



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**"Procedimiento Constructivo
del Túnel de Drenaje Pluvial
Profundo del NAICM"**

INFORME DE ACTIVIDADES PROFESIONALES

Que para obtener el título de

Ingeniero Civil

P R E S E N T A

Angel Venustiano Gómez Contreras

ASESOR DE INFORME

M.I. Agustín Deméneghi Colina



Ciudad Universitaria, Cd. Mx. , 2019

DEDICATORIA

A mi familia, por ser los pilares de mi educación, formación y crecimiento como ser humano, persona, profesionalista y ser mi ejemplo a seguir, por apoyarme en los buenos y malos momentos, por brindarme todo, y por obsequiarme su amor y su cariño, y la enseñanza de seguir adelante y esforzarse, aún cuando los tiempos fueron y han sido difíciles. Cada sacrificio, cada cariño, cada esfuerzo, cada caída, cada risa, cada acierto, pero sobre todo cada instante juntos, me permitieron cumplir mi sueño más profundo. ¡Gracias por creer en mí!. Este trabajo es con especial amor, esfuerzo y cariño para ustedes.

A la comunidad estudiantil, en especial a las generaciones que vienen en camino en las áreas de ingeniería, arquitectura, y afines, esperando que el presente trabajo sea de ayuda para poder conocer, e ir mejorando en el futuro el desarrollo de proyectos subterráneos como túneles. Esperando que este trabajo devuelva un poco de todo lo que la Universidad me brindó.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres: Perla y Jonathan, por contar en todo momento de mi vida con su apoyo, cariño, paciencia, agradeciendo cada sacrificio y esfuerzo que hicieron para que tuviera un futuro mejor, por ser mis héroes y mi ejemplo de vida.

A mis abuelitos: Lupita, Venustiano, Linda †, Santiago; por siempre contar con su cariño, apoyo, y paciencia, cómo los esfuerzos para que pudiera seguir adelante, agradeciéndoles todo lo que hicieron por mí.

A mi hermana Donita por todo su cariño, apoyo, paciencia y risas en todo momento, pero sobre todo por recordarme nunca darme por vencido.

A mis tíos Paco, Chucho, e Isaac por su cariño, apoyo, consejos y motivación para seguir adelante.

A mi alma máter, la Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM, por brindarme un segundo hogar, educación, amigos, cultivar el criterio propio, enriquecer los conocimientos previos y adquiridos durante mi transcurso académico, y ser el camino correcto para llegar al momento en el que estoy, desde la preparatoria hasta mis estudios de mi carrera profesional universitaria.

A Grupo Aeroportuario de la Ciudad de México, GACM, por darme la oportunidad de tener mi primer acercamiento laboral, y durante mi estancia profesional, adquirir y brindarme los conocimientos, que en conjunto con la información pública citada, se pudiera lograr el presente informe.

Al ingeniero Juan Manuel Anguiano Lozada por brindarme su apoyo, amistad, experiencia, enseñanzas, particularmente sobre los túneles y permitir mi desarrollo profesional bajo su cargo en su equipo de trabajo, especialmente para desarrollar este trabajo, por sus valiosas observaciones, conocimientos y material de consulta, como al equipo de trabajo donde pertenezco.

A mi asesor Agustín Deméneghi Colina por sus valiosas observaciones, consejos, experiencias y el apoyo brindado para poder desarrollar y dirigir con éxito este trabajo, como por adquirir el gusto al área de geotecnia.

Al profesor Miguel Ángel Rodríguez Vega por su amistad, observaciones, experiencias, consejos y todo el apoyo brindado, como la oportunidad de considerarme para ingresar por primera vez al mundo laboral de la ingeniería.

A mi asesor y cada uno de mis sinodales, quienes marcaron una huella durante el transcurso de mi carrera, y de quienes disfruté con verdadero gusto sus clases.

Al ingeniero Ramón Gustavo Cruz Hernández por brindarme en cada momento su amistad, apoyo, experiencias y enseñanzas, como también la amabilidad que recibí en todo momento de parte de él y su equipo de trabajo.

Al ingeniero Luis Adrián Palomino Cortés y su equipo de trabajo por brindarme su apoyo con sus opiniones, observaciones, experiencias y fuentes visuales para enriquecer al presente informe.

A todos mis amigos, especialmente a mis amigos que conocí en la prepa, por ser mis hermanos y contar con ellos en todo momento.

A mis amigos y compañeros de trabajo por hacer del trabajo un lugar cálido con su apoyo, amistad y enseñanzas.

A todas las personas que estuvieron presentes en las diferentes etapas de mi vida.

ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN.....	1
1) OBJETIVO Y DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO.....	2
1.1) Objetivo.....	2
1.2) Descripción del proyecto.....	2
2) PLANEACIÓN REQUERIDA PARA INICIO DE ACTIVIDADES.....	12
2.1) Especificaciones de las actividades.....	13
2.2) Reglamento de operación de sitio.....	13
2.3) Plan de control de calidad.....	14
2.4) Plan de salud y seguridad.....	14
2.5) Plan de requerimientos para la seguridad contra incendios.....	15
2.6) Plan de logística.....	15
2.7) Plan BIM.....	15
3) ACTIVIDADES PRELIMINARES.....	17
3.1) Llegada y recorrido a los sitios de la obra.....	18
3.2) Trazo y nivelación.....	19
3.3) Desmante y despalle.....	20
3.4) Construcción de rutas de acceso a sitios de trabajo.....	20
3.5) Mejoramiento del terreno de trabajo.....	25
4) CONSTRUCCIÓN DE LUMBRERAS POR EL MÉTODO DE FLOTACIÓN.....	28
4.1) Descripción del método constructivo de lumbreras flotadas.....	29
4.2) Brocales.....	32
4.3) Muro pantalla.....	36
4.4) Zanja anular.....	38
4.5) Excavación del núcleo.....	38
4.6) Tanque de flotación.....	40
4.7) Construcción de losa de fondo.....	49
4.8) Inmersión del tanque de flotación y construcción de muro estructural....	52
4.9) Trabes de liga y relleno de zanja anular y fondo de lumbrera.....	58
4.10) Preparación de portales de acceso para el túnel.....	62
4.11) Estructura de media caña.....	66
4.12) Construcción de losa tapa.....	69

5) CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL UTILIZANDO EL MÉTODO DE EPB.....	82
5.1) Mejoramiento de suelo a la entrada y salida de los portales del túnel.....	83
5.2) Descripción del método constructivo de túneles por Earth Pressure Balance (EPB).....	85
5.3) Preparaciones, bajada y características del equipo de excavación del túnel.....	88
5.4) Instalación del revestimiento primario del túnel y retiro del equipo de excavación.....	92
5.5) Construcción del revestimiento definitivo del túnel.....	104
6) INSTRUMENTACIÓN.....	108
6.1) Introducción a la instrumentación.....	109
6.2) Descripción de los equipos de instrumentación y sus variables de medición.....	110
7) CONCLUSIONES Y COMENTARIOS FINALES.....	116
FUENTE DE REFERENCIAS DE FIGURAS Y TABLAS.....	118
BIBLIOGRAFÍA.....	119

INTRODUCCIÓN

El Nuevo Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (NAICM), fue uno de los más grandes proyectos multidisciplinarios a nivel nacional e internacional, no sólo por ser un gran reto para la ingeniería mexicana, sino por el compromiso que su construcción implicó en distintos rubros como: ingeniería, arquitectura, construcción, medio-ambiente, economía, tecnología, control de calidad y seguridad, operación de infraestructura aeroportuaria y transportes, legales, entre otros.

Uno de los proyectos que conducía al éxito operativo de esta mega obra, fue el del Drenaje Pluvial Profundo; debido a la ubicación del NAICM: la zona del Antiguo Lago de Texcoco, bien conocido por ser una zona lacustre y de suelos blandos. De manera que la función de este drenaje, era controlar los embalses formados por la aportación de aguas de las avenidas de lluvia y aguas negras de los edificios y diversas estructuras del aeropuerto, desde la primera etapa operativa del mismo, como también garantizar seguridad a las aeronaves al regular las precipitaciones que pudieran presentarse durante las maniobras de los aviones, salvaguardando la vida de los usuarios del aeropuerto.

Tal es la importancia, de cualquier obra que esté involucrada con uno o varios túneles, puesto que son obras que han facilitado muchas actividades humanas a través del tiempo. El ser humano ha aprovechado y construido los túneles como refugio y protección ante los diversos factores atmosféricos, para fines militares y estratégicos, para actividades relacionadas con la minería, para el abasto de agua potable, para el traslado de aguas negras, o bien, para el tránsito de personas, bienes y/o vehículos (Széchy, 1970).

El propósito fundamental de los túneles es facilitar la conexión entre dos puntos, logrando acortar distancias, o bien evitar obstáculos, que otras rutas no pudieran ofrecer para el transporte o tránsito. En virtud a esto, el túnel del que se hará mención, estaba proyectado como una conexión fundamental de diversos puntos para el traslado del agua del drenaje del NAICM, cuyo destino estaba enfocado en la red de drenaje de la Ciudad de México.



Figura 0- Renderizado de la proyección del Edificio Terminal del NAICM.
Fuente de la imagen: <https://www.fosterandpartners.com/es/projects/new-international-airport-mexico-city/>

CAPÍTULO 1: OBJETIVO Y DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO



Figura A.- Equipo para excavación del túnel. (Autoría propia)

1) OBJETIVO Y DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

1.1) OBJETIVO

Por medio de este Informe de Actividades Profesionales se hablará simultáneamente de 2 aspectos:

- El Proceso Constructivo de las Lumbreras Flotadas y la Construcción de Túneles por medio de equipos por EPB (Escudo de Presión Balanceada), como la instrumentación empleada.
- La aplicación práctica de dichos procesos constructivos en el Túnel del Drenaje Pluvial Profundo del NAICM.

Se pretende que este informe, sea de utilidad para estudiantes de ingeniería, arquitectura, o afines, para brindar un acercamiento a un tema interesante como lo han sido los túneles, ante las limitadas referencias académicas del procedimiento constructivo de las lumbreras y los túneles aquí descritos, y sea a su vez un reflejo de las experiencias adquiridas durante la estancia de las Prácticas Profesionales que realicé en el NAICM, brindadas por la Facultad de Ingeniería de la UNAM, y el Grupo Aeroportuario de la Ciudad de México (GACM).

1.2) DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

El Túnel del Drenaje Pluvial Profundo (por su siglas: TDPP), es un proyecto fundamental, que dará servicio y seguridad al proyecto del Nuevo Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (NAICM).

La importancia de llevar a cabo este proyecto, es debido a la necesidad de captar las aguas negras de los edificios y las diversas estructuras del NAICM, y de precipitación en los diversos espacios expuestos a las condiciones atmosféricas del lugar, y trasladarlas al drenaje profundo de la Ciudad de México, en particular a las que involucran las actividades de las aeronaves, para evitar encharcamientos en las pistas de rodaje de los aviones que pongan en riesgo las operaciones aéreas y desde luego terrestres, en el polígono del NAICM.

La captación de estas aguas se hace por medio de una red de conductos conectados entre sí:

- Drenaje Profundo: Túnel del Drenaje Pluvial Profundo.
- Drenaje Superficial: Colectores, a base de Tubería Hincada.

A lo largo de este sistema de drenaje, se lleva a cabo la conducción de las aguas combinadas (aguas negras y de lluvia), cuyo objetivo, es su traslado a las redes de drenaje de la Ciudad de México, específicamente al Túnel del Dren General del Valle, o bien disponerlas en un cuerpo de agua artificial llamado Laguna de Regulación 5, por decisión en las operaciones de trabajo.

Se muestra la siguiente figura (figura 1), que muestra el proyecto del drenaje profundo en conjunto con el drenaje superficial:

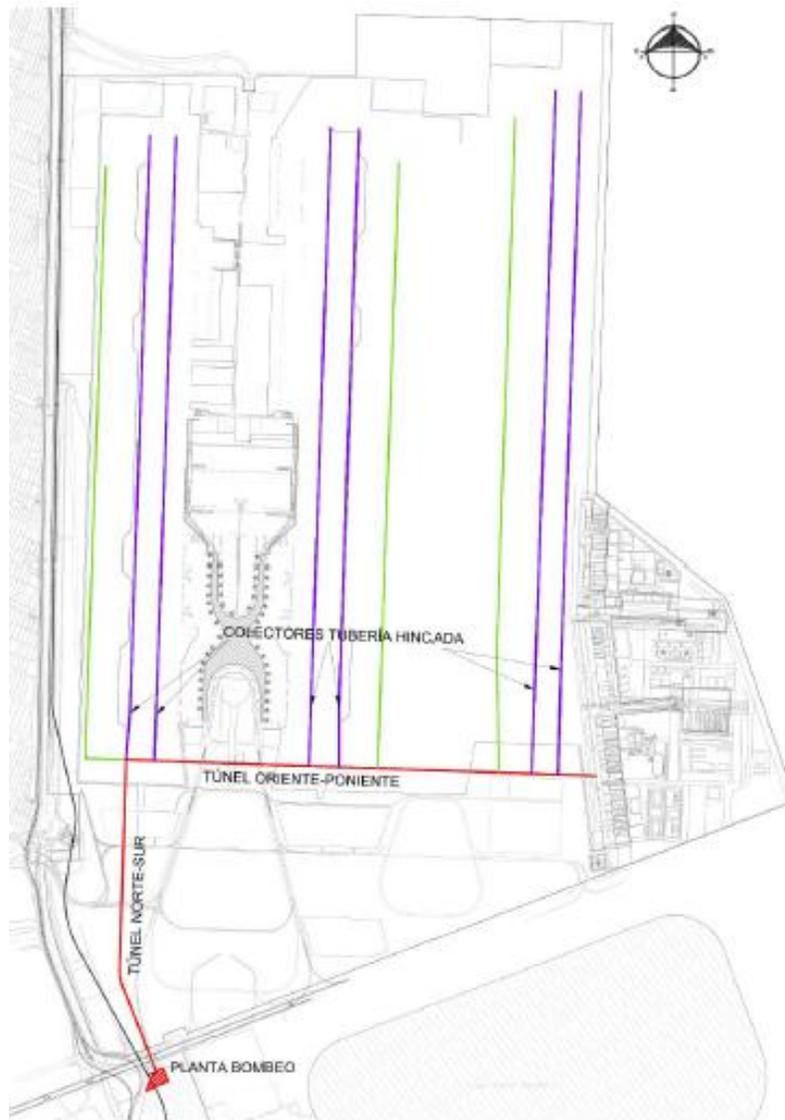


Figura 1.- Proyecto del drenaje superficial y profundo del NAICM.
 Imagen obtenida de <https://compranet.funcionpublica.gob.mx/>

El funcionamiento de este sistema comienza cuando el escurrimiento de las aguas de lluvia es captado por los colectores. Los colectores se localizan en los costados de las pistas de rodaje de las aeronaves y son paralelos a ellas, su funcionamiento es el de un conducto que trabaja a gravedad. Por otra parte, los edificios y estructuras conectados al drenaje, aportan sus aguas residuales a los colectores y una vez que se mezclan con el agua de lluvia, recorren el drenaje superficial hasta finalizar con estructuras conocidas como lumbreras.

Las lumbreras, son el medio que conecta a los colectores con el drenaje profundo. El drenaje profundo de este proyecto, consiste en un túnel, que recibe la aportación de todo el drenaje superficial, su funcionamiento también es por efecto de la gravedad.

Los niveles de estos conductos son importantes, y se toma como dato el nivel de rasante hidráulica, referido al punto tangente inferior del diámetro interno de los conductos. Este dato resulta ser útil para verificar que se cumplan con los niveles proyectados y las pendientes establecidas para los tramos de las conducciones. Para el caso de este proyecto, el nivel de rasante hidráulica de las secciones de los colectores son mayores, que el nivel de rasante hidráulica de la sección del túnel, implicando que la descarga del agua sea en caída libre, al término de la red secundaria hacia el túnel del drenaje profundo.

Para mitigar el impacto del líquido contra la lumbrera, se hacen cajas de amortiguamiento, que son captaciones de concreto armado (similares a una cubeta), equipadas con una tubería al fondo de ellas, que conectan y descargan el flujo del agua captada de la red secundaria a la red primaria, evitando así turbulencias ocasionadas por la caída libre del agua.

Posterior a que el agua fue recibida por las cajas de amortiguamiento y descargada por medio de la tubería en el fondo de ellas, se dirige ahora a la estructura de media caña. La estructura de media caña, permite la conducción del agua transportada por el túnel y aportada por las cajas de amortiguamiento, a través del tramo de las lumbreras. Esta estructura es similar a un canal abierto de sección circular revestida, debido a que son ranuras situadas a través de un espesor de concreto reforzado sobre la losa de fondo de la lumbrera; el nivel de rasante hidráulica de la media caña coincide con el del túnel, permitiendo el transporte del agua a lo largo de toda la red primaria.

Es decir, las lumbreras, durante la fase operativa, permiten cambiar la dirección del agua una vez descargada por los colectores y regularla, hacia la dirección del túnel por medio de la estructura de media caña.

En el proyecto de tienen 2 tipos de lumbreras, distribuidas a lo largo del túnel del drenaje profundo:

- Lumbreras de Construcción
- Lumbreras de Paso

Las lumbreras de construcción, son el medio por el cual se introducirán la maquinaria para la construcción del túnel, particularmente el escudo con el que se realizarán los trabajos de excavación del túnel debido a las dimensiones que este equipo posee, por tal motivo son las lumbreras que poseen el mayor diámetro.

Por otra parte, las lumbreras de paso, servirán para auxiliar a los trabajos concernientes a la ejecución del túnel, agilizar la disposición de los recursos necesarios en obra y también para atender con agilidad las necesidades y situaciones que se presenten durante construcción.

La figura 1.1 muestra el perfil de la lumbrera inicial (Lumbrera T-00), con el objetivo de que se puedan observar la distribución de sus elementos:

Esta laguna, resulta ser una laguna de retención, es un sistema alternativo que consiste en una laguna diseñada para recibir el escurrimiento producido por una tormenta y luego ser vaciada de forma gradual (CONAGUA, MAPAS). Esta laguna permitirá mitigar los riesgos operativos en la estructura del drenaje del NAICM y almacenar el volumen de excedencia de las avenidas, en conjunto con las aguas residuales

El NAICM, tiene proyectadas 4 fases operativas, proyectadas en diferentes años, referidas al arranque operativo de las pistas de rodaje, y como se muestra a continuación en la tabla 1:

Tabla 1.-Fases operativas del NAICM

Fase.	Año de proyección.	Hito	Pista(s) Terminada(s).
1	2020	Inauguración	Pistas 2, 3 y 6
2	2025	Primeros 5 años de Operación	Pista 4
3	2030	Primeros 10 años de Operación	Pista 1
4	2065	Horizonte de Planificación	Pista 5

El objetivo de la tabla 1 es indicar el instante en que el TDPP es operable. De tal manera, que el túnel recibirá las aguas combinadas del NAICM, desde la etapa de inauguración hasta ir incrementando el volumen y gasto de agua al momento de que sean concluidas las demás pistas.

El Túnel del Drenaje Pluvial Profundo, posee las siguientes características:

- ❖ Longitud Total : 7484.78m
- ❖ Diámetro Interior: 5m
- ❖ Rangos de Profundidad del Túnel: 16.02m - 22.01m
- ❖ Número de Lumbreras: 11

Las lumbreras se construirán bajo el Método de Lumbrera Flotada, y serán de 3 diámetros diferentes; por otra parte el túnel será construido bajo el Método de EPB, por medio de un Escudo de Presión Balanceada, dichos métodos serán descritos en los capítulos 4 y 5, respectivamente.

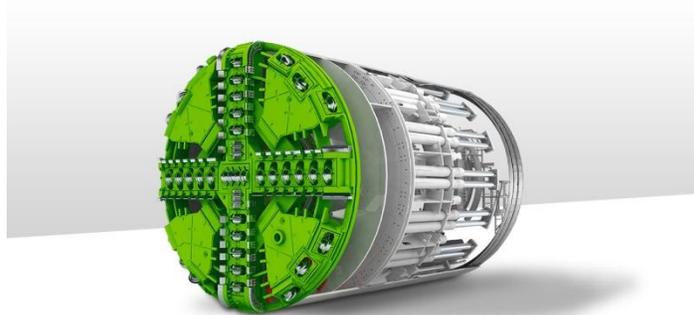


Figura 1.2.- Escudo de presión balanceada.
Fuente: <https://www.herrenknecht.com/en/>

La tabla 1.1, toma como referencia las 11 lumbreras del TDPP, por medio de ellas, se muestran algunas variables del túnel, como son las longitudes que presentan los 10 tramos del túnel, contando y sin contar la longitud del diámetro de las lumbreras. Se destaca que en esta tabla solamente las lumbreras T-00 y T-02 corresponden a lumbreras de construcción, mientras que el restante son lumbreras de paso.

Tabla 1.1.- Longitudes, niveles y pendientes de las secciones del TDPP

Sección del TDPP	Lumbrera	Diámetro de Lumbrera (m)	Longitud del Segmento de Túnel entre Centros de Lumbreras (m)	Longitud Efectiva del Segmento de Túnel (m)	Nivel de Rasante Hidráulica del Túnel (m)	Pendiente
TNS	T-00	16.00	--	--	2204.90	0.001
TNS	T-01	12.00	357.71	343.71	2206.19	0.001
TNS/TOP	T-02	16.00	250.00	236.00	2207.93	0.001
TOP	T-02a	9.00	315.02	302.52	2208.20	0.001
TOP	T-03	9.00	1132.47	1123.47	2209.67	0.001
TOP	T-03a	12.00	369.51	359.01	2209.96	0.001
TOP	T-03b	9.00	287.00	276.50	2210.33	0.001
TOP	T-04	9.00	1470.50	1461.50	2211.46	0.001
TOP	T-04a	9.00	270.52	261.52	2211.78	0.001
TOP	T-04b	9.00	1742.28	1733.28	2212.03	0.001
TOP	T-05	12.00	1289.77	1279.27	2212.38	0.001

La información mostrada en la tabla 1.1, se enriquece con la información geotécnica del proyecto, con la finalidad de contar con las características mecánicas y cualitativas de los materiales del subsuelo. Esta información es indispensable para poder realizar el análisis del comportamiento del terreno, y de las estructuras en estudio (túnel y lumbreras) durante la etapa de construcción y de operación, mediante la instrumentación y personal capacitado, con el objetivo de ofrecer soluciones preventivas que beneficien a los servicios y a la seguridad.

La estratigrafía e información del subsuelo concerniente a los tramos del túnel (TOP y TNS), se muestran mediante los perfiles estratigráficos, figuras 1.3 y 1.4. Esta información se obtuvo por medio de ensayos de piezocono (CPTu), sondeos de muestreo continuo alterado (SPTu), y por medio de pruebas de contenido de agua. Posterior a estas figuras, se mostrará en la tabla 1.2, la descripción detallada de los materiales del subsuelo de los perfiles estratigráficos, referentes a la proyección del TDPP, cuya información se encuentra en los planos geotécnicos del proyecto.

