación se hace el muro de reacción o atraque; para el caso del Túnel Churubusco Xochiaca fue la Lumbrera L5 TIRR. Por motivo del espacio, este muro de reacción se construyó posterior al bajado de la tuneladora.

El muro de reacción es una estructura colocada inmediatamente después del muro de la lumbrera, que contrarresta el empuje ejercido por los gatos hidráulicos de la tuneladora a las dovelas y tubería de atraque.

1. Con el apoyo del área de topografía se realiza el trazo del muro de reacción o atraque.
2. Es demolido el muro de la lumbrera hasta dejar descubierto el armado del lecho interior, y del lecho superior respectivamente
3. Se coloca el acero de refuerzo del muro de reacción
4. Es colocada la cimbra
5. Se vierte el concreto hidráulico y se da el vibrado necesario.
6. Al poder autosoportarse el concreto se retira la cimbra.

El colado del muro de reacción se hace en forma continua y se considera como un colado masivo.

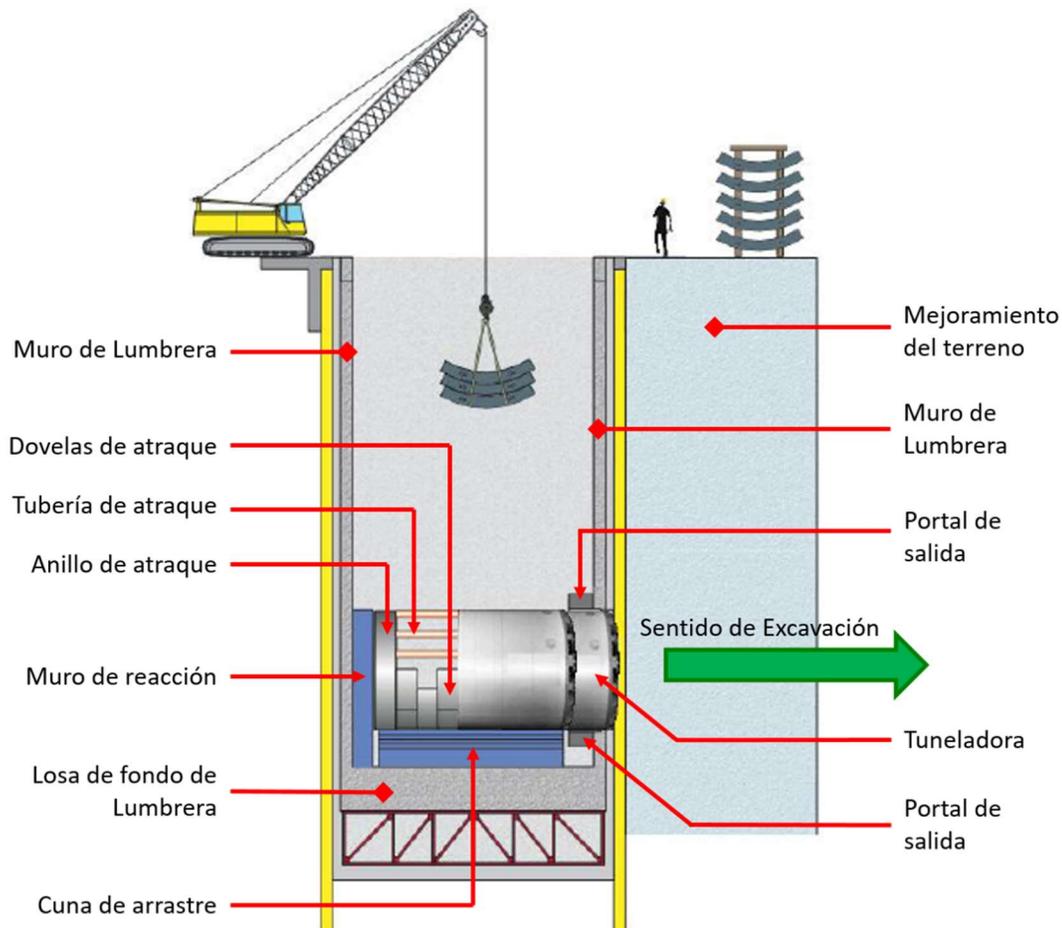


Figura III.82 Perfil de la ubicación del muro de reacción, tubería de atraque, dovelas de atraque, cuna de arrastre y portal de salida en lumbrera [Cortesía: Ing. Luis Adrián Palomino Cortés].

### E. Trabe de borde

La trabe de borde es un elemento de concreto reforzado y su función principal es evitar que ocurran fallas estructurales en la intersección túnel-lumbrera.

Esta trabe se realiza una vez concluidos los trabajos de revestimiento definitivo

1. Se realiza el trazo de la trabe de borde y el arreglo de hileras de los barrenos.
2. Se realizarán perforaciones de 1 1/8" de diámetro, a una profundidad de 25 cm.
3. Limpieza del área aplicando aire comprimido para limpiar profunda y totalmente. Lo anterior con la finalidad de tener una unión estanca y adecuada.
4. Se colocará el conector (varilla del diámetro igual al armado de proyecto de 40 cm de longitud) en el barreno.
5. Se realizará colocación del adhesivo epóxico "grout" o similar en el espacio entre el conector y el barreno.
6. Se habilita el acero de refuerzo de la trabe de borde
7. Se coloca la cimbra y es colada la trabe de borde.

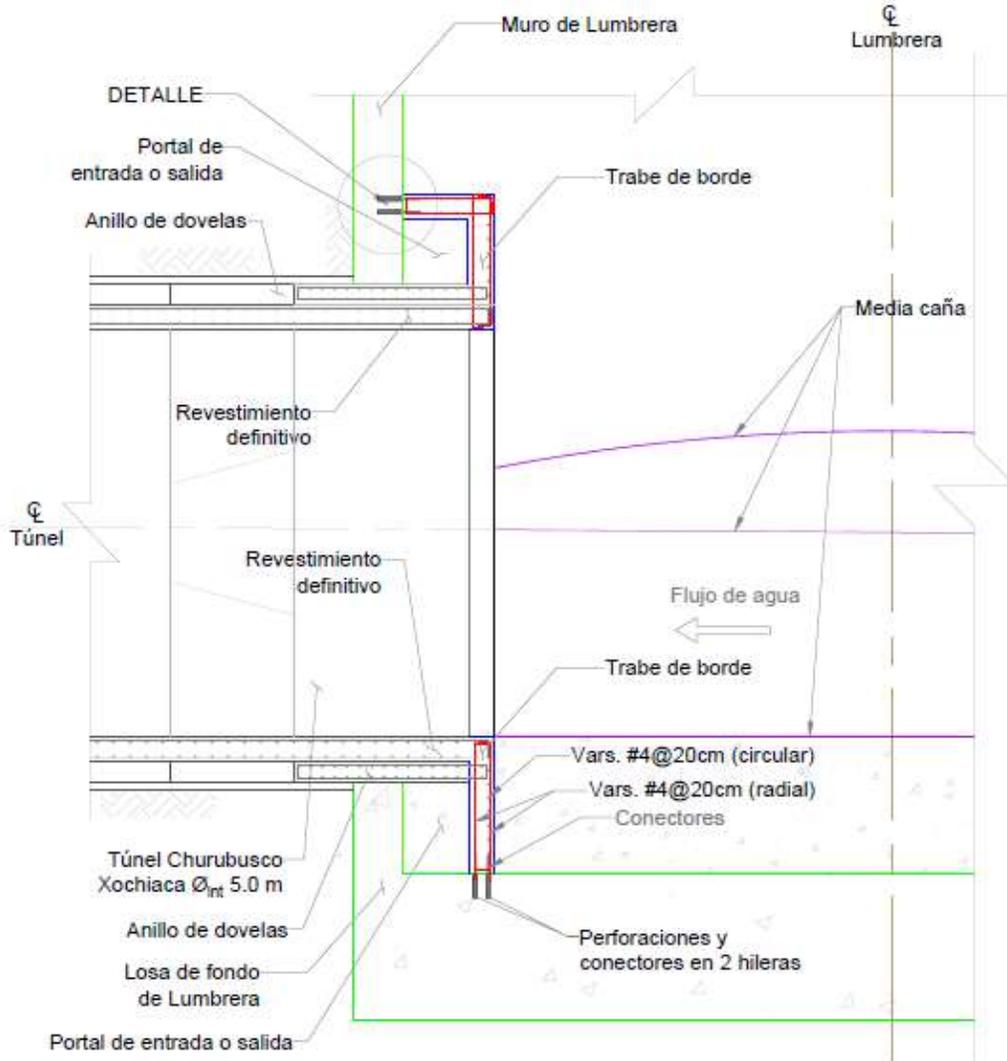


Figura III.83 Perfil de Trabe de borde [Cortesía ICA].

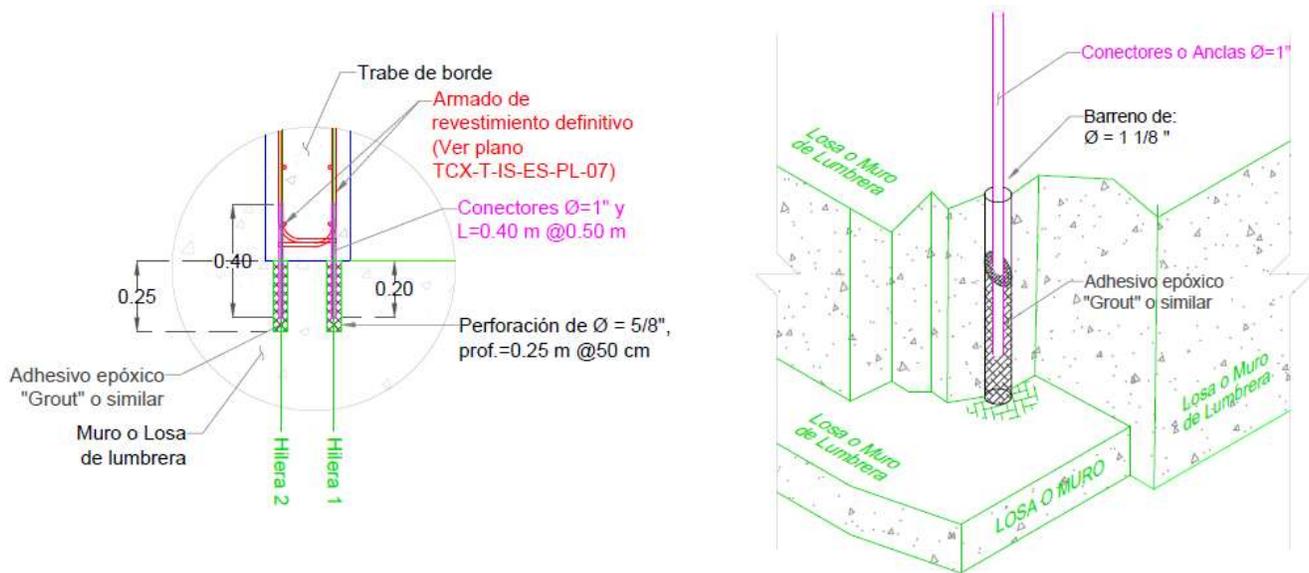


Figura III.84 Detalles de conectores con grout para Trabe de borde [Cortesía ICA].

#### F. Mediacaña

1. Se realizará el trazo del arreglo de hileras de los barrenos. El cual consta de 2 hileras en tresbolillo (para considerar los dos lechos inferior y exterior a una separación: @60 cm
2. Se realizarán perforaciones de 1 1/8" de diámetro, a una profundidad de 25 cm, a un ángulo aproximado, a fin de seguir con la pendiente de la media caña.
3. Limpieza del área aplicando aire comprimido para limpiar profunda y totalmente. Lo anterior con la finalidad de tener una unión estanca y adecuada.
4. Se colocará el conector (varilla del diámetro igual al armado de proyecto de 40 cm de longitud) en el barreno.
5. Se realizará colocación del adhesivo epóxico "grout" o similar en el espacio entre el conector y el barreno.
6. Se conforma tezontle granulado ( $\varnothing=2''$  máximo) hasta una altura de 1.93 m, y formando la media caña con una pendiente hacia ella de 0.05.
7. Es habilitado y colocado el acero de refuerzo de la media caña.
8. Se inicia el colado con una parte de la cubeta de la media caña, y es vibrado.
9. Se coloca la cimbra para los hastiales,
10. Se vierte el concreto hidráulico y se le da el vibrado necesario.
11. Finalmente son coladas las pendientes de la media caña

## Proceso Constructivo del Túnel Churubusco – Xochiaca

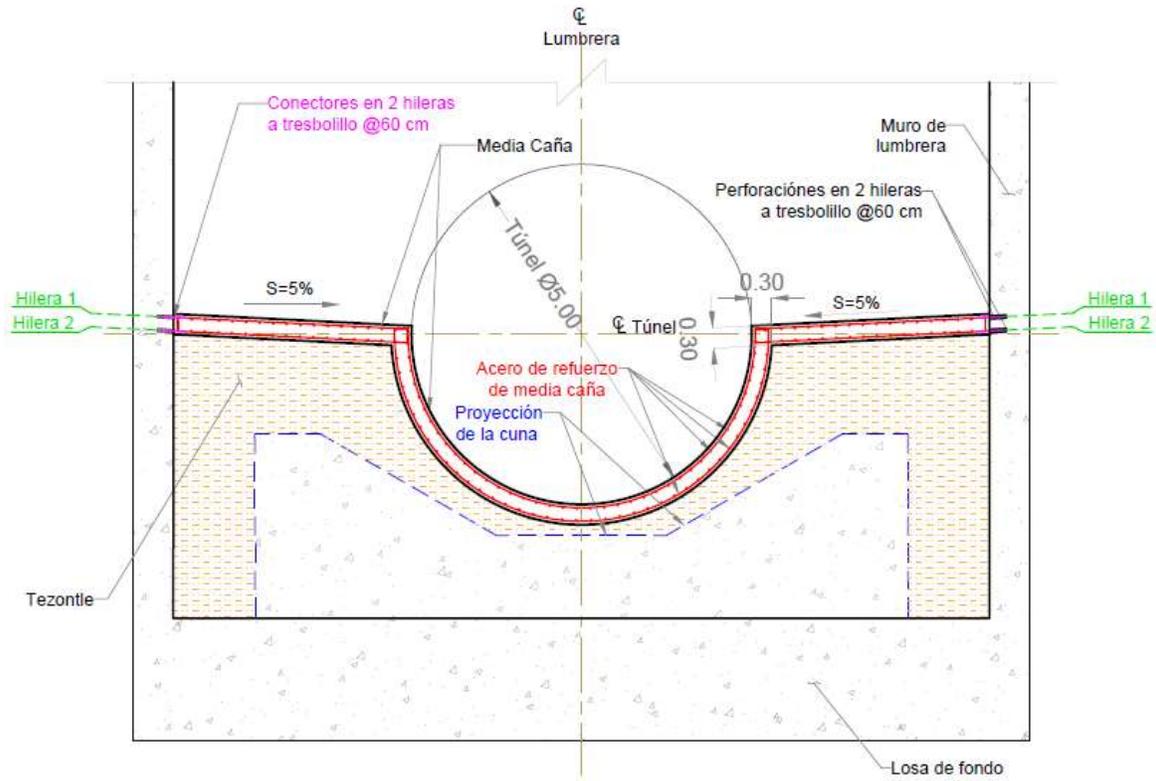
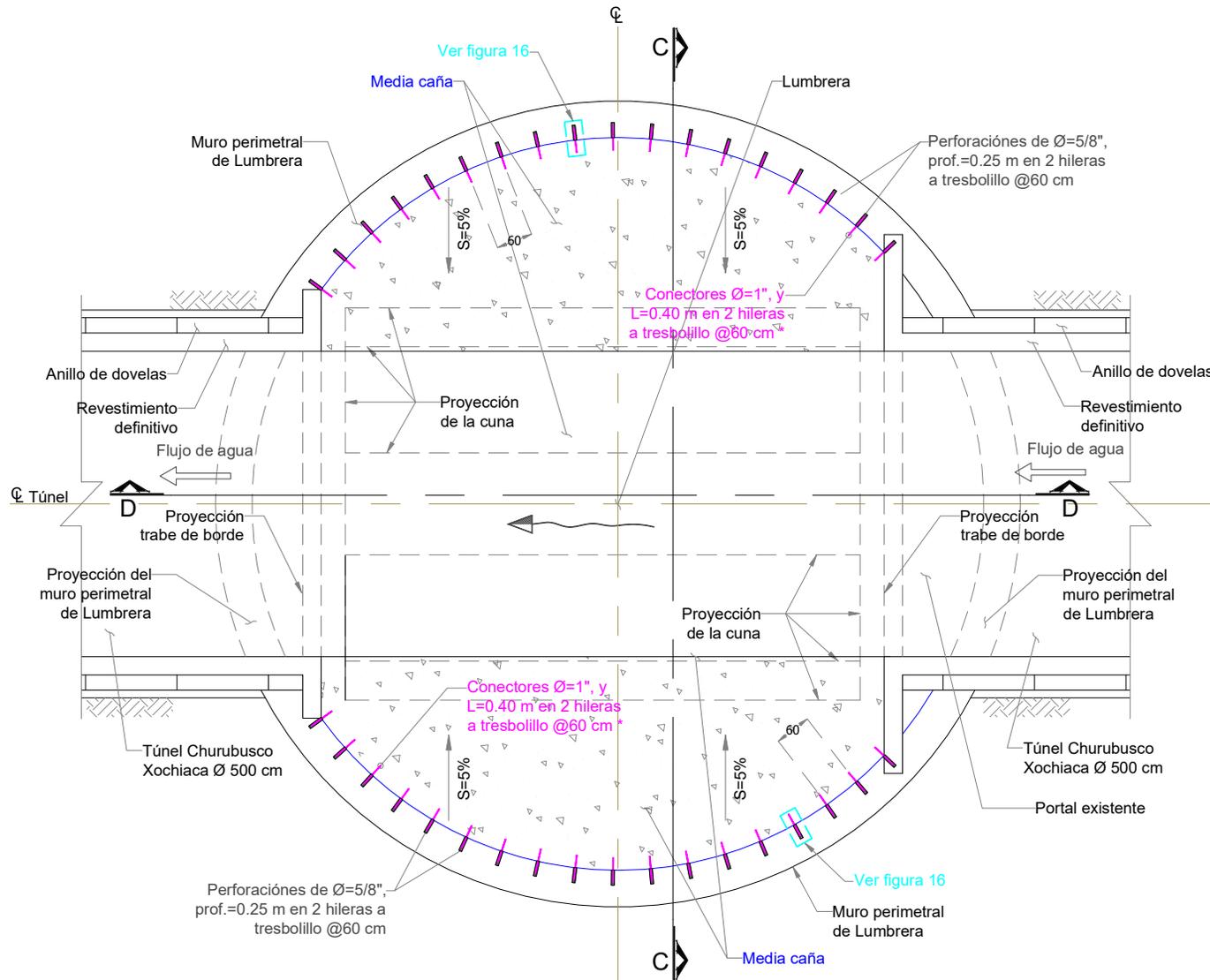


Figura III.85 Perfil de construcción de media caña [Cortesía ICA].

# Proceso Constructivo del Túnel Churubusco – Xochiaca



\* - Por claridad en el dibujo no se muestran las 2 hileras de conectores

Figura III.86 Construcción de media caña en planta [Cortesía ICA]

## Proceso Constructivo del Túnel Churubusco – Xochiaca



Figura III.87 Colocación de acero de refuerzo de media caña [Cortesía ICA].



Figura III.88 Colocación de acero de refuerzo de media caña [Cortesía ICA].



Figura III.89 Colado de cubeta de media caña [Cortesía ICA].



Figura III.90 Colado de pendiente de media caña [Cortesía ICA].

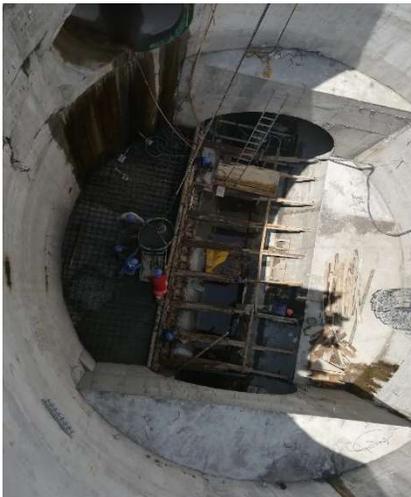


Figura III.91 Colado de pendiente de media caña [Cortesía ICA].



Figura III.92 Colado de pendientes de media caña [Cortesía ICA].

Para finalizar trabajos en las lumbreras se requiere de la colocación de losa tapa, la cual está constituida por traveses que sirven de soporte para la colocación de tabletas prefabricadas en la parte central de la lumbrera y rejilla tipo Irving al contorno de estas, así como barandal de protección al perímetro del elemento.

### G. Losa Tapa

La losa tapa consta de dos principales traveses portantes prefabricadas de concreto reforzado, que libran la lumbrera, dan soporte a los elementos prefabricados, filtros, y rejillas que sirven de ventilación, y sirven de apoyo a las traveses secundarias.

La construcción de la losa tapa se lleva a cabo después de finalizar toda actividad de construcción de túnel, y después de concluirse la construcción de la media caña en la lumbrera.

Las traveses portantes se sostienen por medio del muro estructural, es decir, se realizan demoliciones en el muro para que estas piezas sean ensambladas con el muro estructural, para su posterior relleno con concreto y adhesivo.

Por otra parte, el muro estructural posee ménsulas de apoyo previamente construidas en el proceso de su construcción, sobre la que se desplantaran una variedad de elementos prefabricados y rejillas.

1. Se comienza por demoler parte de la trabe liga, para crear el espacio para los apoyos donde se asienta la losa tapa
2. Se izan y son colocadas las traveses prefabricadas en los espacios correspondientes con su tacón de neopreno de 2.5 cm de espesor respectivo.
3. Una vez colocadas las traveses, se colocan las rejillas y los prefabricados centrales (entre estos prefabricados está un filtro de carbón activado).
4. Para finalizar los trabajos de lumbrera, se hacen las perforaciones radiales necesarias para anclar y fijar la estructura de barandal.



Figura III.93 Losa tapa de Lumbrera, [Propia].

### H. Muro tapón

Aunque un poco ajeno pero necesario para dar estanqueidad a las lumbreras de conexión, otro elemento complementario es el muro tapón; para el caso del Túnel Churubusco Xochiaca se realizó este muro tapón en la lumbrera cuatro del Túnel Interceptor Río de los Remedios (TIRR).

Adicional a dicho muro tapón de concreto reforzado se instaló una compuerta para poder regular el flujo.

Se enlista el procedimiento de construcción para el muro Tapón:

- Trazo para los barrenos en el portal y media caña existentes, y se realizan dichos barrenos
- Se fijan las varillas de anclaje por medio de adhesivo epóxico HILTI RE-500 o similar
- Es habilitado y colocado el acero de refuerzo del muro tapón
- Suministro y colocación de cimbra
- Suministro, colocación y vibrado de concreto hidráulico
- Suministro e instalación de compuerta

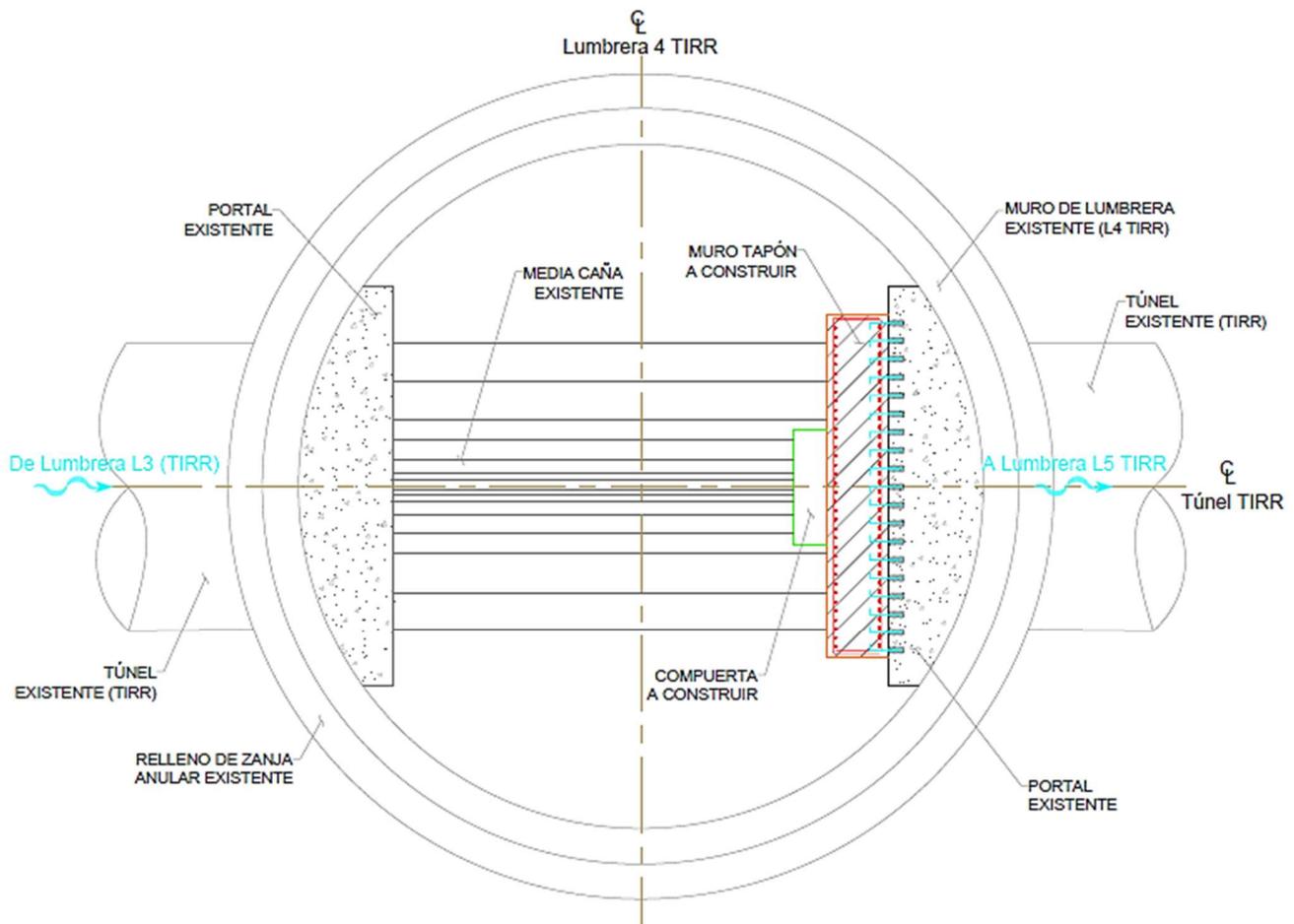


Figura III.94 Muro tapón de Lumbrera 4 TIRR en planta. Cortesía [ICA].

## III.2 Dovelas (Prefabricación)

Las dovelas son prefabricadas en moldes que se desplazan cíclicamente por la planta, en donde a través de cadenas y trinquetes, los moldes se van moviendo en forma automática y pasan por cada una de las etapas del proceso de fabricación; se cuenta con un total 42 moldes (6 anillos completos), el ciclo total de un molde es de poco más de 8 horas, de las cuales permanece aproximadamente 6 horas en la cámara de curado a vapor. Los moldes están marcados con su tipo de pieza correspondiente.

Este sistema consiste en las actividades siguientes:

De manera previa y posteriormente simultánea, se realizan los trabajos de limpieza de molde y colocación de desmoldante, para que el molde esté listo al recibir el armado de la dovela correspondiente.

1. Limpieza del molde.
  - a. Se realiza un lavado del molde con agua a presión, en caso de existir residuos de concreto son retirados con espátula, cincel y cepillo.



Figura III.95 Limpieza de molde para dovela. [Cortesía ICA].

Realizada la limpieza se procede a la aplicación del desmoldante, tomando las medidas preventivas en caso de algún derrame, con una cubierta de plástico y aserrín, en el lugar de la aplicación.

El desmoldante que se utiliza es RHEOFINISH 255 el cual forma una barrera química resistente al agua con los álcalis del concreto. La acción química de este no daña ni mancha el concreto, obteniendo una pieza con apariencia limpia, y sin residuos que se transferían a la superficie.



Figura III.96 Desmoldante Rheofinish 255. [Cortesía ICA].

### 2. Colocación del desmoldante.

- a. Se hace uso de un rociador tipo pistola a base aire comprimido, con lo cual se aplica una cantidad exacta y uniforme a todas las superficies que entrarán en contacto con el concreto.



Figura III.97 Rociador de desmoldante. [Cortesía ICA].

### 3. Habilitado del acero de refuerzo

El habilitado de acero corresponde al doblado de varillas y la fabricación de todos los estribos, bastones y grapas según el tipo de dovela que se requiera, todo esto con la ayuda de cortadoras, dobladoras, y para la unión de las varillas y fijado de estribos de utilizan soldadoras de microalambre.

- a. Identificadas las piezas a utilizar de acuerdo con el tipo de dovela a armar se procede a las tres fases de armado:
  - 1) Armado del lecho o parrilla inferior
  - 2) Armado de lecho o parrilla superior
  - 3) Armado de cadenas

El armado se lleva a cabo en mesas destinadas para cada tipo de dovela.

- b. Se coloca en la mesa la parrilla del lecho inferior, una vez en su posición se colocan las piezas habilitadas para traslape de ambos lechos, se colocan las cadenas para lograr la altura adecuada del armado y se procede a poner la parrilla del lecho superior.



Figura III.98 Habilitado de acero para parrilla [Cortesía Ing. Carlos J. Ilhuicatzí González].



Figura III.99 Habilitado de acero de refuerzo de dovela. [Cortesía Ing. Carlos J. Ilhuicatzí González].

Una vez ensamblada la parrilla, se verifica que cumplan con la cantidad de estribos y grapas que se indican en las especificaciones y que el armado este en su posición, debidamente fijado con los puntos de soldadura de microalambre.

c. Se coloca el armado de dovelas en el carrusel

Con ayuda de la grúa viajera tipo monopuente de 5 toneladas, marca HAWI se traslada el armado de la dovela hacia una mesa giratoria con divisiones (una para cada tipo de dovela) llamada “carrusel” en donde se coloca de acuerdo con el tipo de dovela correspondiente.



Figura III.100 Colocación de armado carrusel [Cortesía Ing. Carlos J. Ilhuicatzí González].

Para el caso de las dovelas instrumentadas el habilitado y colocación de los deformímetros y celdas de presión se realiza cuando el armado del acero de refuerzo finalizó, previo a la colocación del armado dentro del molde. (Ver apartado “Anexos”)

4. Colocación de insertos, separadores, y armado dentro del molde.

- a. Se colocan los insertos y separadores también conocidos como “pollitos” en el armado de acero, necesarios para cumplir con los recubrimientos especificados en el proyecto



Figura III.101 Inserto para junta  
[Cortesía Ing. Carlos J. Ilhuicatzí González].



Figura III.102 Separadores en armado  
[Cortesía Ing. Carlos J. Ilhuicatzí González].

En el lecho superior e inferior se utilizan separadores de 5 cm, mientras que para los lados son de 3 cm; de igual forma se colocan insertos de plástico para las juntas transversales y longitudinales, así como para el perno roscado.

- b. Con la ayuda una grúa de 1.5 toneladas se toma el armado requerido de la mesa giratoria y se traslada y coloca dentro del molde correspondiente.



Figura III.103 Colocación de armado en molde [Propia].

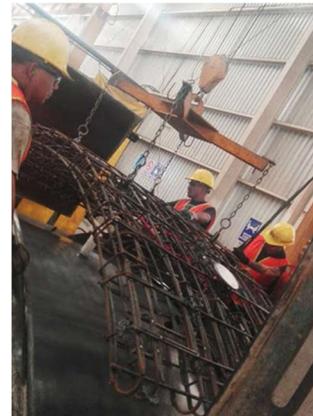


Figura III.104 Colocación de armado en molde [Propia].

- c. Con la pistola neumática son apretados los tornillos del molde, y se cierran las tapas para pasar a la colocación del concreto



Figura III.105 Cerrado del molde [Cortesía Ing. Carlos J. Ilhuicatzí González].

### 5. Colocación de concreto hidráulico

Para el proceso de colado se cuenta con una cámara diseñada especialmente para este fin, sus dimensiones son de 7 m x 5.6 m, cuenta con puertas automáticas, instalaciones de aire a presión, y aislamiento acústico entre la cámara y la cabina de mando.

Al entrar a la cámara de colado se realiza una inspección para cerciorarse que no hizo falta algún separador o inserto, apretar algún tornillo, y que el molde este cerrado completamente.



Figura III.106 Cámara de colocación y vibrado de concreto [Propia].

### a. Vaciado y vibrado de concreto

Con la ayuda de una bacha con capacidad para 3 m<sup>3</sup> se transporta el concreto de la planta de concreto a la cámara de colados, donde se vacía dentro del molde; cuando ya se tiene colocada la cuarta parte del volumen del concreto se inicia el vibrado utilizando los vibradores neumáticos fijos de alta frecuencia ubicados debajo de los moldes.



Figura III.107 Colocación y vibrado de concreto [Propia].



Figura III.108 Vibrador en molde [Cortesía Ing. Carlos J. Ilhuicatzí González].

### 6. Enrasado y pulido de la cara externa de la dovela

- a. Se abren las tapas superiores, para dar el acabado a la pieza, con una regla metálica o de madera se da el enrase de la dovela, y con una llana metálica se da el acabado pulido.



Figura III.109 Enrasado de concreto de dovela [Propia].



Figura III.110 Pulido de concreto de dovela [Propia].

### 7. Lavado exterior del molde

- a. Se limpia el exterior del molde utilizando agua a presión para retirar todo concreto existente en la parte exterior, así se evita que se endurezca y sea más difícil la limpieza una vez retirada la pieza.

- b. Una vez limpio el molde, se procede a cubrir con polietileno para ayudar al fraguado de la pieza, posteriormente se cierran las tapas asegurándolas parcialmente.



Figura III.111 Cerrado de molde, posterior a limpieza exterior [Propia].

### 8. Curado a vapor

Las dimensiones de la cámara de curado son de 53 m x 10 m con capacidad para 30 moldes. Su funcionamiento es a través de un generador de vapor, que es controlado por un tablero.

- a. Un sistema mecánico recoge el molde y lo coloca en la cámara de curado, haciendo avanzar por empuje todos los moldes de esa línea, al mismo tiempo otro sistema mecánico carga el último de ellos sobre el carro de salida, el cual a su vez lo lleva hacia la línea de trabajo, para comenzar un nuevo ciclo.
- b. El curado se subdivide en las siguientes etapas:
  - i. Periodo de curado inicial sin vapor.- Después de haber colado la pieza en su molde, se tiene un tiempo de 70 minutos con tolerancia de +/- 30 minutos que es el periodo de curado inicial a temperatura ambiente sin vapor.
  - ii. Elevación o Incremento de temperatura.- La segunda sección de la cámara nos permite tener un incremento gradual de temperatura en la cual pasamos de temperatura ambiente hasta un rango de 31 a 55°C en un tiempo de 84 minutos con tolerancia de +/- 36 minutos.
  - iii. Mantenimiento o Sostenimiento de temperatura.- El molde pasa a la tercera sección, en la cual se tiene una temperatura que va de los 50 a 65°C y permanece en este ambiente húmedo por espacio de 252 minutos con tolerancia de +/- 108 minutos.
  - iv. Disminución de temperatura y enfriamiento.- La cuarta y última sección de la cámara nos permite tener una disminución de la temperatura en el rango de los 31 a 55°C y permanece por un lapso de 84 minutos con tolerancia de +/- 35 minutos.

Se considera que el elemento es aceptable, si no aparecen fisuras en la superficie del concreto. De acuerdo con el ACI-224.R (control de la fisuración en estructuras de concreto) se consideran de 0.41 mm como ancho máximo permisible, en caso de presentarse fisuras.



Figura III.112 Cámara de curado de dovelas



Figura III.113 Válvulas de control de vapor



Figura III.114 Tablero de control de temperatura en la cámara de curado

[Cortesías Ing. Carlos J. Ilhuicatzí González].

### 9. Desmolde de la pieza y retiro de la dovela

- Con pistola neumática se procede a aflojar los tornillos longitudinales y transversales del molde observando que la dovela quede totalmente suelta.
- Para poder retirar la dovela del molde se lleva a cabo el ensaye de los especímenes representativos del colado (una muestra según especificaciones) estos resultados deben acusar una resistencia mínima del 37% del  $f'c$  ( $130 \text{ kg/cm}^2$ ).
- Para facilitar el desmolde, se vuelven a conectar los vibradores contenidos en el molde por un tiempo de 3 a 4 segundos, antes de que la ventosa retire la dovela.
- Con el apoyo de la grúa ventosa se procede a retirar la dovela del molde asegurándose que el equipo funcione correctamente y verificando que los brazos laterales de la ventosa abracen la dovela para prevenir la caída de ésta en caso de desprendimiento, posteriormente se envía al equipo volteador.

Una vez que la dovela es retirada se procede al cierre de las paredes laterales del molde, y queda listo el molde para comenzar otro ciclo de trabajo.

### 10. Volteo de la dovela

- Con el volteador de dovelas se le da un giro de  $180^\circ$ , para después ser estribadas



Figura III.115 Girado de dovela en planta de dovelas [Cortesía ICA].

- b. Una vez girada se coloca en una mesa elevadora que la transporta a los siguientes puntos.



Figura III.116 Mesa elevadora para dovelas [Cortesía ICA].

### 11. Aparentado o reparación de dovela

Se repara la dovela debido a que surgen desperfectos atribuibles al de desmolde, maniobras de transporte, así como a anomalías en áreas de accesorios (separadores e insertos).

- a. Se realizan las reparaciones correspondientes asegurando que se cumplan con los requisitos técnicos y de calidad de acuerdo con lo establecido en las especificaciones.



Figura III.117 Aparentado de dovela [Cortesía ICA].

### 12. Colocación de número, tipo de pieza y fecha de producción

- a. Se pinta la dovela con el número consecutivo de dovela, número de anillo y fecha de fabricación.



Figura III.118 Pintado de dovela con sus números y fecha [Cortesía ICA].

### 13. Pre-almacenaje de la dovela en el patio de la planta

- a. Se realiza un acopio de las dovelas fabricadas por día, hasta que se entongan las seis piezas que forman el anillo completo.



Figura III.119 Grúa para acopio de dovelas [Cortesía ICA].



Figura III.120 Acopio de dovelas [Cortesía ICA].

### 14. Almacenaje definitivo de dovelas

- a. Con la grúa pórtico se estriban las dovelas en cinco piezas y una cuña, intercalando entre ellas polines; mismas que forman un anillo completo.



Figura III.121 Acopio definitivo de dovelas [Cortesía ICA].

### 15. Transporte de dovelas a patio de lumbrera

La zona de carga se localiza a lo largo de todo el perímetro de la zona de almacenamiento.

- a. Con las grúas pórtico, son cargadas las dovelas y transportadas en tráileres, hacia las diferentes lumbreras. Cada tráiler tiene capacidad para un anillo completo.

### 16. Colocación de sellos perimetrales en dovelas

Suministradas las dovelas en el patio de lumbrera, se les coloca su sello perimetral

- a. Se pega con Resistol 5000 el sello hydrotite en la zona de junta de la dovela
- b. Se pega con Resistol 5000 el sello de neopreno arriba del sello hydrotite.



Figura III.122 Colocación de sello perimetral hydrotite en dovela. [Propia]



Figura III.123 Colocación de sello perimetral de neopreno en dovela. [Propia]

### III.3 Túnel (Excavación y montaje)

El túnel fue excavado con la tuneladora “EPB” (Herrenknecht) HK-S364, la cual fue transportada en partes a Lumbrera L-5 TIRR mediante plataformas tipo “lowboy”.



Figura III.124 Lowboy con segunda parte de la tuneladora EPB. [Cortesía Ing. Eduardo Zaragoza].

Antes de iniciar con el ensamble de la máquina, se demolió la media caña, parte de la trabe de borde y la lumbrera adosada existentes en lumbrera L5-TIRR, después se construyó la cuna de recepción y el mejoramiento del terreno a la salida de la lumbrera, se instalaron plantas de concreto y mortero; y se habilitó un patio de manto para la recepción de dovelas y el cárcamo de rezaga.

Cabe señalar que, para todas las maniobras de carga, descarga y bajada del escudo se emplearon grúas adecuadas en función del peso de los componentes de la TBM.

Como preliminares a la excavación se tuvieron el bajado, ensamble y puesta en marcha de la máquina tuneladora, realizado de la siguiente manera:

1. Ensamble de Tuneladora.
  - a. Se realiza la demolición del muro de lumbrera, y se realizan los anclajes para el portal de entrada
  - b. Es bajado el anillo frontal que conforma el escudo, en este anillo se encuentra la cámara o plenum de presión, y los motores; colocándolo en la cuna.
  - c. Inmediatamente después se desciende y coloca el anillo intermedio que conforma el escudo, en este anillo se encuentran el compresor o presurizador y los gatos de empuje. Colocándolo en la cuna, y son soldadas ambas secciones.
  - d. Es descendida y colocada la rueda o cabeza de corte
  - e. Es bajado y colocado el tornillo sin fin
  - f. Es descendido el sistema erector, para enseguida realizar su conexión atornillada.
  - g. Habiéndose colocado el sistema erector, se baja el faldón del escudo; la cual contendrá el sello de cepillos
  - h. Para finalizar el ensamble son bajados los elementos necesarios del “back-up”
  - i. Se conectó el “umbilical” en el fondo de la lumbrera y en superficie conectadas entre sí conforme a las especificaciones del fabricante.
  - j. Una vez ensamblado el escudo en el fondo de la lumbrera y accionados los sistemas del equipo, se construyó el muro de reacción y se colocan los anillos de atraque.
  - k. Es colocada la tubería de atraque para transmitir el empuje de los gatos hacia el muro de reacción, agregando más tubería finalizando cada empuje.



Figura III.125 Maniobras de izaje del primer cuerpo del escudo [Cortesía Ing. Eduardo Zaragoza].



Figura III.126 Bajada del primer cuerpo de escudo [Cortesía Ing. Eduardo Zaragoza].



Figura III.127 Descenso del segundo cuerpo del escudo [Cortesía Ing. Eduardo Zaragoza].



Figura III.128 Bajada del erector del escudo [Cortesía Ing. Eduardo Zaragoza].

Para este caso, el portal de entrada fue construido mientras se ensambló el escudo



Figura III.129 Descenso y conexión de la cabeza de corte [Cortesía Ing. Eduardo Zaragoza].



Figura III.130 Bajada del faldón del escudo [Cortesía Ing. Eduardo Zaragoza].

La construcción del muro de reacción se realizó después ensamblada toda la tuneladora, debido al espacio.

### 2. Colocación de sello de túnel

Construido el portal de entrada, se coloca el sello compuesto por dos placas de acero, tornillos de ajuste y un anillo de neopreno, como se muestra en las siguientes tres figuras.

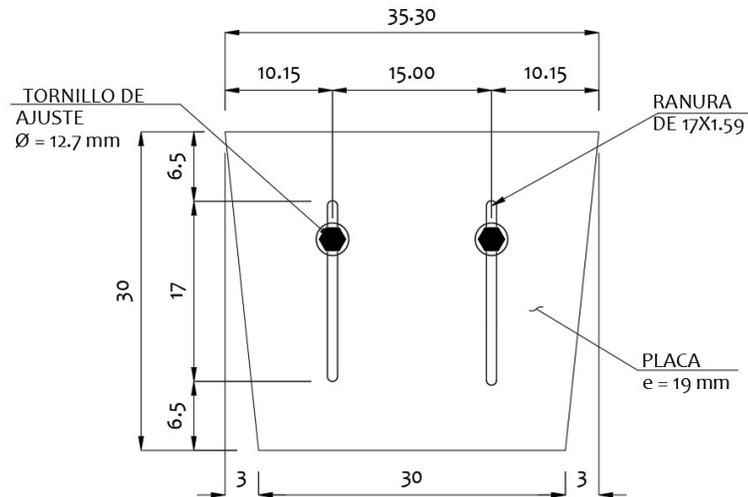


Figura III.131 Placa móvil para fijación de neopreno, [cortesía ICA]

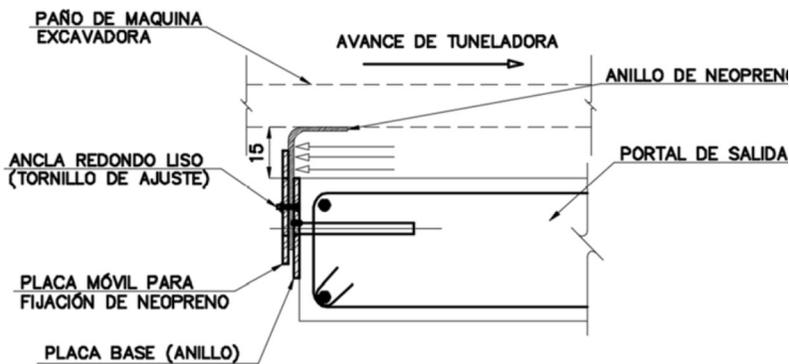


Figura III.132 Sección de configuración de sello, [cortesía ICA]

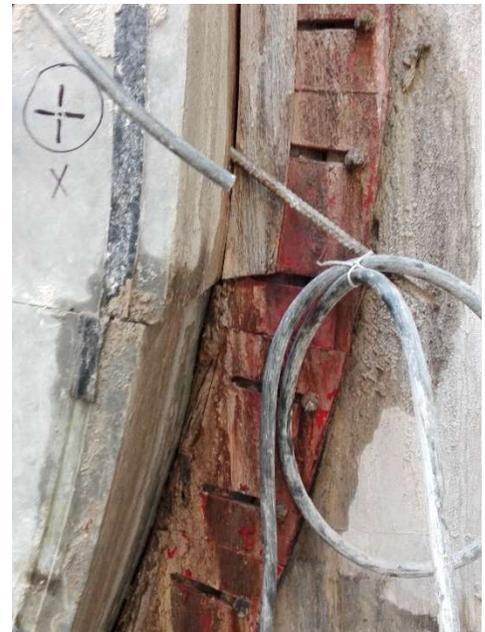


Figura III.133 Sello de túnel, [Propia]

Previamente al bajado de las dovelas se revisa que las dovelas no tengan estrelladuras, que tengan colocado su empaque sello hydrotite de neopreno, además se verifica que cuente con los tornillos de acoplamiento necesarios para la fijación de esta.

3. Colocación de anillos de atraque y tubería de atraque (lumbreras subsecuentes)
  - a. Se inicia con el bajado de las dovelas del primer anillo; las dovelas de hastiales y clave se introducen por el espacio que queda entre el faldón del escudo y el portal de entrada previamente construido; también se colocan hasta donde el brazo erector del escudo pueda tener acceso a ella.
  - b. Se colocan las varillas que conforman las juntas entre anillos y junta entre dovelas, llamados también tornillos de acoplamiento.
  - c. El brazo erector levantará la dovela, mediante un perno roscado para transportarla a su posición final. Una vez colocada, se retira el brazo erector y se moviliza para tomar y colocar la siguiente dovela, sujetándola a la primera mediante los dispositivos de conexión (tornillos de acoplamiento), este mismo procedimiento se realiza para la colocación del resto de las dovelas, hasta configurar el primer anillo troncocónico.
  - d. Se coloca el segundo anillo de atraque, a partir de este anillo los siguientes consistirán únicamente de tres dovelas tipo A; dejando el espacio superior como acceso de materiales, personal y equipo, denominando a este tipo de anillos como tipo alcancía.
  - e. Es colocada la tubería de atraque, se van colocando extensiones a la misma hasta que la tuneladora pueda colocar anillos de atraque en el portal de entrada.
  - f. Una vez que se tenga el área necesaria para el ingreso de personal, suministro de materiales y equipo menor; se procede a troquelar completamente los anillos de atraque que se alojan en el portal de entrada.
  - g. Estando debidamente colocados los anillos de atraque y en contacto los gatos del escudo con el último anillo de atraque, se procede a la presurización del frente debiendo cubrir uniformemente el faldón del escudo para así iniciar con la excavación de los primeros metros del túnel y subsecuentes.