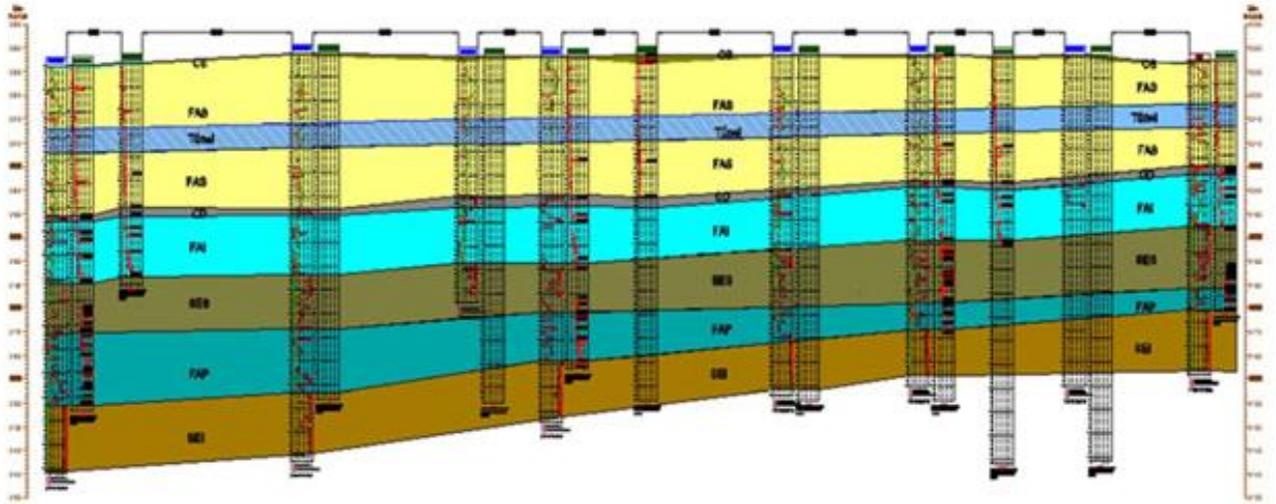


Figura 1.3.-Perfil estratigráfico TOP (Sentido: de izquierda a derecha T-02 a T-05)

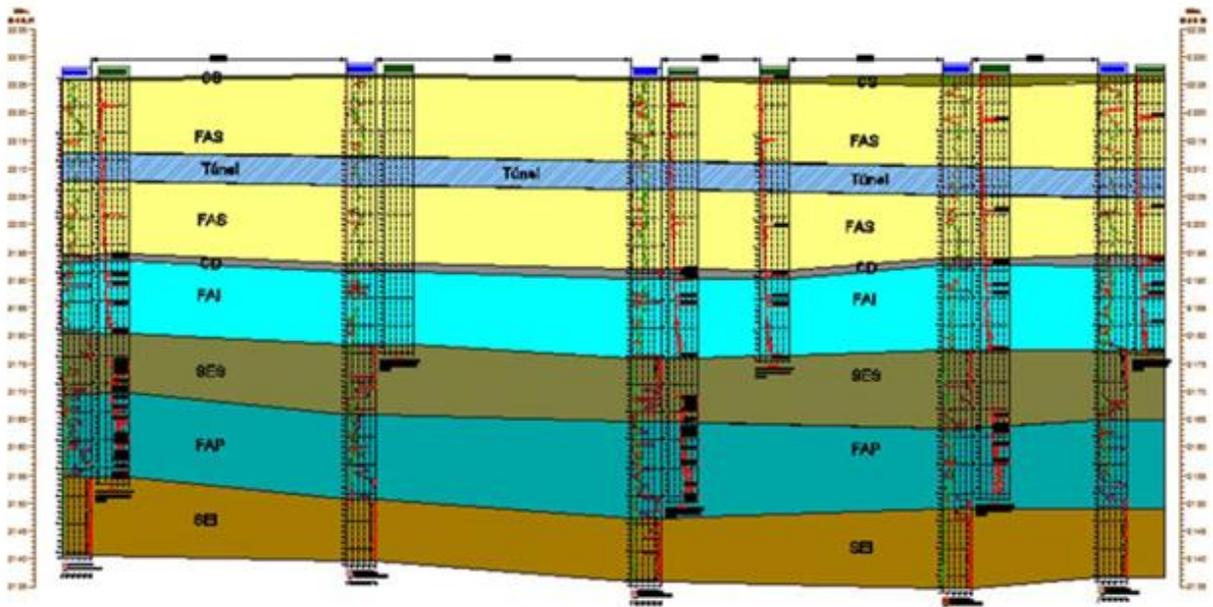


Figura 1.4.-Perfil estratigráfico TNS (Sentido: de izquierda a derecha T-02 a T-00)

Las dos imágenes obtenidas de <https://compranet.funcionpublica.gob.mx/>

Tabla 1.2.- Descripción de la estratigrafía.

Nomenclatura	Formación	Rangos de Espesor (m)	Descripción del Estrato
CS	Costra Superficial Desecada	0.50-1.20	Compuesta principalmente de arcilla color café claro (CH), de consistencia blanda y con escasa arena fina.
FAS	Formación Arcillosa Superior	22.00-34.00	Compuesta por arcillas color gris verdoso (CH), de consistencia muy blanda y muy compresible. Dentro de esta formación se detectaron 9 horizontes o marcadores de ceniza volcánica de compacidad suelta y limos arenosos de consistencia blanda a media.
CD	Primera Capa Dura	1.00-2.00	Conformada por limos arenosos color gris verdoso (ML), de consistencia dura a muy dura y ceniza volcánica color negro
FAI	Formación Arcillosa Inferior	10.00-15.00	Se compone de arcillas color gris verdoso (ML), de consistencia muy blanda a media. Al igual que en las FAS, se encontraron horizontes o marcadores de ceniza volcánica altamente compacta y limos arenosos de consistencia muy dura
SES	Serie Estratificada Superior	8.00-14.00	Consiste principalmente en una serie heterogénea de suelos arcillosos, limosos y arenosos, en los que el factor común es la alta variabilidad de consistencia, compacidad y compresibilidad.
FAP	Formación Arcillosa Profunda	12.00	Se compone de arcillas color gris verdoso (CH), de consistencia blanda a muy firme
SEI	Serie Estratificada Inferior	--	Serie de suelos formada por intercalaciones de materiales con una mayor consolidación, de origen lacustre, color gris verdoso (destacan los materiales limosos, arenosos, limo-arenosos, areno-limosos, arcillas arenosas, arenas arcillosas, así como cenizas volcánicas con arcillas escasas)

Como se ha observado, el túnel se localiza en el estrato de la FAS, cuyo material son arcillas blandas. Por otra parte, los rangos de profundidad del túnel varían, respecto del nivel de terreno natural al eje de la sección circular, desde 11.50 hasta 19.50m (ubicados en las lumbreras T-05 y T-00 respectivamente). Los niveles de terreno natural por lumbrera son los presentes en la tabla 1.3:

Tabla 1.3.- Niveles de terreno natural

Lumbrera	Nivel de Terreno Natural (m)
T-00	2226.91
T-01	2226.30
T-02	2226.44
T-02a	2226.98
T-03	2228.22
T-03a	2227.84
T-03b	2228.29
T-04	2227.80
T-04a	2228.27
T-04b	2228.64
T-05	2226.02

Por otra parte, se incluye en la tabla 1.4, las propiedades mecánicas que posee el subsuelo a las diferentes profundidades del túnel en el sitio de las lumbreras, hasta el nivel de rasante hidráulica del mismo, con los ensayos ya antes mencionados, exceptuando los valores de las presiones piezométricas como las de frente, siendo ambas referidas al eje del túnel. Por otra parte la tabla 1.5 mostrará los rangos de valores de las tres primeras formaciones de la estratigrafía.

Tabla 1.4.- Variables mecánicas del subsuelo a lo largo del túnel referidas a las lumbreras y NAF

Lumbrera	Estrato	Peso volumétrico del material, γ_m ($\frac{kN}{m^3}$)	Nivel de agua freática, NAF (m)	Presión piezométrica al eje del túnel (kPa)	Presión de frente al eje del túnel (kPa)	Su, promedio, en la zona del túnel (kPa)	Eu, promedio, en la zona del túnel (MPa)	Permeabilidad promedio ($\times 10^{-5}, \frac{m}{día}$)
T-00	FAS	11.60	1.5	160	200	24	3.4	8.64
T-01	FAS	11.60	0.8	150	180	22	3.1	8.64
T-02	FAS	11.60	0.5	137	165	22	2.9	8.64
T-02a	FAS	11.60	1.7	127	165	21	3.0	8.64
T-03	FAS	11.60	2.0	122	160	22	2.9	8.64
T-03a	FAS	11.60	1.2	124	155	22	2.8	8.64
T-03b	FAS	11.60	1.0	130	160	22	2.9	8.64
T-04	FAS	11.60	2.0	103	140	22	2.9	8.64
T-04a	FAS	11.60	1.2	109	140	22	2.9	8.64
T-04b	FAS	11.60	1.0	111	140	22	2.9	8.64
T-05	FAS	11.60	1.5	93	125	20	2.6	8.64

Donde:

- Presión piezométrica al eje del túnel: Es la carga hidráulica o altura piezométrica "h", asociada con la Ley de Darcy a un nivel. Donde se involucra la carga de posición "z", y de presión, ($h = z + \frac{U_w}{\gamma_w}$), donde: U_w es la presión de poro y γ_w es el peso volumétrico del agua.
- Presión de frente al eje del túnel: Es la presión a un nivel que ejerce(n) los estratos del subsuelo a una cierta profundidad, en este caso al eje del túnel, considerando el peso volumétrico del material del estrato, γ_m .
- Su: Resistencia no drenada
- Eu: Módulo de elasticidad en condiciones no drenadas.
- Permeabilidad promedio: Coeficiente de permeabilidad "k", obtenido mediante la ley de Darcy referida a la velocidad, considerando un flujo laminar ($v = ki$), donde i, es el gradiente hidráulico asociado a las pérdidas de energía en una sección y v, es la velocidad de descarga del agua en el terreno.

(Deméneghi *et al.*, Apuntes de comportamiento de suelos)

Tabla 1.5.- Información estratigráfica donde se sitúa el drenaje profundo

Unidad	Espesor (m)	γ_m ($\frac{kN}{m^3}$)	SUCS	f (%)	w (%)	Su (kPa)
CS	0.50-1.20	12.00-12.60	CH	97-99	16-175	20-50
FAS	22.00-32.00	11.00-11.70	CH	92-99	150-400	5-58
CD	1.00-2.00	--	--	--	50-120	--

Donde:

- SUCS: Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.
- f: Porcentaje de finos obtenidos en la muestra de material del estrato.
- w: Porcentaje de agua en la muestra de material del estrato.
- Su: Resistencia no drenada.
- γ_m : Peso volumétrico del material del estrato.

(Deméneghi *et al.*, Apuntes de comportamiento de suelos)

CAPÍTULO 2: PLANEACIÓN REQUERIDA PARA INICIO DE ACTIVIDADES



Figura B.- Boceto del edificio terminal del NAICM.

Fuente de la imagen: https://www.fosterandpartners.com/es/projects/new-international-airport-mexico-city/#bocetos_y_dibujos

2) PLANEACIÓN REQUERIDA PARA INICIO DE ACTIVIDADES

2.1) ESPECIFICACIONES DE LAS ACTIVIDADES

Es un documento que contiene las características de las actividades del programa de obra, en las diferentes etapas constructivas, para que se puedan elaborar en orden y en apego a distintas normativas, que son mencionadas en

En dichas especificaciones se tienen las siguientes características:

- Descripción de las actividades
- Metodología de construcción de las actividades
- Análisis y alcances del precio unitario (mano de obra, maquinaria, insumos, pruebas de laboratorio, certificaciones)
- Sugerencias e indicaciones a: contratista y/o supervisión
- Requisitos de ejecución
- Planeación y programación de obra
- Responsabilidades de los participantes de obra (contratista y supervisión)
- Tolerancias (rangos permisibles dispuestos en normativas)
- Motivos de rechazo
- Criterios de medición (unidades que se emplearán)
- Base de pago (precio unitario por obra terminada, lote, entre otros)

Como se observa, dicho contenido es indispensable para dar seguimiento a la ejecución de las actividades, poder detectar a tiempo si alguna de ellas no cumple con alguno de los aspectos ya mencionados.

2.2) REGLAMENTO DE OPERACIÓN DE SITIO

El Reglamento de Operación de Sitio (ROS), es una serie de normativas que deben respetarse y aplicarse en todo momento dentro del polígono del NAICM; dentro del ROS, se encuentran diversas recomendaciones a la planificación de los diversos proyectos del NAICM, que faciliten a los involucrados, lograr sus objetivos de manera ordenada, mejorar la ejecución de los trabajos en obra, así como agilizar todos los procedimientos de entrega de la documentación, trazabilidad de los insumos y maquinaria, verificación de la distribución de las actividades en el tiempo por medio de cronogramas, proponer medidas preventivas ante eventos no deseados, tales como incendios, así como los requisitos que deberán contener los planes que serán obligatorios para iniciar la obra. Cabe mencionar, que dentro de estos planes, se encuentra la implementación de nuevas tecnologías en el ámbito de la construcción, como lo es el sistema de trabajo BIM.

Los planes obligatorios antes mencionados serán descritos para que se pueda apreciar la importancia de ellos, no sólo para el caso del proyecto del TDPP del NAICM, sino para toda obra, con el fin de garantizar trabajos de calidad y que sean seguros tanto para los trabajadores y personal específico durante la ejecución de obra, y a largo plazo para los fines al que los proyectos fueron destinados.

2.3) PLAN DE CONTROL DE CALIDAD

Es un documento donde se especifican los procedimientos necesarios y los recursos asociados al cumplimiento de las políticas y objetivos del sistema de gestión de calidad. Se entiende por concepto de calidad al grado en el que un conjunto de características inherentes cumple con los requisitos (necesidades o expectativas) establecidos. El grado puede ser pobre, bueno y excelente. Debe ser elaborado por un equipo calificado y experimentado en materia de calidad. (ISO 9000:2015, *Sistemas de gestión de la calidad-Fundamentos y vocabulario*)

Este plan debe estar basados en el sistema de gestión de calidad ISO 9000:2005 y sus alcances incluyen no sólo a este plan, sino a los demás planes del proyecto. Entre las características que se destacan de este plan, son:

- Aseguramiento de la calidad : Proporcionar confianza en el cumplimiento de los requisitos de calidad.
- Mejora continua: Aumentar la capacidad de cumplimiento de requisitos .
- Monitoreo de calidad: Evaluación sistemática e independiente del sistema de calidad, para mejorarlo continuamente.
- Control de calidad: Gestión de calidad orientada al cumplimiento de requisitos.

2.4) PLAN DE SALUD Y SEGURIDAD

Es un plan que consiste en una serie de recomendaciones y sugerencias sustentadas en diferentes normativas concernientes a la seguridad, e higiene durante las operaciones en obra, y por tal motivo es de prioridad para el personal que estará presente para la ejecución de los trabajos en los sitios de trabajo, debe ser elaborado por un equipo calificado y experimentado en materia de seguridad, e higiene industrial.

El plan consiste y debe contener lo siguiente:

- Ser una propuesta integral para la seguridad de los trabajadores (dentro y fuera de los lugares de trabajo), cumpliendo con los ordenamientos legales vigentes en materia de seguridad, salud e higiene industrial
- Ser una serie de indicadores estadísticos de seguridad, que demuestren el desempeño del sistema de gestión de seguridad en el sitio e instalaciones fuera de él, en conformidad con los estándares y regulaciones locales y vigentes, referentes a la seguridad e higiene industrial.

Este documento tiene como objetivo ofrecer condiciones de seguridad y salud en el trabajo para el desarrollo de las actividades que serán aplicadas de manera continua, así como garantizar seguridad a los trabajadores durante sus actividades de trabajo, y a las demás personas que asistan a los lugares de trabajo de este proyecto.

2.5) PLAN DE REQUERIMIENTOS PARA LA SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS

Este plan tiene como objetivo establecer los requerimientos para la prevención y protección contra incendios en los centros de trabajo, esto es, todas aquellas acciones técnicas y administrativas que se desarrollan para evitar que se presente un incendio en los lugares de trabajo. Se entiende por incendio al fuego que se desarrolla sin control en tiempo y espacio. Por otra parte, el fuego es una oxidación rápida de los materiales combustibles con desprendimiento de luz y calor (*NOM-002-STPS-2010, Condiciones de seguridad. Prevención y protección contra incendios en los centros de trabajo.*).

2.6) PLAN DE LOGÍSTICA

Este documento contempla, planea, prepara, mantiene y gestiona el terreno y las diferentes zonas de trabajo dentro del predio del proyecto y el equipo, instalaciones, trabajos temporales y otras instalaciones requeridas para realizar su trabajo de manera eficiente y coordinada, como la planificación para la recepción de los diversos recursos, horarios, mantenimiento, mediante equipos de transporte, de manera que proporcione un máximo beneficio a la construcción de los trabajos permanentes y a las operaciones y actividades cerca o dentro de los límites de su trabajo, en coordinación con los demás proyectos del NAICM. Así como el mantenimiento, uso y limpieza de las vialidades utilizadas para la llegada a los diferentes puntos de los frentes de trabajo y los permisos correspondientes para llegar a ellos.

2.7) PLAN BIM

El BIM (Building Information Modelling), es una representación digital del proyecto, que puede comprender uno o más modelos virtuales; esta modelación significa un beneficio para el seguimiento, supervisión y planeación de la construcción del proyecto, puesto que ofrece la mayor cantidad de recopilación y manipulación de información del proyecto y la ejecución en obra, en tiempo real, de acuerdo al programa de obra, diversos planos, catálogo de conceptos, modificaciones, adecuaciones de proyecto y avances constructivos, sin que estos cambios, representen un retraso para la revisión y supervisión de información, gracias a la rapidez y eficacia del software para el manejo de datos en tiempo real y la modelación del proyecto ante esta serie de eventos. Esto conlleva a que el sistema BIM, sea una herramienta preventiva ante los constantes cambios en obra, ofreciendo tiempo a los profesionistas de cada disciplina para ofrecer soluciones a las situaciones que se vayan presentando en la ejecución en obra, reducir las omisiones de información del proyecto en obra, una vez que se han vertido las fuentes de información del proyecto en el sistema BIM (planos de proyecto y modificaciones, programación de obra, catálogo de conceptos) para su automatización y ajuste inmediato; facilitar las cuantificaciones de obra, el control presupuestal de acuerdo a los avances reales del proyecto, mejorar el seguimiento de la construcción y mantenimiento al finalizar el proyecto, como de facilitar la comunicación y transmisión de información entre el equipo de trabajo, entre otros.

El modelo virtual que sea creado, se debe juntar y coordinar con los demás modelos BIM de los demás proyectos del NAICM, de manera que muestren por completo el modelo virtual del aeropuerto.

El presente plan y programa, para su correcta descripción y ejecución, debe de contar con un equipo multidisciplinario (áreas de ingeniería, arquitectura, topografía, instalaciones), para que cada uno de ellos pueda otorgar datos para ofrecer un diseño completo y detallado, con el objetivo de que pueda ser consultado libre y sencillamente por los involucrados del proyecto y visualizado para que se puedan hacer las correspondientes observaciones al proyecto, modificaciones y avance en obra, reduciendo los tiempos de revisión que resultarían de analizar toda la información del proyecto y los diversos cambios que se vayan presentando en obra, en un modelo automatizado.

El plan estará coordinado por un autor, cuya función es acoplar todos los datos que han sido recopilados de las diversas fuentes de información y de las disciplinas involucradas en el modelo virtual, plasmarlas en la modelación, y garantizar el cumplimiento de dicho modelo, de acuerdo a los objetivos indicados de esta representación digital, así como describirlos y detallarlos en el plan. El autor del modelo, asignará para la ejecución del mismo, elementos y parámetros, con características geométricas y propiedades (material, propiedades físicas y mecánicas, entre otros), denominados atributos. Los elementos mencionados son las piezas o componentes que pueden ser: acero, concreto, prefabricados, madera, plásticos, polímeros; que en conjunto formen un sistema, que en este caso son las lumbreras y el túnel. A su vez, el autor creará modelos específicos de cada una de las áreas, es decir, donde se visualicen exclusivamente los elementos referidos a cada área, esto es, un modelo estructural, arquitectónico, topográfico o bien, de instalaciones, que son las componentes principales del modelo BIM.

Estos elementos y especificaciones del modelo BIM deberán ser clasificados de acuerdo a un sistema llamado Unifomat II, que se encarga de organizar y clasificar los elementos de construcción y datos recopilados, con el fin de mejorar la administración y regulación de información, generando informes durante todas las etapas del proyecto, funcionando como una normativa para el control de especificaciones de los elementos asignados por cada proyecto.



Figura 2.- Otras aplicaciones de BIM.

Fuente: <https://www.autodesk.com/solutions/bim/hub/what-is-bim>

CAPÍTULO 3: ACTIVIDADES PRELIMINARES



Figura C.- Construcción de caminos de acceso.

3) ACTIVIDADES PRELIMINARES

3.1) LLEGADA Y RECORRIDO A LOS SITIOS DE OBRA

Esta actividad es fundamental para iniciar la construcción de algún proyecto, consiste en que los participantes del proyecto, asistan, visualicen e inspeccionen las zonas donde se ejecutarán los trabajos de obra, por tal motivo el personal de obra involucrado en el proyecto, que ha dado asistencia a los recorridos de los sitios, evalúa la situación del entorno de las zonas proyectadas de trabajo, compara los datos reales con los proyectados, así como analizar los datos y parámetros del lugar, con apoyo del equipo de instrumentación que se disponga, para la topografía del lugar, la ubicación de la capa vegetal, fauna existente, obstáculos que se encuentren en los sitios que puedan ser importantes durante las etapas de construcción, entre otros, con el objetivo de planear y dar soluciones preventivas ante posibles situaciones o eventos que atrasen y pongan en riesgo las operaciones, calidad de ejecución, personal de trabajo, equipo, vehículos, maquinaria, procurando que sea un entorno de trabajo seguro, garantizando operaciones y maniobras hábiles y efectivas durante la ejecución de las actividades en obra y de visita.

En la figura 3, se muestra la visita a los sitios de obra del TDPP, específicamente a los sitios de una de las lumbreras, que significó un beneficio para los participantes del proyecto, para la verificación de los datos del proyecto, como la conciliación topográfica de los centros de lumbrera del proyecto, el área de la plataforma de trabajo del terreno, caminos de penetración y del levantamiento topográfico general del lugar; por otra parte prever las necesidades que se requerirán durante obra debido a las condiciones de la topografía del lugar, por mencionar: zanjas, rellenos, diques, traslado de flora o fauna que aún permanezca en los sitios, entre otros.



Figura 3.- Visita a uno de los sitios de las lumbreras (autoría propia).

3.2) TRAZO Y NIVELACIÓN

Las actividades de trazo y nivelación son actividades de gran importancia para corroborar por medio de equipos topográficos y el personal calificado, las zonas de trabajo, en lo que se refiere a la altimetría y coordenadas en general, así como identificar las interferencias que pudieran existir dentro de estos espacios respecto al proyecto, como pueden ser: árboles, estructuras de concreto, mampostería o acero, tuberías, cables o instalaciones en general, y tener contempladas soluciones preventivas para la ejecución de las obras en el proyecto.

Se hacen una serie de lecturas con el equipo topográfico y las referencias de nivel necesarias (bancos de nivel), para realizar el levantamiento topográfico y posteriormente analizar el comportamiento del terreno, en ciertos puntos de las secciones del terreno, conocidos como puntos geométricos. En estos puntos, se da un registro de las coordenadas georeferenciadas, cuyo objetivo es la asignación de una ubicación de gran precisión espacial a entidades cartográficas, con el fin de situarlos en la superficie terrestre.

El conjunto de todos los puntos geométricos formarán un polígono, y dentro de esta figura se darán con precisión los datos topográficos necesarios que se requieran para la ejecución de las actividades del proyecto con mayor precisión, como pudiera ser el caso de verificar la pendiente del túnel, la verticalidad de las paredes de las lumbreras, o bien, la horizontalidad del tanque de flotación durante el instante de inmersión.

La correcta ejecución y cumplimiento de los trabajos de topografía para las lumbreras y el túnel, obtenidas por los diversos aparatos e instrumentación, que se abordará en el capítulo 6, guiará al éxito de la calidad de los trabajos, como evitar riesgos debidos a la carencia de referencias topográficas, como pudiera ser un mal posicionamiento de los elementos de las estructuras, ó inclinaciones indebidas que ocasionen daños al personal de trabajo, estructuras, maquinaria, o las operaciones de trabajo.