Figura III.134 Sistema de atraque en lumbrera, cortesía ICA.

### 4. Fabricación de la mezcla de inyección

Esta inyección tiene por objetivo rellenar el espacio anular existente de la excavación que realiza la rueda de corte entre el diámetro exterior del anillo y el terreno natural. Cuyo fin principal es evitar movimientos del terreno propiciados por dicho espacio o hueco y así evitar asentamientos en superficie.

Para la fabricación de la mezcla de inyección se instala en la superficie una planta de inyección, cuyos principales componentes constan de:

- a) Agitador vertical.
- b) Silo para almacenamiento de cemento.
- c) Silo o almacén para arena.
- d) Tolva de pesado de los materiales.
- e) Una bomba Moyno 3L-10 o similar.
- f) Tanque para almacenamiento de agua potable.

Para que el escudo inicie con el proceso de excavación es necesario la instalación en la superficie de las líneas de suministros (aire, agua, ventilación, electricidad y comunicación), línea de extracción de material, almacén, planta de fabricación de lechada, acometida de energía, subestación, laboratorios, oficinas, cárcamo de rezaga y el suministro de los anillos de dovelas.

### 5. Excavación y montaje

El proceso de excavación se inicia en el frente, donde la rueda de corte gira, y cava el suelo gracias al empuje transmitido por los cilindros de empuje del escudo.

- a. Puesta en marcha de la tuneladora, accionando la rueda de corte y los gatos de empuje.

Ya teniendo el escudo en contacto con el terreno, se procede a excavar, accionando los motores de la transmisión y el cabezal de corte para dar inicio al empuje y excavación.

La excavación se realiza en longitudes de 1.50 m, colocando en cada tramo excavado y en forma inmediata se coloca un anillo de dovelas prefabricadas de concreto según la posición, es decir la configuración del anillo correspondiente.

Al inicio de la excavación se realizan los siguientes procesos:

- 1) La tuneladora coloca los anillos de atraque en el portal de salida, y estos se troquelan una vez que se tenga el espacio necesario.
- 2) Ya que se fijaron los anillos de atraque en portal de salida, se retiran la tubería de atraque, los anillos tipo alcancía, y los anillos de atraque del muro de reacción.
- 3) Avanzando la tuneladora y se tenga el espacio suficiente, se baja el resto del back-up
- 4) Se procede a colocar las vías, y al avanzar la tuneladora es descendida la locomotora para facilitar el suministro de dovelas e insumos.

- 5) Cuando se tiene espacio suficiente, el material que se encuentra en superficie se baja al túnel por la lumbrera y se coloca sobre los “trucks”, los cuales transportan el material al frente de avance por medio de la locomotora eléctrica (antes de que se terminen los recursos necesarios para cada empuje).
- 6) Posteriormente, liberado el espacio suficiente, se procede a colocar las instalaciones de vías para la locomotora, el cambio de vía central a dos vías (cambio California), y el elevador de personal.

b. Colocación de dovelas

- i. El brazo erector va tomando las dovelas (A1, A2, A3, B1, B2 y K) para formar un anillo troncocónico, considerando el orden de colocación cerrando con la dovela tipo “K”. Una vez colocado el anillo se está en condición de realizar otro empuje.

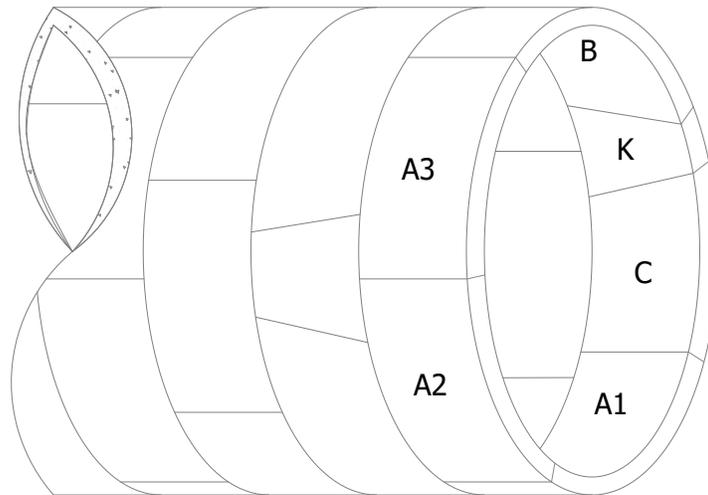


Figura III.135 Perspectiva de anillos de dovelas.

Para la colocación de dovelas se realizan las siguientes actividades:

- 1) Se retraen los gatos del escudo ubicados en la posición donde se coloca la primera dovela.
- 2) La dovela es tomada por el brazo erector, y se coloca en su sitio correspondiente.
- 3) Una vez colocada, se apoyan los gatos de empuje en la dovela colocada para poder retirar el brazo erector, trasladándolo para sujetar la siguiente dovela por colocar.
- 4) Se retraen los gatos de empuje necesarios para alojar la segunda dovela.
- 5) Se hacen coincidir los orificios de conexión de las dovelas para la sujeción entre estas por medio de tornillos.
- 6) Nuevamente se apoyan los gatos de empuje, y fijada la dovela se desplaza el brazo erector para tomar la siguiente dovela.
- 7) Se repite la misma secuencia descrita hasta colocar las cinco dovelas y finalmente la (cuña) dovela tipo “K”.

### 6. Conclusión de empuje y colocación del anillo de dovelas siguiente.

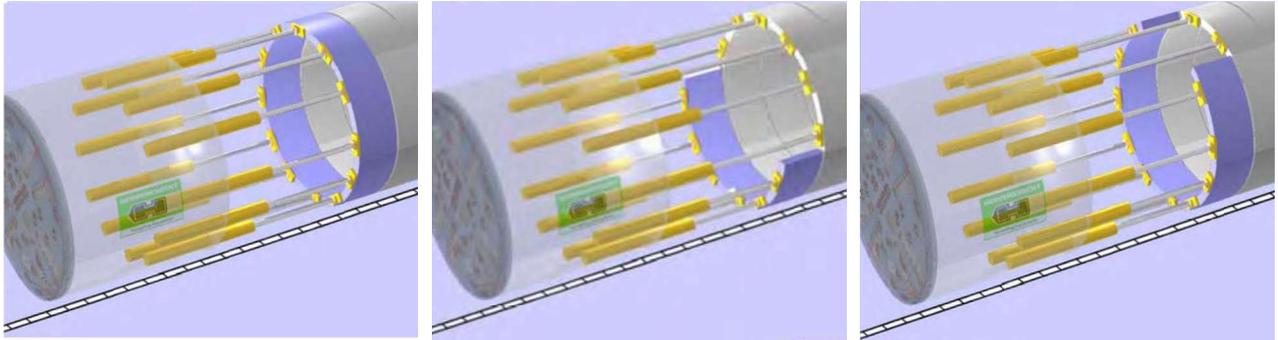


Figura III.136 Ciclo de colocación de dovelas, [cortesía Herrenknecht].

Inmediatamente tras ser cortado, el material excavado debe ser capaz de fluir a través de las aberturas de la cabeza de corte hacia la cámara de excavación, de ahí al tornillo sinfín, y después ser extraído hasta la superficie por la bomba de extracción.

- a. Extracción de material producto de excavación
  - i. Se comienza con la extracción del material del frente de excavación a través del tornillo sin-fin de la *EPB*, el cual a su vez permite controlar la presión en la cámara de lodos en función de la velocidad de extracción (rotación).

Se incorpora un tramo de tubería para la extensión de la tubería de rezaga al final del tren de la tuneladora, aproximadamente cada 4 avances.



Figura III.137 Conexión de tubería de rezaga, [cortesía ICA].

Cuando se excavan los primeros metros se deberá rezagar con botes (cubetas) hasta “cebar” la bomba de lodos; a partir de lo anterior el material será extraído por bombeo hasta el cárcamo de rezaga en superficie.

Simultáneo a la excavación, se realiza la inyección de lechada entre el anillo y el terreno, mientras en la superficie se preparan las siguientes dovelas colocándoles el sello perimetral a cada una de ellas. De igual forma se preparan los tornillos de unión necesarios para la fijación de las dovelas.

b. Relleno del espacio anular con la mezcla de inyección

La inyección de lechada anular se realiza paralelamente a la excavación a través de las líneas de inyección de mortero existentes al interior del faldón

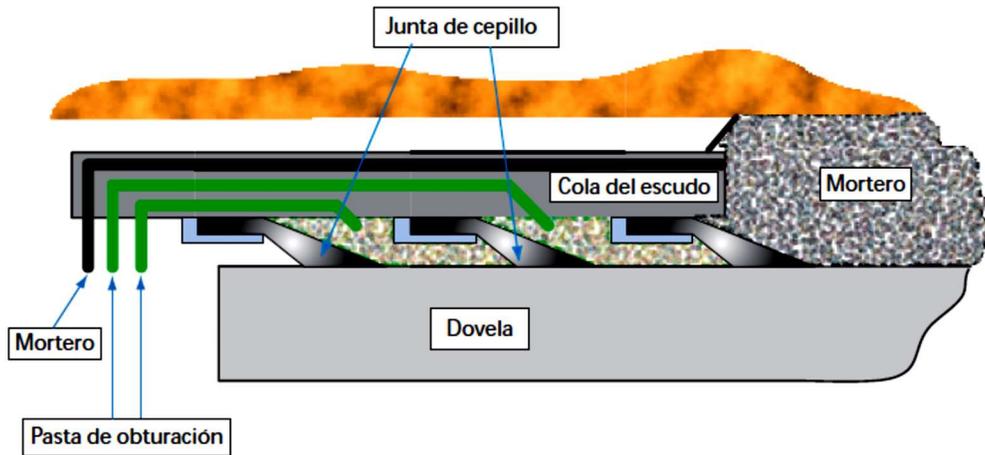


Figura III.138 Inyección de mezcla de inyección de mortero, [cortesía Herrenknecht].

c. Revisión de alineamiento de dovelas y escudo

Al término de cada empuje se checa con el sistema de guiado, el nivel real del escudo y se compara con el teórico, lo cual da la pauta para la programación de los gatos requerida para el siguiente empuje, y de ser el caso cambiar la siguiente posición de anillo.

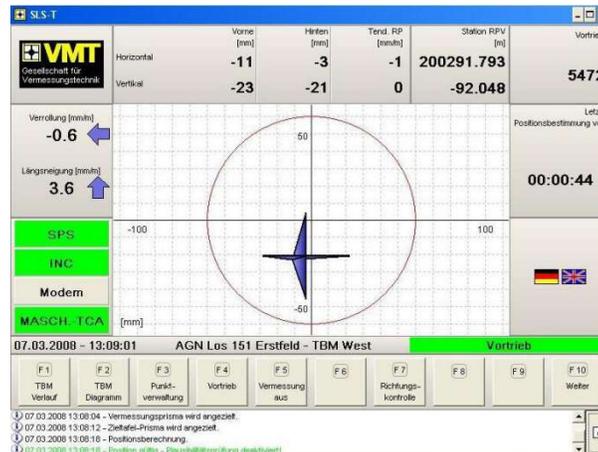


Figura III.139 Captura de pantalla de sistema de guiado VMT, [cortesía ICA].

d. Suministro en patio de lumbrera y descenso de dovelas

En superficie, en el patio de lumbrera todo el material para el suministro del frente de excavación se baja al túnel por la lumbrera; avanzada la tuneladora como se comentó

previamente los suministros se colocan sobre los “trucks”, los cuales transportan el material al frente de avance por medio de la locomotora eléctrica.

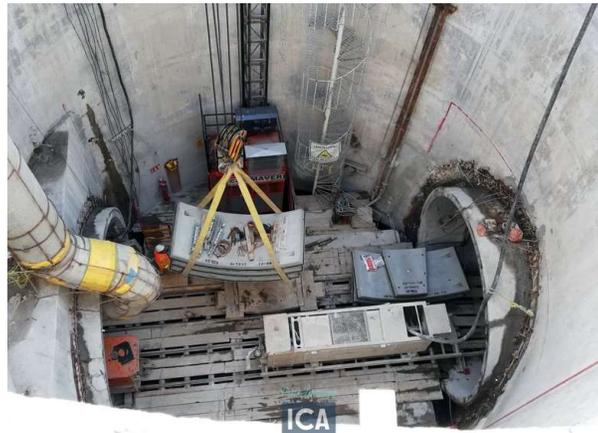


Figura III.140 Descenso de dovelas y suministros en lumbrera mediante grúa, [cortesía ICA].

Una vez que el escudo está por llegar a la lumbrera de recepción (lumbrera de paso), cien metros antes se tendrá un control más estricto y coordinado con cada actividad para así llegar al centro del portal de llegada. Cuando el escudo detecta que ha topado con la lumbrera se ha concluido el tramo de excavación con el proceso antes descrito, posteriormente se involucran otras actividades tales como demolición del portal para dar paso a la tuneladora.

Detectado el cortador del escudo y liberado éste, se prepara la cuna para la recepción del equipo, iniciando de esta manera el paso de la tuneladora por la lumbrera.

Una vez teniendo el escudo en la lumbrera, se revisa, dándole mantenimiento a todo el equipo necesario. Paralelamente a este mantenimiento, en superficie de la siguiente lumbrera, se montan las instalaciones pertinentes y se suministran los recursos.



Figura III.141 Revisión y mantenimiento a rueda de corte, [cortesía ICA].

Al término del paso de la tuneladora por la lumbrera (lumbrera de paso), se continua la excavación nuevamente de los primeros metros del siguiente subtramo de túnel, que, a diferencia de los primeros metros en la lumbrera de montaje, en esta ya se cuenta desde inicio con todo el tren de la tuneladora, de igual manera se debe cuidar el ajuste del sello del portal, se colocaran los anillos de atraque y su apuntalamiento.



Figura III.142 Troquelado de anillos de atraque, [cortesía ICA].

Una vez que el escudo se encuentre completamente dentro del túnel, se continúa la excavación hasta alcanzar la longitud determinada y después proceder con el retiro de los anillos de atraque. Posteriormente se procede a colocar las instalaciones necesarias dentro del túnel, tales como: Cambio de vía central a dos vías (cambio California), locomotoras eléctricas, elevador de personal y así como todos los recursos necesarios para facilitar y hacer más eficiente la excavación del túnel.



Figura III.143 Colocación de polines para instalación de cambio California, [cortesía ICA].

Posteriormente, se procede con el desmantelamiento de instalaciones del subtramo anterior excavado, retiro de vías, tuberías y limpieza, de esta manera se da paso con el inicio de los preliminares del revestimiento definitivo de ese tramo de túnel.

Las actividades son anteriores son repetitivas durante todo el proceso de excavación del túnel, este proceso de excavación se continuo en todos los tramos de lumbrera a lumbrera hasta que la tuneladora llegue a la Lumbrera de salida (L-0), concluyéndose así el revestimiento (primario) de dovelas, y se procede con el desmantelamiento, subida, y retiro de la tuneladora de la obra.

### III.4 Revestimiento definitivo

En seguida del revestimiento primario se procede a la construcción del revestimiento definitivo (secundario), que en este caso será un colado monolítico continuo en tramos de 9.0 m con un espesor de 30 cm. El diámetro terminado del Túnel es de 5.00 m; el cual sigue el procedimiento siguiente:

1. Preliminares
  - a. Retiro de durmientes, rieles y cualquier elemento ajeno al acero de refuerzo.
  - b. Limpieza de la sección por armar
2. Colocación de acero de refuerzo
  - a. Colocación de guías para el acero longitudinal (lecho inferior)
  - b. Acarreo de material a la sección de armado
  - c. Habilitado de acero (corte y dobléz)



Figura III.144 Acarreo del acero de refuerzo con retroexcavadora, [Propia].



Figura III.145 Habilitado y corte del acero de refuerzo, [Propia].

- d. Montaje de andamios para armado y colocación de acero de refuerzo



Figura III.146 Andamio colocado en túnel, [Propia].



Figura III.147 Andamio colocado en túnel, [Propia].

- e. Tendido de acero longitudinal del lecho exterior en base a las guías, y se colocarán separadores (“pollos”) para garantizar el recubrimiento (0.07 m)
- f. Colocación del acero de refuerzo transversal del lecho exterior.
- g. Se colocan “silletas” para garantizar la separación entre lechos (exterior e interior).
- h. Colocación de acero longitudinal del lecho interior.
- i. Colocación de acero transversal del lecho interior y se colocarán separadores (“pollos”) para garantizar el recubrimiento de 0.07 m
- j. Es retirado el andamio para armado de la sección superior del túnel (hastiales y clave).



Figura III.148 Separador de concreto en lecho inferior, [Propia].



Figura III.149 Separador de concreto en lecho Superior, [Propia].



Figura III.150 Acero de refuerzo de revestimiento definitivo colocado, [Propia].

### 3. Montaje y colocación de cimbra telescópica

La cimbra telescópica se ensambla una parte en superficie y la otra en el interior de lumbrera y de túnel, como se indican las etapas necesarias en seguida:

Se deberán dejar las preparaciones necesarias en el acero de refuerzo para la colocación de las piernas de apoyo de la cimbra telescópica. Esta consiste en el desplazamiento del acero (transversal) donde se coloca la pierna de apoyo de la cimbra, se correrá el acero sin que represente un problema de ajuste en el armado aledaño.

a. Habilitado y ensamble de cimbra telescópica.

Conforme a las maniobras que se realizan para el ensamble de la cimbra telescópica, se indica lo siguiente:

a) Ensamble en superficie de las secciones superior e inferior de un módulo.



Figura III.151 Ensamble de clave y hastiales de cimbra telescópica en superficie  
[Cortesía M.I Mario A. Aguilar Téllez].



Figura III.152 Ensamble de cubeta de cimbra telescópica en superficie  
[Cortesía M.I Mario A. Aguilar Téllez].

- b) Descenso de las medias secciones inferiores al interior de túnel, soportadas o calibradas con las piernas radiales en su base.
  - c) Bajada de grúa pórtico, y ensamble con trabe carril para dar forma al “Transportador”. Y se coloca sobre la sección inferior.
  - d) Descenso de las medias secciones superiores, soportadas o calibradas con las piernas radiales en su periferia.
  - e) Conexión fija en unión de secciones inferiores y superior.
  - f) Descenso del equipo de bombeo (flexible) para vaciado de concreto.  
Para los colados al inicio del túnel el equipo de bombeo permanece en superficie
  - g) Colocación de instalaciones de aire comprimido y de inyección hidráulica.
  - h) Prueba del equipo electromecánico en sitio (verificación de que no exista fugas de aire o aceite).
- b. Con ayuda del “transportador”, y previa colocación de desmoldante en la cubeta, se colocará la sección inferior de un módulo, y se nivelará con las piernas de apoyo (puntales de carga).



Figura III.153 Colocación de sección inferior de la cimbra telescópica [Propia].



Figura III.154 Cimbra telescópica colocada [Propia].

- c. Montados los cinco módulos de la cimbra telescópica, se procede a la conexión de las instalaciones de aire y aceite para el equipo electromecánico, así como instalaciones eléctricas para la iluminación.
- d. Taponeo del frente de la cimbra telescópica con madera para evitar la salida del concreto.



Figura III.155 Encofrado de madera de frente de la cimbra telescópica [Cortesía M.I Mario A. Aguilar Téllez].

- e. Instalación en fondo de lumbrera un sistema de bombeo flexible (la bomba se podrá desplazar hacia el frente, y en la parte posterior deberá existir un sistema de tubos rectos conectados por codos que darán la flexibilidad de desplazamiento necesario). Este sistema de bombeo se deberá conectar con el sistema que viene de superficie.
- f. Verificación de la alimentación del sistema de aire, de inyección de aceite, y eléctrico para el correcto funcionamiento del equipo de colado (cimbra telescópica).

### 4. Colocación de “*liner*” (membrana plástica de Polivinilo)

En la cara exterior de la cimbra que tendrá contacto con el concreto, se coloca la cara lisa de la membrana plástica (*liner*) desde la clave, permitiendo que los anclajes mecánicos queden listos para ser embebidos en el concreto, cubriendo 240° del túnel. Después se procede al tensado en la parte inferior del *liner* sobre la cimbra para garantizar un ajuste preciso y una superficie tensa para recibir el colado de concreto.

Cabe mencionar que el *liner* considera los respectivos pasos para inyección de concreto y apoyos de la cimbra. Previo a la etapa del colado se colocará *liner* y se siguen los siguientes pasos:

- a. Se debe verificar la ausencia de bordes filosos en la cimbra para que el *liner* no sea dañado.
- b. Se coloca *liner* en la parte superior de la cimbra (clave y hastiales) con los anclajes paralelos a la longitud del túnel; desenrollando hacia abajo, desde la clave hasta cubrir los hastiales o se puede jalar mediante lazos a través de la cubeta, empezando por un hastial y terminando en el opuesto.
- c. Las hojas del *liner* deben ser traslapadas aproximadamente una pulgada.
- d. Todas las lengüetas se tensan con apoyo de una varilla y bandas con matraca para garantizar que la hoja está segura y correctamente tendida sobre la cimbra.
- e. Montaje de la sección superior de conexión atornillada con la sección inferior. Las piezas se tomarán con el transportador y se desplazarán hacia el frente. \*\*Cualquier daño a la hoja durante estas operaciones debe ser reparado mediante la soldadura de un parche en la zona dañada.
- f. Se llevan a cabo los cortes en boquillas y ventanas requeridas para realizar el vaciado de concreto.

### 5. Colocación de concreto

Posterior a la colocación del *liner*, se procederá a realizar el vaciado del concreto para el colado del revestimiento definitivo como se enuncia a continuación:

- a. Colocación de un sistema de tuberías y bomba para concreto PUTZMEISTER modelo 2100 HD de concreto desde superficie a fondo de lumbrera.
- b. Llegado el concreto se verifica el revenimiento, para que se garantice su manejabilidad durante el bombeo. (Revenimiento =  $0.26 \pm 0.02$  m)
- c. Vaciado del concreto en la bomba en superficie y bombeo de este hacia el fondo de lumbrera.
- d. Bombeo del concreto al interior del túnel, y vaciado de concreto en ventanas de cimbra telescópica a nivel de hastial.
- e. Con el brazo mecánico de la bomba en superficie, se girará este hacia un lado y otro, de manera que vacíe primero en la ventana izquierda, y posteriormente a la derecha. Lo anterior de manera continua conforme al llenado de la cimbra telescópica.
- f. Alcanzado el nivel de hastial (pasando la ventana de alimentación), se procederá a vaciar el concreto en las ventanas dispuestas en la clave de la cimbra hasta garantizar el llenado de la sección de 0.30 m de espesor.



Figura III.156 Ventanas de hastial de cimbra telescópica [Propia].



Figura III.157 Ventanas de clave de cimbra telescópica [Propia].