Figura 3.1.- Trabajos de topografía en las zonas de las lumbreras (autoría propia).

3.3) DESMONTE Y DESPALME

Se realizan las actividades de limpieza y retiro de la capa vegetal del terreno con maquinaria, como tractores, cargadores frontales, excavadoras o retroexcavadoras, y equipo en general para la carga y acarreo del material; por otra parte si hay estructuras o instalaciones previamente existentes, como se hizo mención, se procede a su retiro, o bien, para el caso de elementos de la naturaleza, se hace contacto con las autoridades en materia ambiental correspondiente, para su reubicación o permanencia, según sea el caso.

Una vez que se retira la capa vegetal, se procede con el desmonte del material del suelo de los sitios de obra, por medio de equipos de excavación, carga y acarreo para dar continuidad a las demás actividades, concernientes a la colocación de los materiales para el mejoramiento del terreno, como son los caminos de penetración (o de acceso a los sitios de trabajo) y las plataformas de trabajo, que a continuación se dará una descripción.



Figura 3.2.- Actividad de desmonte en las zonas de las lumbreras (autoría propia).

3.4) CONSTRUCCIÓN DE RUTAS DE ACCESO A SITIOS DE TRABAJO

Se toma en cuenta para iniciar esta actividad, lo estipulado en el Plan de Logística y las actividades anteriores, para comenzar con la construcción de los caminos de penetración, que permiten al personal de trabajo acceder a los sitios de las lumbreras, tomando en cuenta, que estas rutas de acceso no interfieran con las actividades de otros frentes de trabajo, permitiendo así un ágil flujo vehicular dentro de las zonas de trabajo del proyecto y sus cercanías, dentro del polígono del aeropuerto. Los caminos de penetración están conformados por un terraplén que consiste en dos espesores de diferentes materiales: tezontle y base hidráulica. Sin embargo, las capas necesitan de un sustento que pueda retener los materiales ya mencionados ante las condiciones de carga y evitar la desfragmentación de los materiales granulares, por tal motivo es que se colocan el geotextil y la geomalla.

El geotextil, se conforma de lienzos de tela que cubren la superficie a lo largo de la superficie donde situarán los caminos de acceso; es la primera cubierta que se colocará sobre el terreno natural, para que encima de esta capa, se coloque la geomalla. El geotextil tendrá como función cubrir la capa de tezontle para garantizar la estabilidad del talud, y una vez que esté colocado la geomalla y la capa de tezontle se procede a cerrar dicha capa; para retener el geotextil se pueden colocar fragmentos de rocas o bien, el empleo de grapas, hasta el momento en que se coloque la capa de base hidráulica. Las especificaciones del geotextil, son las que a continuación se presentan en las especificaciones que establece el ROS:

- No tejido
- Tipo: Termofijado
- Densidad mínima por m^2 : $200 \frac{g}{m^2}$
- Traslapes permisibles:
 - ❖ Traslape longitudinal: 0.30m
 - ❖ Traslape transversal: 0.60m



Figura 3.3.-Geotextil colocado en camino de penetración (autoría propia).

Posterior a la colocación del geotextil, se coloca la geomalla; es un elemento de plástico, similar a una red, conformada, de manera análoga al geotextil, por lienzos de dimensiones que el fabricante otorgue; la geomalla puede ser, debido al número de ejes respecto de sus nodos, biaxial o triaxial, de manera que una geomalla biaxial, forma en sus nodos, una cruz, y por tal motivo los espacios son cuadrados, por otra parte, la geomalla triaxial, forma en sus nodos una figura similar a un asterisco, y los espaciamentos son pequeños triángulos rectángulos; para el caso del proyecto la geomalla es biaxial, como lo indica el proyecto de los caminos y plataformas.

La función de la geomalla es la de incrementar la capacidad de resistencia del terreno natural y evitar una falla por desfragmentación de la capa de tezontle o por la infiltración de agua que pudiera presentarse de las obras de drenaje del agua pluvial, de las que se hablarán más adelante.

Para fijar este elemento se puede hacer uso también de fragmentos de rocas, o con grapas de varillas del no. 8, considerando que los traslapes se harán de acuerdo a las especificaciones del fabricante de la geomalla. Por otra parte, durante la colocación de este material, se deberá tener cuidado que no exista ningún elemento pesado sobre él, con el fin de garantizar que el material esté en buenas condiciones para que mantenga su buena calidad.

Las especificaciones estipuladas en el ROS para la geomalla, son las siguientes:

- Geomalla Biaxial Tipo Bx
- Tensar: 1200



Figura 3.4.- Geomalla colocada en camino de penetración (autoría propia).

Por otra parte, las obras de drenaje se pueden realizar mediante zanjas o alcantarillas de tubería; el drenaje de alcantarilla, se coloca a través de la capa de tezontle por medio de cabezales (o cabezotes) de concreto, que guían al agua captada hacia los costados de los caminos, por otra parte, las zanjas consisten en unas cunetas, ubicadas en los costados de los caminos para desviar el agua de los caminos, en virtud de las pendientes de las vialidades.

Para conformar al terraplén, se cumple con una secuencia de construcción, que consiste en primer término la colocación de la geomalla, para la posterior colocación del geotextil, con la finalidad de proteger al material del contacto con el terreno natural y ante eventos naturales, y lograr la integridad de las capas como su retención, lograr los taludes que se indican en proyecto, mientras se van colocando las capas de material de tezontle y de base hidráulica en subcapas.

La primera capa en colocarse es la de tezontle. El material de tezontle debe de cumplir con ciertas características como son el tamaño máximo de agregado de 3", con el objetivo de que este diámetro permita que los fragmentos del material puedan ser compactados y se minimicen los poros (espacios) dentro de la capa; el espesor total de tezontle, es de 50cm como mínimo, para lograr este espesor se colocan subcapas de 30cm (como mínimo) de espesor hasta completar el espesor total; por otra parte el talud de la capa total de tezontle es de 1.5:1, para evitar el colapso de la capa conformada de tezontle que pueda ocasionar la desfragmentación del camino durante su construcción, ó durante las operaciones de trabajo.

Posteriormente, se cubren los taludes de la capa total de tezontle, con el geotextil, de manera que la longitud para la cubierta de los taludes sea de 1m en los extremos laterales de los caminos de acceso (hombros), como se muestra en la Figura 3.5 y sujetos por los fragmentos de roca como se ha mencionado, y que se puede apreciar en la Figura 3.3.

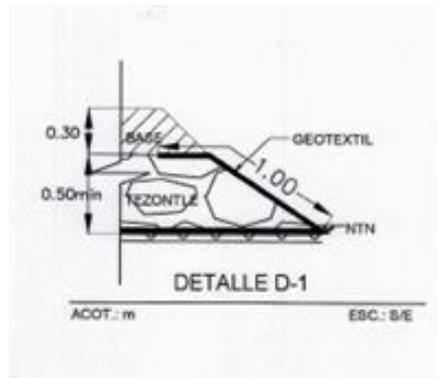


Figura 3.5.-Detalle constructivo del terraplén.
Imagen obtenida de <https://compranet.funcionpublica.gob.mx/>

Las especificaciones requeridas para la capa de tezontle, estipuladas en los planos de caminos y plataformas, son las que se describen a continuación:

- Conformada por subcapas no mayores de 30cm
- Material: Grava triturada bien graduada
- Tamaño máximo de agregado: hasta 3" compactado al 90% de su P.V.S.M. (Peso volumétrico seco máximo)
- Basadas en: AASHTO Estándar; respaldada en N-CMT-1-01/16 "Materiales para Terraplén" de la SCT.

Por otra parte, se hace la colocación de la base hidráulica cuya función es la de proporcionar un apoyo uniforme al terraplén, aminorar los esfuerzos transmitidos por las diversas condiciones de carga a la capa de tezontle, como el drenaje del agua que se pueda infiltrar e impedir el ascenso capilar del agua subterránea.

Se realiza la colocación de la base hidráulica, este material es el producto de un proceso de trituración de agregados pétreos, y se coloca en subcapas de 15 cm compactadas por equipos como rodillos vibratorios, hasta lograr un espesor total de 30 cm, a su vez, este material debe poseer un talud para su estabilidad, de 1:1. Uno de los aspectos importantes de la base hidráulica, es que mientras se vaya realizando su aplicación sobre la capa de tezontle, la mezcla de los materiales se homogeniza con agua, por medio de un equipo de mezcla ubicado en los sitios de construcción, llamado planta estabilizadora de materiales, cuya función es la de preparar mezclas asfálticas, para terracerías, pavimentos y construcción de carreteras.

Las especificaciones requeridas para la capa de base hidráulica, estipuladas en los Planos de Caminos y Plataformas, son las siguientes:

- Conformada por subcapas no mayores de 15cm
- Material: Base de grava, producto de tratamientos de trituración de agregados pétreos
- Tamaño máximo de agregado: hasta 38mm compactado al 100% de su P.V.S.M.
- Basadas en: AASHTO T-180-74; respaldada en N-CMT-1-01/16

(Fuente adicional: SCT, N-CTR-CAR-1-04-002/11)

Una vez que se ha hecho toda la colocación del terraplén y elementos de retención, se tendrán como resultado, los caminos de penetración, con características de sección como:

- Ancho de carril: 4.00m
- Pendiente de carril: 3.00%

Posterior a que se concluyan los trabajos de los caminos de penetración, se colocan los señalamientos en los costados de los caminos para poder dar las indicaciones necesarias de las operaciones de los vehículos, para que se puedan iniciar las actividades posteriores. Uno de los señalamientos más importantes, es establecer la velocidad máxima, para que las operaciones sean seguras para el personal que acceda o esté en las cercanías de los sitios de trabajo, para el caso del proyecto, se han establecido $30 \frac{km}{h}$, como se muestra en la figura 3.6.

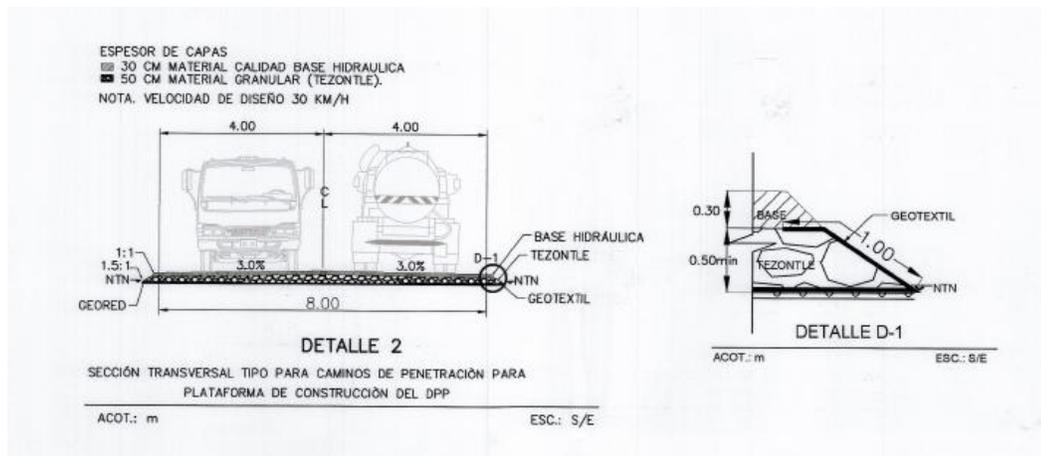


Figura 3.6- Especificaciones de los caminos de penetración.
 Imagen obtenida de <https://compranet.funcionpublica.gob.mx/>



Figura 3.7.- Construcción de camino de penetración (autoría propia).

3.5) MEJORAMIENTO DEL TERRENO DE TRABAJO

El mejoramiento del terreno de trabajo consiste en plataformas donde se hará la ejecución de obras, que facilitan las maniobra de las maquinarias y el personal autorizado, debido a su horizontalidad y mayor resistencia que la que proporcionaría el terreno natural.

Está conformado de manera semejante a los caminos de penetración, pero con espesores de diferente tamaño. Sobre su superficie se hace la distribución de los espacios de trabajo a la que se le denomina en los planos como "Diseño de operación" y es variable por cada lumbrera, en función del terreno natural y del tipo de lumbrera. En la figura 3.8 se muestra la sección tipo:

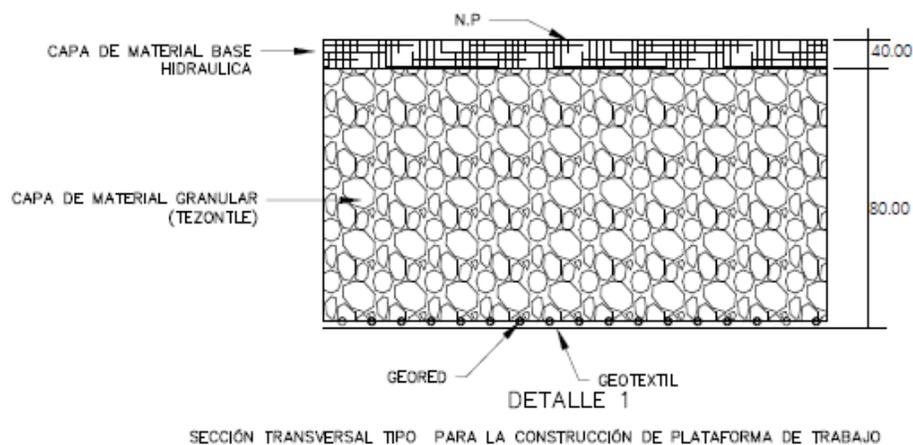


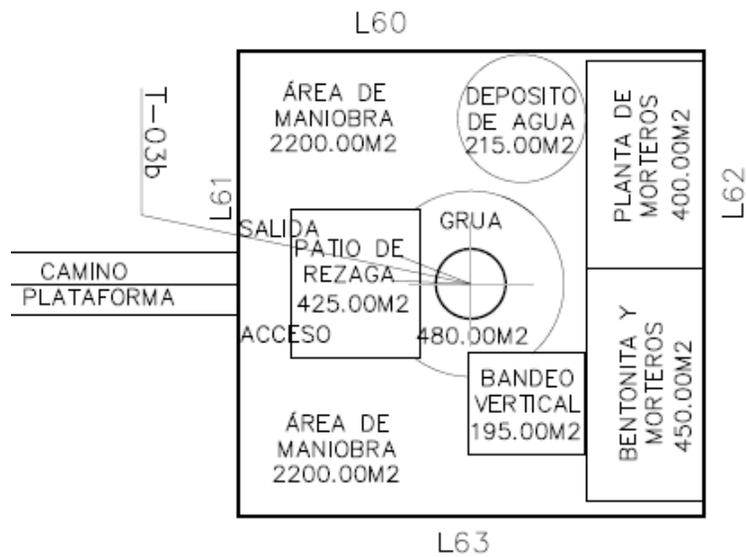
Figura 3.8.- Sección tipo del perfil de las plataformas de trabajo.
 Imagen obtenida de <https://compranet.funcionpublica.gob.mx/>

Dentro de las plataformas de trabajo, se dispondrán los siguientes espacios, con los que deberá contar cada plataforma de las lumbreras del proyecto, para poder ejecutar con eficacia las actividades en virtud de la disposición de estos elementos:

- **Espacio para lumbrera:** Es el área donde se efectuarán los trabajos de excavación del núcleo de la lumbrera.
- **Espacio para la grúa:** Es el área donde se podrá desplazar la grúa para realizar sus actividades con relación a la excavación del núcleo.
- **Patio de dovelas:** Es un área donde se disponen las dovelas, de manera análoga a un almacén (stock), para que se puedan instalar durante el proceso constructivo del túnel.
- **Patio de rezaga:** Espacio asignado para las tolvas de materiales granulares, y para la tubería con la cual se aplicará el material del lodo bentonítico durante los procesos de excavación de las zanjas de las lumbreras.
- **Bandeo vertical:** Es un espacio asignado a la disposición de los materiales excavados del estrato de arcilla del terreno, por medio de bandas transportadoras hasta el sitio asignado.
- **Planta de morteros:** En esta sección se tendrá una planta de fabricación de este material para la inyección del revestimiento definitivo en el procedimiento constructivo del túnel por medio del equipo de excavación de EPB.
- **Bentonita y morteros:** Esta zona tiene almacenados los materiales producto de la planta de morteros, así como del material de bentonita, para la elaboración del lodo en los instantes de excavación de las zanjas de las lumbreras, mediante almacenes conocidos como fosas de lodo bentonítico.
- **Depósito de agua:** Es un contenedor cerrado donde se dispondrá el agua y se mantendrá limpia para evitar su contaminación debida a agentes atmosféricos u organismos que puedan ocasionar deterioro en actividades de mezclado.
- **Centro de control:** Es una caseta en donde se dispondrán los equipos de control para la maquinaria por medio de energía eléctrica, es decir, es la fuente de energía de los diversos equipos de la tuneladora.
- **Áreas de maniobra:** Son los espacios por donde podrán circular los vehículos de carga y de las diversas actividades para la ejecución del proyecto del TDPP.

En la figura 3.9 se indica un diseño de operación de las plataformas de trabajo, en este caso de la lumbrera T-03b, donde se aprecia la distribución de los elementos para ejecutar y operar correctamente las actividades laborales del procedimiento constructivo de las lumbreras y el túnel:

PLATAFORMA DISEÑO
DE OPERACIÓN T-03b



DETALLE T-03b

Figura 3.9.- Diseño de operación de una plataforma de trabajo (Lumbrera T-03b).
Imagen obtenida de <https://compranet.funcionpublica.gob.mx/>

Adicionalmente se muestra en la figura 3.10, uno de los patios de dovelas para la construcción de los anillos que conforman al TDPP:



Figura 3.10.- Patio de dovelas dispuestas en las plataformas de trabajo (autoría propia).

CAPÍTULO 4: CONSTRUCCIÓN DE LUMBRERAS POR EL MÉTODO DE FLOTACIÓN



Figura D.- Ejemplo de una lumbrera (autoría propia).

4) CONSTRUCCIÓN DE LUMBRERAS POR EL MÉTODO DE FLOTACIÓN

4.1) DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO CONSTRUCTIVO DE LUMBRERAS FLOTADAS

Las lumbreras son pozos verticales que permiten bajar el equipo para la perforación de túneles, realizar otras operaciones para la construcción del mismo y tener un acceso al túnel para mantenimiento durante su operación. También se usan como obras de captación y cárcamos de bombeo (Auvinet *et al.*, 2017).

Uno de los métodos constructivos empleados para la construcción de lumbreras, es el método de Lumbreras Flotadas, cuyas características son:

- Colocación de un muro pantalla con la finalidad de formar una zanja rellena por lodo fraguante que proteja y cubra al suelo debido a los cortes realizados por las excavaciones, así como funcionar como un refuerzo para la retención ante los esfuerzos de corte. Por otra parte, este muro otorgará peso a la lumbrera contra el efecto de subpresión del agua del subsuelo y emersión.
- Colocación de lodo bentonítico para ademar y garantizar estabilidad durante las actividades de excavación simultáneamente.
- Compensar el volumen que ha sido excavado, con el lodo bentonítico y evitar una falla por subpresión o por el empuje lateral del subsuelo.
- Construcción de los elementos del tanque de flotación en superficie, para la posterior construcción de los elementos de la lumbrera, durante el proceso de inmersión del tanque de flotación en el lodo, como el muro estructural.

(<https://compranet.funcionpublica.gob.mx/>,2017)

Para ejecutar correctamente estas estructuras, se deben considerar tres aspectos principales:

- Control preciso y estricto del equilibrio y balance del tanque de flotación durante su inmersión, por medio de los equipos de control (grúa, malacates, plumas de izaje) y de la inyección del aire comprimido.
- Efectuar con rapidez la aplicación del lodo bentonítico, como agilizar el proceso de inmersión del tanque, para evitar la degradación de la cohesión entre las partículas del lodo.
- Mantener un riguroso control de calidad para las características y propiedades de los lodos.

(<https://compranet.funcionpublica.gob.mx/>,2017).

El lodo bentonítico es un material constituido por bentonita, cuyo comportamiento es similar al de una arcilla, que no pierde consistencia ni estabilidad, al momento de agregar grandes cantidades de agua. La bentonita es una roca, cuyas características permiten expandir su volumen al ponerse en contacto con el agua, dando una masa voluminosa y viscosa (Ceballos, 2011).

Las propiedades principales que contiene el lodo bentonítico son:

- **Densidad:** Permite que el lodo ejerza la contrapresión necesaria en las paredes de excavación.
- **Viscosidad:** Define la resistencia del fluido.
- **Porcentaje de arena:** Es una medida que considera la inclusión del lodo bentonítico en el sitio de colocación, y su mezclado con el material del terreno; a menor porcentaje, mayor es la calidad del lodo.
- **pH:** Indica si el material es equilibrado, para que el lodo sea estable y evite el fenómeno de sedimentación.
- **Tixotropía:** Indica la capacidad del lodo para pasar de un estado consistente a uno líquido al estar en movimiento y volver a dicho estado al estar en reposo.

Para el caso del proyecto las características del lodo bentonítico del proyecto son las que se presentan en la tabla 4:

Tabla 4.- Características del lodo bentonítico.

Características	Valor
Peso volumétrico, γ	10.70 $\frac{kN}{m^3}$
Viscosidad Marsh	32.00-50.00 s
Contenido de arena	5.00%
pH	7-11

Para que el lodo bentonítico logre con eficacia estas propiedades, se le debe de dar una hidratación mínima de 8 horas en las fosas de lodo bentonítico.

Por otra parte, el lodo fraguante, es similar al lodo bentonítico, con la diferencia que este lodo al fraguar, funciona para estabilizar el terreno que se ha excavado, y otorgar peso a la lumbrera para evitar problemas por efectos de la subpresión, se compone de una mezcla de bentonita, cemento y agua; sus características son las de la tabla 4.1 :

Tabla 4.1.-Características del lodo fraguante.

Características	Valor
Peso volumétrico, γ	14.00 $\frac{kN}{m^3}$
Módulo elástico, E	64.00 MPa
Resistencia a la compresión simple (a los 14 días), q_u	1.00 MPa

El método constructivo de la Lumbraera Flotada, consiste a grandes rasgos en los siguientes procesos:

- Construcción de los brocales exterior y primer brocal interior (provisional).
- Excavación perimetral con equipo guiado, con relleno simultáneo de lodo fraguante para construcción de muro pantalla.
- Demolición del primer brocal provisional y construcción del segundo brocal para redefinir la zona de excavación del núcleo de la lumbrera y de la zanja anular, para muro estructural.
- Excavación de zanja anular para poder dar un espaciamiento al muro estructural de las lumbreras, por medio de equipo guiado y su posterior relleno mediante inyección de mortero.
- Excavación del núcleo de la lumbrera mediante equipo no guiado (almeja libre) sustituyendo el material excavado por medio de lodo bentonítico.
- Instalación de elementos de balance y sujeción sobre el brocal exterior para la instalación del tanque de flotación durante su inmersión, garantizando el balance del mismo.
- Construcción del tanque metálico, y montaje sobre vigas cerrojo, para su posterior colado de la losa de fondo sobre el tanque metálico.
- Inmersión del tanque de flotación sobre el lodo bentonítico garantizando su estabilidad.
- Construcción del muro estructural durante la etapa de inmersión y expulsión del lodo bentonítico, para la posterior preparación de los portales de acceso y/o salida.
- Inyección de mortero en el fondo de la excavación (embebiendo al tanque de flotación) y zanja anular, garantizando el equilibrio de fuerzas debido al peso ejercido por este volumen contra el de las fuerzas de subpresión.
- Construcción de traveses de liga para conectar de la estructura de la lumbrera con el brocal exterior, garantizando su funcionamiento y comportamiento como cuerpo único.

(<https://compranet.funcionpublica.gob.mx/>,2017).



Figura 4.- Construcción de una lumbrera, mediante muros Milán (autoría propia).

4.2) BROCALES

Una vez que los caminos de penetración y plataformas de trabajo han sido construidos, y se han distribuido los diversos espacios del diseño de operación para trabajar adecuadamente en los sitios de trabajo, se procede a la construcción de las lumbreras.