### 6. Descimbrado y desplazamiento de cimbra telescópica

Al día siguiente del colado, se está en posibilidades de retirar la cimbra telescópica ya que el concreto habrá alcanzado por lo menos el 40% de su resistencia; por lo que podremos proceder al descimbrado y desplazamiento de la cimbra telescópica, siguiendo las etapas siguientes:

- a. Con el transportador se retira la sección superior de un molde (se soporta por las columnas de la grúa pórtico), y con el balancín de la viga riel se desmolda y toma la sección inferior.
- b. Posterior al desplazamiento del módulo hacia el frente, se deberá aplicar un sellador al revestimiento definitivo como medida de protección en la cubeta del túnel (la parte no cubierta por el *liner*).
- c. Las operaciones de armado, y montaje de cimbra se siguen como se indicó previamente, con avances definidos en obra, dados por módulos de 9.0 m.
- d. Para finalizar, se utilizará soldadura por extrusión para unir cada sección del *liner* que consiste en parches para ventanas laterales sección superior, pasos por inyección y apoyos de la cimbra.
- e. Se mueve la cimbra y se sigue el mismo procedimiento de manera cíclica hasta cubrir la totalidad del túnel.

7. Inyecciones de lechada de contacto entre dovela y revestimiento

- a. Se perforará el espesor del revestimiento definitivo y la inyección se realizará en dos etapas, a través de barrenos efectuados de acuerdo con el esquema siguiente:

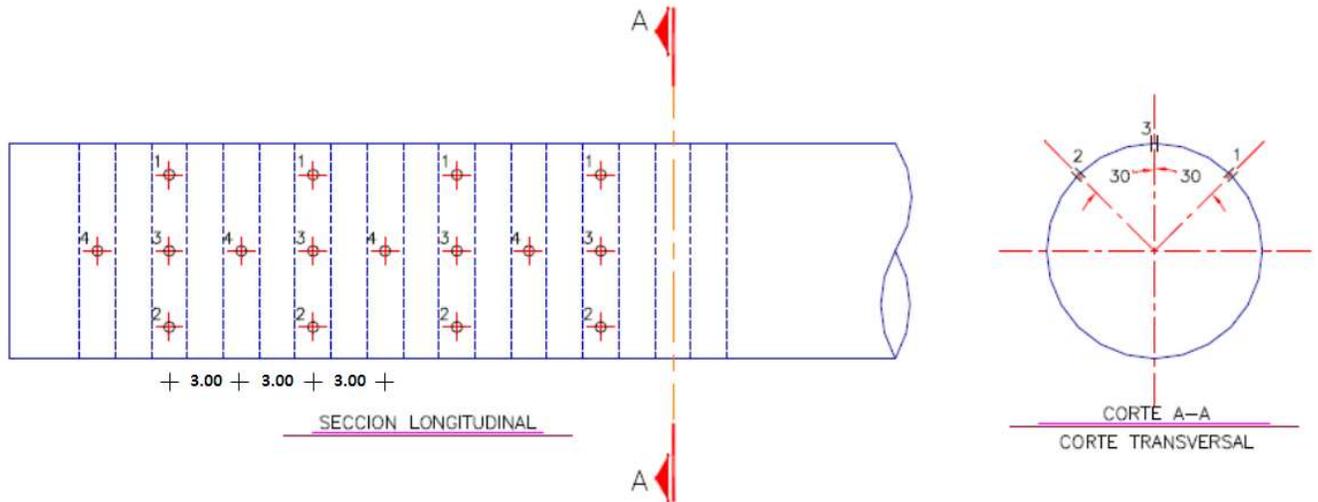


Figura III.158 Esquema de distribución de barrenos de inyección de contacto, [Cortesía ICA].

Los barrenos se distribuirán en aureolas formadas de tres barrenos para la 1ª fase, y de un barreno para la 2ª fase, distribuidos uniformemente de acuerdo con el esquema anterior

- b. La inyección de la 1ª fase se realiza en aureolas separadas a cada 6.00 m, formadas por tres barrenos separados en ángulo de 30° hacia ambos lados del centro de la clave. El orden de inyección será siguiendo la secuencia de los barrenos No. 1, 2, 3 de acuerdo con el esquema anterior.
- c. La inyección de la 2ª fase se hará en aureolas formadas por un solo barreno, No. 4 y estarán separadas a cada 6.00 m, de acuerdo con el esquema anterior.

Se empleará una mezcla para la inyección de primera y otra para segunda fase, las cuales tendrán la siguiente dosificación:

Tabla III.3 Dosificación de mortero y lechada de contacto, [Cortesía ICA].

| MATERIAL  | 1ª FASE      | 2ª FASE      |
|-----------|--------------|--------------|
| AGUA      | 136.0 litros | 136.0 litros |
| CEMENTO   | 150.0 kg     | 150.0 kg     |
| BENTONITA | 37.0 litros  | 37.0 litros  |
| ARENA     | 50.0 litros  | -----        |

La presión para las dos fases de inyección será de hasta 0.5 Kg/cm<sup>2</sup> (medida del manómetro de la boquilla del barreno), y se mantendrá durante un lapso de 5 a 10 minutos para el mortero. Los barrenos perforados servirán para verificar el recorrido de la lechada, para lo cual se deberán colocar llaves de paso en los mismos, los que se purgarán periódicamente para expulsar el agua o aire y verificar el recorrido de la inyección.

8. Preparaciones para el habilitado del acero de la trabe borde
  - a. Se dejan las preparaciones para el habilitado del acero de la trabe borde y media caña, para su colado posterior



Figura III.159 Preparación de acero de refuerzo para traba de borde, [cortesía ICA].

Al término del revestimiento definitivo se construyen las trabes de borde

## IV. Conclusiones

La construcción de túneles se práctica desde la antigüedad; se resume que en un principio fueron las conducciones de agua las que necesitaron de la solución de túnel, más adelante el desarrollo del ferrocarril, y posteriormente los automóviles hicieron necesaria la construcción de túneles.

La ingeniería de túneles y obras subterráneas de nuestro país ha tenido gran importancia desde la época prehispánica, se han desarrollado magnas obras y presenta un desarrollo notable en concordancia a las adversidades y problemáticas.

Ante los diferentes métodos y procesos constructivos de un túnel, gracias a los criterios de diseño se pudo seleccionar los mejores procedimientos constructivos para la construcción del Túnel Churubusco – Xochiaca, así como sus lumbreras y obras auxiliares; ya que se realizó en condiciones de suelos blandos saturados (Arcillas de alta plasticidad de baja resistencia al corte y alta compresibilidad), por lo cual se seleccionó correctamente la tuneladora EPB y se realizaron las lumbreras por método de flotación.

El empleo de un escudo excavador con frente presurizado de lodos ofrece:

- Ventajas:
  - a) Durante el proceso de excavación sólo es necesaria la presión en el frente proporcionada por el sistema de lodos y por el empuje de la cabeza cortadora, dado que el faldón del escudo proporciona el revestimiento temporal en las paredes laterales.
  - b) El suelo por excavar, a excepción de la zona cercana a la lumbrera, no necesita de un tratamiento especial para mejorar sus características mecánicas.
  - c) Reduce notablemente el problema de las deformaciones excesivas y el riesgo de falla al frente.
- Desventajas
  - a) Por el manejo del material producto de la excavación mediante bombeo, no puede excavar en terrenos con roca.
  - b) Se presenta un ruido excesivo, debido al uso de bombas tipo pistón las cuales son las encargadas de la extracción del material producto de la excavación.

En la construcción del túnel, fue importante llevar un control del proceso de excavación, cuidando los aspectos constructivos como:

- La inyección de contacto suelo-dovela - Tanto la presión por aplicar como el control de volumen por inyectar, esto para asegurar el confinamiento del anillo de dovelas; condición de suma importancia para el comportamiento del anillo.
- La importancia del avance entre el revestimiento primario, o sea las dovelas y el revestimiento final, debido al diseño y la relación que tiene este con las deformaciones que pudieron presentarse.

- Para la estabilidad del frente se considera muy importante proporcionar una presión interior estabilizadora equivalente a la carga piezométrica que actúa en los estratos (para el TCX entre 15.5 y 21 ton/m<sup>2</sup>)
- Lo preponderante y significativa que es la instrumentación, y la cuantiosa ayuda que representa ante la prevención, manejo, solución de posibles riesgos y fallas.

El Túnel Churubusco – Xochiaca reforzará el sistema de drenaje actual, y disminuye fuertemente riesgos de inundaciones en el área.

Para mí, fue un verdadero placer participar en el área de ingeniería e instrumentación. Fue un orgullo demostrar que los conocimientos adquiridos en la Facultad de Ingeniería de la UNAM.

Se tendrán que hacer más obras con el sistema de túnel para poder ahora satisfacer la demanda de agua potable, y reducir la escasez de este líquido vital que se avecina dentro de los próximos años.

## Anexos

### A.1 Instrumentación TCX

Parte importante en el proceso de excavación y construcción de túneles, es asegurar la estabilidad de las estructuras circundantes donde pasa el túnel, por lo cual, se deberá vigilar que no exista algún tipo de afectación a la infraestructura derivado del proceso de excavación.

Ante tal premisa, es prioritario implementar instrumentación que permita realizar un monitoreo y seguimiento del comportamiento del proceso constructivo: previo, durante y posterior a la construcción del túnel. El enfoque de la instrumentación es monitorear los parámetros de deformación, del estado de esfuerzos y de movimientos superficiales y subterráneos.

Durante la etapa de construcción es necesario obtener y medir: las presiones de poro, los niveles freáticos o piezométricos, desplazamientos de la masa de suelo, y deformaciones; información que será de utilidad para conocer las diferentes variables del subsuelo, y las condiciones actuales de la zona donde se llevan los trabajos para el Túnel. Se lleva un registro de las lecturas de la instrumentación para detectar cualquier comportamiento anormal, y para verificar hipótesis y criterios de diseño.

Los principales instrumentos de auscultación geotécnica son:

#### A.1.1. Piezómetros de cuerda vibrante

Son sensores de medición sumergibles sensibles a la presión, diseñados para detectar la presión del agua intersticial y los niveles de agua subterránea en una variedad de aplicaciones geotécnicas. En un tubo metálico sellado herméticamente y dentro del cual contiene un alambre de acero de alta resistencia a la tracción con un ancla fija en un extremo y están unidos a un diafragma en contacto con la presión del agua en el otro extremo. El cable se acciona eléctricamente, con una frecuencia de resonancia de vibración proporcional a la tensión en el cable. Esta frecuencia induce una corriente alterna en una bobina que es detectada por la unidad de lectura, y luego se puede convertir en una presión. La salida de frecuencia es inmune al ruido eléctrico externo.



Figura A1. Piezómetro de cuerda vibrante [Cortesía RST Instruments]

Para la auscultación en el proyecto del Túnel Churubusco – Xochiaca, se instalaron dos piezómetros de cuerda vibrante por estación de medición, con una separación entre 2 a 3 metros de la pared de la lumbrera, y entre 1 a 5 metros del lecho exterior del túnel, y localizados en los estratos permeables de influencia para la clave y eje del túnel.

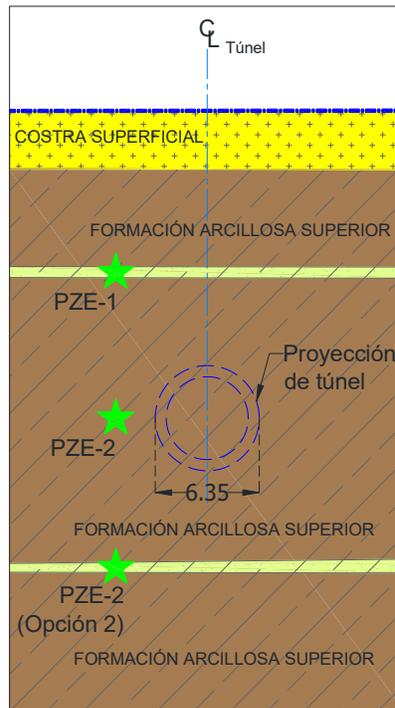


Figura A2. Esquema de profundidad de instalación de piezómetros eléctricos [Cortesía ICA]

### Procedimiento de instalación

Las actividades generales de instalación de los piezómetros eléctricos consisten en lo siguiente:

- i. Localización topográfica, de acuerdo con las especificaciones del proyecto.
- ii. Simultáneamente a la localización topográfica, se realizó la preparación del instrumento, iniciando con la saturación, colocándolo en un contenedor lleno de agua durante 24 horas.
- iii. Se realiza una perforación de  $\varnothing=4\frac{1}{2}$ " mediante una perforadora Long Year, empleando agua como fluido de perforación, generalmente se perfora hasta un metro más de la profundidad de instalación solicitada para evitar problemas con el azolve del barreno.
  - a. Conjuntamente se fabrica una camisa con material geotextil, que abraza la parte el tubo de PVC a la profundidad de instalación
- iv. Al finalizar la perforación del barreno, se realiza un energético lavado en toda la longitud del barreno, posteriormente se corrobora la profundidad del barreno.
- v. Previo a la colocación del piezómetro se realiza la toma de lecturas con la unidad de lectura "VW Data Recorder", obteniendo la lectura "cero".
- vi. Posteriormente se canaliza el cable del instrumento a través de una tubería de PVC de 2" de diámetro, con la finalidad de brindarle protección y principalmente para que sirva como guía del sensor hasta colocarlo a la profundidad indicada.

## Proceso Constructivo del Túnel Churubusco – Xochiaca

- vii. Se procede a colocar el bulbo del piezómetro dentro del barreno hasta la profundidad que marca el proyecto.
- viii. Posteriormente se realiza la colocación de materiales graduados, hasta alcanzar la boca de barreno.
  - a. Sello de pellets inferior
  - b. Filtro de grava sílica exterior
  - c. Filtro de grava sílica interior
  - d. Sello de pellets superior
  - e. Mortero de cemento-agua-bentonita
- ix. Después de la colocación de materiales y del relleno del barreno, se realiza la toma de lecturas con el "VW Data Recorder", hasta observar su estabilización.
- x. Finalmente se construye un registro de concreto armado con tapa metálica de placa de  $\frac{3}{4}$ " de espesor para proteger el instrumento.

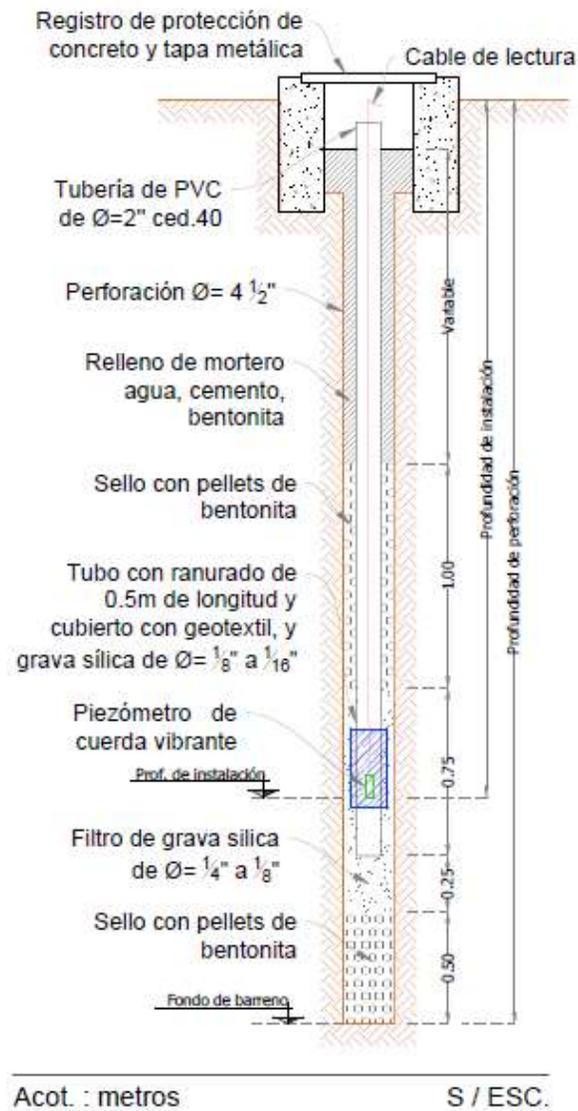


Figura A3. Esquema de instalación de piezómetros [Cortesía ICA]

### A.1.2. Celda de presión de inserción (*"Push-in pressure cell"*)

Constan de dos placas longitudinales de acero inoxidable soldadas entre sí alrededor de su periferia. El espacio anular entre estas placas está lleno de glicol desaireado. Un puerto y un filtro para medir la presión de poro se encuentran en uno de los lados planos de la placa de soporte detrás de la sección sensible a la presión de la celda.

La celda de presión y el puerto para la presión de poro están conectados mediante tubos de acero inoxidable a dos transductores de presión integrados en la celda, típicamente de cuerda vibrante, neumático o de deformímetro si se van a realizar mediciones dinámicas; también se incorpora un termistor para medir la temperatura. Permite medir la presión total del suelo y la presión hidráulica del sitio donde se instale. Puede ser utilizado para estudiar variaciones en el estado de esfuerzos "in situ", tanto vertical como horizontal, dependiendo de la orientación con que se instale la celda de presión. El instrumento se conforma por una celda de carga y una piedra porosa que permite medir y registrar la presión hidráulica. La instalación y monitoreo de este equipo es muy similar a la instalación de un piezómetro cerrado de cuerda vibrante, por lo que, se requiere utilizar una unidad de registro eléctrico.

Las también llamadas "piezoceldas", sustituyen el uso de piezómetros de cuerda vibrante; ya que permiten medir la presión de poro y a su vez la presión total del suelo, permitiendo así registrar y monitorear el estado de esfuerzos de la excavación y del túnel construido. Se recomienda la instalación de dos instrumentos por estación de medición, ambos localizados en la zona del eje del túnel: hastial derecho e izquierdo con una separación máxima de  $\frac{1}{2}$  diámetro con respecto a la línea exterior de excavación. Se recomienda que el rango de operación del equipo se encuentre dentro de 30 ton/m<sup>2</sup>.

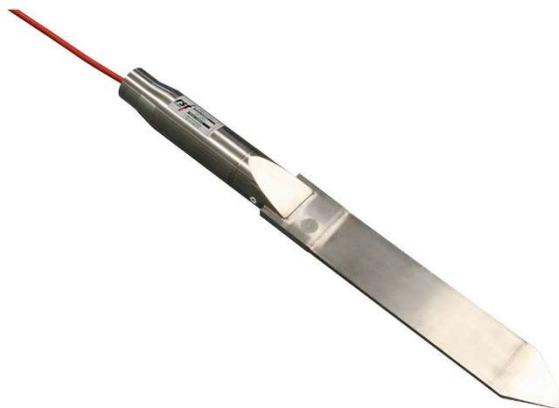


Figura A4. Piezocelda de cuerda vibrante [Cortesía RST Instruments]

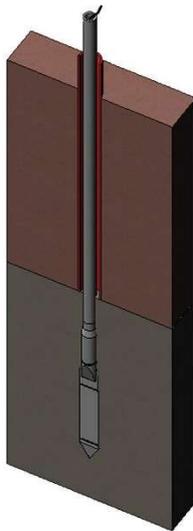


Figura A5. Esquema de instalación de piezocelda  
[Cortesía RST Instruments]

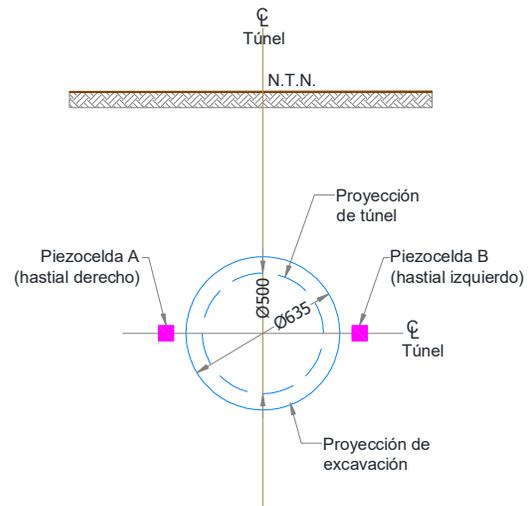


Figura A6. Esquema de profundidad de instalación de estación de piezoceldas [Cortesía ICA]

Una piezocelda de inserción está diseñada para ser hincada al suelo, donde puede medir la presión total de la tierra y la presión de poro del suelo. Se le puede usar para determinar el estado de esfuerzos *“in situ”*, tanto vertical como horizontal, dependiendo de la dirección de instalación. Además, se puede utilizar para controlar el cambio en la presión activa y pasiva alrededor de las estructuras de retención (muros diafragma), así como en túneles. Se instalan regularmente en suelos cohesivos de grano fino, que incluyen arcillas muy blandas a rígidas.

### Procedimiento de instalación

Las actividades generales de instalación de los piezómetros eléctricos consisten en lo siguiente:

- i. Localización topográfica, de acuerdo con las especificaciones del proyecto.
- ii. Se realiza una perforación de  $\varnothing=4\frac{1}{2}$ " mediante una perforadora Long Year, empleando agua como fluido de perforación.
  - a. Conjuntamente se fabrica una camisa con material geotextil, que abraza la parte superior de la celda.
- iii. Al finalizar la perforación del barreno, se realiza un energético lavado en toda la longitud del barreno, posteriormente se corrobora la profundidad del barreno.
- iv. Previo a la colocación de la piezocelda, se realiza la toma de lecturas con la unidad de lectura "VW Data Recorder" obteniendo la lectura "cero".
- v. Posteriormente se canaliza el cable del instrumento a través de una tubería de acero galvanizado de  $1\frac{1}{2}$ " de diámetro, con la finalidad de brindarle protección y principalmente que sirva como guía del sensor hasta colocarlo a la profundidad indicada.
- vi. Se procede a hincar la piezocelda hasta la profundidad que marca el proyecto.

## Proceso Constructivo del Túnel Churubusco – Xochiaca

- vii. Posteriormente se realiza la colocación de materiales graduados, primero grava cuarzosa, posteriormente un sello de pellets, y luego mezcla de inyección hasta alcanzar la boca de barreno.
  - a. Filtro de grava sílica
  - b. Sello de pellets superior
  - c. Mortero de cemento-agua-bentonita
- viii. Después de la colocación de materiales y del relleno del barreno, se realiza la toma de lecturas con el “VW Data Recorder”, hasta observar su estabilización.
- ix. Finalmente se construye un registro de concreto armado con tapa metálica de placa de  $\frac{3}{4}$ " de espesor para proteger el instrumento.

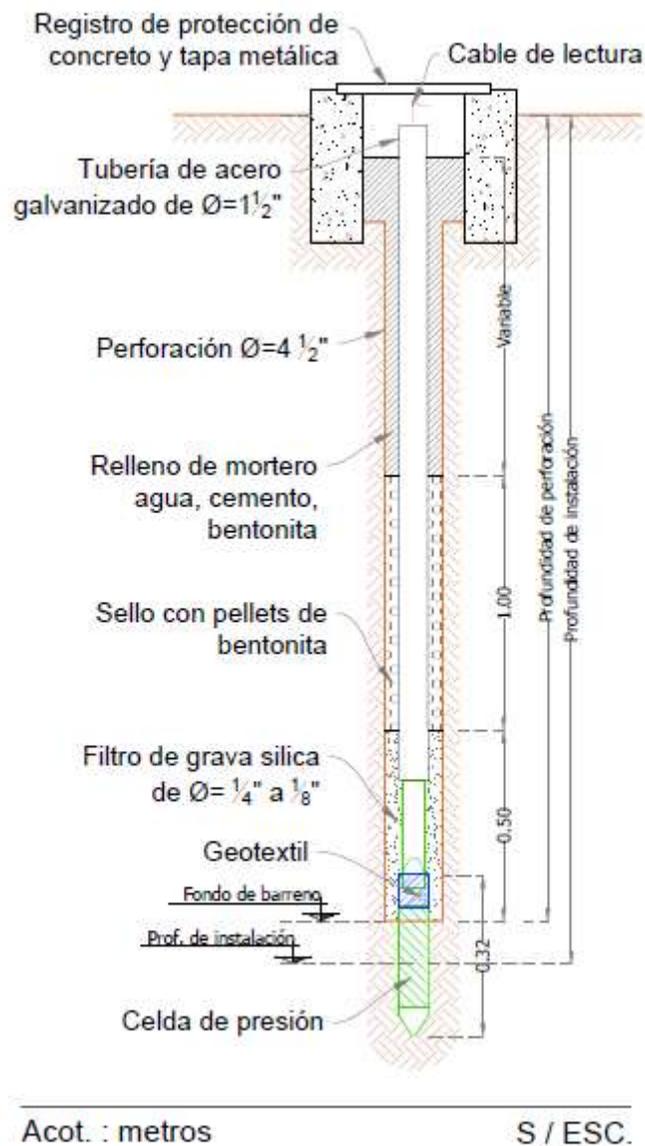


Figura A7. Esquema de instalación de piezoceldas [Cortesía ICA]

### A.1.3. Extensómetros verticales de barras verticales

Los extensómetros de barras verticales o “banco de nivel flotante” son equipos de instrumentación geotécnica que permiten registrar y monitorear la deformación de los estratos del suelo donde se instala la barra de medición, de manera puntual en el sitio y a la profundidad a la que se instalen.