La actividad de arranque de las lumbreras, son los brocales, estos elementos son estructuras de concreto armado, similares a un bastón invertido, que forman un anillo perimetral. El brocal consta de 2 partes:

- **Alerón:** Es la parte horizontal superior de los brocales y se encuentran al nivel del terreno, este alerón será ampliado para poder ligar el muro pantalla, esta ampliación es conocida como nariz.
- **Pata:** Es la parte vertical del brocal, y estará embebida en la plataforma de trabajo y con el material del subsuelo.

La función de este elemento es delimitar las zonas donde se llevaran a cabo las actividades de excavación para las zanjas de las actividades posteriores, como lo son el muro pantalla, muro estructural y la excavación del núcleo, también para el caso de los brocales permanentes, son un apoyo estructural para el proceso de inmersión del tanque de flotación para las diversas estructuras embebidas en los brocales como lo son las vigas cerrojo.

Existen 2 tipos de brocales:

- ❖ **Brocales Exteriores:** su ubicación es permanente, y no cambia a lo largo de la construcción de las lumbreras y túneles. Su finalidad es también estructural, y en ella se fijarán algunos elementos para el procedimiento de inmersión del tanque de flotación
- ❖ **Brocales Interiores:** son provisionales y sirven para dar el trazo de 2 instantes constructivos de las lumbreras: la elaboración del muro pantalla, y la elaboración de la zanja perimetral, con la finalidad de dar un espaciamiento de la inyección y expulsión de los lodos durante la inmersión del tanque de flotación, con el objetivo de colocar la losa de fondo de la lumbrera.

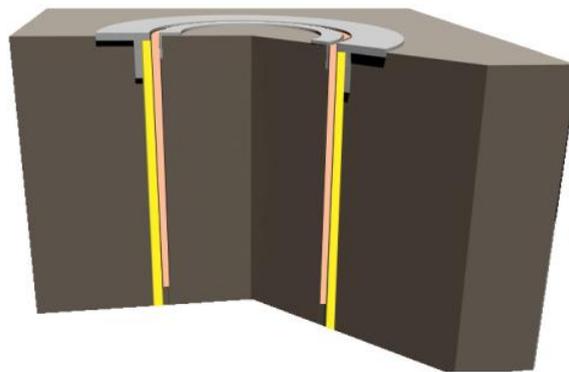


Figura 4.1.- Renderizado de brocales: exterior e interior.
(Cortesía: Ing. Luis Adrián Palomino Cortés)

Se realizan los trabajos de excavación por medio de equipos mecánicos, o una cuadrilla para la ejecución de la zanja perimetral de los brocales, para la instalación de su armado ya habilitado mediante una cuadrilla de fierros, en las plataformas de trabajo.

Se coloca el cimbrado en las zanjas y se realiza el calzado para dar el recubrimiento del acero de refuerzo, citado en los planos estructurales, con la finalidad de evitar el contacto de este material con el terreno natural para evitar problemas por corrosión debido al alto contenido de sales en el terreno. Por último, una vez colocado el acero de refuerzo habilitado para el brocal y para los anclajes de las vigas cerrojo, que se detallarán más adelante, se procede al colado del concreto, para dar inicio a las actividades posteriores.

El **brocal exterior** posee las siguientes características:

- Concreto estructural Clase I, fabricado con cemento resistente a los sulfatos, con base en la especificación: CPC 30 RS, o CPC 40 RS.
- Adición del 5% como mínimo de microsílíce para el concreto.
- Peso volumétrico, $\gamma = 22.00 \frac{kN}{m^3}$.
- Resistencia a la compresión simple a los 28 días, $f'_c = 25.00MPa$, de acuerdo a Norma NMX-C414-ONNCCE, vigente.
- Recubrimiento libre de 6.50cm.

Los **brocales interiores** poseen las siguientes características:

- Concreto estructural Clase II, fabricado con cemento resistente a los sulfatos, con base en la especificación: CPC 30 RS, o CPC 40 RS.
- Peso volumétrico, $\gamma = 22.00 \frac{kN}{m^3}$.
- Resistencia a la compresión simple a los 28 días, $f'_c = 15.00MPa$, de acuerdo a Norma NMX-C414-ONNCCE, vigente.
- Recubrimiento libre de 5.00cm.

Para ambos casos, el acero de refuerzo tendrá un límite de fluencia, $f_y = 412.00MPa$, y de diámetros variables de varilla para los armados, de acuerdo al tipo de brocal.

A continuación se mostrarán las etapas de colocación de los brocales, con el objetivo de observar la ubicación de ellos, haciendo énfasis en los brocales provisionales, para delimitar las actividades de excavación (figuras 4.2-4.5); por otra parte, se observarán en las figuras 4.6-4.8 las secciones de los brocales para que se pueda observar el arreglo del acero de refuerzo para dar forma a los dos tipos de brocales, y también para el caso de la extensión del brocal exterior:

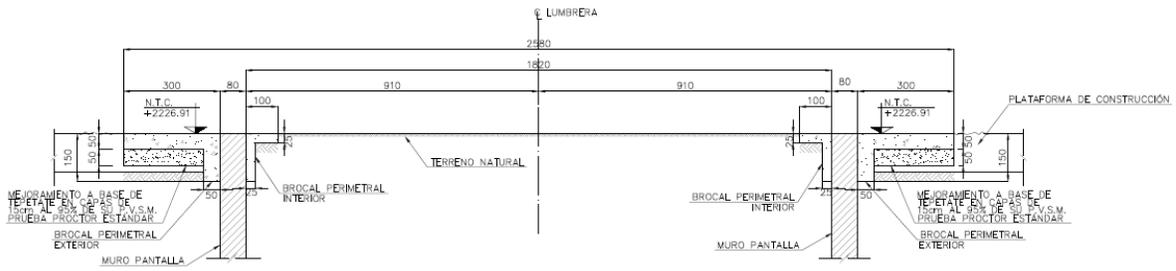


Figura 4.2.- Primera etapa de instalación de brocales.

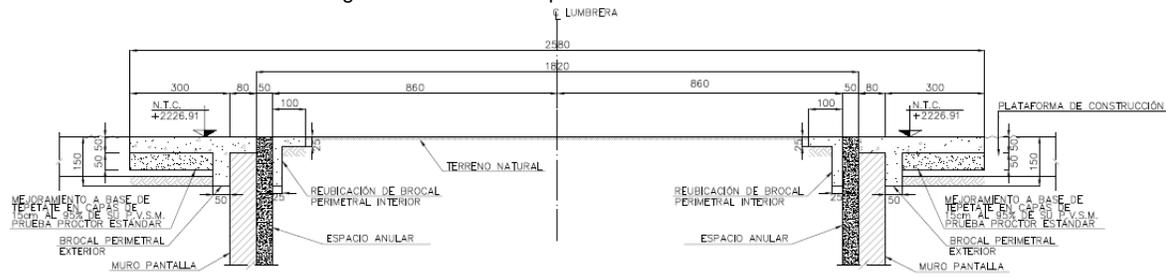


Figura 4.3.- Segunda etapa de instalación de brocales, extensión de brocal exterior y segundo colocación de brocal provisional.

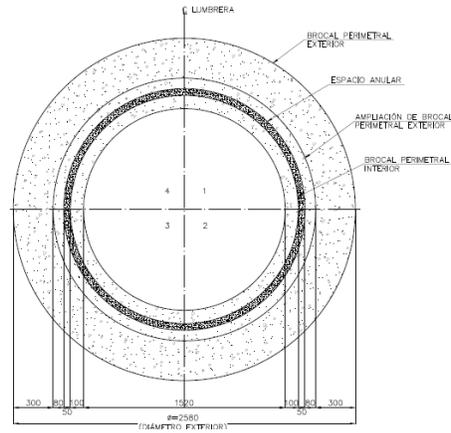


Figura 4.4.- Vista en planta de la segunda etapa; definición de cuadrantes para arreglo de la extensión del brocal exterior.

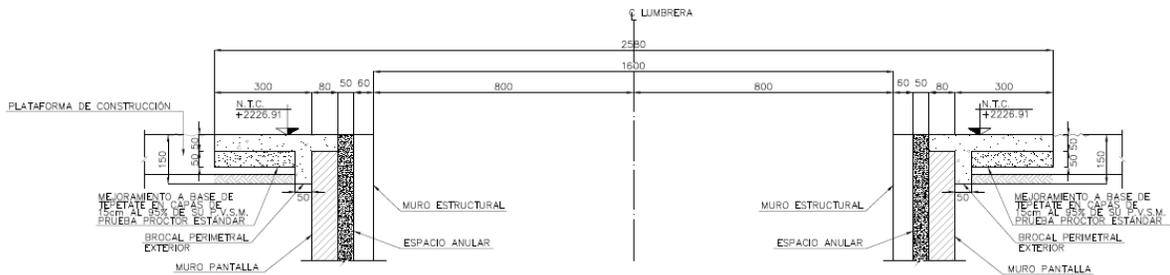


Figura 4.5.- Última etapa, permanencia de brocal exterior con extensión.

Las cuatro imágenes obtenidas de <https://compranet.funcionpublica.gob.mx/>

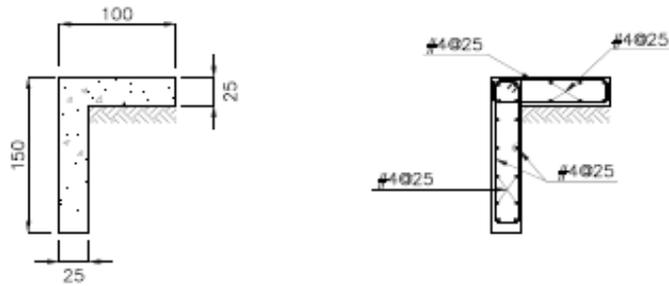


Figura 4.6.- Sección de brocales interiores.

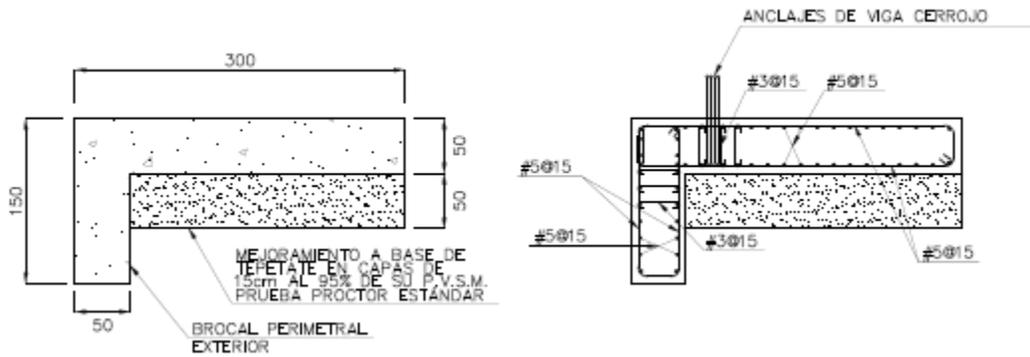


Figura 4.7.- Sección de brocal exterior, sin extensión (o nariz).

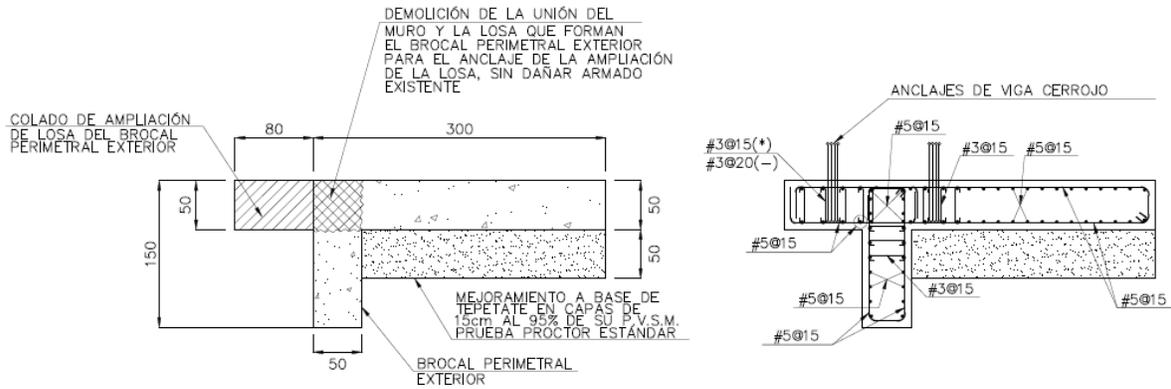


Figura 4.8.- Sección de brocal exterior, con extensión (o nariz).

Las tres imágenes obtenidas de <https://compranet.funcionpublica.gob.mx/>

En la figura 4.4, se muestra la extensión del brocal exterior, conocido como nariz, se realiza una vez fraguado el muro pantalla. Su objetivo es proteger al muro pantalla, debido a las actividades de excavación por medio de maquinaria, de manera que cuando se retire el volumen del material excavado, no maltrate al muro pantalla. Para poder realizar dicha extensión, es necesario, hacer una pequeña demolición del muro pantalla, y sobre ese espacio, se coloca el acero ya habilitado y se hace el colado del concreto de dicha extensión, para poder equilibrar el peso debido a la nariz, se hace un arreglo de colocación, de acuerdo a los cuadrantes de la figura 4.4, que será decidido en obra y siguiendo el planteamiento anterior.

4.3) MURO PANTALLA

Este muro se construye de la necesidad de estabilizar el material del terreno debido a los cortes realizados para la zanja perimetral, evitando caídos y desfragmentación en las paredes verticales del terreno, como brindar peso para compensar el volumen retirado contra el de la fuerza de subpresión; por otra parte, este elemento garantiza la seguridad del personal de obra, durante las actividades posteriores.

Una vez que el brocal exterior y el primer brocal interior se han construido, se procede a hacer un arreglo de excavación con el objetivo de mantener la estabilidad en la zanjas. Las excavaciones se realizan por medio de un equipo guiado, o almeja guiada (como se muestra en la figura 4.9), que permite hacer cortes verticales con mayor orden y precisión que una almeja libre, en espacios reducidos. El arreglo geométrico de excavación consiste en excavar dos tipos de tableros (o mordidas): primarios y secundarios, en diferentes instantes.

Se inicia con los tableros primarios de manera alternada como se muestra en la figura 4.10, para que se pueda colar consecuentemente el lodo fraguante en dichos espacios, procediendo de la misma manera con los tableros secundarios. El lodo fraguante se encontrará en los fosos de almacenamiento de lodo, y será bombeado hasta que este fluido se disponga en las zanjas del muro pantalla, y tendrá las características dispuestas en la tabla 4.1.

Para los tableros secundarios, se hará la excavación de las zanjas teniendo en cuenta que se hará un traslape de 60 cm con cada tablero primario ya terminado; es decir, la extracción del volumen del tablero secundario, incluirá el material del terreno y parte del lodo fraguante de los tableros primarios, en virtud de las dimensiones de la almeja y lograr la curvatura requerida para la sección del muro pantalla, como se observa en la figura 4.11.



Figura 4.9.- Almeja guiada.

Fuente: <http://www.gandara.com.mx/products.php?cat=almejasmuromilan>

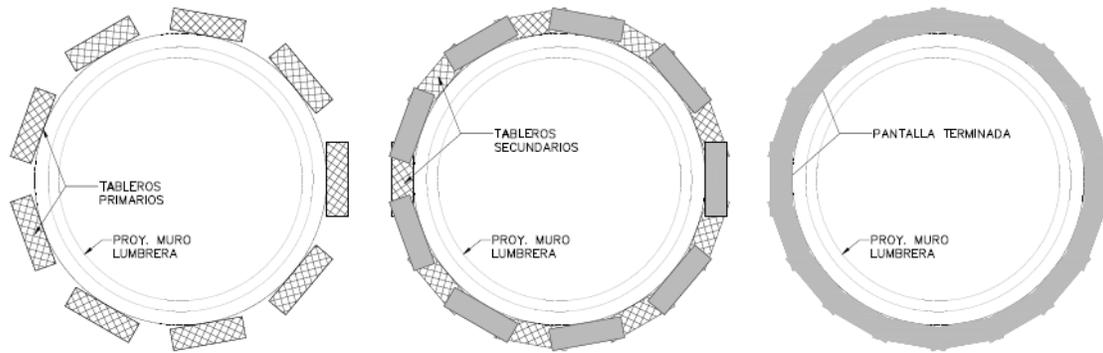


Figura 4.10.- Arreglo de tableros para muro pantalla.

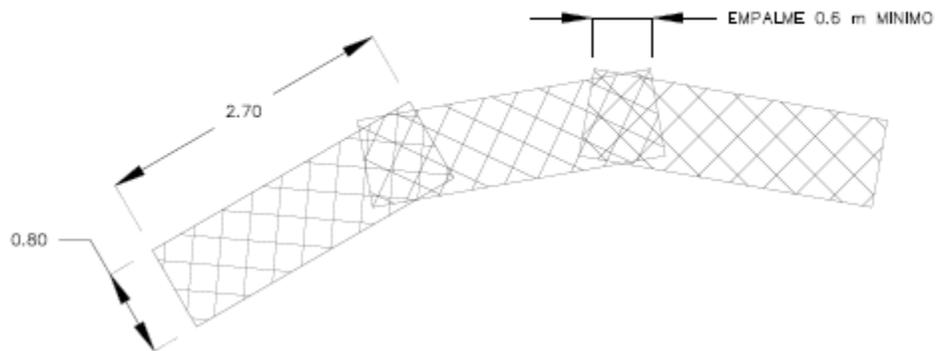


Figura 4.11.- Dimensiones de los tableros para muro pantalla.

Las dos imágenes obtenidas de <https://compranet.funcionpublica.gob.mx/>

Una vez que se ha terminado de construir el muro pantalla, se prosigue con la demolición del primer brocal provisional, para poder dar el espaciamiento de la zanja anular tomando como referencia al segundo brocal provisional, que se construirá de la misma manera que el primero, para su posterior demolición, una vez que inicien los trabajos de excavación del núcleo de la lumbrera. Por otra parte, una vez que el muro pantalla ha fraguado y alcanzado su resistencia para el soporte de las condiciones de carga del subsuelo, se procede a realizar la extensión del brocal exterior para poder fijar el muro pantalla con el brocal definitivo, como se ha hecho mención en el subcapítulo 4.1, referido a los brocales.

4.4) ZANJA ANULAR

La zanja anular (o espacio anular) consiste en una sección estratégica, donde se harán las operaciones de control para la inyección y expulsión de lodo bentonítico para la inmersión del tanque de flotación, por medio de un equipo de mangueras y bombas conectadas a las fosas de los lodos. Posteriormente a este proceso, se llevará a cabo una etapa de relleno para el espacio bajo el nivel del tanque de flotación, ya instalado en el fondo de excavación del núcleo de la lumbrera, y enseguida se hace el relleno del espacio de la zanja anular por medio de mortero. Una vez que se hace dicho relleno, los muros estructurales que se construirán durante la inmersión del tanque de flotación, entran en contacto con la capa de mortero. Finalmente todos los muros y rellenos se conectarán con trabes de liga, que se presentarán más adelante, para que todo el conjunto tenga el comportamiento de un cuerpo único.

Esta zanja se procederá a construir de la misma forma que la zanja para el muro pantalla, es decir, se procederá a un arreglo de tableros, y estará al mismo nivel de fondo de la excavación del núcleo de la lumbrera, con el objetivo de que se dosifique desde allí el lodo, hasta rellenar de manera simultánea y por completo, el volumen que se desplazo del material del subsuelo con el lodo bentonítico.

Posterior a que se ha realizado la zanja anular, se procederá a la demolición del segundo brocal provisional para iniciar con la excavación del núcleo.

4.5) EXCAVACIÓN DEL NÚCLEO

Se le conoce al núcleo, al sector del material del terreno que será excavado para poder crear el orificio principal o de acceso a la lumbrera; su excavación se realiza mediante un equipo de excavación conocido como almeja libre, (o almeja loca), como se muestra en la figura 4.12.

Para poder comenzar con las actividades de excavación de la zanja anular se deben tener hasta el momento, el ademe con lodo bentonítico del espacio anular y el segundo brocal provisional demolido. La excavación del núcleo, se realiza de acuerdo a un arreglo de excavación mediante cuadrantes que se decidirán durante obra, para lograr la estabilidad debido al corte de las excavaciones, y simultáneamente verter el lodo bentonítico para compensar el peso del terreno, de manera similar a la de la zanja anular. Cuando la excavación del núcleo se haya hecho por completo, el lodo bentonítico habrá sustituido por completo al material excavado, teniendo en cuenta que el nivel del lodo bentonítico podrá estar bajo el nivel de tope de concreto del brocal exterior 0.50m como máximo, para poder estabilizar las paredes verticales, referidas al muro pantalla.

Cuando las actividades de excavación del núcleo han llegado hasta la profundidad que el proyecto establece, se tiene que hacer un perfilado de las protuberancias que el muro pantalla pudo haber presentado, para garantizar su verticalidad, quitando aquellas que se hayan presentado en él, y evitar que las actividades posteriores se vean afectadas por la falta de verticalidad.

Para poder llevar a cabo este perfilado, se realiza mediante elementos macizos dentados en la parte inferior y sostenidos por equipos como dragas, que se conocen como trepanos, como se indica en la figura 4.13.

Posteriormente al perfilado del muro pantalla, se comprueba que la curvatura formada por los tableros de este muro formen en conjunto, una circunferencia interior adecuada, mediante un elemento llamado escantillón. El escantillón es una estructura soportada por un par de dragas, y que se le da forma para que coincida con el perímetro del muro pantalla, por medio de este elemento se verifica que se cumpla el diámetro de la circunferencia de la excavación, de tal modo que demande si hay alguna diferencia respecto al diámetro establecido, cómo se indica en la figura 4.14. Una vez que se garantiza la verticalidad, como el cumplimiento del diámetro correcto en toda la profundidad del muro pantalla, se procede a la inmersión del tanque de flotación.

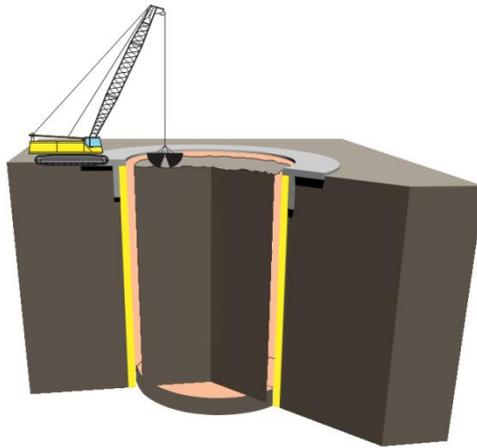


Figura 4.12.- Excavación del núcleo mediante draga equipada con almeja bivalva.

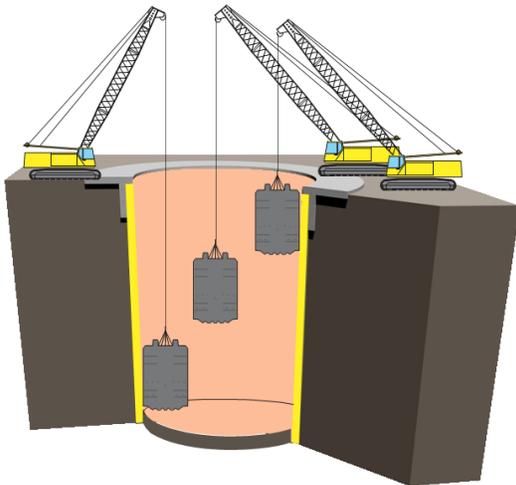


Figura 4.13.- Operación con trepanos en muro pantalla.