Estos instrumentos requieren de la realización de un barreno con un diámetro adecuado en el que se instalarán hasta las profundidades necesarias. Están conformados generalmente por barras de aluminio de 3/8” de diámetro acopladas con un espárrago de 1/4”. En el extremo superior (a nivel superficial) se coloca la terminal(cabecal) de medición y en el extremo inferior de la barra se coloca un ancla, la cual se fija con una mezcla de cemento y agua en el estrato que se va a monitorear, mientras que el resto de la perforación se rellena con una lechada de cemento, bentonita y agua

En el caso del TCX se instalaron dos cabezales de extensómetro en cada estación de monitoreo, una de tres barras y otra de dos, localizadas en los estratos de interés. La primera estación de cada par deberá quedar sobre el eje del túnel, y la segunda a 5 m de separación del diámetro exterior del túnel de lado derecho o izquierdo, según las condiciones de espacio.

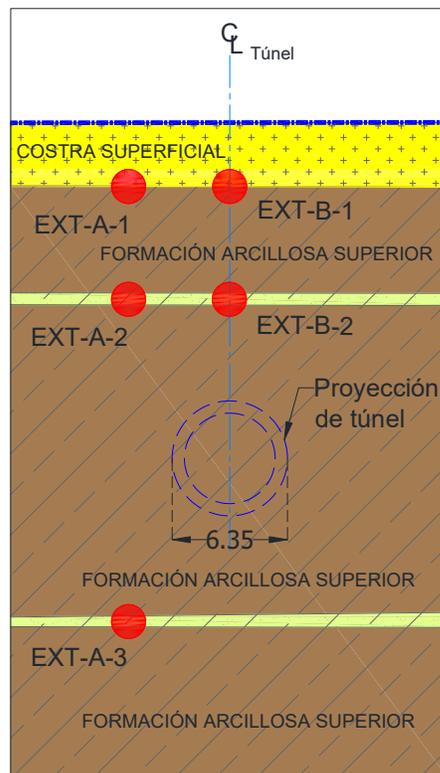


Figura A8. Esquema de profundidades de instalación de estación de extensómetros de barra vertical [Cortesía ICA]

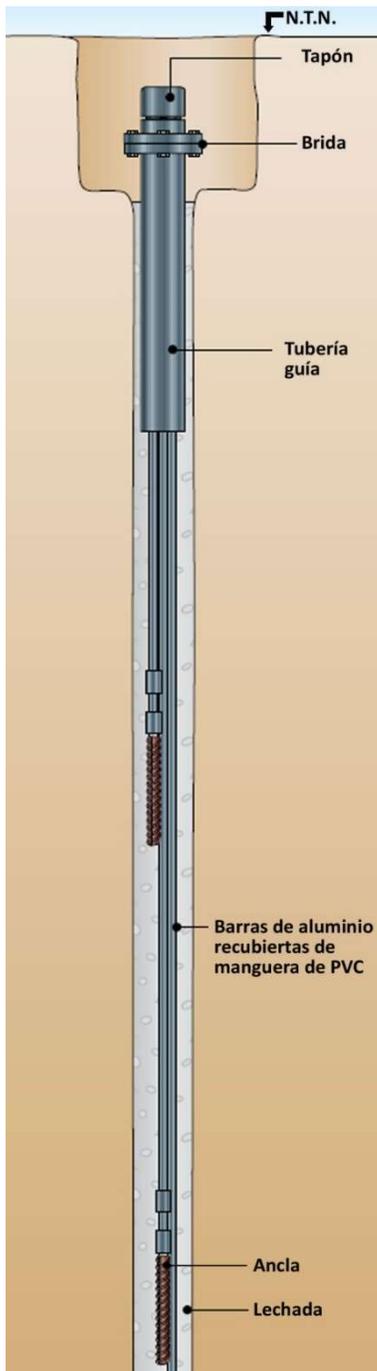


Figura A9. Extensómetro de barras verticales [Cortesía Coniisa]

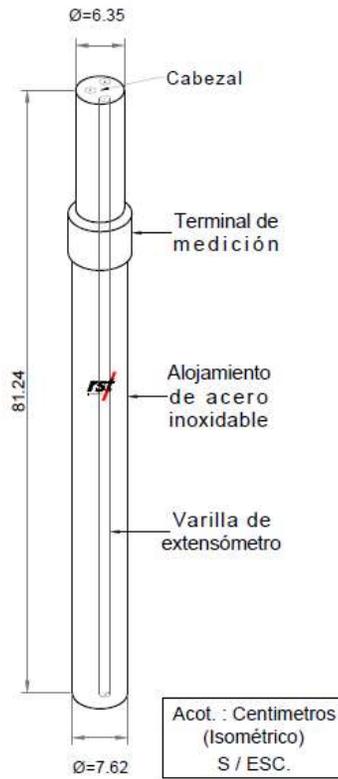


Figura A10. Cabezal o terminal de medición de extensómetro [Elaboración propia]

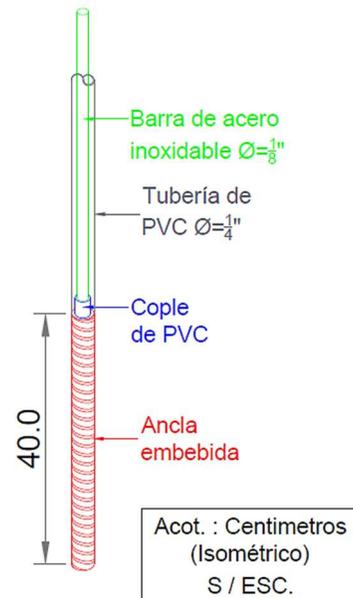


Figura A11. Cabezal o terminal de medición de extensómetro [Elaboración propia]

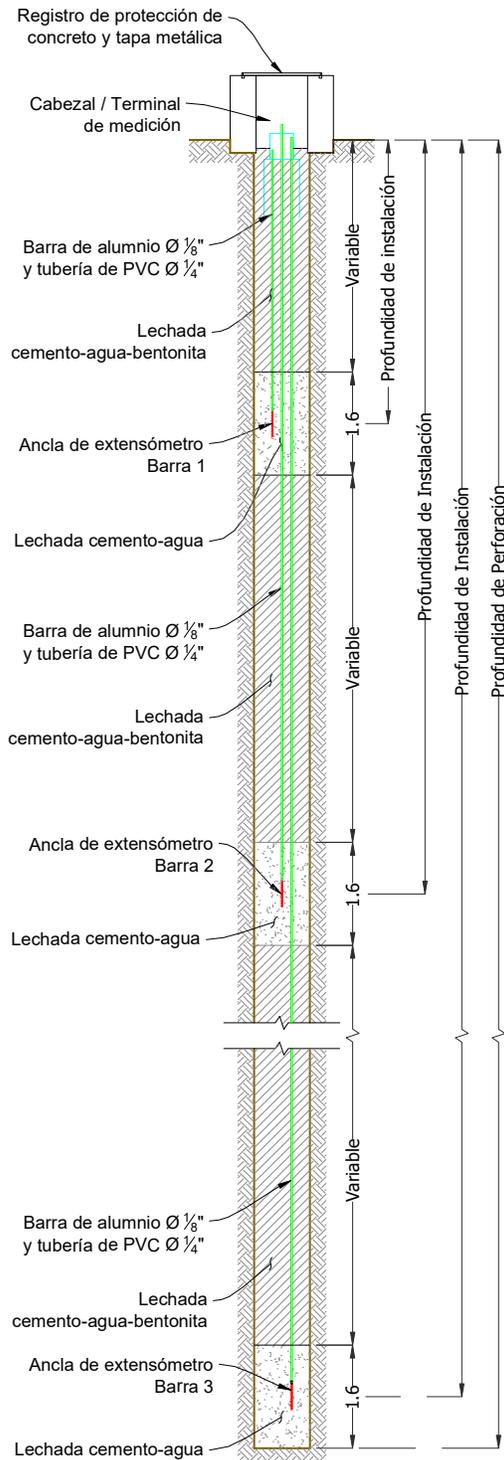
### Procedimiento de instalación

Las actividades generales de instalación de los extensómetros de barra consisten en lo siguiente:

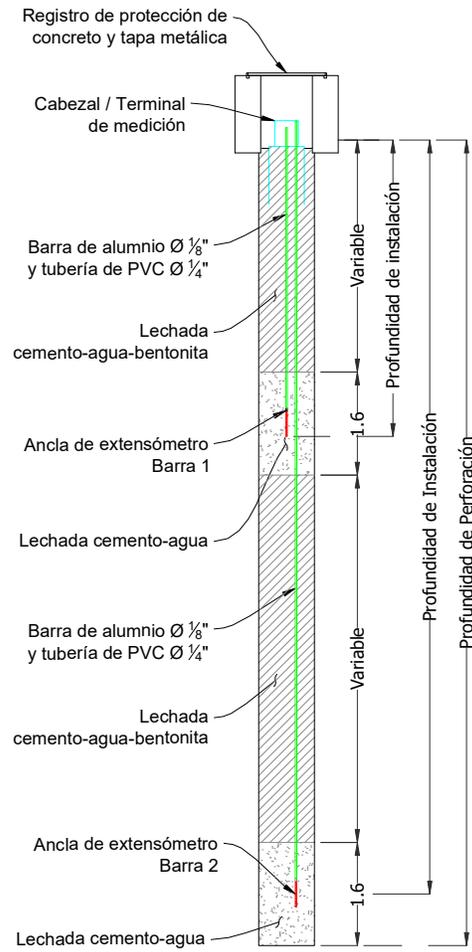
- i. Localización topográfica, de acuerdo con las especificaciones del proyecto.
- ii. Se realiza una perforación de  $\varnothing=4\frac{1}{2}$ " mediante una perforadora Long Year, empleando agua como fluido de perforación.
  - a. Conjuntamente se van ensamblando las anclas a las barras de acero inoxidable y también con la tubería de PVC de 1/4", dejando armadas las barras de medición a utilizar.
- iii. Al finalizar la perforación del barreno, se realiza un energético lavado en toda la longitud del barreno, posteriormente se corrobora la profundidad del barreno.
- iv. Posteriormente se coloca la barra que va a la mayor profundidad indicada, y se etiqueta.
- v. Se vierte en el barreno lechada de agua-cemento en los volúmenes indicados hasta alcanzar 1.6 metros de espesor, y se deja fragüe.
- vi. Después del fraguado de la lechada agua-cemento, se vierte en el barreno lechada agua-cemento-bentonita, e igualmente se deja fraguar.
- vii. Se procede a colocar las barra(s) siguiente(s) a la profundidad indicada, y se repiten los dos pasos anteriores hasta completar la estación de medición. De la misma forma la(s) barra(s) se etiqueta(n)
- viii. Previo al fraguado de la última lechada, se coloca el terminal o cabezal de medición de acero inoxidable, el cual alojará las barras; cada barra del extensómetro es colocada en su orificio correspondiente según su etiquetado.
- ix. Finalmente se construye un registro de concreto armado con tapa metálica de placa de  $\frac{3}{4}$ " de espesor para proteger el instrumento.
- x. Concluida la instalación y, se realiza la toma de lecturas con el micrómetro obteniendo la lectura "cero".

Cuando el estrato monitoreado sufre deformaciones, la varilla anclada se desplazará verticalmente, ya sea de manera ascendente o descendente y dichas variaciones podrán medirse en la superficie del terreno mediante un micrómetro análogo o digital.

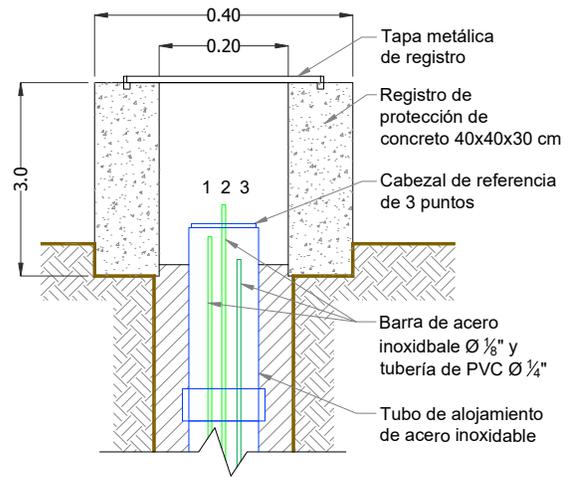
# Proceso Constructivo del Túnel Churubusco – Xochiaca



**EXTENSÓMETRO A**  
Acot. : metros S / ESC.



**EXTENSÓMETRO B**  
Acot. : metros S / ESC.



**DETALLE CABEZAL**  
Acot. : metros S / ESC.

Figura A12. Esquema de instalación de extensómetros [Cortesía ICA]

### A.1.4. Inclinómetros

El inclinómetro mide el cambio de pendiente de una tubería de plástico, fijada dentro de un barreno vertical o dentro del armado de un muro Milán. Este instrumento permite definir la distribución de movimientos laterales al deformarse e inclinarse la tubería guía, en función de la profundidad medida con respecto al nivel del terreno natural y en función del tiempo.

Un sistema de inclinómetro consta de cuatro partes principales (Figura 2.3):

- a. Una tubería guía que se instala permanentemente dentro de un barreno vertical. Esta tubería guía puede ser de plástico ABS o aluminio y posee cuatro ranuras longitudinales que sirven como guías para el recorrido de la sonda.



Figura A13. Tubería ABS de inclinómetro [Cortesía RST]

- b. La sonda inclinométrica que posee dos pares de ruedas que se ajustan a las ranuras para descender a lo largo de la tubería guía. Este dispositivo es el encargado de registrar los desplazamientos horizontales que sufre la tubería guía dentro del barreno.

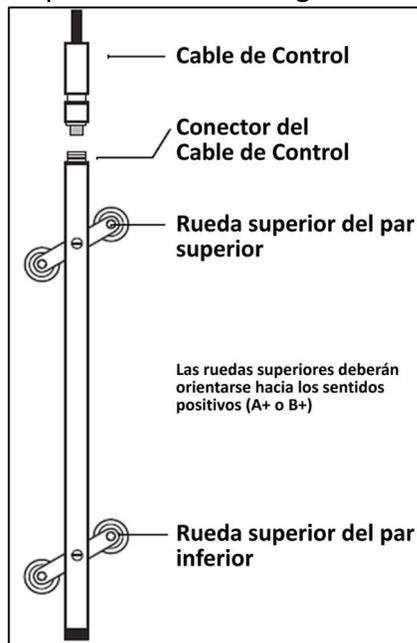


Figura A14. Sonda inclinométrica [Cortesía ICA]

- c. Un cable de control para subir y bajar la sonda dentro del ademe y transmitir señales eléctricas a la superficie. Para el control preciso de la profundidad de la sonda, el cable está generalmente graduado y posee arillos metálicos a cada medio metro que sirven como seguro de fijación del cable, sin riesgo de perder la sonda a profundidad.



Figura A15. Piezómetro de cuerda vibrante [Cortesía RST]

- d. Una unidad de lectura portátil con la que se registran las señales eléctricas enviadas por la sonda inclinométrica y con la que se puede graficar e interpretar las mediciones en tiempo real.



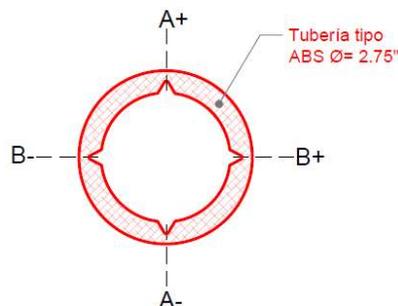
Figura A16. Ultra rugged Field PC [Cortesía RST]

Deberán de instalarse cuatro inclinómetros diametralmente opuestos respecto al centro de la lumbrera, perpendiculares entre sí y rotados 45° con respecto al eje del túnel (Figura 4.1), de tal forma que estos también deberán de encontrarse a 45° de los ejes de referencias superficiales y su perforación no deberá de interferir con el trazo del túnel.

Las profundidades de instalación deberán alcanzar hasta 1.5 diámetros de la lumbrera por debajo del nivel máximo de excavación, deberán ubicarse de 3 a 5 m de separación del brocal de la lumbrera

y quedarán protegidas del maltrato que puedan sufrir por efectos de la maquinaria de excavación y/o maniobras del procedimiento constructivo correspondiente.

Se deberá emplear tubería guía ranurada de plástico ABS, con diámetro exterior de 70 mm que sea compatible con la sonda inclinométrica a utilizar. Sus ranuras deberán orientarse de tal forma que el sentido A+ apunte hacia el centro de la lumbrera.



A+ Hacia el interior de la lumbrera  
A- Hacia el exterior de lumbrera

### CONVENCIÓN DE EJES DE INCLINÓMETRO

Figura A17. Sentido de tubería de inclinómetros [Cortesía ICA]

#### Procedimiento de instalación

Las actividades generales de instalación de los inclinómetros consisten en lo siguiente:

- i. Localización topográfica, de acuerdo con las especificaciones del proyecto.
- ii. Se realiza una perforación de  $\varnothing=4\frac{1}{2}$ " mediante una perforadora Long Year, empleando agua como fluido de perforación.
- iii. Al finalizar la perforación del barreno, se realiza un energético lavado en toda la longitud del barreno, posteriormente se corrobora la profundidad del barreno.
- iv. Posteriormente se coloca la tubería acoplada hasta colocarlo a la profundidad y posición indicadas.
  - a. Se van ensamblando los tubos con los coples necesarios hasta alcanzar la profundidad de instalación.
  - b. Al ir introduciendo la tubería se va llenando con agua para contrarrestar el efecto de flotación producido por la lechada de relleno
- v. Simultáneamente a la colocación de la tubería de rellena el espacio anular de la perforación con lechada agua-bentonita-cemento.
- vi. Finalmente se construye un registro de concreto armado con tapa metálica de placa de  $\frac{3}{4}$ " de espesor para proteger el instrumento.

# Proceso Constructivo del Túnel Churubusco – Xochiaca

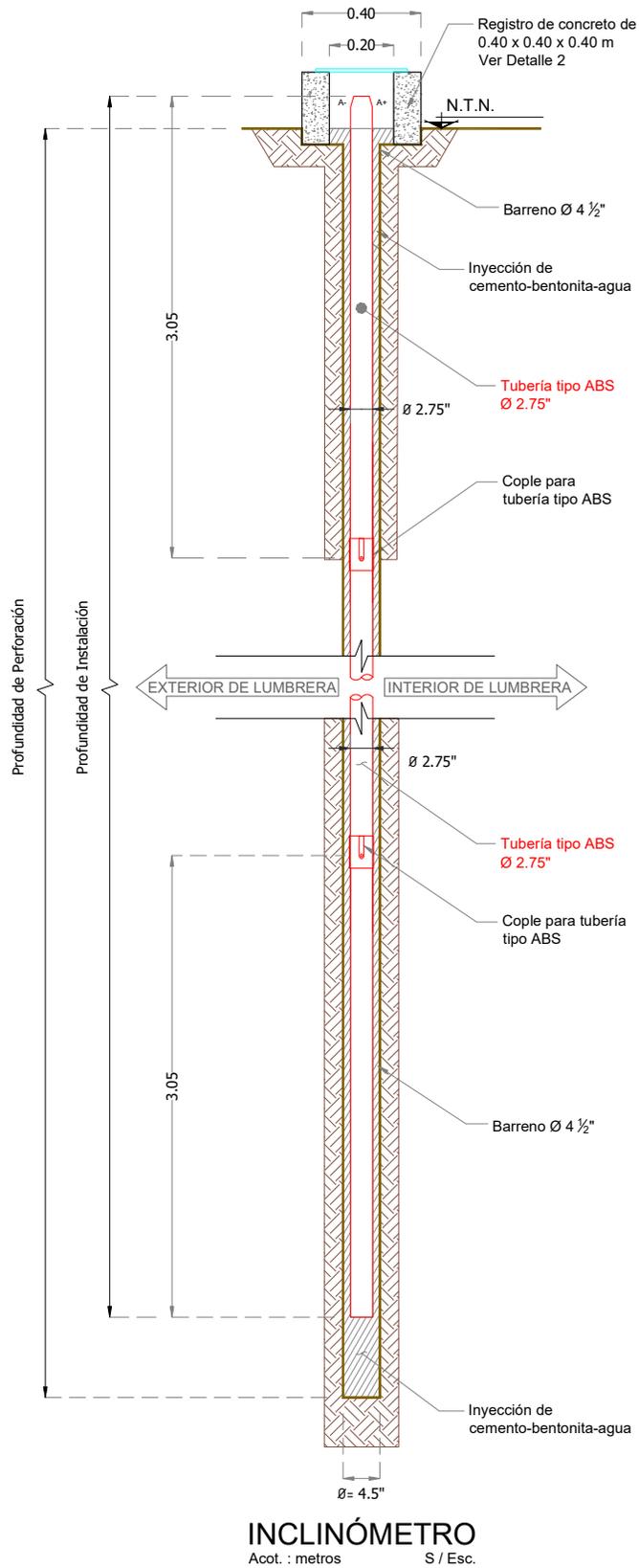


Figura A18. Esquema de instalación de inclinómetros [Cortesía ICA]

### A.1.5. Dovelas instrumentadas

Acorde a lo establecido en el proyecto base aprobado por la CONAGUA, para un anillo de dovelas instrumentado, se considera la instalación de 8 deformímetros de acero, 8 deformímetros de concreto y 4 celdas de presión, distribuidos en la clave, cubeta, hastial izquierdo y derecho; se recomienda la instalación de anillos instrumentados en la zona de entrada y salida de cada cruce, conforme al proyecto.

Los principales instrumentos de auscultación del túnel dovelado son:

#### a. Deformímetros de acero ("*welded strain gauges*")

Son dispositivos que sirven para medir esfuerzos en las barras de acero del revestimiento primario del túnel, a través de un transductor del tipo cuerda vibrante. En esencia, estos instrumentos consisten en un alambre de acero tensado y montados con soldadura o resina epóxica entre dos bloques de acero inoxidable de alta resistencia (Figura 2.7).

Cuando se presentan esfuerzos en las barras de acero de la dovela, los dos bloques se mueven en ciertas direcciones ocasionando un cambio en la tensión del alambre de acero, lo cual se traduce como un cambio en la frecuencia de resonancia de vibración del alambre tensado. El valor de la frecuencia se eleva al cuadrado y se multiplica por una constante que depende del modelo del instrumento empleado de manera que los valores de las lecturas resultantes se muestran en unidades de microdeformación o microstrains ( $\mu\epsilon$ ).

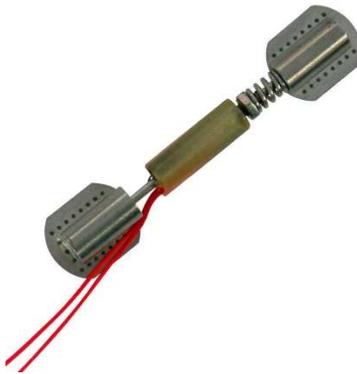


Figura A19. Deformímetro para acero [Cortesía RST Instruments]

#### b. Deformímetros de concreto ("*Embedded strain gages*")

Son dispositivos que sirven para medir esfuerzos dentro del concreto de las dovelas del túnel, a través de un transductor del tipo cuerda vibrante. Se componen de dos pestañas de acero unidas por un resorte de acero, que al ejercerles presión modifican la tensión existente en dicho resorte. Poseen una cobertura de PVC que protegen al instrumento para que se mantenga calibrado durante la instalación de este.



Figura A20. Deformímetro para concreto [Cortesía RST Instruments]

c. Celdas de presión de tierra (“Earth pressure cell”)

Son dispositivos para medir presiones totales que actúan en un punto de la estructura. Se conforman de placas circulares de acero inoxidable soldadas por sus bordes creando una cavidad sellada, la cual se llena de un fluido incompresible formando el cuerpo de la celda, al que se acopla un transductor de presión de cuerda vibrante (Figura 2.9). La celda se instala con la superficie sensible en contacto directo con el suelo o roca. La presión que actúa sobre esa superficie se transmite al fluido dentro de la celda modificando la tensión existente en el transductor de cuerda vibrante y a su vez, la frecuencia de resonancia de vibración del mismo, permitiendo la medición y toma de lecturas de la misma manera antes descrita para los deformímetros.



Figura A21. Deformímetro para acero [Cortesía RST Instruments]

La instrumentación de dovelas tiene el objetivo de medir los esfuerzos ejercidos sobre el revestimiento primario del túnel, mediante los deformímetros de acero y de concreto, y las celdas de presión, así como las deformaciones que pueda sufrir el mismo durante la excavación y hasta antes de la colocación del revestimiento definitivo mediante la medición de convergencias.

## Proceso Constructivo del Túnel Churubusco – Xochiaca

---

Los deformímetros y celdas de presión se instalaron en cuatro dovelas (A1, A3, B y C) de las seis que conforman un anillo de dovelas y en conjunto definen un anillo Instrumentado. La disposición de estas cuatro dovelas corresponde al monitoreo de las presiones y esfuerzos ejercidos en la clave, hastiales y rasante hidráulica del túnel.

A lo largo de todo el trazo del túnel se instalaron 26 anillos instrumentados, separados 500 m cada uno aproximadamente. Se describen las especificaciones en la Tabla A-I a continuación.

Tabla A-I. Especificaciones técnicas de los instrumentos instalados en las dovelas.

| Instrumento               | Parámetro                 | Valor                           |
|---------------------------|---------------------------|---------------------------------|
| Deformímetros en acero    | Rango:                    | 3000 $\mu\epsilon$              |
|                           | Precisión:                | $\pm 0.5\%$ de la escala total  |
|                           | Resolución:               | 0.4 $\mu\epsilon$               |
|                           | Temperatura de operación: | -20°C a 80°C                    |
| Deformímetros en concreto | Rango:                    | 5000 $\mu\epsilon$              |
|                           | Precisión:                | $\pm 0.25\%$ de la escala total |
|                           | Resolución:               | 0.125 mV/V nominal              |
|                           | Temperatura de operación: | -20°C a 80°C                    |
| Celdas de presión         | Rango:                    | 2 MPa                           |
|                           | Rango máximo:             | 150% de la escala total         |
|                           | Precisión:                | $\pm 0.1\%$ de la escala total  |
|                           | Resolución:               | 0.025% de la escala total       |
|                           | Temperatura de operación: | -20°C a 80°C                    |

### A.1.6. Monitoreo del diámetro interno del túnel (convergencias)

Los asentamientos y desplazamientos del terreno causados por la excavación del túnel, así como la presión de contacto, producen efectos sobre el revestimiento primario del túnel, pues al no comportarse como una estructura totalmente rígida, éste se deforma y se contrae. El monitoreo de convergencias consiste en determinar esa deformación que sufre el revestimiento del túnel una vez que deja de ser soportado por la máquina tuneladora, midiendo la distancia entre dos puntos de la superficie excavada del túnel con cintas especiales o con equipo topográfico y determinando la variación de estas distancias en función del tiempo.

Mediante este método no se obtiene la posición exacta de los puntos luego de que se presentan deformaciones, sin embargo, se obtiene la variación en la distancia relativa entre puntos; datos suficientes para la evaluación de la estabilidad del túnel.

El monitoreo del revestimiento primario se realizará midiendo el diámetro horizontal y vertical del revestimiento primario, ya sea con distanciómetro láser, y/o estación total. Los parámetros de control y monitoreo de referencia serán conforme a lo indicado en los términos de referencia. Las definiciones básicas serán: DISTORSIÓN MÁXIMA= diferencia entre diámetro máximo deformado y el diámetro mínimo deformado, dividido entre el valor del diámetro mínimo deformado, sea inferior al 1%. DEFORMACIÓN DIAMETRAL MÁXIMA= modificación de distancia que se presenta entre dos puntos diametralmente opuestos de la sección transversal del túnel sea inferior al 0.5% del diámetro de diseño.

Se muestra a continuación un diagrama empírico para el control de desplazamientos.

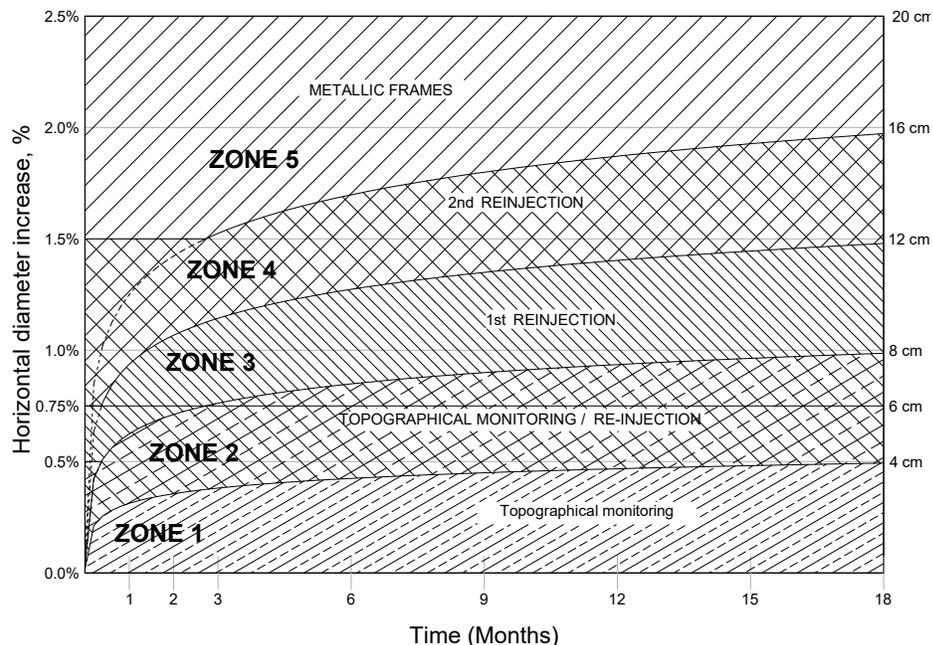


Figura A22. Diagrama para control de desplazamiento en túneles con dovelas en suelos blandos.  
[Cortesía ICA]

El seguimiento del control de desplazamiento del endovelado y en su caso las medidas de control y mitigación propuestas serán conforme a lo indicado en la TABLA A-II.

## Proceso Constructivo del Túnel Churubusco – Xochiaca

---

TABLA A-II. Control deformativo y medidas de mitigación [Cortesía ICA]

| <b>Zona</b> | <b>Comportamiento</b>                              | <b>Diámetro horizontal (%)</b> | <b>Acción de mitigación</b>  |
|-------------|--|--------------------------------|--|
| 1           | ÓPTIMO, con clara tendencia de estabilidad         | 0.0 a 0.5                      | Monitoreo topográfico  |
| 2           | LIGERAMENTE ÓPTIMO, con tendencia a desplazamiento | < 1.0                          | Monitoreo topográfico continuo, reinyección del espacio anular   |
| 3           | NO ÓPTIMO  | < 1.5                          | Monitoreo topográfico continuo. Ejecución de la primera o segunda reinyección del espacio anular   |
| 4           | NOTORIAMENTE INESTABLE                             | < 2.0                          | Monitoreo topográfico continuo, ejecución de la primera y segunda reinyección del espacio anular   |
| 5           | CRITICO  | > 2.0                          | Monitoreo topográfico intenso, ejecución de primera y segunda reinyección del espacio anular. Adicionalmente, se deberá colocar un sistema de apuntalamiento metálico. |

### A.1.7. Dispositivos de lectura o medición

El dispositivo de lectura procesa la señal y despliega una lectura (en unidades “B”) misma que se convierte a unidades de ingeniería, en este caso a  $\text{kg}/\text{cm}^2$ . La medición es a través de una terminal digital portátil, VW Data Recorder, con la cual también se obtiene la temperatura registrada con el termistor.



Figura A23. Lector portátil de cuerda vibrante “VW2106” [Cortesía RST Instruments]



Figura A24. Lector para instrumentos de cuerda vibrante [Cortesía ICA]

### Procedimiento de medición

Para el monitoreo de todos los instrumentos de cuerda vibrante en general, será necesario el uso de una unidad de lectura compatible con transductores de cuerda vibrante. Esta unidad de lectura consiste en una consola digital portátil en la que se conectan los cables de señal y del termistor, mediante la cual es posible tomar las lecturas de frecuencia del instrumento de cuerda vibrante y de temperatura de los termistores acoplados a este tipo de instrumentos (Figura A20).

Para realizar la toma de lectura en forma manual de los sensores eléctricos, es necesario contar con la unidad Portátil “VW Data Recorder”. Este equipo despliega los datos obtenidos con los sensores para posteriormente transferirlos a una computadora. Las terminales del sensor son conectadas en la parte interior de la unidad de lectura, donde se muestra la configuración de la conexión del instrumento. Una vez conectado el sensor se toma la medición.

Para convertir la frecuencia registrada en estas unidades de lectura a unidades de presión o microdeformación, según sea el caso, será necesario tener al alcance los certificados de calibración proporcionados por el fabricante de los instrumentos, pues en ellos se plasman los factores de corrección y de calibración propios de cada instrumento en particular, mismos que son necesarios para la correcta conversión de unidades.

A.1.8. Referencias superficiales. Puntos de control topográfico

Los puntos de control topográfico tienen el objetivo de evaluar los movimientos verticales en la superficie del terreno, previo, durante y posterior al paso de la máquina tuneladora; las referencias superficiales conocidas como “mojoneras” son referenciadas topográficamente a una nivel de referencia fijo; esto con el objeto de conocer los asentamientos o expansiones derivados por el proceso de excavación con equipo EPB, también permite evaluar los asentamientos con respecto al hundimiento regional.

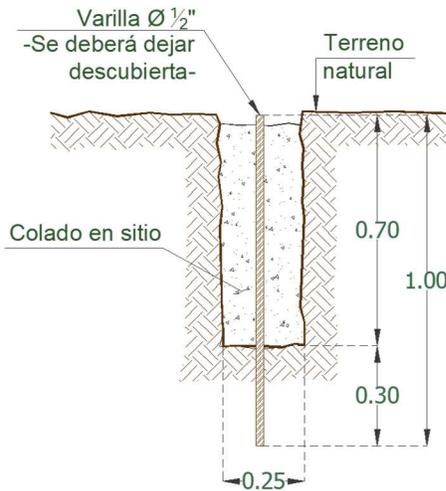


Figura A25. Detalle de instalación de los puntos de control superficial

En cada uno de los cruces, se recomienda instalar, en el sentido longitudinal, una sección de referencias conformada por tres líneas; una línea se ubicaría en el eje del túnel, y las segundas en la zona de los hastiales del túnel. En el sentido transversal, se recomienda la instalación de 8 líneas de monitoreo, donde los monitores tengan una separación de 2.5 a 5.0 y 15.0m entre ellos, y un arreglo similar al que se indica en la Figura 06, dependiendo de las condicionantes del sitio.

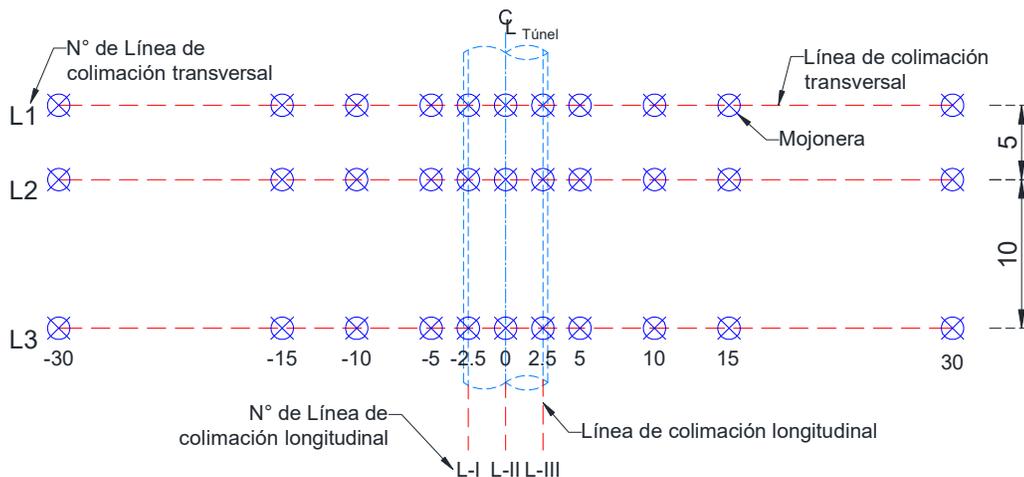


Figura A26. Esquema de instalación de referencias topográficas en cruces importantes [Cortesía ICA]

### Procedimiento de instalación

- i. Previo al inicio de la instalación de las "mojoneras" y con apoyo de la brigada de topografía, se deberán ubicar y referenciar cada uno de los puntos de instalación de las referencias superficiales.
- ii. Se deberá realizar una excavación de sección 0.25 x 0.25 metros, con una profundidad de 0.70 metros mínimo.
- iii. Posteriormente, se deberá colocar al centro de la excavación una varilla corrugada de  $\varnothing = 1/2"$ , con una longitud de 1.00 metro, la cual deberá anclarse 0.30 metros en el fondo de la excavación.
- iv. De manera consecutiva se deberá rellenar la excavación concreto con un  $f'c = 100 \text{ kg/cm}^2$ ; tomando en cuenta que la varilla deberá quedar descubierta en la parte superior de la excavación.
- v. Una vez colada la excavación se deberán rectificar la ubicación y coordenadas de la referencia instalada; esto con el apoyo de la brigada de topografía.
- vi. En base a un corrimiento de nivelación se le asigna -con un nivel fijo automático- a la punta de varilla visible la elevación inicial; misma elevación será la base para la comparativa de monitores posteriores.
- vii. Para el caso de las referencias perimetrales y radiales a la lumbrera, se contemplará el uso de banderolas, con el fin de posicionar, garantizar y proteger las referencias

## A.2 Frecuencia de medición de estaciones de monitoreo

Las condiciones básicas por considerar en la instalación de cada estación y su frecuencia de monitoreo se describen en la TABLA A.2.1.

TABLA A.2.1 Relación de instrumentos por considerar en una estación de monitoreo. Recomendación de frecuencia de monitoreo [Cortesía ICA]

| Instrumento                         | Descripción de instalación   | Frecuencia de monitoreo   |  |  |
|-------------------------------------|--|---|--|--|
|                                     |  | Previo  | Durante  | Posterior  |
| Piezómetro de cuerda vibrante (PZE) | En estratos permeables, y:<br>1. Zona de clave del túnel<br>2. Zona del eje del túnel<br>3. Zona de cubeta del túnel                       | TBM 100m antes del punto de medición:<br>1 vez por semana                               | 50m antes, durante el paso y 50 m después del punto de medición:<br>1 o 2 veces/día  | TBM a 50-100m:<br>1 vez por semana<br><br>Posteriormente<br>1 vez/mes. |
| Piezocelda (PZC)                    | Hastial derecho y el otro en el hastial izquierdo.   | TBM 100m antes del punto de medición:<br>1 vez/semana                                   | 50 m antes, durante el paso y 50m después del punto de medición:<br>1 o 2 veces/día  | TBM a 50-100m:<br>1 vez por semana<br><br>Posteriormente<br>1 vez/mes. |
| Referencias superficiales           | 3 líneas en el sentido longitudinal (eje y hastiales del túnel)<br>8 líneas en el sentido transversal, con separación de 2.5 a 5.0 y 15.0m | TBM 100m antes del punto de medición:<br>1 vez/semana con respecto al punto de medición | 50 m antes durante el paso y de 50m después del punto de medición:<br>3 veces/semana | TBM a 50-100m:<br>1 vez por semana<br><br>Posteriormente<br>1 vez/mes. |
| Extensómetro de barra (EXT)         | Zona de influencia de lentes y clave del túnel   | TBM 100m antes del punto de medición:<br>1 vez/semana                                   | 50 m antes Durante el paso y de 50m después del punto de medición:<br>1 vez/día      | TBM a 50-100m:<br>1 vez por semana<br><br>Posteriormente<br>1 vez/mes. |
| Anillo instrumentado (AI)           | Conforme a lo establecido en el proyecto ejecutivo de instrumentación.   | TBM 100m antes del punto de medición:<br>1 vez/semana                                   | Durante el paso y de 50m después del punto de medición:<br>1 vez/día                 | TBM a 50-100m:<br>1 vez por semana<br><br>Posteriormente<br>1 vez/mes. |

## Proceso Constructivo del Túnel Churubusco – Xochiaca

---

### **Nota:**

En caso de presentarse alguna eventualidad, las frecuencia de monitoreo puede incrementarse o espaciarse según lo consideren necesario la supervisión externa y la contratista.

### **Abreviaturas:**

CP. Celda de carga/presión.

DA. Deformímetro para acero

DC. Deformímetro para concreto





## A.4 Pruebas de laboratorio

Se realizan diversas pruebas de laboratorio a los agregados, al concreto y al acero se enuncian de manera general a continuación:

En planta de dovelas realizan pruebas a la grava y arena, lo que incluye: granulometría, masa específica, absorción, masas volumétricas.

A todo concreto a utilizar, en estado fresco y en estado endurecido se le realizan pruebas según las normas siguientes:

Las normas que se aplican son las siguientes:

NMX-C-083-ONNCCE-2002

Determinación de la resistencia a la compresión de cilindros de concreto.

NMX-C-109-ONNCCE-2004

Cabeceo de especímenes cilíndricos.

NMX-C-111-ONNCCE-2004

Agregados para concreto hidráulico. Especificaciones y métodos de prueba

NMX-C-152-ONNCCE-2010

Método de prueba para la determinación del peso específico de cementantes hidráulicos.

NMX-C-156-1997-ONNCCE

Determinación del revenimiento en el concreto fresco.

NMX-C-159-ONNCCE-2004

Elaboración y curado de especímenes en el laboratorio.

NMX-C-160-ONNCCE-2004

Elaboración y curado en obra de especímenes de concreto.

NMX-C-161-1997-ONNCCE

Concreto fresco – Muestreo

NMX-C-162-1997-ONNCCE

Concreto fresco – Determinación de la masa unitaria, cálculo del rendimiento y contenido de aire del concreto fresco por el método gravimétrico.

NMX-C-156-1997-ONNCCE (Prueba de revenimiento)

Concreto fresco – Revenimiento

En planta de dovelas, una vez fabricado el concreto se realiza la prueba de revenimiento, a fin de determinar la consistencia del concreto fresco y verificar la uniformidad de la mezcla, dicho valor debe ser de 5 cm +/- 2 cm según lo indica el proyecto, tomándose el registro correspondiente. La frecuencia con la que se realiza esta prueba es cada 5 m<sup>3</sup>.

## Proceso Constructivo del Túnel Churubusco – Xochiaca

---

### Pruebas de compresión

Una parte muy importante es la de realizar las respectivas pruebas de compresión para ello se toman 8 muestras cada 40 m<sup>3</sup> y se prueban en los tiempos siguientes:

2 cilindros a desmolde.

2 cilindros a los 7 días

4 cilindros a los 28 días.

Los resultados de las pruebas de resistencia a partir de cilindros moldeados se pueden utilizar para fines de control de calidad, aceptación del concreto, y para estimar o verificar la resistencia del concreto; en planta de dovelas, se verifica que alcanza una resistencia mínima de 130 kg/cm<sup>2</sup> para poder realizar el desmolde.

### Pruebas al acero de refuerzo.

Del acero recibido de los proveedores, se envían al IMCIC muestras de 1.2 m cada 40 toneladas con el fin de que se realicen las pruebas de tensión, doblado y corrugaciones que servirán para verificar la calidad de estas y constatar el cumplimiento de las especificaciones de la obra.