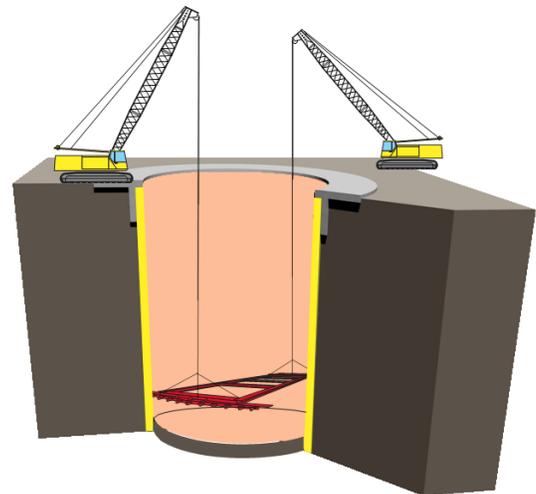


Figura 4.14.- Operación con escantillón en muro pantalla.

(Cortesía de las 3 imágenes: Ing. Luis Adrián Palomino Cortés)

4.6) TANQUE DE FLOTACIÓN

El tanque de flotación es un elemento conformado por un esqueleto de armaduras de perfiles de acero estructural y placas metálicas para cubrir el contorno circular y a las armaduras mismas del lodo bentonítico durante la inmersión del mismo, con apoyo de tuberías de inyección de aire comprimido. Será un soporte para la losa de fondo, que se situará sobre la placa superior del mencionado tanque, sobre la que se harán diversas maniobras para la construcción del túnel, y sobre ella se colocará la maquinaria correspondiente para iniciar la excavación y construcción del túnel.

Los puntos clave del tanque son los siguientes:

- Garantizar la flotación del elemento y evitar hundimientos incontrolables en los instantes de inmersión sobre el lodo bentonítico.
- Garantizar que el conjunto del tanque de flotación y la losa, sea una superficie rígida y uniforme para los procedimientos posteriores.

Simultáneamente a los trabajos de excavación del núcleo de la lumbrera, se inician las actividades para la fabricación del tanque de flotación y elementos auxiliares para este proceso; dentro de estas actividades se harán los ensambles de las piezas de acero estructural indicadas en los planos, los cortes necesarios de alguna de las piezas (por ejemplo: perfiles de acero, cartabones, placas metálicas, entre otros), empleo de soldadura para las conexiones (mediante electrodos serie E70xx), habilitado de acero para la losa de fondo y posterior a ello, preparación para el mezclado del concreto de la misma.

Por otra parte, se preparan otros elementos como las plumas para izaje y control del tanque de flotación, equipadas con polipastos y malacates manuales, para dar equilibrio durante la inmersión del tanque. Cabe destacar que dichos elementos de equilibrio, son exclusivamente para ese objetivo, de manera que en ningún momento son elementos que soporten los diversos casos de cargas, durante el proceso de inmersión del tanque. Las plumas de izaje van ancladas al brocal exterior, para garantizar su fijación en el arreglo y número de plumas de izaje al que se tenga proyectado en los planos.

Una vez que todas las armaduras han sido fabricadas y ubicadas como lo solicita el proyecto para el arreglo del esqueleto del tanque de flotación, se procede a elaborar el contorno perimetral y la tapa superior del tanque de flotación, por medio de placas de acero, es decir, la placa perimetral y la placa tapa, que garantizan el sellado en las fronteras del tanque, mediante soldadura con el personal calificado y experimentado.

A continuación se muestra una tabla que contiene la distribución de los perfiles de acero estructural en las armaduras, y elementos necesarios para garantizar el buen comportamiento estructural del tanque de flotación:

Tabla. 4.2- Elementos estructurales para armaduras (AR-01 a AR-04) de tanque de flotación.

Elemento Tipo	Designación	Descripción
C.I.	2LI 102x10 (14.59 kg/m)	Cuerda inferior
C.S.	2LI 102x13 (19.05 kg/m)	Cuerda superior
D-1	OR 102x6.4 (18.13 kg/m)	Diagonal
M-1	OR 102x6.4 (18.13 kg/m)	Montante
C.P.S.	OR 102x6.4 (18.13 kg/m)	Cuerda perimetral superior
C.P.I.	OR 102x6.4 (18.13 kg/m)	Cuerda perimetral inferior
C.P.M.	OR 102x6.4 (18.13 kg/m)	Cuerda perimetral media
PL Perimetral	Placa lisa 9.5 mm Esp (74.70 kg/m ²)	Placa perimetral (Pared del tanque)
PL Tapa	Placa lisa 9.5 mm Esp (74.70 kg/m ²)	Placa tapa del tanque
PL	Placa lisa 9.5 mm Esp (74.70 kg/m ²)	Placas de conexión
SOL-1	Solera 9.5x76.20 (5.7 kg/m)	Atiesador
SOL-2	Solera 9.5x50.8 (3.8 kg/m)	Placas de conexión

El arreglo de las armaduras que componen al tanque de flotación se distribuyen en planta, así como la distribución de elementos de las armaduras en perfil, como se muestra en la figura 4.15:

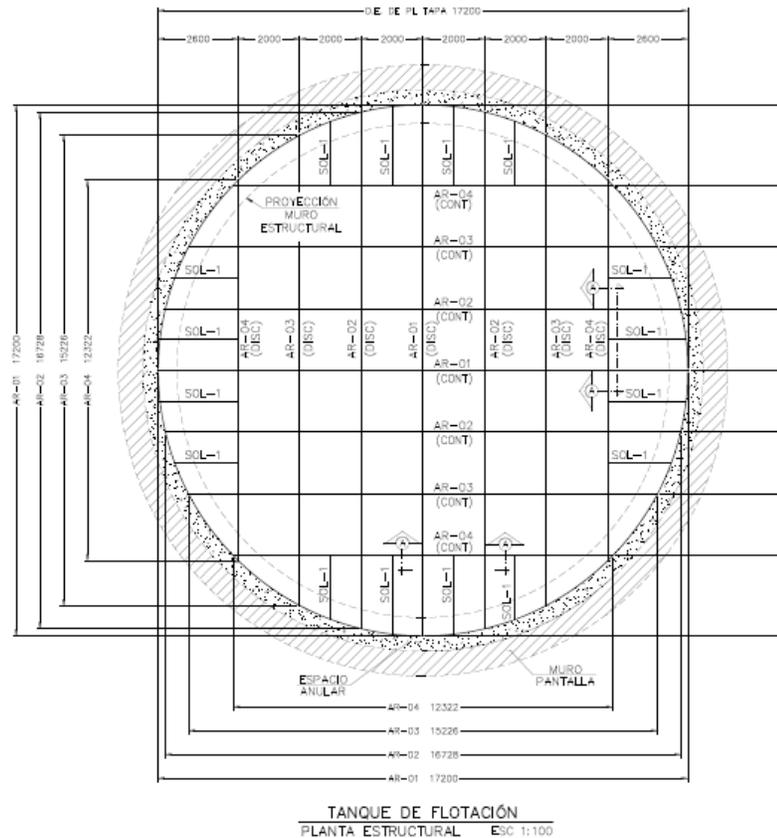


Figura 4.15.- Distribución en planta de armaduras.
 Imagen obtenida de <https://compranet.funcionpublica.gob.mx/>

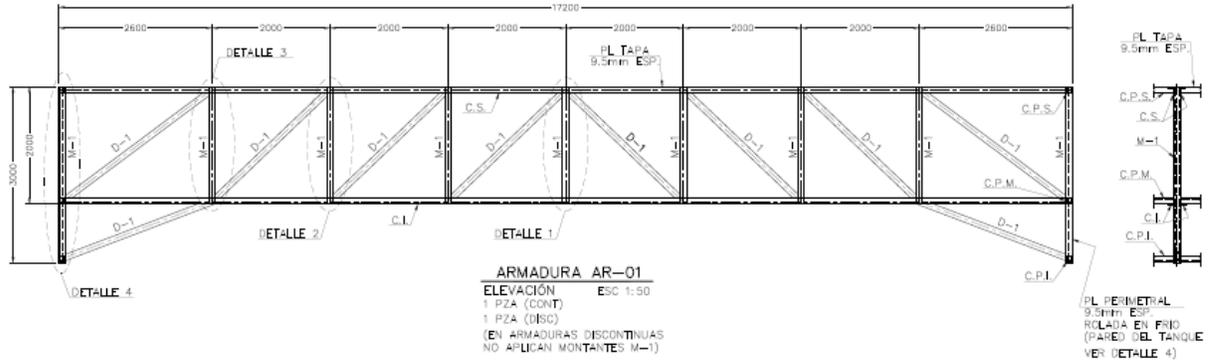


Figura 4.16.- Perfil de armadura tipo AR-01 para tanque de flotación.

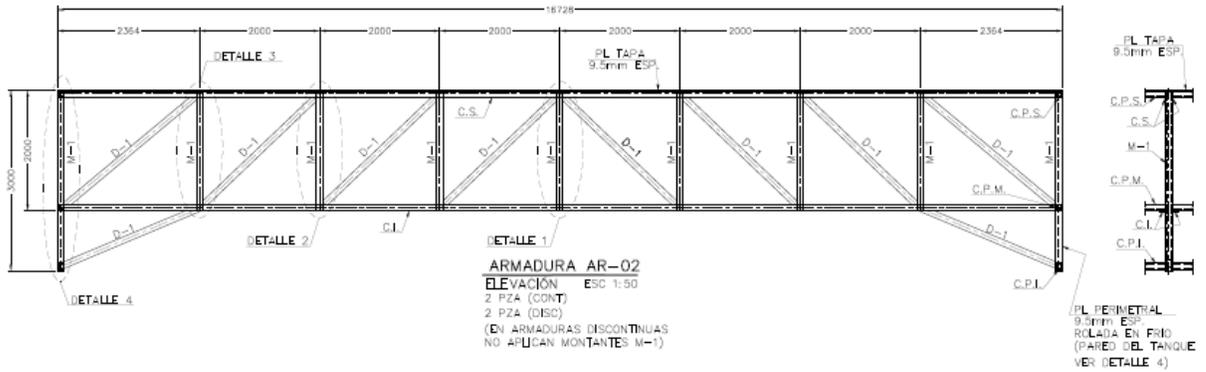


Figura 4.17.- Perfil de armadura tipo AR-02 para tanque de flotación.

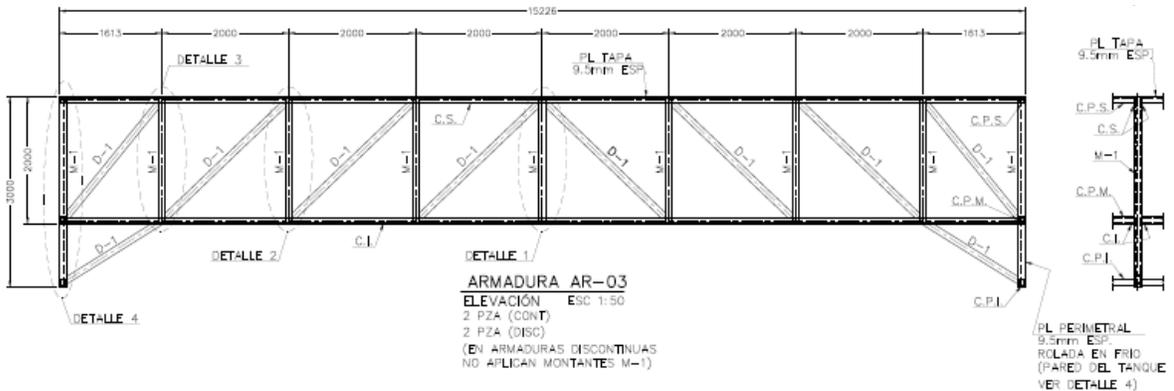


Figura 4.18.- Perfil de armadura tipo AR-03 para tanque de flotación.

Las tres imágenes obtenidas de <https://compranet.funcionpublica.gob.mx/>

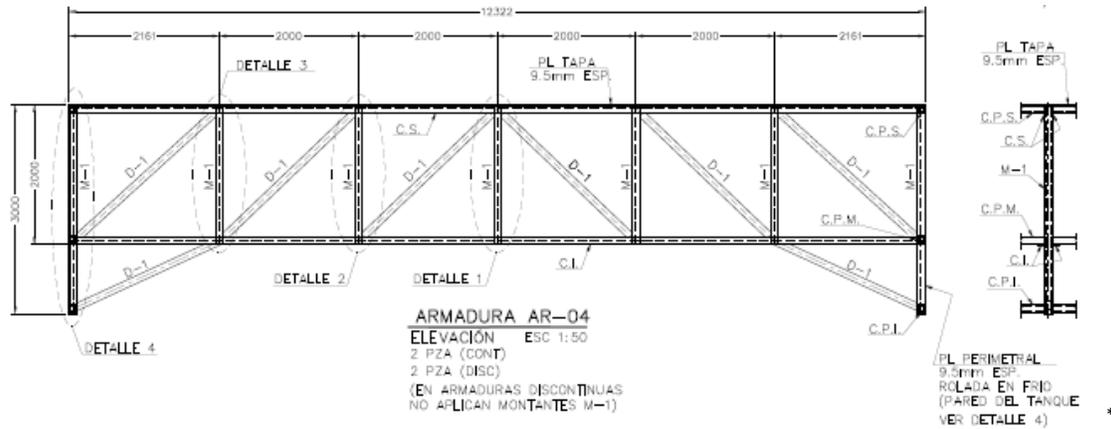


Figura 4.19.- Perfil de armadura tipo AR-04 para tanque de flotación.
 Imagen obtenida de <https://compranet.funcionpublica.gob.mx/>

La placa tapa del tanque de flotación, tendrá distribuidos barrenos, por los cuales se ensamblarán perfiles metálicos tipo OC, por donde se conectarán las tuberías de inyección, mediante ellas se inyectará el aire durante el proceso de inmersión, con el objetivo de lograr el balance al momento de dicha actividad, por efecto de la subpresión del lodo bentonítico contra el peso del tanque de flotación y el muro estructural, evitando que exista algún desnivel en el tanque que pueda poner en riesgo su colocación, y todo lo involucrado en esta actividad.

Los perfiles metálicos del tipo OC para las tuberías de inyección de aire, deben contar con protecciones alrededor de ellas para que el personal de obra pueda identificar la ubicación de dichas tuberías, conocidas como celosías de protección. Además, estas tuberías se sostienen por medio de cartabones, que consisten en placas metálicas soldadas a la placa tapa del tanque, brindándoles rigidez, y por debajo de la placa tapa por sujetadores, (ángulos tipo LI) que conectan a las tuberías con las armaduras que conforman el esqueleto del tanque de flotación. Por otra parte, las tuberías de inyección, deben tener una longitud mayor a la que tendrá el peralte (espesor) de la losa de fondo, para evitar que el concreto al momento de colarse, genere un tapón en las tuberías, por tal motivo, se especifica una longitud mayor que la que tendrá la losa de fondo, medida partir de la placa tapa del tanque.

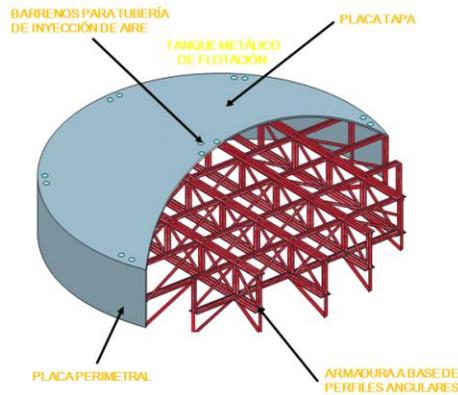


Figura 4.20.- Isométrico a color: esqueleto y placas del tanque de flotación.
 (Cortesía: Ing. Luis Adrian Palomino Cortés.)

Una vez que se tiene el tanque metálico, se procede a trasladarlo por encima de la excavación que se ha realizado en el núcleo de la lumbrera, apoyado sobre unas vigas, que se conocen como vigas cerrojo (de sujeción), similares al funcionamiento de un pasador de puerta, estos elementos a diferencia de los polipastos y malacates, si son estructurales, pero la aportación de las cargas es mínima, puesto que el lodo bentonítico es quien recibe la mayor parte de las demandas durante el proceso de construcción e inmersión del tanque.

Las vigas cerrojo son perfiles metálicos, (para el caso del proyecto, tipo IR) que se sujetan por medio de anclajes, que son paquetes de 4 varillas corrugadas con una serie de dobleces que permiten crear un espacio para que pueda pasar la viga cerrojo; los anclajes como se mencionó en el subtema de los brocales, se encuentran embebidos en el brocal exterior, en una parte del alerón y en la extensión del mismo, por lo que se colocan en el instante en que se ya se tenga dispuesto el acero de refuerzo del brocal y se haga el colado del concreto. En la figura 4.21 se muestra la distribución de estos elementos en el brocal definitivo.

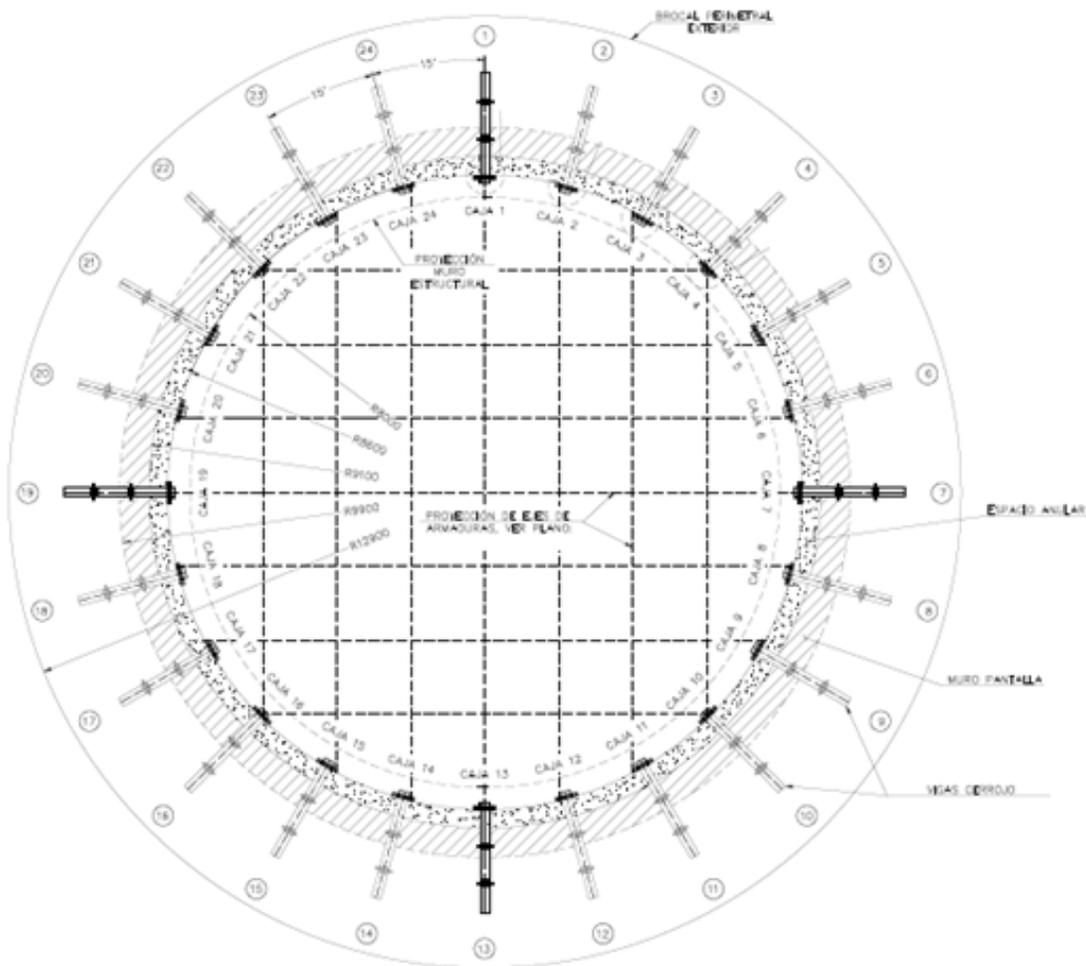


Figura 4.21.- Distribución de vigas cerrojo.
 Imagen obtenida de <https://compranet.funcionpublica.gob.mx/>

A lo largo de la longitud de este elemento estructural, se colocan atiesadores transversales que consisten en placas con espesores variables (como mínimo 13mm), y con ellos se incrementa la resistencia al corte, aportando fuerzas exteriores al alma de la sección de la viga cerrojo ante las condiciones de carga, evitando que se arrugue o que se pandee (De Buen López de Heredia, 2017). También cuentan a lo largo de su longitud de un cubre-placa sobre el patín superior de la viga cerrojo, como un refuerzo adicional, cuyo espesor de placa es de 5 mm. En las figuras 4.22-4.25, se muestra el perfil y sección de estas vigas:

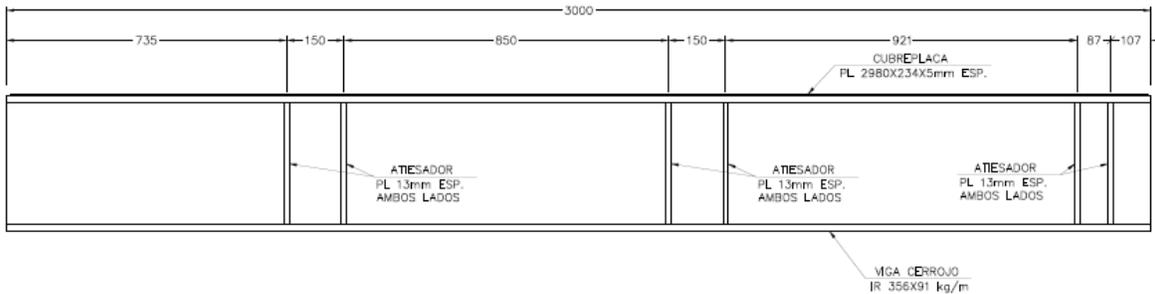


Figura 4.22.- Perfil de viga cerrojo

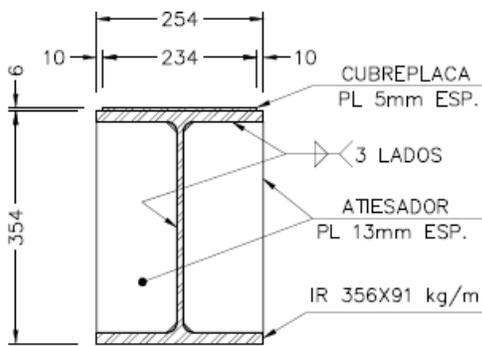


Figura 4.23.- Sección de viga cerrojo.

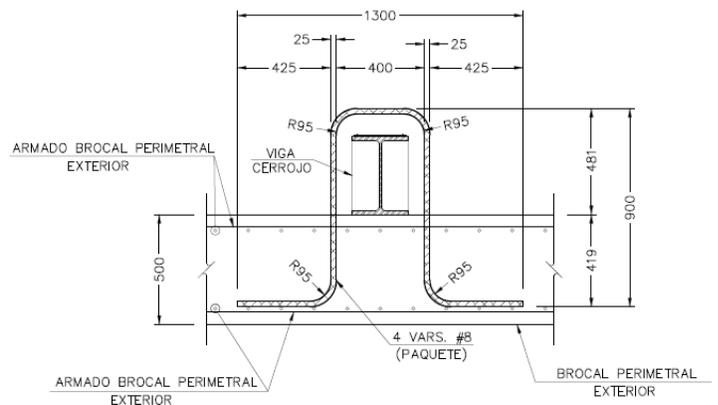


Figura 4.24.- Sección de viga cerrojo y anclajes.