## Referencias

- [1] – Topografía Subterránea. Adrián Gustavo Sosa, Andrés Darío Ibazeta Alessi.
- [2] – Laureano Cornejo Álvarez; “La excavación mecánica de túneles en terrenos blandos y su evolución histórica”. (español). Revista Ingeopres. Año 2000. Pág. 1
- [3] – Evolución en la construcción de obras subterráneas; Giovanni Lombardi. Pág. 3
- [4] – Imagen de Pirámide de Sakkara, sepultura del Rey Zoser, Egipto, ca. 2600 a.C. Tomada de: Evolución en la construcción de obras subterráneas; Giovanni Lombardi. Pág. 3
- [4] – Topografía Subterránea. Adrián Gustavo Sosa, Andrés Darío Ibazeta Alessi.
- [5] – Lawrence Berlow. Diodoro Sículo, Bibliotheca Historica, Book II. Reference Guide to Famous Engineering Landmarks of the World: Bridges, Tunnels, Dams, Roads, and Other Structures. Routledge. p. 54.
- [6] – BOLETIN AMITOS 81; pág.18. Disponible en: [https://issuu.com/amitos/docs/bolet\\_n\\_amitos\\_81\\_baja](https://issuu.com/amitos/docs/bolet_n_amitos_81_baja)
- [7] – Fotografía de túnel de Qanat cerca de Ispahán (Irán). Tomada de: <https://es.wikipedia.org/wiki/Qanat>
- [8] – Túnel de Siloam. [http://www.coiim.es/enla/Industria/primeros\\_tuneles.htm](http://www.coiim.es/enla/Industria/primeros_tuneles.htm)
- [9] – Fotografía de Túnel Siloé. Disponible en: [http://www.lugaresbiblicos.com/tunel\\_de\\_ezequias/](http://www.lugaresbiblicos.com/tunel_de_ezequias/)
- [10] – Fotografía de Túnel Ezequías. Disponible en: <https://www.primeroscristianos.com/sabes-del-tunel-del-rey-ezequias/>
- [11] – Schmidt, E.F., 1953. Persepolis I – Structures, Reliefs, Inscriptions; The University of Chicago Oriental Institute Publications, Volume LXVIII, The University of Chicago Press. Disponible en: <https://oi.uchicago.edu/research/publications/oip/oip-68-persepolis-i-structures-reliefs-inscriptions>
- [12] – Acueducto de Persépolis. Disponible en: <https://www.pinterest.com.mx/pin/348043877432690664/?lp=true>
- [13] – Apostol, Tom M. (2004). "The Tunnel of Samos" (PDF). Engineering & Science No. 1. Disponible en: <http://calteches.library.caltech.edu/4106/1/Samos.pdf>
- [14] – Fotografía Túnel de Eupalino. Disponible en: <https://historiacivil.wordpress.com/2014/01/29/tunel-de-eupalinos/>
- [15] – Delphine Dumas-Acolat, 2011. Aménager l'espace naturel. Tunnels. Disponible en: <http://terra.antiqua.free.fr/amenager.html#tunnels>
- [16] – Fotografía del túnel de Posilipo. Tomada de: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/a/a4/Parco\\_della\\_Grotta\\_di\\_Posillipo10.jpg/170px-Parco\\_della\\_Grotta\\_di\\_Posillipo10.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/a/a4/Parco_della_Grotta_di_Posillipo10.jpg/170px-Parco_della_Grotta_di_Posillipo10.jpg)
- [17] – Túnel de roca de Telerek. <http://terelek.blogcu.com/terelek-kaya-tuneli/319497>
- [18] – Matthias Schulz, 2009. Rome's Tremendous Tunnel - The Ancient World's Longest Underground Aqueduct. Disponible en: <https://www.spiegel.de/international/world/rome-s-tremendous-tunnel-the-ancient-world-s-longest-underground-aqueduct-a-612718.html>

- [19] – Fotografía Qanat Fir'aun. Tomada de: <http://www.dekapolis-aquaedukt.de/de>
- [20] – Túnel Furlo. <http://www.riservagoladelfurlo.it/>
- [21] – Fotografía del túnel Furlo. Tomada de:  
[https://www.google.com/maps/place/T%C3%BAnel+romano+de+Furlo/@43.6390838,12.7139543,3a,75y/data=!3m8!1e2!3m6!1sAF1QipNL2i13KLdT\\_qFOjKIdr6Z3Ekwval5jxRzJL4zB!2e10!3e12!6shttps:%2F%2Fh5.googleusercontent.com%2Fp%2FAF1QipNL2i13KLdT\\_qFOjKIdr6Z3Ekwval5jxRzJL4zB%3Dw203-h152-k-no!7i4288!8i3216!4m5!3m4!1s0x132c5436b19b0b89:0xf082c91dccc3650!8m2!3d43.6390838!4d12.7139543](https://www.google.com/maps/place/T%C3%BAnel+romano+de+Furlo/@43.6390838,12.7139543,3a,75y/data=!3m8!1e2!3m6!1sAF1QipNL2i13KLdT_qFOjKIdr6Z3Ekwval5jxRzJL4zB!2e10!3e12!6shttps:%2F%2Fh5.googleusercontent.com%2Fp%2FAF1QipNL2i13KLdT_qFOjKIdr6Z3Ekwval5jxRzJL4zB%3Dw203-h152-k-no!7i4288!8i3216!4m5!3m4!1s0x132c5436b19b0b89:0xf082c91dccc3650!8m2!3d43.6390838!4d12.7139543)
- [22] – Sistema de Información de Patrimonio Cultural Aragonés (SIPCA) – “La Mina - Zaragoza - Campo de Daroca - Daroca”. Disponible en: <http://www.sipca.es/censo/7-INM-ZAR-024-094-007/La/Mina.html#.XZtJrVVKjIX>
- [23] – Fotografía de túnel de Mina de Daroca (Zaragoza), España. Tomada de:  
[http://xiloca.org/xilocapedia/images/2/2c/Mina\\_Daroca.jpg](http://xiloca.org/xilocapedia/images/2/2c/Mina_Daroca.jpg)
- [24] – Pays Albigeois y Louisa Paulin, 2014. El túnel de Malpas. Disponible en:  
<http://www.canaldumidi.com/Biterrois/Malpas/Malpas.php>
- [25] – Fotografías del túnel de Malpas. Tomadas de:  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Malpas\\_Tunnel#/media/File:TunnelduMalpas.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/Malpas_Tunnel#/media/File:TunnelduMalpas.jpg)
- [26] – Túnel Harecastle. Disponible en: [https://en.wikipedia.org/wiki/Harecastle\\_Tunnel](https://en.wikipedia.org/wiki/Harecastle_Tunnel)
- [27] – Fotografía de los Túneles de Harecastle. Disponible en:  
<https://www.insure4boats.co.uk/historyofthewaterways/point-of-interest/harecastle-tunnel>
- [28] – Túnel del Canal de Sapperton. <https://www.cotswoldcanals.net/thames-severn-canal-construction.php>
- [29] – Fotografía del túnel del canal de Sapperton. Tomada de:  
<https://www.cotswoldcanals.net/sapperton-canal-tunnel.php#>
- [30] – British Crown and SeaZone Solutions Limited. Fritchley’s Tunnel, Butterley Gangroad.  
<https://historicengland.org.uk/listing/the-list/list-entry/1422984>
- [31] – Túnel de Fritchley (Derbyshire), Inglaterra. Tomada de: <https://www.bbc.com/news/uk-england-derbyshire-31951751>
- [32] – Imágenes de época del túnel Tames. Tomadas de: Juncà Ubierna, J. A. (1997). Pág. 6, Capítulo 1, Historia de los túneles y su evolución tecnológica. “Manual de Túneles y Obras Subterráneas”. Editor: Carlos López Jimeno et al. Madrid: Gráficas Arias Montano, 1997 (1ª edición).
- [33] – The Mining History Journal - Volume 1. (1994) - Doreen Chaky. “John Henry v. Charles Burleighs drill”. Disponible en: <https://www.mininghistoryassociation.org/Journal/MHJ-v1-1994-Chaky.pdf>
- [34] – Grabado de perforadora neumática. Tomado de: The Mining History Journal - Volume 1. (1994) - Doreen Chaky. “John Henry v. Charles Burleighs drill”. Disponible en:  
<https://www.mininghistoryassociation.org/Journal/MHJ-v1-1994-Chaky.pdf>
- [35] – Túnel Fréjus. <https://structurae.info/ouvrages/tunnel-ferroviaire-du-mont-cenis>
- [36] – Fotografía del túnel Fréjus. Tomada de: <https://structurae.info/photos/318017-tunnel-ferroviaire-du-mont-cenis>

- [37] – Fotografía de dominio público del portal este del túnel Hoosac:  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Hoosac\\_Tunnel#/media/File:East\\_Portal\\_of\\_Hoosac\\_Tunnel.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/Hoosac_Tunnel#/media/File:East_Portal_of_Hoosac_Tunnel.jpg)
- [38] – Ben Johnson, 2015. Tower Subway. Disponible en: <https://www.historic-uk.com/HistoryMagazine/DestinationsUK/Tower-Subway>
- [39] – Tower Subway graph. Tomada de: <https://www.historic-uk.com/HistoryMagazine/DestinationsUK/Tower-Subway/>
- [40] – Escudo de aire comprimido de Greathead en acción en el depósito de limo debajo del río Hudson en Nueva York. Tomada de: Mechanized tunneling in urban areas – design methodology and construction control. Editores: Vittorio Guglielmetti, Piergiorgio Grasso, Ashraf Mahtab, Shulin Xu, Pág. 12; Fig. 1.9
- [41] – Fairfield, A. P., CDR USN Naval Ordnance Lord Baltimore Press (1921) p.44
- [42] – Christian Wolmar (2005). The Subterranean Railway: How the London Underground was Built and How It Changed the City Forever. Atlantic Books.
- [43] – Dibujo de trabajadores en el ferrocarril de la ciudad y del sur de Londres, parte de la red de trenes subterráneos de Londres, en el siglo XIX. Tomada de: <https://www.abc.net.au/news/2013-01-10/city-and-south-london-railway/4459544>
- [44] – Los camiones de volteo y sus características. Disponible en: <https://www.tauro.mx/camiones-de-volteo/>
- [45] – Estudio Sassani. Disponible en: <https://estudiosassani.wordpress.com/2017/01/>
- [46] – ¿Qué es un Low Boy? Disponible en: <http://gruasgremsa.com.mx/que-es-un-low-boy/>
- [47] – Farrell Sklerov & Michael Saucier, 1999. New York City Department of Environmental Protection Public Affairs. Acueducto Delaware. Disponible en: [https://www1.nyc.gov/html/dep/html/press\\_releases/10-99pr.shtml#.XOW21FJKjIU](https://www1.nyc.gov/html/dep/html/press_releases/10-99pr.shtml#.XOW21FJKjIU)
- [48] – Fotografía del Acueducto Delaware. Tomada de: [https://www1.nyc.gov/html/dep/images/features\\_widecolumn/ss\\_del\\_aqueduct02.jpg](https://www1.nyc.gov/html/dep/images/features_widecolumn/ss_del_aqueduct02.jpg)
- [49] – M. Fuchsberger: número especial en el 75 cumpleaños de Christian Veder, comunicaciones del Instituto de Mecánica de Suelos, Mecánica de Rocas e Ingeniería de la Cimentación, Universidad Tecnológica de Viena (Technische Universität Graz), 1983. Disponible en: <https://www.worldcat.org/title/sondernummer-zum-75-geburtstag-von-christian-veder/oclc/256210765>
- [50] – Trabajo de Fin de Máster: Estudio de los riesgos generados por agentes químicos en la fabricación de explosivos; Alfonso Dávila Abellán, 2016. Disponible en: <https://repositorio.upct.es/bitstream/handle/10317/3621/tfm317.pdf>
- [51] – *Earth pressure balance (EPB) shield tunneling in Bangkok*. Pag.51; Suchatvee Suwansawat, 2002
- [52] – Eduardo de J. Vidaud Quintana & Ingrid N. Vidaud Quintana. EL TÚNEL BAJO EL CANAL DE LA MANCHA Ficción hecha realidad; 2015. Disponible en: <http://www.revistacyt.com.mx/index.php/ingenieria/433-el-tunel-bajo-el-canal-de-la-mancha-ficcion-hecha-realidad>
- [53] – Fotografía de un tren Eurostar sale del Túnel del Canal de la Mancha, gestionado por Eurotunnel. Tomada de: <https://e00-expansion.uecdn.es/assets/multimedia/imagenes/2019/03/01/15514424984749.jpg>

- [54] – Túnel Laerdal. El túnel de carretera más largo del mundo. Disponible en: <https://www.visitnorway.es/listings/el-t%C3%BAnel-de-carretera-m%C3%A1s-largo-del-mundo/49513/>
- [55] – Fotografía del túnel Laerdal, Noruega. Tomada de: <https://fiordosnoruegos.org/tunel-laerdal/>
- [56] – Túnel Eiksund, Yngve Jarslett & Reidar Hugsted & Rasmus S. Nordahl; 2018 Disponible en: <https://snl.no/Eiksundtunnelen>
- [57] – Fotografía de Eiksuntunnelen. Tomada de: <https://giertsentunnel.no/media/1067/20080516-lysslange-Eika-Eiksundsambandet.JPG>
- [58] – Max Seitz; 2016. Las increíbles cifras del túnel de San Gotardo, el más largo del mundo. Disponible en: [https://www.bbc.com/mundo/noticias/2016/06/160513\\_internacional\\_tecnologia\\_tunel\\_san\\_gotardo\\_impresionantes\\_cifras\\_ms](https://www.bbc.com/mundo/noticias/2016/06/160513_internacional_tecnologia_tunel_san_gotardo_impresionantes_cifras_ms)
- [59] – Fotografía del túnel de base de San Gotardo, Suiza. Tomada de: [https://ichef.bbci.co.uk/news/660/cpsprodpb/7A73/production/\\_92974313\\_mediaitem92974312.jpg](https://ichef.bbci.co.uk/news/660/cpsprodpb/7A73/production/_92974313_mediaitem92974312.jpg)
- [60] – Grupo ACS, 2017. Excavación de túnel en Seattle con “Big Bertha”. Disponible en: [https://www.grupoacs.com/ficheros\\_editor/File/07\\_sala\\_prensa/01\\_noticias/01\\_notas\\_prensa/acs/Ingles/050417%20Nota%20de%20prensa%20FINALIZACION%20TUNEL%20DE%20SEATTLE\\_ENG.pdf](https://www.grupoacs.com/ficheros_editor/File/07_sala_prensa/01_noticias/01_notas_prensa/acs/Ingles/050417%20Nota%20de%20prensa%20FINALIZACION%20TUNEL%20DE%20SEATTLE_ENG.pdf)
- [61] – Fotografía de excavadora “Big Bertha”. Tomada de: <https://centinela66.com/2014/01/04/misterio-total-objeto-desconocido-interrumpe-excavacion-de-tunel-en-estados-unidos/>
- [62] – US debut for vertical shaft machine technology - Peter Kenyon, TunnelTalk; Abril 2012. Disponible en: <https://tunneltalk.com/Ballard-Siphon-Seattle-Apr12-Vertical-shaft-machine-debuts-on-USA-tunnelling-project.php>
- [63] – Máquina excavadora de Lumbreras “Herrenknecht”. Disponible en: <https://www.herrenknecht.com/en/products/productdetail/vertical-shaft-sinking-machine-vsm/>
- [64] – Fotografía del túnel de la pirámide de Cholula, Puebla, Estados Unidos Mexicanos. Tomada de: <https://inah.gob.mx/en/boletines/2951-un-viaje-al-mestizaje>
- [65] – Artículo de investigación: Procesos y actores en la conformación del suelo urbano en el lago de Texcoco. Maribel Espinosa-Castillo. Instituto Politécnico Nacional. Disponible en: [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1405-84212008000200009](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-84212008000200009)
- [66] – “Bóveda Real”. Último fragmento del túnel de Enrico Martínez. Tajo Nochistongo. Tomada de: <http://tunelesenlahistoria.blogspot.com/2016/06/historia-de-los-tuneles-en-mexico.html>
- [67] – Túnel de Huehuetoca visitado por el superintendente Real del Desagüe, Domingo de Trespalacios y Escandón, hacia 1760. Tomado de: El agua y la ciudad de México - De Tenochtitlán a la megalópolis del siglo XXI. Pág. 30. Autor Jorge Legorreta.
- [68] – Horno de cal en Tequixquiac, vista general. Tomada de: [https://mediateca.inah.gob.mx/islandora\\_74/islandora/object/fotografia%3A6407](https://mediateca.inah.gob.mx/islandora_74/islandora/object/fotografia%3A6407)
- [69] – Horno continuo de ladrillo en el tajo de Tequixquiac. Tomada de: [https://mediateca.inah.gob.mx/islandora\\_74/islandora/object/fotografia%3A368988](https://mediateca.inah.gob.mx/islandora_74/islandora/object/fotografia%3A368988)
- [70] – Fotografía “Túnel del Canal de Desagüe”. Tomada de: [https://mexicana.cultura.gob.mx/multimedia/mediatecamedia/fotografia\\_3607/2288.jpg](https://mexicana.cultura.gob.mx/multimedia/mediatecamedia/fotografia_3607/2288.jpg)

- [71] – Fotografía del túnel de Ogarrío. Tomada de: <http://pueblomagicodemexico.com.mx/real-de-catorce>
- [72] – Fotografía “Manuel Ávila Camacho con funcionarios e ingenieros frente a la entrada al túnel de Tequixquiác”. Tomada de: [https://mexicana.cultura.gob.mx/en/repositorio/detalle?id=\\_suri:FOTOTECA:TransObject:5bc7d79a7a8a0222ef116fad](https://mexicana.cultura.gob.mx/en/repositorio/detalle?id=_suri:FOTOTECA:TransObject:5bc7d79a7a8a0222ef116fad)
- [73] – Fotografía “Entrada al Túnel de Tequixquiác”. Tomada de: [https://mexicana.cultura.gob.mx/en/repositorio/detalle?id=\\_suri:FOTOTECA:TransObject:5bc7d7247a8a0222ef104162&word=T%C3%9ANEL%20DE%20TEQUIXQUIAC&r=0&t=524022](https://mexicana.cultura.gob.mx/en/repositorio/detalle?id=_suri:FOTOTECA:TransObject:5bc7d7247a8a0222ef104162&word=T%C3%9ANEL%20DE%20TEQUIXQUIAC&r=0&t=524022)
- [74] – Fotografía del túnel de desvío para la Central Hidroeléctrica “Infiernillo”. Tomada de: <https://photobucket.com/gallery/user/leormericardo/media/bWVkaWFJZDo4NTU4MTk1Mw==/?ref=>
- [75] – Propaganda de la Línea 1 de STCM. Tomada de: <https://www.eluniversal.com.mx/galeria/metropoli/cdmx/2016/09/3/la-ciudad-en-el-tiempo-la-linea-1-del-stc-metro>
- [76] – Panorámica de las maniobras para la bajada del escudo de frente cerrado y lodo a presión al fondo de lumbrera. Tomada de: <http://www.revistatyca.org.mx/ojs/index.php/tyca/article/download/652/574>
- [77] – Fotografía del Túnel Emisor Central. Disponible en: <https://es.slideshare.net/CICMoficial/los-retos-pasado-presente-y-futuro-del-agua-v7>
- [78] – Fotografía de túnel “Muñiz” acceso a C.H. Chicoasén. Tomada de: [http://1.bp.blogspot.com/-KS9i2eKzys4/TV8mxscc-cl/AAAAAAAAAHI/8tEoVn6JDCw/s1600/100\\_0402.JPG](http://1.bp.blogspot.com/-KS9i2eKzys4/TV8mxscc-cl/AAAAAAAAAHI/8tEoVn6JDCw/s1600/100_0402.JPG)
- [79] – Fotografía de Túneles Acopilco (Portal Oriente). Tomada de: <https://www.google.com/maps/@19.3168904,-99.3264912,3a,75y,91.49h,91.66t/data=!3m6!1e1!3m4!1swlbHt6FiqFQOw-zf1PIcyQ!2e0!7i13312!8i6656?hl=es>
- [80] – Túnel de la estación Miguel Ángel de Quevedo de la línea 3 del STCM. Tomada de: [https://c2.staticflickr.com/4/3024/2668734990\\_52b2d16824\\_z.jpg](https://c2.staticflickr.com/4/3024/2668734990_52b2d16824_z.jpg)
- [81] – Túnel de la estación Barranca del Muerto de la línea 7 del STCM. Tomada de: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/8f/Barranca\\_del\\_Muerto\\_platforms.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/8f/Barranca_del_Muerto_platforms.jpg)
- [82] – Túnel de la estación Aquiles Serdán de la línea 7 del STCM. Tomada de: [https://imagenes.milenio.com/gzyF272EWw6Vhqd3M4YZu\\_fjU68=/958x596/https://www.milenio.com/uploads/media/2014/07/18/linea-ofrece-servicio-parcial-camarones.jpeg](https://imagenes.milenio.com/gzyF272EWw6Vhqd3M4YZu_fjU68=/958x596/https://www.milenio.com/uploads/media/2014/07/18/linea-ofrece-servicio-parcial-camarones.jpeg)
- [83] – Fotografía de Túnel Los Querendes (Portal Sur). Tomada de: [https://www.google.com/maps/@18.2026254,-99.2072705,3a,75y,311.53h,105.72t/data=!3m6!1e1!3m4!1scvoekv\\_RVebn6ttly6U1KA!2e0!7i13312!8i6656?hl=es](https://www.google.com/maps/@18.2026254,-99.2072705,3a,75y,311.53h,105.72t/data=!3m6!1e1!3m4!1scvoekv_RVebn6ttly6U1KA!2e0!7i13312!8i6656?hl=es)
- [84] – Fotografía de Maxitúnel (Portal Oriente). Tomada de: <https://cokiemoster3.blogspot.com/2016/12/lineas-de-autobuses-evitan-maxitunel.html>
- [85] – Fotografía del Túnel Baluarte. Tomada de: <https://grupo-omega.com/wp-content/uploads/2015/11/Tunel-Baluarte-3.jpg>

- [86] – Túnel Interceptor Río de los Remedios. Acciones de infraestructura de drenaje y abastecimiento de agua en el Valle de México - 2007-2012 - Coordinación General de Proyectos Especiales de Abastecimiento de Agua Potable y Saneamiento del Valle de México; CONAGUA. 2012
- [87] – El polémico primer túnel sumergido de México y América Latina. Disponible en: <https://www.regionvalles.com/polemico-primer-tunel-sumergido-mexico-america-latina/>
- [88] – Fotografía del túnel Sumergido Coatzacoalcos-Villa de Allende. Disponible en: <https://cdn-3.expansion.mx/dims4/default/b1d0003/2147483647/strip/true/crop/659x462+0+0/resize/800x561!/quality/90/?url=https%3A%2F%2Fcdn-3.expansion.mx%2Ffc%2Fcd916a5814d5d68c3f9cef8da7047c8%2Ftunel-sumergido-coatzacoalcos20170601120531.jpg>
- [89] – Información útil a tu alcance sobre la autopista urbana. Disponible en: [https://web.archive.org/web/20130511210409/http://www.transparenciaautopistaurbana.df.gob.mx/au\\_surponiente.html](https://web.archive.org/web/20130511210409/http://www.transparenciaautopistaurbana.df.gob.mx/au_surponiente.html)
- [90] – Fotografías de túneles de Supervía Poniente. Disponible en: [https://web.archive.org/web/20160915170330/http://www.transparenciaautopistaurbana.df.gob.mx/supervia\\_poniente/Imagen212.jpg](https://web.archive.org/web/20160915170330/http://www.transparenciaautopistaurbana.df.gob.mx/supervia_poniente/Imagen212.jpg)
- [91] – Túnel Emisor Poniente II, finalista Obra del Año 2019. Disponible en: <https://obrasweb.mx/construccion/2019/07/16/tunel-emisor-poniente-ii-finalista-obra-del-ano-2019>
- [92] – Fotografía de túnel Emisor Poniente II. Disponible en: [http://premioobrascemex.com/images/sitio/obras\\_finalistas/2019/mexico/infra/Tunel-Emisor-Poniente.png](http://premioobrascemex.com/images/sitio/obras_finalistas/2019/mexico/infra/Tunel-Emisor-Poniente.png)
- [93] – Corte transversal de Bitúnel del tren Interurbano México-Toluca. Disponible en: <https://www.transporte.mx/wp-content/uploads/2019/05/image-133-1.jpg>
- [94] – Portal Poniente de Bitúnel del tren Interurbano México-Toluca. Disponible en: <https://www.transporte.mx/wp-content/uploads/2019/05/image-137.jpg>
- [95] – Clasificación general de túneles. Disponible en: [https://ocw.unican.es/pluginfile.php/184/course/section/86/tema\\_01.pdf](https://ocw.unican.es/pluginfile.php/184/course/section/86/tema_01.pdf)
- [96] – Cobertura o techo de Túnel San Pedro-Loma larga. Disponible en: <https://img.gruporeforma.com/imagenes/elementorelacionado/9/224/8223179.jpg>
- [97] – Sección transversal de métodos convencionales de excavación de avance y destroza. Disponible en: <https://docplayer.es/docs-images/71/65354554/images/23-0.jpg>
- [98] – Vista en corte de método convencional de excavación de avance y destroza. Disponible en: <http://2.bp.blogspot.com/-nUE2yudEIsQ/VSlxKBV3skI/AAAAAAAAABA/u4cceybiyXQ/s1600/metodo%2Bingles.png>
- [99] – Ejemplo de excavación, media sección superior en una fase y banqueo en fases. Disponible en: [http://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGST/Manuales/Manual\\_Tuneles/CAP07.pdf](http://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGST/Manuales/Manual_Tuneles/CAP07.pdf)
- [100] – Equipo de excavación “Topo”. Disponible en: <https://semanaingenieriacaminosmadrid.com/wp-content/uploads/2017/05/Topo-acciona-1024x768.jpg>