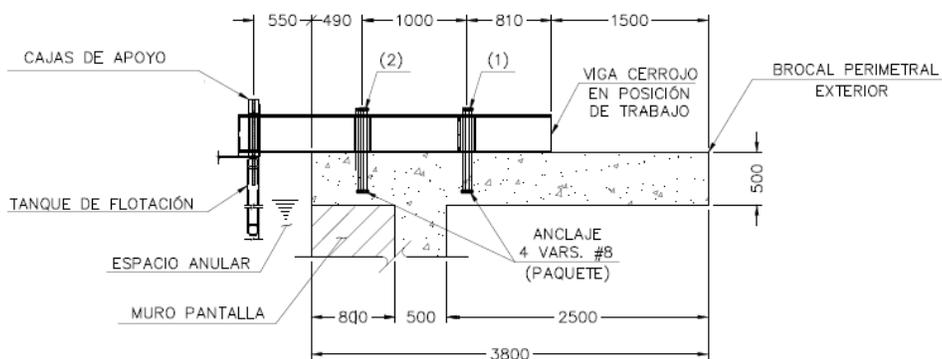


Figura 4.25.- Perfil de viga cerrojo y anclajes.

Las cuatro imágenes obtenidas de <https://compranet.funcionpublica.gob.mx/>

Para que las vigas cerrojo puedan soportar al tanque de flotación, se logra mediante cajas de apoyo. Estas cajas se colocan alrededor de la placa perimetral del tanque metálico, por medio de soldadura. Las cajas de apoyo consisten en marcos de perfiles estructurales y atiesadores que forman un orificio cuadrado, cuya forma permite que se puedan ensamblar las vigas cerrojo perfectamente y a su vez, esta serie de cajas coincide con la distribución de las vigas sujetadas por sus anclajes en el brocal exterior, como se indicó en la figura 4.21. Posteriormente, estas cajas se numeran una vez conectadas al tanque, para poder identificar aquellas que llevarán un elemento de soporte para el traslado del tanque sobre las vigas cerrojo, estos elementos de soporte son conocidos como orejas de izaje, que son pequeñas placas (con espesor de 19mm) con orificios donde un cable metálico pueda introducirse y soportar el peso de la estructura por medio de un balancín sustentado a su vez por una grúa.

El traslado del tanque se hace por medio de un par de mecanismos como los que se han descrito en el párrafo anterior, es decir: una grúa que sostiene por medio de cables y un balancín a dicho elemento, mediante orejas de izaje y placas pasantes. El balancín es un perfil estructural (tipo OC) cuya longitud es variable por cada lumbrera en función de su diámetro, sin embargo, es menor al diámetro del tanque metálico, con el fin de que este balancín coincida con la posición de dos cajas de apoyo. El balancín tendrá a cada 100mm de separación en cada extremo de su longitud una placa pasante (a eje de pieza). La placa pasante atraviesa el balancín y será soldada para que pueda soportar por medio de un cable tipo boa con alma de acero, al tanque a través de 2 perforaciones en cada extremo de esta placa (cuyo espesor es de 19mm), esto es, un orificio se encuentra por arriba y otro por debajo del balancín. El orificio inferior conecta con las orejas de izaje por medio del cable, mientras que, por la parte superior se hace un arreglo geométrico para que el cable sea sostenido por el gancho de la grúa; este arreglo geométrico consiste en formar un triángulo cuyos vértices tengan el mismo grado de inclinación, que puede variar entre 45 a 60 grados. Las siguientes figuras indican el arreglo de los elementos a los que se ha hecho mención: cajas de apoyo, orejas de izaje, placas pasantes, balancín y el arreglo del cable, para las operaciones de traslado del tanque metálico.

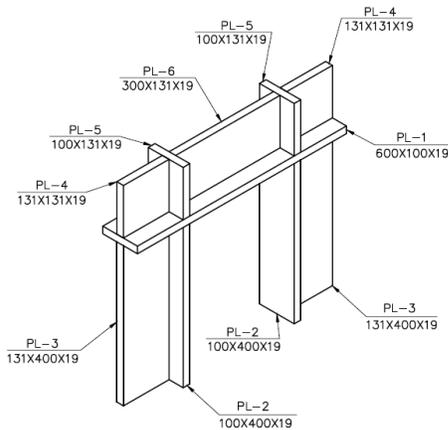


Figura 4.26.- Isométrico de caja de apoyo.

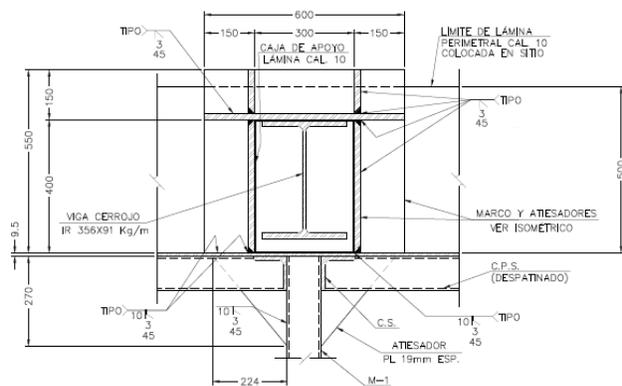


Figura 4.27.- Sección de caja de apoyo.

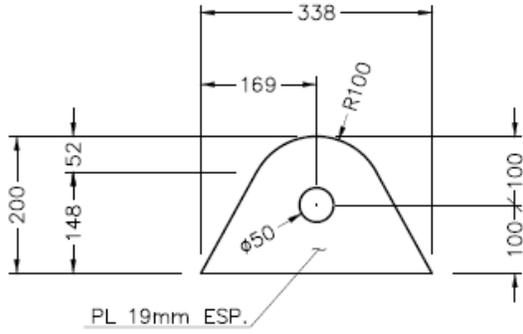


Figura 4.28.- Detalle de oreja de izaje.

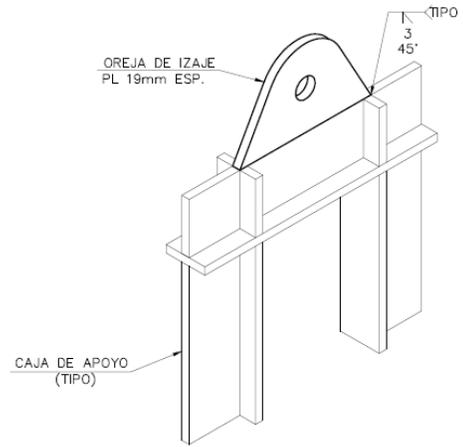


Figura 4.29.-Isométrico de caja de apoyo equipado con oreja de izaje.

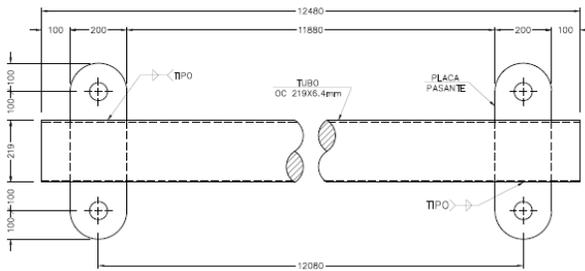


Figura 4.30.- Detalle de balancín.

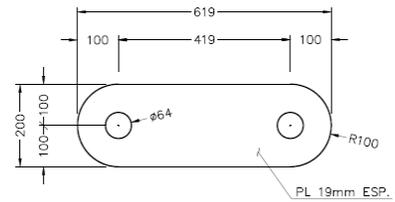


Figura 4.31.- Detalle de placa pasante.

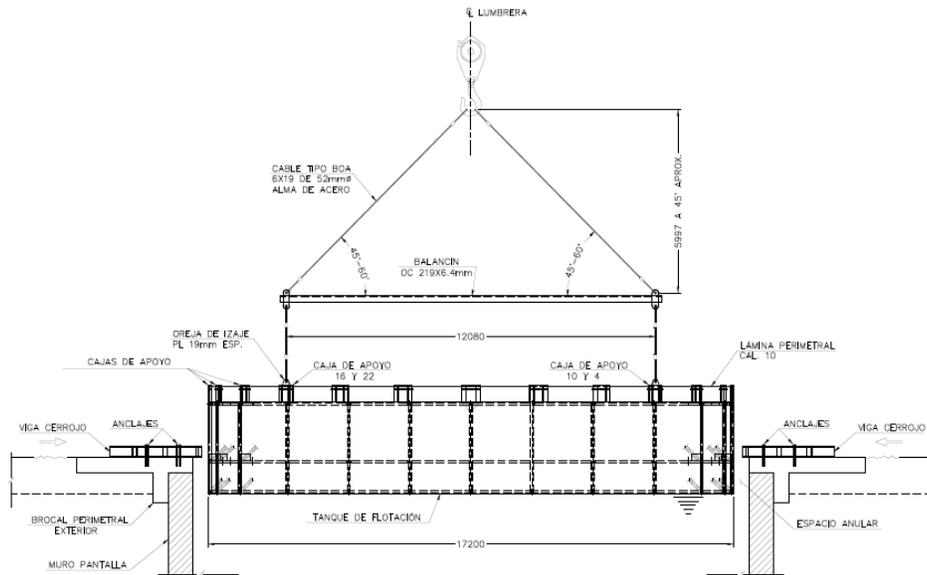


Figura 4.32.- Conjunto de elementos para traslado de tanque.

Las cinco imágenes obtenidas de <https://compranet.funcionpublica.gob.mx/>

Para la unión de todas las piezas que se han mencionado en este capítulo, se hace uso de soldadura, las especificaciones de ella, así como su aplicación son las siguientes:

- Electrodo Serie E70xx.
- Empleo del Código AWS D1.1, en su versión vigente.
- Las estructuras serán íntegramente soldadas con cordón continuo, con un espesor del 70% del mínimo de la pieza a soldar.
- La soldadura sólo podrá ser aplicada por el personal calificado de acuerdo al Código AWS D1.1.
- Evitar los fenómenos de: torcedura y flambéo, para el material que será soldado.
- Las superficies que se les aplique la soldadura estarán libres de óxido, grasa, escoria o pintura.
- Cumplir con los requerimientos del Código AWS, para electrodos con bajo contenido de hidrógeno, para su manejo, almacenamiento y horneado, así como contar con hornos portátiles para su uso en campo.
- Durante el montaje no se deberán incluir piezas deformadas debido a golpes.
- Aplicación de capa protectora anticorrosiva tipo: Comex 100, o similar preparando antes la superficie ante cualquier contaminante u obstáculo que evite la adherencia del producto.

A continuación se muestra en la tabla 4.3, la simbología concerniente a la soldadura, donde se indican aspectos como: tipo y posición de soldadura, aplicación y longitud por donde deberá aplicarse el cordón de la soldadura:

Tabla 4.3.-Simbología de soldadura.
Tabla obtenida de <https://compranet.funcionpublica.gob.mx/>

SIMBOLOGÍA DE SOLDADURA			
TIPO DE LA SOLDADURA	FILETE	BISEL (*)	ABOCINADO
POSICIÓN DE LA SOLDADURA			
LADO DE LA FLECHA			
OTRO LADO DE LA FLECHA			
AMBOS LADOS			
APLICACIÓN DE LA SOLDADURA			
SOLDADURA DE TALLER	SOLDADURA DE CAMPO	ALREDEDOR	
LONGITUD DE CORDONES			
TODA LA LONGITUD	PARCIAL	INTERMITENTE	
(*) CUANDO NO APAREZCA EN EL SIMBOLO EL VALOR DE "A" SE TOMARA ESTE COMO CERO			
SOLDADURA DE FILETE SIN DIMENSIONES, ESPESOR DEL CORDÓN IGUAL AL 70% DEL MÍNIMO ESPESOR DE LA PIEZA A SOLDAR			

4.7) CONSTRUCCIÓN DE LOSA DE FONDO

Los trabajos inician una vez que el tanque se ha montado sobre las vigas cerrojo, y el lodo bentonítico dispuesto en la zanja al nivel que se ha indicado antes, una vez fijada la posición del tanque sobre estos elementos y las piezas metálicas ya instaladas para que el concreto no se filtre en los orificios donde se colocarán los elementos de inyección del aire comprimido, se hacen las preparaciones para la construcción de la losa de fondo.

Se prepara la cimbra para delimitar las zonas donde se colocará el concreto reforzado de la losa de fondo, simultáneamente se empiezan las actividades del habilitado del acero de refuerzo para su posterior colocación y calzado para dar el recubrimiento necesario. Esta losa de fondo constará de una parrilla superior e inferior, varillas longitudinales inferior y superiores para unir las varillas de las parrillas, también se tendrán soportes tipo "Z" para incrementar la resistencia de carga de la losa. Sobre parte de las orillas de la losa de fondo, se construirá parte de una trabe de borde, cuyo contorno es circular y que permitirá la entrada del equipo de excavación. Dentro de este perímetro que forma esta trabe, (ubicada en el muro estructural) se hará un armado diferente al de todo el muro, y se dará detalle de ella, en el siguiente subcapítulo. Este sector será posteriormente demolido para la entrada de la maquina tuneladora, y forma parte de la preparación de los portales de entrada y de salida del túnel.

Para el caso de la construcción de la losa de fondo, también se construirá una parte del muro estructural (3.00m), que se describirá posteriormente para poder continuar con el proceso de inmersión y la continuidad de este muro. Por otra parte para el colado del concreto de la losa de fondo y brindar el espesor indicado en el proyecto se hará en 3 etapas de colado (juntas de colado), y cada que se haga una de ellas, la superficie que se le adicionará la capa superior de concreto deberá estar limpia, libre de polvo, grasa u otros materiales, además, para garantizar la adherencia entre el concreto previamente colado con concreto fresco, se le hará una aplicación de adhesivo estructural, siguiendo las indicaciones que brinde el fabricante de este producto para su aplicación.

Se deberán tomar en cuenta, las siguientes características de los elementos de concreto reforzado para su correcta construcción:

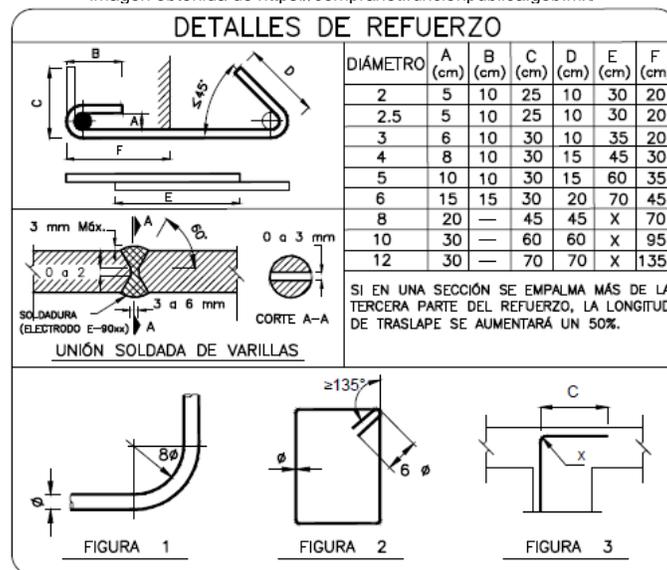
- Espesor total de la losa: 150.00cm
- Número y espesor de subcapas de la losa: 3 subcapas de 50.00cm
- Peralte de trabe de borde: 90.00cm
- Espesor del muro estructural: 60.00cm
- Recubrimiento en losa de fondo: 6.50 cm
- Recubrimiento en muro estructural: 6.50cm

Las especificaciones de la **losa de fondo, trabe de borde y muro estructural** son las siguientes:

- Concreto estructural Clase I, fabricado con cemento resistente a los sulfatos, con base en la especificación: CPC 30 RS, o CPC 40 RS.
- Adición del 5% como mínimo de microsílíce para el concreto.
- Peso volumétrico, $\gamma = 22.00 \frac{kN}{m^3}$.
- Resistencia a la compresión simple a los 28 días, $f'_c = 35.00MPa$, de acuerdo a Norma NMX-C414-ONNCCE, vigente.
- Adhesivo estructural tipo SIKADUR 32, o similar para unión de concreto existente y concreto fresco.

- Para aquellas varillas que sean conectadas mediante soldadura, se utilizarán electrodos de la serie E-90xx.
- No se deberá traslapar más del 50% del refuerzo en una sola sección.
- Longitudes de traslape y anclaje, y dobleces para las varillas que se sean indicadas en el proyecto, se deberán efectuar bajo lo indicado en la tabla 4.4.
- Los dobleces de varilla se deberán hacer en frío, sobre perno de diámetro mínimo e igual a 8 diámetros de la varilla, de acuerdo a lo indicado en la tabla 4.4
- Todos los estribos se construirán como lo establece la figura 2 de la tabla 4.4, exceptuando en las piezas, donde no se indique.
- No se admitirán traslapes en varillas del no. 8 o mayor; para tal caso, se usarán conectores mecánicos siguiendo las instrucciones del fabricante de dichas piezas, o bien, se hará la aplicación de soldadura, como lo indica el detalle de: Unión soldada de varillas de la tabla 4.4, cuya resistencia de dicha unión debe ser al menos 1.25 veces la capacidad de la varilla.
- Para los casos que se requieran estribos o grapas, la primera pieza será colocada a 5.00cm del paño del apoyo
- Las varillas que no tengan indicado el detalle del doblez en los extremos, deben de quedar rematadas en gancho estándar la longitud "c", hasta el extremo del elemento perpendicular, de acuerdo a la figura 3, de la tabla 4.4.

Tabla 4.4.- Conexiones y arreglos para acero de refuerzo.
 Imagen obtenida de <https://compranet.funcionpublica.gob.mx/>



Por otra parte, el **acero de refuerzo** tendrá un límite de fluencia, $f_y = 412.00MPa$.

A continuación se muestran de las figuras 4.33-4.36, los detalles estructurales de la losa de fondo, trabe de borde y parte del muro estructural, que serán construidos para iniciar el proceso de inmersión del tanque de flotación, como la construcción del muro estructural en etapas. Se ha tomado como ejemplo la lumbrera T-00, para las figuras mencionadas:

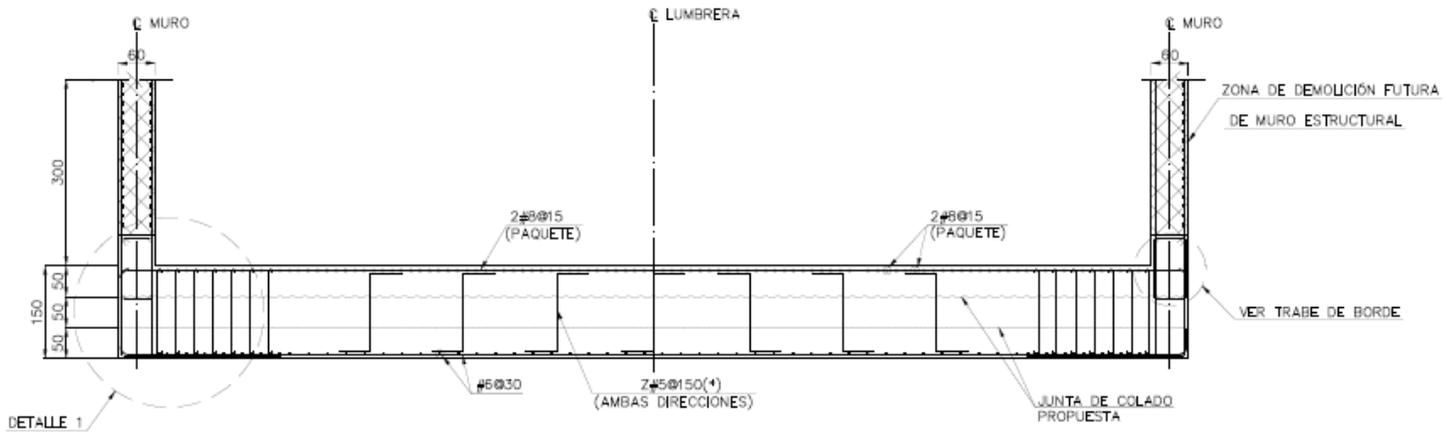


Figura 4.33.- Perfil de losa de fondo, trabe de borde para portales y zona de demolición futura de muro estructural.

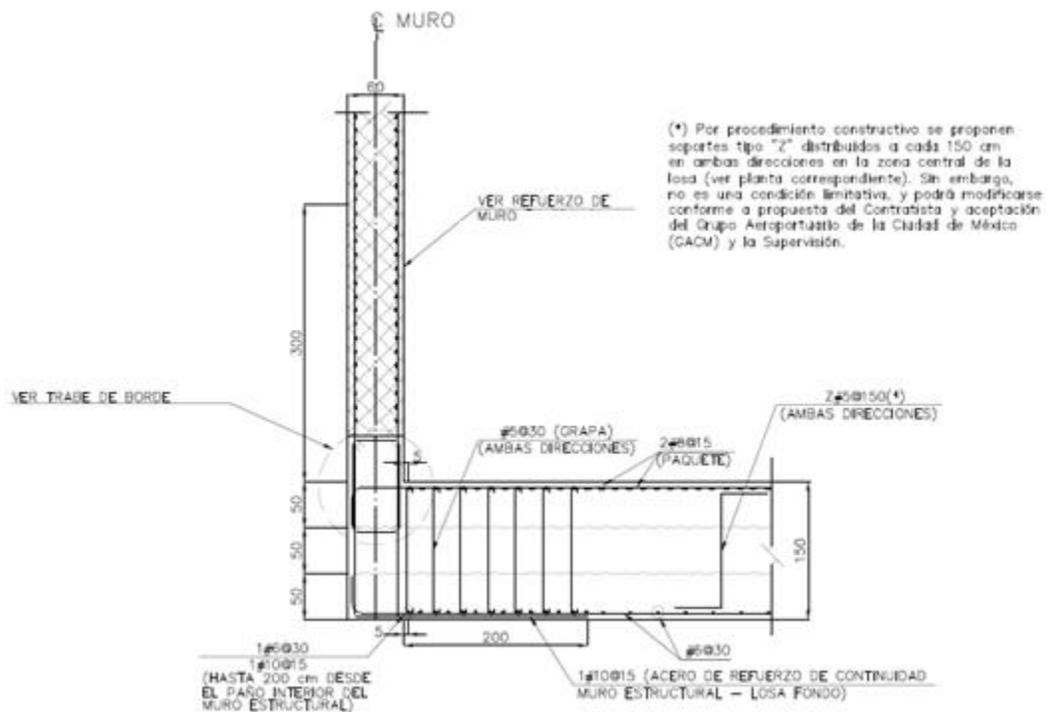


Figura 4.34.- Detalle 1: Armado para losa de fondo, trabe de borde para portales y muro estructural.

Las dos imágenes obtenidas de <https://compranet.funcionpublica.gob.mx/>

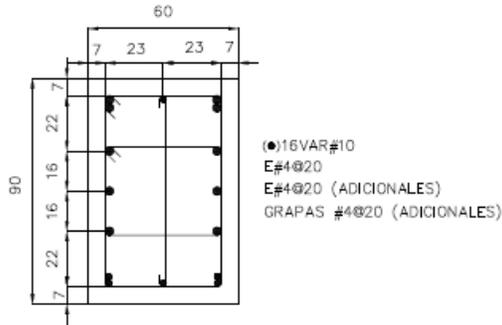


Figura 4.35.- Sección de trabe de borde de portales en contacto con losa de fondo.

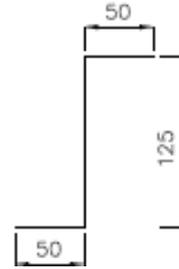


Figura 4.36.- Detalle de varillas de soportes tipo "Z".

Las dos imágenes obtenidas de <https://compranet.funcionpublica.gob.mx/>

4.8) INMERSIÓN DEL TANQUE DE FLOTACIÓN Y CONSTRUCCIÓN DE MURO ESTRUCTURAL

Una vez que la losa de fondo ha sido construida con éxito, como los elementos: trabe de borde y parte del muro estructural, se procede a operar con los elementos de control del tanque de flotación. El par de grúas se encargarán de realizar la inmersión del tanque sobre el lodo bentonítico, mientras los malacates en conjunto con las plumas de izaje y las tuberías de inyección de aire comprimido, establecerán el equilibrio y demandarán si hay alguna discrepancia respecto a la horizontalidad del tanque de flotación para corregir a tiempo el desnivel que se pudiera presentar, mientras el lodo bentonítico equilibra las fuerzas debido al peso del tanque a medida que va bajando y construyendo el muro estructural. Mientras esto sucede, las vigas cerrojo sostienen una parte del peso de esta estructura introduciéndose en espacios dispuestos para su ensamble, en el concreto armado de los muros de los colados subsecuentes.