- [101] – Equipo de excavación “Escudo TBM” utilizado en el Túnel Emisor Oriente. Disponible en: [https://www.tunneltalk.com/images/Herrenknecht/Herrenknecht\\_S-497\\_Emisor\\_Oriente\\_Abnahme.jpg](https://www.tunneltalk.com/images/Herrenknecht/Herrenknecht_S-497_Emisor_Oriente_Abnahme.jpg)
- [102] – Equipo de excavación de empuje de tubos. Disponible en: <http://microtunnelboringmachine.com/uploadfile/20181013/20181013225715931.jpg>
- [103] – Rueda de corte y desmontaje de la rueda de corte de la TBM S-948. Disponible en: [https://www.interempresas.net/ObrasPublicas/Articulos/243994-Tunel-bitubo-Marquesa-Proyecto-Tren-Interurbano-Mexico-Toluca-\(TIMT\)-reto-atravesar-zonas.html](https://www.interempresas.net/ObrasPublicas/Articulos/243994-Tunel-bitubo-Marquesa-Proyecto-Tren-Interurbano-Mexico-Toluca-(TIMT)-reto-atravesar-zonas.html)
- [104] – Cilindros de empuje y Zapata o “gripper” de TBM. Disponible en: [https://www.atphydraulik.ch/fileadmin/\\_processed\\_/csm\\_Linthal\\_2015\\_Zylinder\\_88c8270684.jpg](https://www.atphydraulik.ch/fileadmin/_processed_/csm_Linthal_2015_Zylinder_88c8270684.jpg)
- [105] – Vista en perspectiva de TBM “topo”. Disponible en: <https://docplayer.net/docs-images/71/64450429/images/8-1.jpg>
- [106] – “Back-up” de Túnel de Guadarrama. Disponible en: [https://www.durofelguera.com/catalogo\\_tedesa/obras/Fotos%20Back-Ups/Back-Up%20Tunel%20de%20GUADARRAMA.jpg](https://www.durofelguera.com/catalogo_tedesa/obras/Fotos%20Back-Ups/Back-Up%20Tunel%20de%20GUADARRAMA.jpg)
- [107] – Cucharones, rampas y anillo de lodos que permiten una extracción eficiente del material excavado. Disponible en: [https://www.herrenknecht.com/fileadmin/user\\_upload/Main\\_Website/03\\_Produkte/01\\_Tunnelling/09\\_Einfachschild-TBM/02\\_Content/02\\_content\\_einfachschild.jpg](https://www.herrenknecht.com/fileadmin/user_upload/Main_Website/03_Produkte/01_Tunnelling/09_Einfachschild-TBM/02_Content/02_content_einfachschild.jpg)
- [108] – Vista en perspectiva de sistema de rezaga de Acciona-Ghella Joint Venture. Disponible en: [https://agjv.no/images/di/30\\_39\\_zoomed\\_tbm-inside3-1000x563-.jpg](https://agjv.no/images/di/30_39_zoomed_tbm-inside3-1000x563-.jpg)
- [109] – Cilindros de empuje en tuneladora. Disponible en: <https://victoryepes.blogs.upv.es/files/2018/09/GCBA - Cuenca Vega - Tuneladora 14-768x512.jpg>
- [110] – Erector de tuneladora. Disponible en: [https://img.directindustry.es/images\\_di/photo-g/23242-11170704.jpg](https://img.directindustry.es/images_di/photo-g/23242-11170704.jpg)
- [111] – Erector de tuneladora. Disponible en: <https://docplayer.es/docs-images/61/45688251/images/30-2.png>
- [112] – Sistema de guiado de escudo Herrenknecht. Disponible en: [https://www.herrenknecht.com/fileadmin/user\\_upload/Main\\_Website/03\\_Produkte/04\\_Peripheral\\_Equipment/11\\_Navigation-Monitoring/02\\_Content/02\\_content\\_nav-monitiring.jpg](https://www.herrenknecht.com/fileadmin/user_upload/Main_Website/03_Produkte/04_Peripheral_Equipment/11_Navigation-Monitoring/02_Content/02_content_nav-monitiring.jpg)
- [113] – Sello para escudo y su colocación en el frente y en la parte posterior de la excavación. Disponible en: <https://www.tunnelcutter.com/uploads/e16a6092.jpg>
- [114] – Sello para escudo y su colocación en el frente y en la parte posterior de la excavación. Disponible en: <https://www.condat-lubricants.com/wp-content/uploads/sites/2/2016/04/mastic-extrado-tunnelier-660x330.png>
- [115] – Escudo abierto con brazo excavador. Disponible en: [https://www.braumann-tiefbau.eu/uploads/inhalt/75\\_22\\_braumann\\_010710\\_0057.jpg](https://www.braumann-tiefbau.eu/uploads/inhalt/75_22_braumann_010710_0057.jpg)
- [116] – Escudo abierto con brazo rozador. Disponible en: [https://www.herrenknecht.com/fileadmin/user\\_upload/Main\\_Website/03\\_Produkte/01\\_Tunnelling/12\\_Teilschnittmaschine/02\\_Content/01\\_content\\_teilschnittmaschine.jpg](https://www.herrenknecht.com/fileadmin/user_upload/Main_Website/03_Produkte/01_Tunnelling/12_Teilschnittmaschine/02_Content/01_content_teilschnittmaschine.jpg)

- [117] – Vista en corte de escudo cerrado. Disponible en: [https://www.herrenknecht.com/fileadmin/user\\_upload/Main\\_Website/03\\_Produkte/01\\_Tunnelling/07\\_EPB-Schild/03\\_ImageMap/01\\_imagemap\\_epb\\_1.png](https://www.herrenknecht.com/fileadmin/user_upload/Main_Website/03_Produkte/01_Tunnelling/07_EPB-Schild/03_ImageMap/01_imagemap_epb_1.png)
- [118] – Vista en corte de escudo doble. Disponible en: [https://www.herrenknecht.com/fileadmin/user\\_upload/Main\\_Website/03\\_Produkte/01\\_Tunnelling/10\\_Doppelschild-TBM/03\\_ImageMap/01\\_imagemap\\_doppelschild\\_1.jpg](https://www.herrenknecht.com/fileadmin/user_upload/Main_Website/03_Produkte/01_Tunnelling/10_Doppelschild-TBM/03_ImageMap/01_imagemap_doppelschild_1.jpg)
- [119] – Hincado de tubería o microtuneleo, también “Pipe jacking”. Disponible en: <https://www.geostructures.com/solutions/structures/microtunneling/images/Microtunneling-1.jpg>
- [120] – Hincado de tubería o microtuneleo, también “Pipe jacking”. Disponible en: <http://www.pipejacking.org/assets/pj/uploads/photos/aboutp1.jpeg>
- [121] – Rozadora marca: FAMUR, modelo: KTW-150. Disponible en: [https://img.directindustry.es/images\\_di/photo-g/58723-13196170.jpg](https://img.directindustry.es/images_di/photo-g/58723-13196170.jpg)
- [122] – Perforadora neumática Tamrock. Disponible en: [https://http2.mlstatic.com/perforadora-neumatica-crawler-drill-tamrock-cha700-hidrotrak-D\\_NQ\\_NP\\_924313-MLM27465338082\\_052018-F.jpg](https://http2.mlstatic.com/perforadora-neumatica-crawler-drill-tamrock-cha700-hidrotrak-D_NQ_NP_924313-MLM27465338082_052018-F.jpg)
- [123] – Cabeza axial. Disponible en: [https://1.bp.blogspot.com/--D-Ff\\_TGgM/WITogV8jjWI/AAAAAAAAABw4/AGtKCNmtXUgZD9oHdV4zBneeJ2BuNhUEQCLcBGAs/s1600/a6.png](https://1.bp.blogspot.com/--D-Ff_TGgM/WITogV8jjWI/AAAAAAAAABw4/AGtKCNmtXUgZD9oHdV4zBneeJ2BuNhUEQCLcBGAs/s1600/a6.png)
- [124] – Cabeza tangencial. Disponible en: <https://3.bp.blogspot.com/-hKikR3Twrms/WITOhdcXgRI/AAAAAAAAABxE/2izw5d9quB0ROL0YW1fjlxpx5sp33zshQCLcBGAs/s1600/a7.png>
- [125] – Forma de corte con minadores axial y transversal. Disponible en: [https://3.bp.blogspot.com/-119hByvKqHQ/WITojN41K5I/AAAAAAAAABxM/8EaVfFAaT0kxVsIavPA5veH\\_KYd0\\_s65ACLcBGAs/s1600/a8.png](https://3.bp.blogspot.com/-119hByvKqHQ/WITojN41K5I/AAAAAAAAABxM/8EaVfFAaT0kxVsIavPA5veH_KYd0_s65ACLcBGAs/s1600/a8.png)
- [126] – Dispositivos típicos de rezaga de rozadoras. Disponible en: [https://ocw.unican.es/pluginfile.php/184/course/section/86/tema\\_07.pdf](https://ocw.unican.es/pluginfile.php/184/course/section/86/tema_07.pdf) [96] – Disponible en:
- [127] – Esquema de tiro o disparo. Disponible en: <https://image.slidesharecdn.com/manualexcavatuneles-150716213226-lva1-app6891/95/manual-excava-tuneles-30-638.jpg?cb=1437082399>
- [128] – Unidad de perforación “Jumbo”. Disponible en: <https://prensa.compumet.info/wp-content/uploads/2018/03/Jumbo-partes.jpg>
- [129] – Unidad de perforación “Jumbo”. Disponible en: [https://www.etwinternational.com.ar/public/uploded/2796/b\\_4\\_4\\_tunneling\\_rock\\_drilling\\_rig\\_1.jpg](https://www.etwinternational.com.ar/public/uploded/2796/b_4_4_tunneling_rock_drilling_rig_1.jpg)
- [130] – División de zonas o fases de perforación y voladura Disponible en: <https://www.studocu.com/es-mx/document/universidad-catolica-de-santa-maria/caminos-ii/practica/voladura-de-rocas/5093161/view>
- [131] – Fases y secuenciación de ejecución de detonación y voladura. Disponible en: [https://blog.structuralia.com/hs-fs/hubfs/Imported\\_Blog\\_Media/tunel11-5.jpg?width=600&height=341&name=tunel11-5.jpg](https://blog.structuralia.com/hs-fs/hubfs/Imported_Blog_Media/tunel11-5.jpg?width=600&height=341&name=tunel11-5.jpg)
- [132] – Explosivo ANFO. Disponible en: <http://gruponitro.mx/assets/images/f2-492x291.jpg>
- [133] – Explosivo Hidrogel. Disponible en: <https://tecnologiaminera.com/imgPosts/1568791378k9pxV06A.jpg>

[134] – Explosivo emulsión. Disponible en: <http://wilebminingsupplies.com/wp-content/uploads/2016/03/Surface-Bulk-Emulsion.jpg>

[135] – Gel explosivo. Disponible en:

[https://as2.ftcdn.net/jpg/02/62/21/97/500\\_F\\_262219765\\_AUL9Pgs9sSkFp40hTzk65wOnmPW700Y1.jpg](https://as2.ftcdn.net/jpg/02/62/21/97/500_F_262219765_AUL9Pgs9sSkFp40hTzk65wOnmPW700Y1.jpg)

[136] – Explosivo granular. Disponible en:

[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/7/76/N110\\_ruuti.jpg/1200px-N110\\_ruuti.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/7/76/N110_ruuti.jpg/1200px-N110_ruuti.jpg)

[137] – Explosivo TNT. Disponible en: <https://c8.alamy.com/compes/w2rn7t/dos-ww2-us-army-media-libra-de-alto-explosivo-tnt-bloques-utilizados-por-el-cuerpo-de-ingenieros-americanos-para-demolicion-y-sabotaje-propositos-w2rn7t.jpg>

[138] – Detonadores. Disponible en: <http://www.tracefireandsafety.com/VFRE-99/Recognition/Initiation/ElecDet-1.jpg>

[139] – Explosivo armado. Disponible en: <https://www.explocen.com.ec/wp-content/uploads/2019/10/a18-05.jpg>

[140] – Explosor. Disponible en: [https://www.autostemtechnology.com/wp-content/uploads/2019/07/35-x-200g\\_update.png](https://www.autostemtechnology.com/wp-content/uploads/2019/07/35-x-200g_update.png)

[141] – Mechanized tunneling in urban areas – design methodology and construction control.

Editores: Vittorio Guglielmetti, Piergiorgio Grasso, Ashraf Mahtab, Shulin Xu., Pág. 382; Fig. 1.9

[142] – Clima CDMX. Cuéntame – INEGI . Disponible en:

<http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/df/territorio/clima.aspx?tema=me&e=09>

## Bibliografía

1. G. Lombardi. Evolución en la Construcción de Obras Subterráneas [en línea]. Madrid, 2006. Disponible en: <https://www.lombardi.ch/fr-fr/SiteAssets/Publications/1265/Pubb-0445-L-Evolucion%20en%20la%20construccion%20de%20obras%20subterraneas.pdf>
2. Enrique Santoyo Villa, Enrique Bermúdez González, René Contreras Galván. Evolución de la construcción de túneles urbanos. Revista “geotecnia” No. 228 Julio 2013. Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica, A. C. (SMIG)
3. Miquel Estruch Serra, Ana Tapia Gómez. Topografía subterránea para minería y obras. Edicions. UPC.
4. Fernando García Bastante. (2005). “Reseña histórica sobre los explosivos”. ETSI Minas de Vigo.
5. Laureano Cornejo Álvarez; “La excavación mecánica de túneles en terrenos blandos y su evolución histórica”. (español). Revista Ingeopres. Año 2000. Disponible en: [https://www.academia.edu/42852302/La\\_excavaci%C3%B3n\\_mec%C3%A1nica\\_de\\_t%C3%BAnes\\_en\\_terrenos\\_blandos\\_y\\_su\\_evoluci%C3%B3n\\_hist%C3%B3rica](https://www.academia.edu/42852302/La_excavaci%C3%B3n_mec%C3%A1nica_de_t%C3%BAnes_en_terrenos_blandos_y_su_evoluci%C3%B3n_hist%C3%B3rica)
6. Richard Shelton Kirby. (1956). Engineering in History, Dover Publications, USA. Disponible en: <https://archive.org/details/B-001-000-180/page/n4>
7. Sergio Felipe Zaldívar Reyes; Tesis para maestría: Metodología para el análisis y diseño de conexiones túnel-lumbrera y túnel-túnel en suelos blandos sometidos a hundimiento regional. 2013
8. José Antonio Juncá Ubierna; Capítulo 1, Historia de los túneles y su evolución histórica. Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona. (1997).
9. Vittorio Guglielmetti, Piergiorgio Grasso, Ashraf Mahtab, Shulin Xu; Mechanized tunneling in urban areas – design methodology and construction control. Taylor & Francis Group. (2007)
10. Jorge Luis Ramos Ramos; Estado del arte de brocas de perforación. 2011. Pág. 3. Disponible en: <http://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/784/1/1034302975-2011-2-IP.pdf>
11. Curso Túneles; Impartido por: Rubén Pérez Álvarez y Noemi Barral Ramón. Departamento de Transportes y tecnología de proyectos y proceso
12. Carlos López Fernández; Planificación, proyecto y construcción de túneles de gran longitud, 2012. Universitat Politècnica de Catalunya · BarcelonaTech (UPC)
13. Carmen Valverde, y Adrián Guillermo Aguilar (1987), "Localización geográfica de la ciudad de México", en Departamento del Distrito Federal y El Colegio de México (eds.), Atlas de la ciudad de México, pp. 19–22.
14. Horacio Ramírez de Alba; 1995. Primeros usos del concreto en México: primer túnel de Tequixquiac. Ciencias exactas y aplicadas. Vol. 2, no. 1, págs. 99-103. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5128804>

15. Memoria histórica, técnica y administrativa de las obras del desagüe del Valle de México; 1449-1900 / publicada por orden de la Junta Directiva desagüe del Valle de México.  
Disponible en:  
<https://ia800207.us.archive.org/26/items/memoriahistorica01mexi/memoriahistorica01mexi.pdf>
16. Manual de diseño y construcción de túneles de carretera. Capítulo 1. 2016. Secretaría de Comunicaciones y transportes. Disponible en:  
[http://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGST/Manuales/Manual\\_Tuneles/CAP01.pdf](http://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGST/Manuales/Manual_Tuneles/CAP01.pdf)
17. Maribel Espinosa-Castillo; Artículo de investigación: Procesos y actores en la conformación del suelo urbano en el ex lago de Texcoco. Instituto Politécnico Nacional. Disponible en:  
[http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1405-84212008000200009](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-84212008000200009)
18. Luis F. Robledo Cabello; Presentación “Abastecimiento de agua potable a la Zona Metropolitana del Valle de México”. 2007. Colegio de Ingenieros Civiles de México, A.C.  
Disponible en: <http://www.aldf.gob.mx/archivo-3dbec297284ef26ec6363104588225a9.pdf>
19. Electricidad, C. F. (junio, 2014). Hidrología de la C.H. “Infiernillo”. México, D.F.: CFE.
20. Oscar José Muñoz; Tesis: Túnel Emisor Oriente (TEO): Procedimiento constructivo de una galería de montaje para ensamble de una máquina tuneladora. 2016
21. Valek–Valdés, Gloria (2000), Agua, reflejo de un valle en el tiempo, México, Universidad Nacional Autónoma de México. Disponible en:  
[https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=VoGkOxKy5lcC&oi=fnd&pg=PA9&ots=8dOgHuFVM4&sig=Xp09VwuhdD5KmzVUYX-rvNgqS-g&redir\\_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=VoGkOxKy5lcC&oi=fnd&pg=PA9&ots=8dOgHuFVM4&sig=Xp09VwuhdD5KmzVUYX-rvNgqS-g&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false)
22. Secretaría de Comunicaciones y transportes; Manual de diseño y construcción de túneles de carretera. Capítulo 1. 2016. Disponible en:  
[http://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGST/Manuales/Manual\\_Tuneles/CAP01.pdf](http://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGST/Manuales/Manual_Tuneles/CAP01.pdf)
23. Tamez, E., E. Santoyo y F. Mooser; Manual de diseño geotécnico para el metro. Secretaría de Recursos Hidráulicos. (1987).
24. Auvinet, G. (2006). Construction of deep tunnel shafts in Mexico City soft clays by the flotation method; Invited Lecture, Proceedings, ISSMGE ATC-47 Pre-Workshop, pp. 41-50, Busan, South Korea.
25. Moreno, A y Schmitter, J. J. (1981). Failures of shafts and tunnels in soft soils, Soft-Ground Tunneling ‘Failures and Displacements, A. A. Balkema, Rotterdam, pp 23-32
26. Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica (DGCOH) / Secretaría General de Obras/ DDF; Drenaje profundo: Cuarta salida artificial para el desalajo de aguas residuales del valle de México. 1991
27. Secretaría de Obras y Servicios, Departamento del Distrito Federal; “Memoria de las Obras del Sistema de Drenaje Profundo del Distrito Federal”, México; 1975.

28. José Francisco Suárez Fino, Leonardo Guzmán León. Revestimiento de concreto hidráulico en túneles carreteros; Revista: Vías Terrestres no.40 marzo-abril 2016. . Disponible en: [https://issuu.com/helios\\_comunicacion/docs/vt40\\_baja\\_ok/19](https://issuu.com/helios_comunicacion/docs/vt40_baja_ok/19)
29. Sánchez, F. 2013. Técnicas modernas de cálculo en medios continuos para el diseño de excavaciones subterráneas en roca. AMITOS, 3er Simposio Internacional sobre túneles y lumbreras en suelos y roca.
30. Maxitúnel Interurbano Acapulco. Disponible en: <http://infraestructura.ingenet.com.mx/2009/07/maxitunel-interurbano/>
31. COANUGUA/SEMARNAT; Presentación: Proyectos estratégicos – Agua Potable – Drenaje – Saneamiento. 2015. Disponible en: [https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2013/08/Informe\\_Conagua\\_drenaje\\_y\\_abastecimiento\\_V\\_M\\_2007-2012.pdf](https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2013/08/Informe_Conagua_drenaje_y_abastecimiento_V_M_2007-2012.pdf)
32. SCT,2019. Tren Interurbano México-Toluca. Disponible en: <http://www.sct.gob.mx/transporte-y-medicina-preventiva/transporte-ferroviario-y-multimodal/tren-interurbano-mexico-toluca/>
33. Pedro Soto H.; Optimización de la presión de trabajo en un escudo EPB en suelos blandos. Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica (SMIG)
34. Salvador Navarro Carrasco, Raúl Primitivo Ortiz Gómez, y, Juan Antonio Ruiz Marín. Disponible en: [https://www.academia.edu/23228315/SALVADOR\\_NAVARRO\\_CARRASCO\\_RA%C3%9AL\\_PRIMITIVO\\_ORTIZ\\_G%C3%93MEZ\\_ASSIGNATURA\\_DE\\_OBRAS\\_GEOT%C3%89CNICAS\\_GEOTECNIA\\_APLICADA\\_A\\_LA\\_CONSTRUCCI%C3%93N\\_DE\\_T%C3%9ANEL\\_ES?auto=download](https://www.academia.edu/23228315/SALVADOR_NAVARRO_CARRASCO_RA%C3%9AL_PRIMITIVO_ORTIZ_G%C3%93MEZ_ASSIGNATURA_DE_OBRAS_GEOT%C3%89CNICAS_GEOTECNIA_APLICADA_A_LA_CONSTRUCCI%C3%93N_DE_T%C3%9ANEL_ES?auto=download)
35. Carlos López Jimeno, Emilio López Jimeno, y Francisco Javier Ayala Carcedo; Drilling and Blasting of Rocks; Ed. Taylor & Francis, 1997. Disponible en: [https://books.google.com.mx/books?id=ebNArd17TH0C&pg=PA117&lpg=PA117&dq=RIO\\_MEX+E20&source=bl&ots=yuctXMy8lq&sig=ACfU3U3gs5wv80jsUra5v1Ng2Jm8UNpCuQ&hl=es&sa=X&ved=2ahUKewi2k4jn8oDmAhUFH6wKHY2BAa4Q6AEwA3oECAoQAQ#v=onepage&q=RIOMEX%20E20&f=false](https://books.google.com.mx/books?id=ebNArd17TH0C&pg=PA117&lpg=PA117&dq=RIO_MEX+E20&source=bl&ots=yuctXMy8lq&sig=ACfU3U3gs5wv80jsUra5v1Ng2Jm8UNpCuQ&hl=es&sa=X&ved=2ahUKewi2k4jn8oDmAhUFH6wKHY2BAa4Q6AEwA3oECAoQAQ#v=onepage&q=RIOMEX%20E20&f=false)
36. Auvinet, G. (2006). Construction of deep tunnel shafts in Mexico City soft clays by the flotation method; Invited Lecture, Proceedings, ISSMGE ATC-47 Pre-Workshop, pp. 41-50, Busan, South Korea.
37. Marsal, R. J. y Mazari, M. (1959). El subsuelo de la ciudad de México, Facultad de Ingeniería, UNAM, México.
38. Junta Directiva del Desagüe del Valle de México. Memoria histórica, técnica y administrativa de las obras del desagüe del Valle de México, 1442-1900. Tomo 1, Libro 4. (1902). Disponible en: [http://cdigital.dgb.uanl.mx/la/1080019537\\_C/1080019537\\_T1/1080019537\\_T1.html](http://cdigital.dgb.uanl.mx/la/1080019537_C/1080019537_T1/1080019537_T1.html)
39. Ramón Aguirre Díaz; Los retos pasado presente y futuro del agua. CMIC, 2013
40. Sánchez, R.; Tesis de Licenciatura: “Instrumentación en obras geotécnicas”, (2014). IPN México, (director. Dr. G. Auvinet).
41. Mecánica de suelos – Tomo 1 – Fundamentos de mecánica de suelos. Eulalio Juárez Badillo y Alfonso Rico Rodríguez. Limusa, 2005

42. Felipe Mendaña Saavedra, y Ramón Fernández Martínez; Hidroescudos y tuneladoras E.P.B. - Campos de utilización.
43. Mario Arturo Aguilar Téllez, Juan Jacobo Schmitter Martín del Campo, María Elena Acevedo Valle; Experiencias en el diseño y construcción de lumbreras, flotadas y con muros Milán en suelos blandos Revista Geotecnia – SMIG – No. 251
44. Andrés Moreno Fernández y Juan Jacobo Schmitter M.; Lumbreras y túneles en suelos, experiencias innovadoras en la ingeniería mexicana.
45. Mario Arturo Aguilar Téllez, Juan Jacobo Schmitter Martín del Campo, María Elena Acevedo Valle; Experiencias en el diseño y construcción de lumbreras, flotadas y con muros Milán en suelos blandos. Revista Geotecnia – SMIG – No. 251
46. <https://www.herrenknecht.com/>