La cantidad de etapas de inmersión dependerán de la altura de los colados subsecuentes (o segmentos de muro) que conforman al muro estructural, como de la profundidad de excavación, teniendo en cuenta, que el muro estará sobre el nivel tope de concreto de la losa de fondo, e inmediatamente arriba de la trabe de borde de la losa, hasta el nivel tope de concreto del brocal exterior. Para tal efecto, la propuesta del proyecto para el muro estructural, (tomando como referencia la lumbrera T-00) se hará en 8 colados subsecuentes, considerando que la altura de cada uno de ellos es de 2.44m, y una primera etapa de colado de 3.00m de muro estructural, hasta que el tanque de flotación entre en contacto con el fondo de la zanja de excavación del núcleo de la lumbrera.

Respecto al primer colado, se tienen que dejar expuestos los disparos del acero para que se puedan unir o traslapar el acero de refuerzo subsecuente de los muros y dar continuidad al muro, y sucesivamente seguir con este procedimiento. Los disparos son simplemente las varillas de acero de refuerzo de los muros a los que se tiene deseado continuar para construir los muros superiores.

La construcción de los muros será a la altura del nivel tope de concreto de los brocales, para facilitar la ejecución las actividades correspondientes: habilitado y colocación del acero, colocación de cimbra, colado de concreto y fraguado, para posteriormente retirar la cimbra, y continuar con el siguiente muro (colado subsecuente) y repetir el proceso.

Cada que se inicia la construcción de uno de los muros subsecuentes, se irá bajando la estructura ya construida, con apoyo del par de sistemas de grúas, equilibrada a su vez por las tuberías de inyección de aire comprimido y el sistema de malacates-plumas de izaje, una vez que se hayan desplazado las vigas cerrojo de las cajas de apoyo para su posterior ensamble en las siguientes cajas de apoyo de los muros que serán construidos. Simultáneamente, se lastrará el lodo bentonítico durante este proceso de inmersión, esto es, el volumen del lodo será agregado o desplazado con la finalidad de equilibrar las fuerzas y lograr un buen balance y operación durante la inmersión.

El sistema de malacates-plumas de izaje serán distribuidos a cada 90°, y habrá cuatro de ellos (a 0°, 90°, 180°, 270° respectivamente) y se puede tomar como punto de partida los ejes cardinales o bien la dirección del túnel y distribuirlos como se hizo mención. Estos sistemas sujetarán a los muros para su estabilidad mediante ganchos de izaje; los ganchos de izaje son varillas con dobleces, cuyo arreglo geométrico permiten que el cable de los malacates pueda pasar a través de él, además estas piezas van soldadas con parte del acero de refuerzo y embebidas en el concreto de los muros que forman parte del muro estructural.

En cada una de las juntas de los colados subsecuentes, se hace la instalación de un elemento plástico llamado banda ojillada. Esta banda, impide que se pueda infiltrar el agua a través de las juntas de los muros, es decir, es un elemento sellador; su colocación al ser embebida en el concreto brinda un beneficio para prolongar la vida útil del concreto y evitar el deterioro del mismo. Por otra parte, se respetarán los espacios donde se ubicarán las trabes de borde y los armados para los portales del túnel, como las trabes de borde concernientes a los colectores, proporcionando el habilitado y colocación del arreglo del acero de refuerzo que se solicita en el proyecto.

El proceso terminará una vez que el tanque de flotación se desplante en el nivel de fondo de excavación del núcleo, como se ha hecho mención; el lodo bentonítico que se haya retirado durante este proceso será transportado mediante pipas hacia un banco de tiro designado por la dependencia. En las figuras 4.37-4.52, se muestran los detalles constructivos y estructurales respecto al muro estructural, para que se pueda apreciar con mayor detalle:

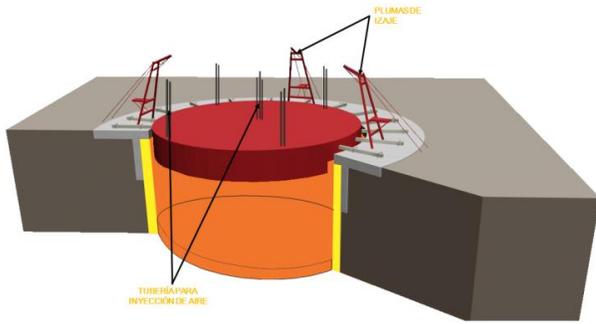


Figura 4.37.- Preparación del tanque metálico para los colados de losa de fondo y muro estructural.

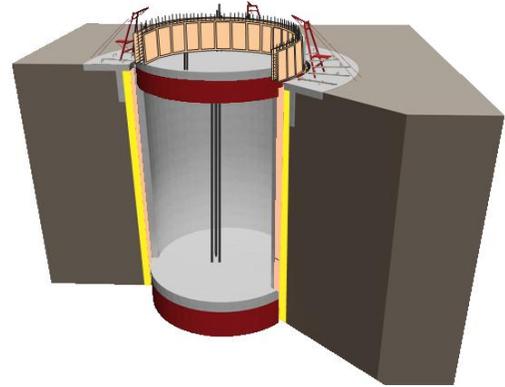


Figura 4.38.-Preparación para inmersión del tanque y colados subsiguientes.

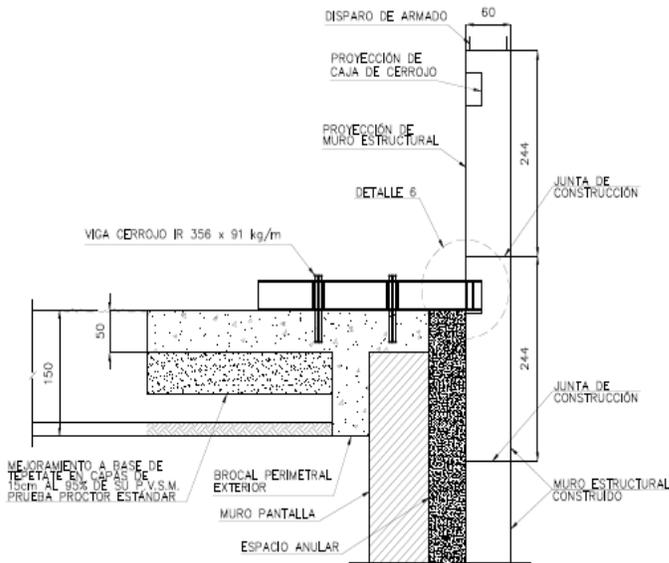


Figura 4.39.- Perfil de colados subsiguientes de muro estructural.

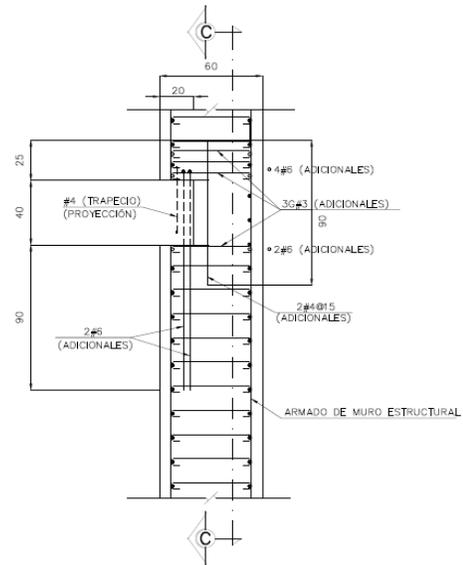


Figura 4.40.-Detalle 6 para espacios de apoyo para vigas cerrojo en colados subsiguientes.

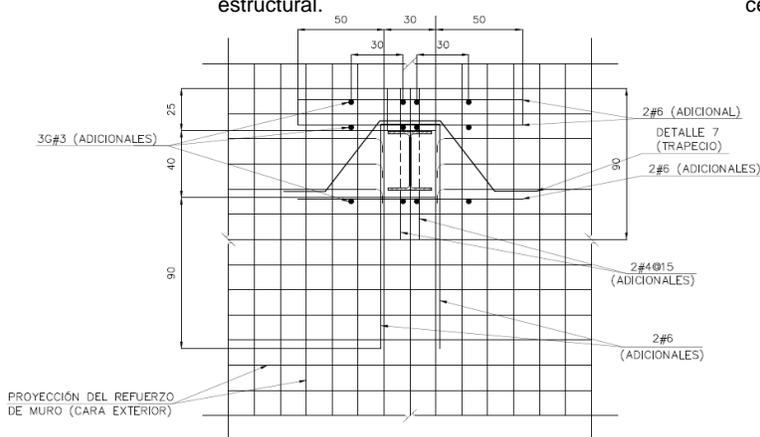


Figura 4.41.- Corte C-C. Espacios de apoyo para vigas cerrojo en colados subsiguientes.

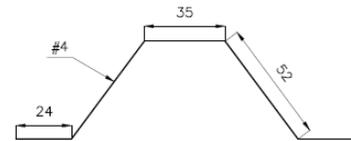


Figura 4.42.-Detalle de trapecio para espacios de apoyo para vigas cerrojo.

Las imágenes 4.37-4.38 son cortesía de: Ing. Luis Adrián Palomino Cortés
Las imágenes 4.39- 4.42 obtenidas de <https://compranet.funcionpublica.gob.mx/>

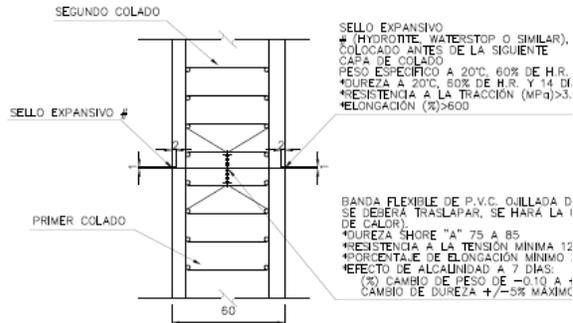


Figura 4.43.- Detalle de juntas entre colados subsiguientes. Presencia de banda ojillada.

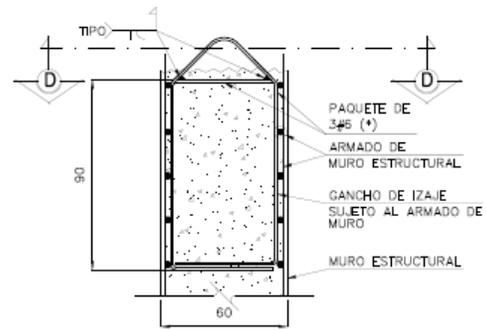


Figura 4.44.- Detalle de ganchos de izaje para muro estructural en colados subsiguientes.

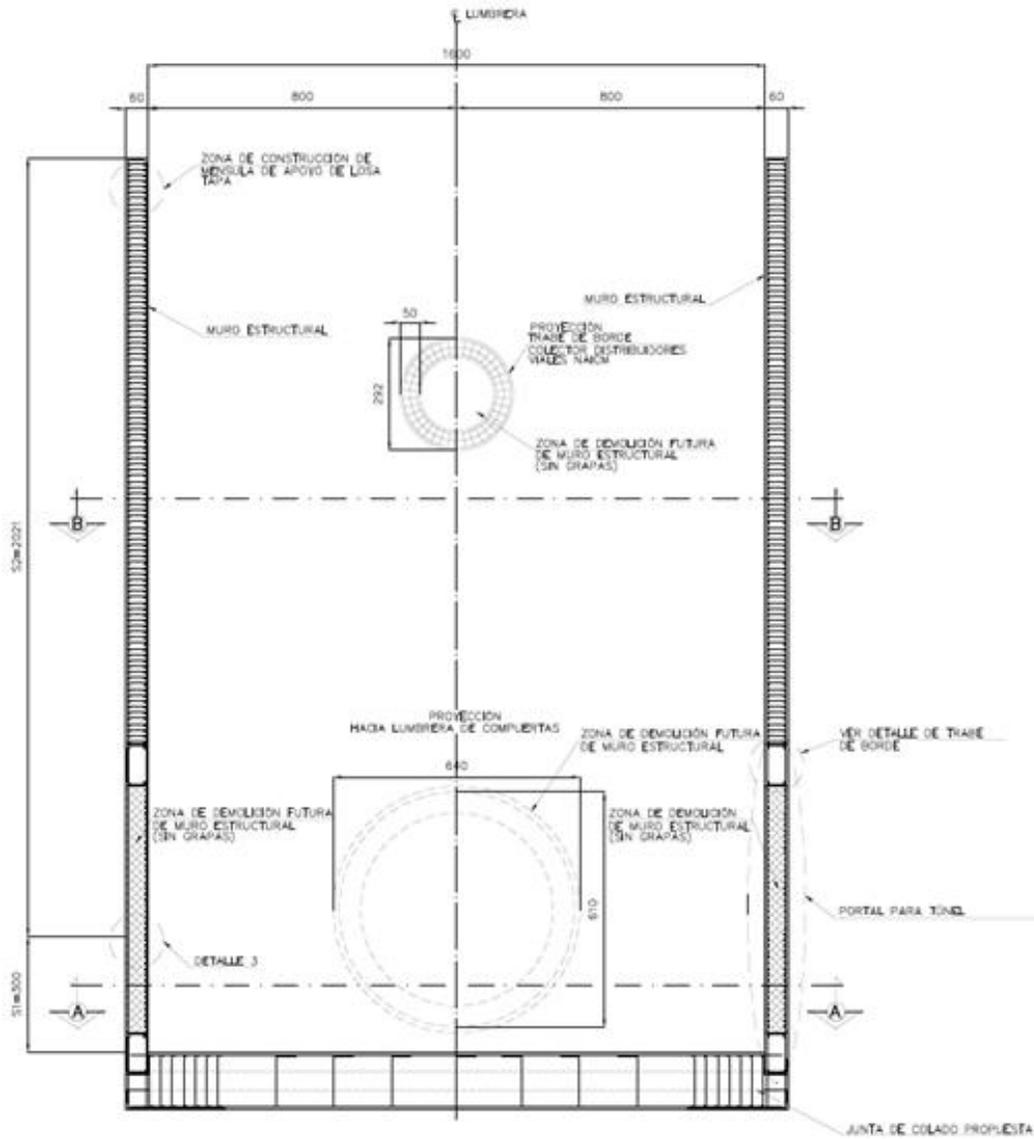


Figura 4.45.- Perfil de lumbrera con cortes: A-A y B-B, para detalles de acero de refuerzo.

Las tres imágenes obtenidas de <https://compranet.funcionpublica.gob.mx/>

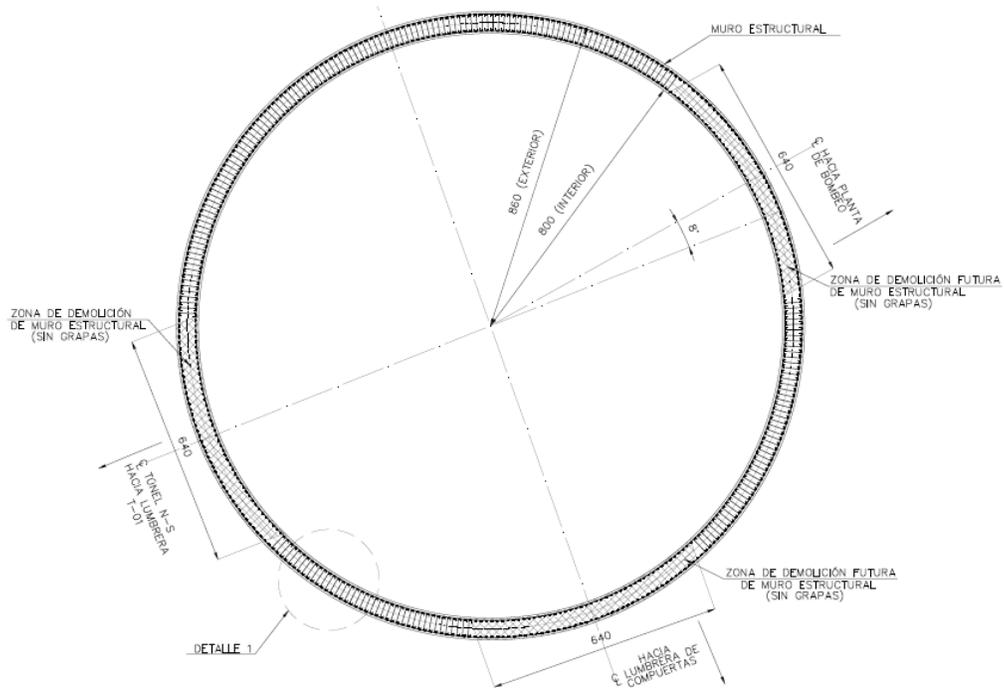


Figura 4.46.-Corte A-A. Planta de muro estructural.

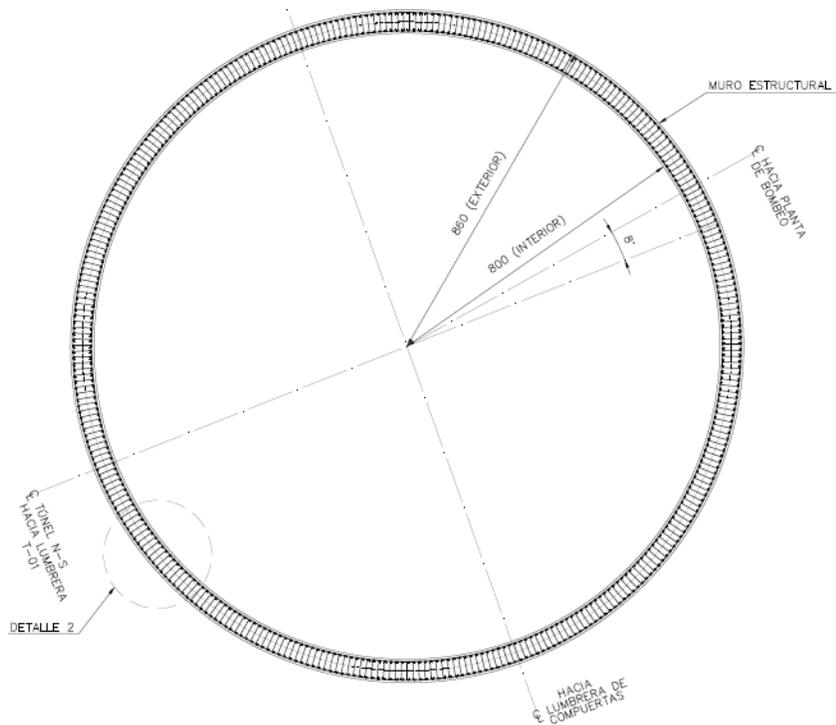


Figura 4.47.- Corte B-B. Planta de muro estructural.

Las dos imágenes obtenidas de <https://compranet.funcionpublica.gob.mx/>

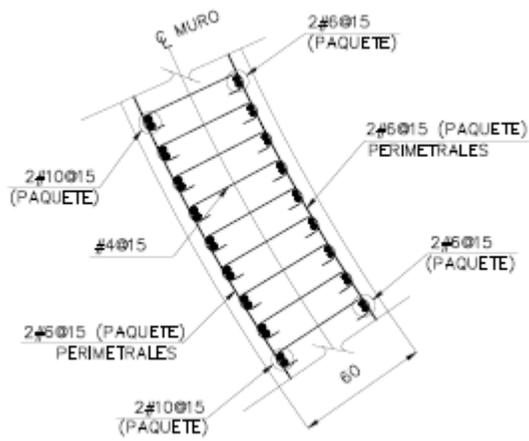


Figura 4.48.-Detalle 1. Acero de refuerzo.

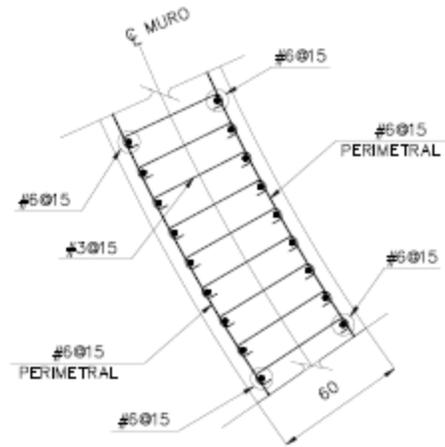


Figura 4.49.- Detalle 2. Acero de refuerzo.

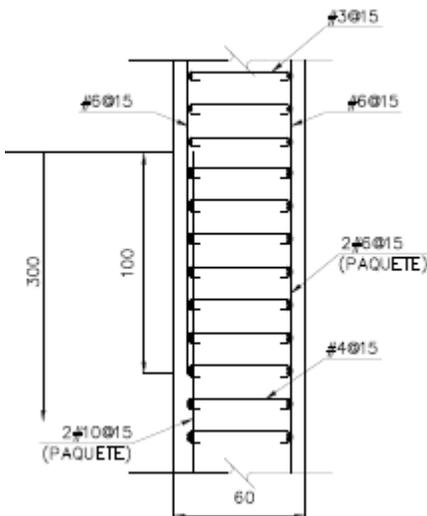


Figura 4.51.-Detalle 3.Acero de refuerzo.

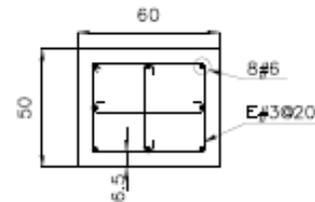


Figura 4.51.- Sección de trabe de borde para colectores.

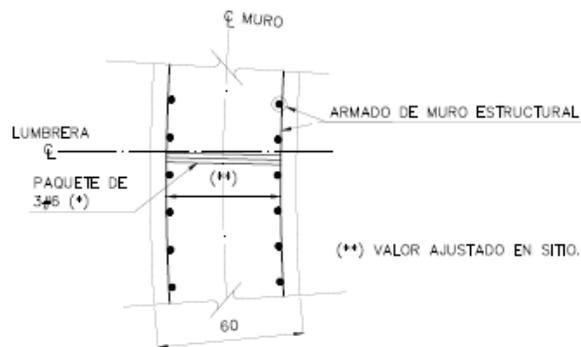


Figura 4.52.- Corte D-D. Detalle de acero estructural en zona de ganchos de izaje.

Las cinco imágenes obtenidas de <https://compranet.funcionpublica.gob.mx/>

4.9) TRABES DE LIGA Y RELLENO DE ZANJA ANULAR Y FONDO DE LUMBRERA

Una vez que se ha instalado el tanque de flotación al fondo de excavación del núcleo y construido el muro estructural, se procede con la construcción de las traves de liga.

Las traves de liga son elementos estructurales de concreto armado que unen el muro estructural con el brocal exterior y el muro pantalla, con el objetivo que todo el conjunto se comporte como un solo cuerpo ante eventos como el paso del equipo de excavación.

Para llevar a cabo la construcción de estas vigas, es necesario hacer una demolición en el brocal exterior, como del muro estructural, para que en estos espacios se construyan las traves de liga en la periferia de la lumbrera y puedan conectar a las diversas estructuras que conforman a la lumbrera. La distribución de estas piezas es a cada 30° respecto del centro de la lumbrera, es decir, habrá 12 traves de liga por lumbrera. Se hará la limpieza de las demoliciones, posteriormente la colocación de la cimbra, el habilitado y colocación del acero de refuerzo, colado y fraguado de concreto, y el retiro de la cimbra. Las figuras 4.53-4.59, mostraran los detalles de las traves de ligas dispuestas en el perímetro de las lumbreras:

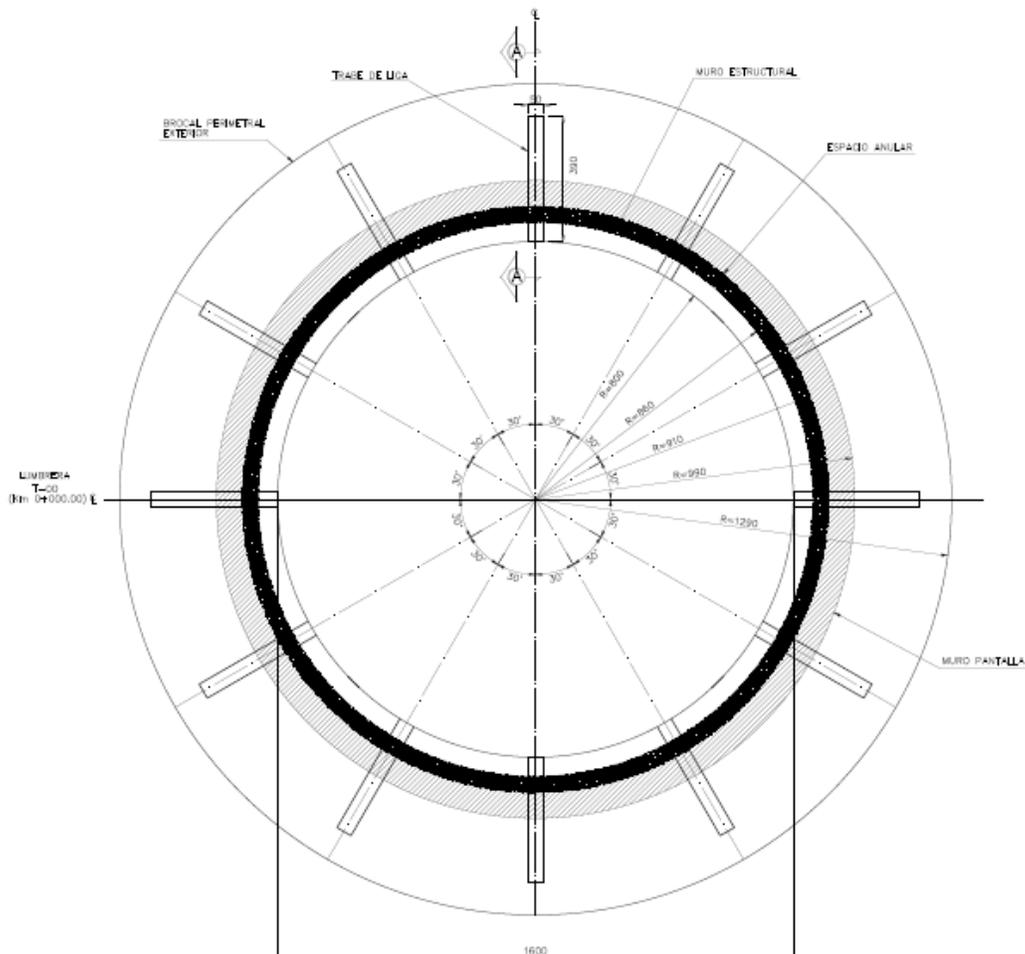


Figura 4.53.- Distribución de traves de liga.
Imagen obtenida de <https://compranet.funcionpublica.gob.mx/>

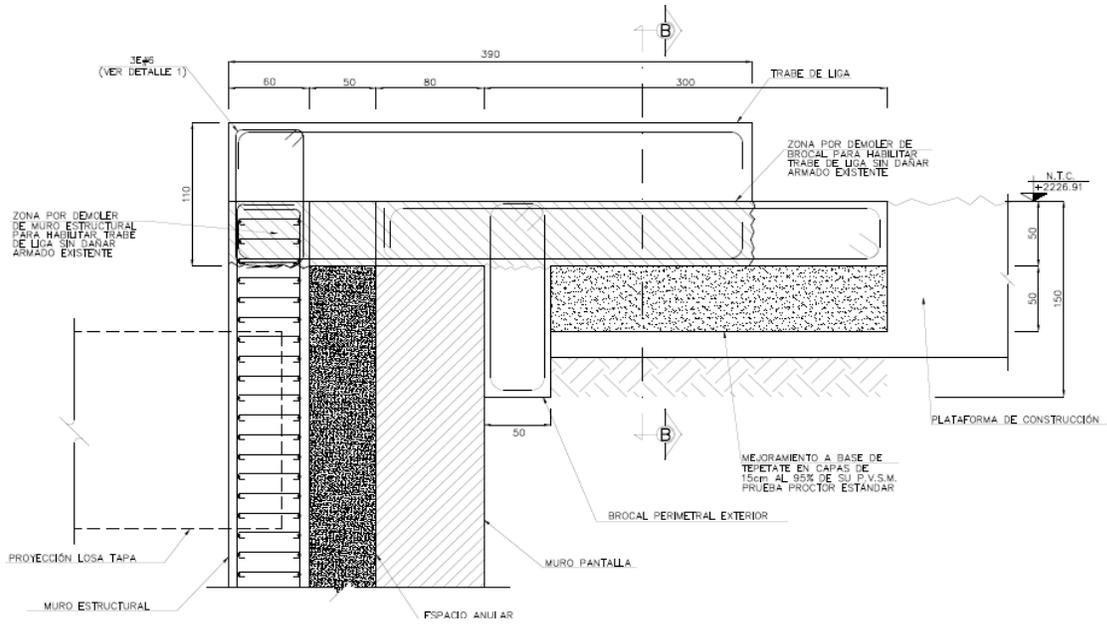


Figura 4.54.- Corte A-A. Ensamble de trabe de liga.

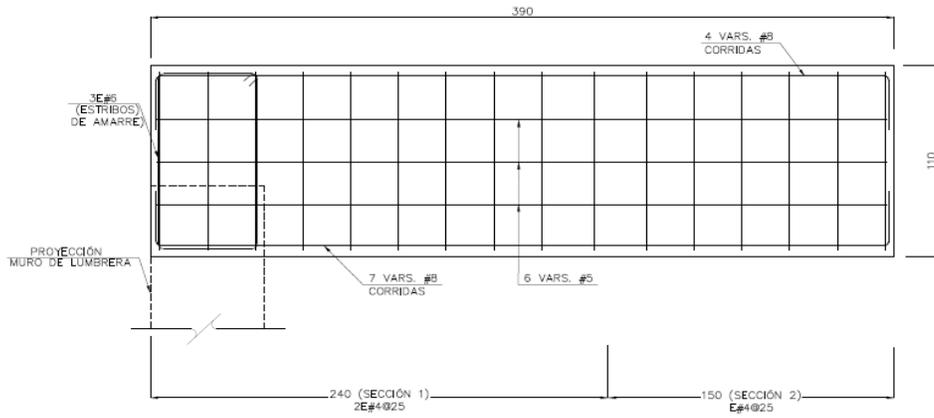


Figura 4.55.- Perfil de trabe de liga.

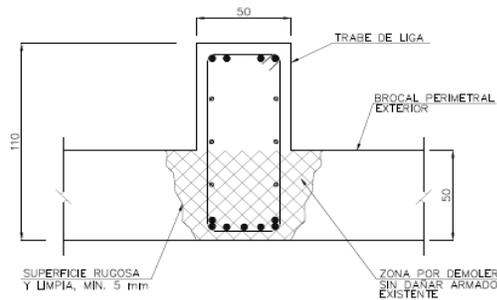


Figura 4.56.- Corte B-B. Trabe de liga embebida a brocal exterior.

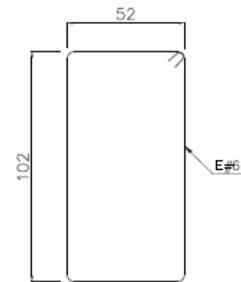


Figura 4.57.- Detalle 1. Estribos de trabe de liga.

Las cuatro imágenes obtenidas de <https://compranet.funcionpublica.gob.mx/>

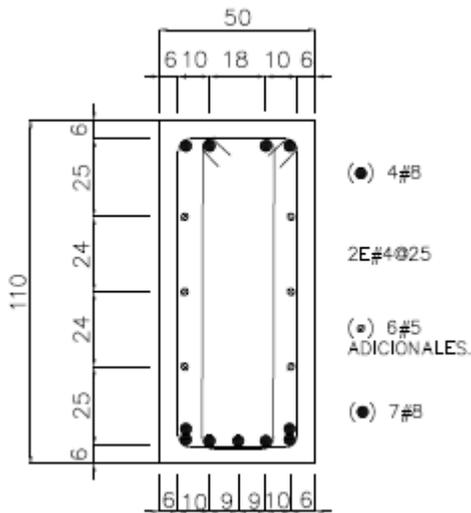


Figura 4.58.- Sección 1. Trabe de liga.

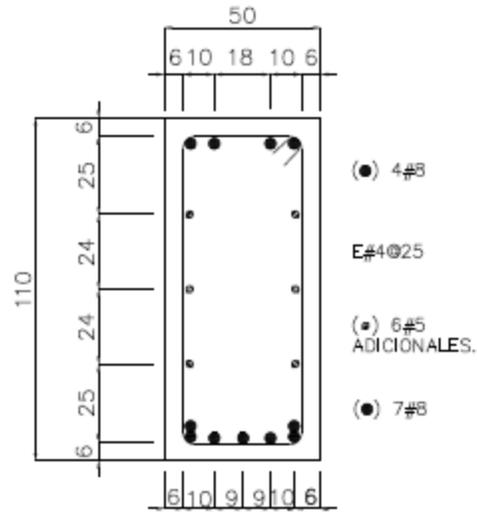


Figura 4.59.-Sección 2. Trabe de liga.

Las dos imágenes obtenidas de <https://compranet.funcionpublica.gob.mx/>

Las características que poseen las **trabes de liga** son las siguientes:

- Concreto estructural Clase I, fabricado con cemento resistente a los sulfatos, con base en la especificación: CPC 30 RS, o CPC 40 RS.
- Peso volumétrico, $\gamma = 22.00 \frac{kN}{m^3}$.
- Resistencia a la compresión simple a los 28 días, $f'_c = 35.00 MPa$, de acuerdo a Norma NMX-C414-ONNCCE, vigente.
- Adhesivo estructural tipo SIKADUR 32, o similar para unión de concreto existente y concreto fresco.
- Recubrimiento libre de 4.50cm.
- El **acero de refuerzo** tendrá un límite de fluencia, $f_y = 412.00 MPa$.

Una vez que las trabes de liga han sido construidas se procede al relleno del fondo de la lumbrera y el espacio anular que hay entre el muro estructural y el muro pantalla para poder unir por completo todos los elementos de la lumbrera. Este relleno se hará mediante concreto simple, dosificado por medio de tubería tremie de embudo y empleando la tubería dispuesta en la losa de fondo, debido a la inmersión del tanque de flotación para la aplicación del aire comprimido. Se debe de realizar la limpieza de las zonas de relleno para evitar que se contamine el mortero con los residuos del lodo bentonítico y lodo fraguante de los procesos anteriores. Estos materiales son recolectados por medio de mangueras y/o tuberías, y se disponen en pipas para su posterior traslado a una zona de tiro autorizada.

La tubería tremie es un sistema de colocación de mortero y concreto que dispone de un embudo en la parte superior para poder recibir el mortero de las ollas y sea inyectado mediante una serie de tuberías de acero conectadas mediante juntas herméticas; la última de estas tuberías es colocada hasta el fondo de las zanja del espacio anular y por medio de ella se inyecta el material.

Este sistema de inyección se emplea con frecuencia para vaciados en zonas de difícil acceso, y/o gran profundidad, como es el caso de pantallas; la aplicación de los materiales en este sistema es continuo y suave para evitar que se incorpore aire, así como evitar movimientos horizontales mientras fluye el mortero, el proceso finalizará en cuanto se hayan rellenado el fondo de excavación de la lumbrera, como la zanja anular; por otra parte, otra de las ventajas que ofrece este sistema es que no requiere de vibrado del concreto, en virtud del estricto manejo del mortero (Euclid Group Toxement, 2017). Las características que posee el mortero son las que a continuación se muestran:

- Resistencia a la compresión simple, $q_u = 4 \text{ MPa}$
- Materiales de la mezcla: Arena-cemento-agua
- Cemento Tipo CPC 40 RS

La figura 4.60, muestra el proceso de inyección de mortero en los espacios de la lumbrera mediante tubería tremie de embudo y las tuberías utilizadas para la inyección de aire durante el proceso de inmersión:

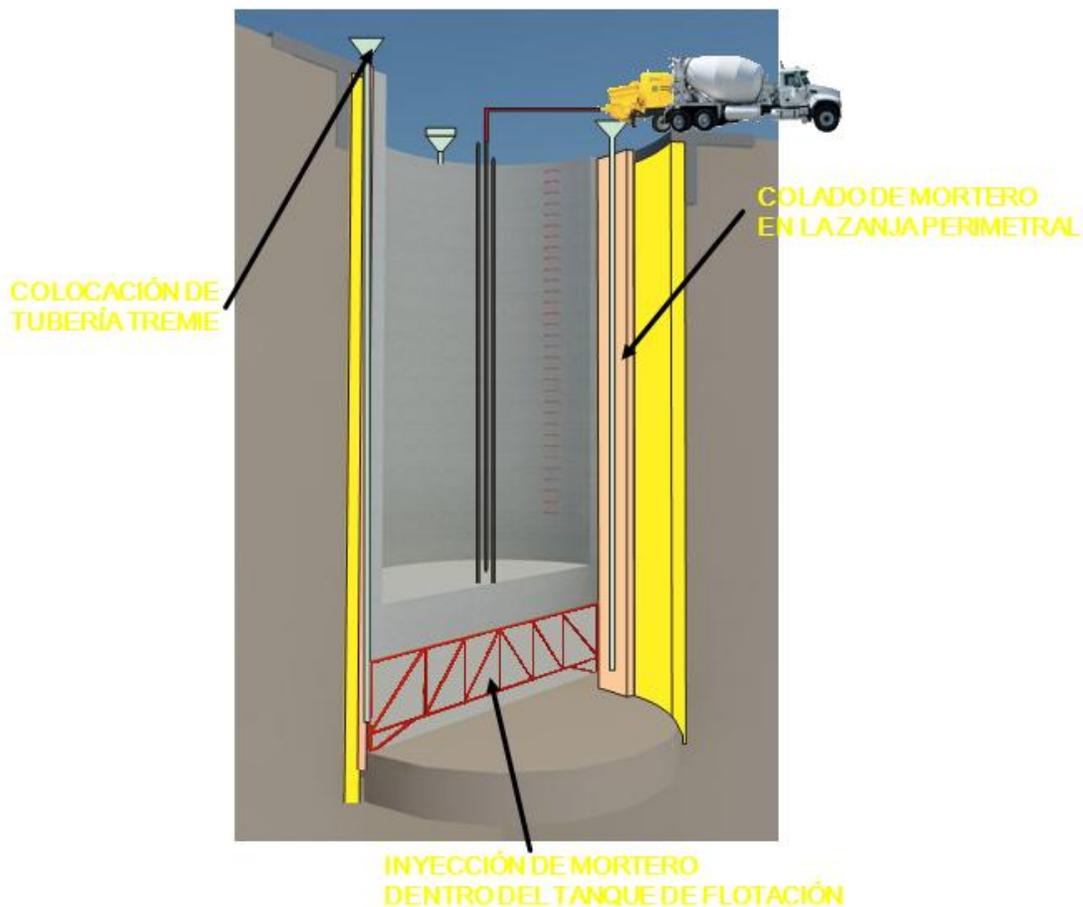


Figura 4.60.- Inyección de mortero en zanja anular y fondo de excavación de lumbrera.
(Cortesía: Ing. Luis Adrián Palomino Cortés)

4.10) PREPARACIÓN DE PORTALES DE ACCESO Y SALIDA DEL TÚNEL

Hasta este momento las traveses de borde ya han sido proyectadas en el proceso de construcción del muro estructural (durante el primer colado del muro estructural, poco después de la construcción de la losa de fondo) bajo los detalles y especificaciones de la figura 4.35, las traveses de borde servirán para marcar donde serán las demoliciones futuras para el acceso del equipo de excavación del túnel. La preparación de estos portales consisten en reforzar el muro estructural en los sectores que serán demolidos para el paso del equipo de excavación del túnel y las actividades que a ello conlleva. El portal consiste en una extensión de concreto reforzado del que sobresalen las traveses de borde, formando un anillo de concreto reforzado de sección rectangular, y sobre este elemento se instalan una serie de protectores y refuerzos, para evitar la salida del mortero inyectado y el desprendimiento del primer anillo de dovelas fundamentalmente, durante el empuje de los gatos del escudo de la tuneladora, cuando se realice la excavación del túnel. Los elementos de protección y sello, junto con sus características son las siguientes:

- Placa base (o anillo) metálico, cuyo espesor, $e = 19.00mm$, anclado con perforaciones a cada 12° y $19.00mm$ de diámetro perforado, la longitud del ancla de fijación será de $L = 400.00mm$, número total de barrenos: 30.
- Anillo de neopreno, Dureza Shore 60, con espesor, $e = 20.00mm$, anclado con perforaciones a cada 4.31° y 4.69° de manera alternada y $15.90mm$ de diámetro perforado, la longitud del tornillo de ajuste será de $L = 100.00mm$, de cuerda normal estándar con rondana plana y tuerca hexagonal, límite de fluencia, $f_y = 4200.00 \frac{kg}{cm^2}$; número total de barrenos: 80, que coincidirán con las placas móviles, de la misma manera que el tornillo antes mencionado.
- Placas móviles con ranuras para poder fijar y ajustar el neopreno y la placa base por medio de pares de tornillos de ajuste, espesor de placas, $e = 19.00mm$, par de ranuras de $27 \times 1.59mm$, número total de placas móviles: 40.

Por otra parte, las especificaciones para el concreto y el acero son las que se presentan a continuación:

- Concreto estructural Clase I, fabricado con cemento resistente a los sulfatos, con base en la especificación: CPC 30 RS, o CPC 40 RS.
- Adición del 5% como mínimo de microsílíce para el concreto.
- Peso volumétrico, $\gamma = 22.00 \frac{kN}{m^3}$.
- Resistencia a la compresión simple a los 28 días, $f'_c = 35.00MPa$, de acuerdo a Norma NMX-C414-ONNCCE, vigente.
- En uniones soldadas de varillas, utilizar electrodos: Serie E-90xx
- Adhesivo estructural tipo SIKADUR 32, o similar para unión de concreto existente y concreto fresco.
- Recubrimiento libre de 7.00cm.
- El **acero de refuerzo** tendrá un límite de fluencia, $f_y = 412.00MPa$.

En las figuras 4.61-4.71. se mostrarán los detalles del emportalamiento para las preparaciones del túnel:

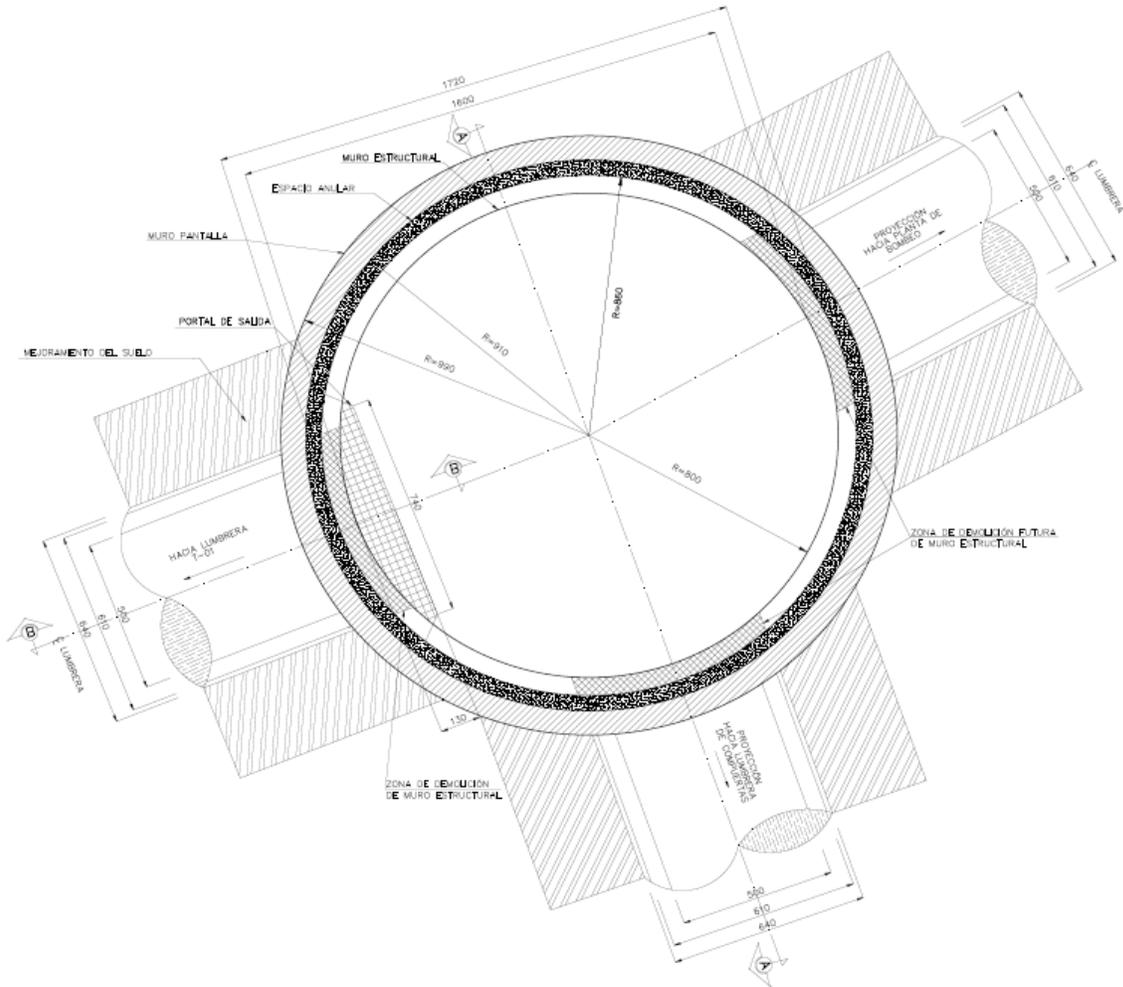


Figura 4.61.- Vista en planta de lumbrera (T-00), con cortes A-A y B-B para portales de entrada/salida.

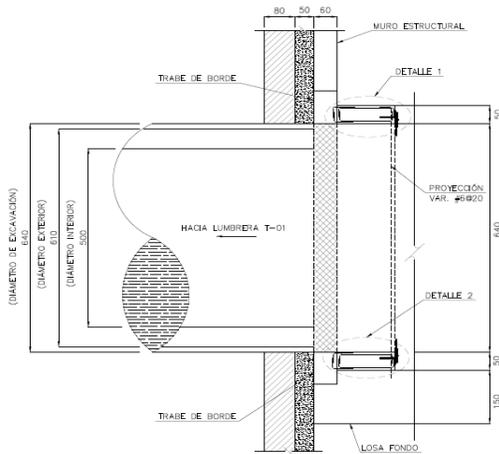


Figura 4.62.- Corte A-A. Portal de entrada/salida.

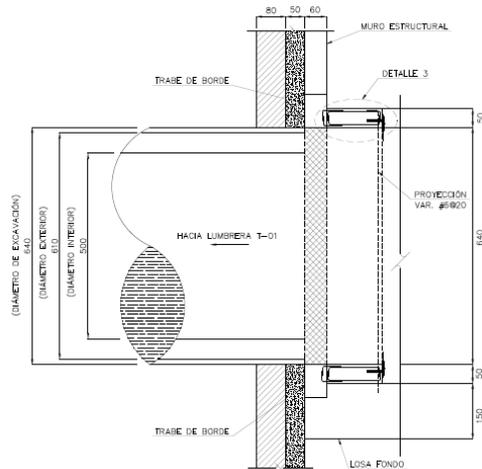


Figura 4.63.- Corte B-B. Portal de entrada/salida.

Las tres imágenes obtenidas de <https://compranet.funcionpublica.gob.mx/>

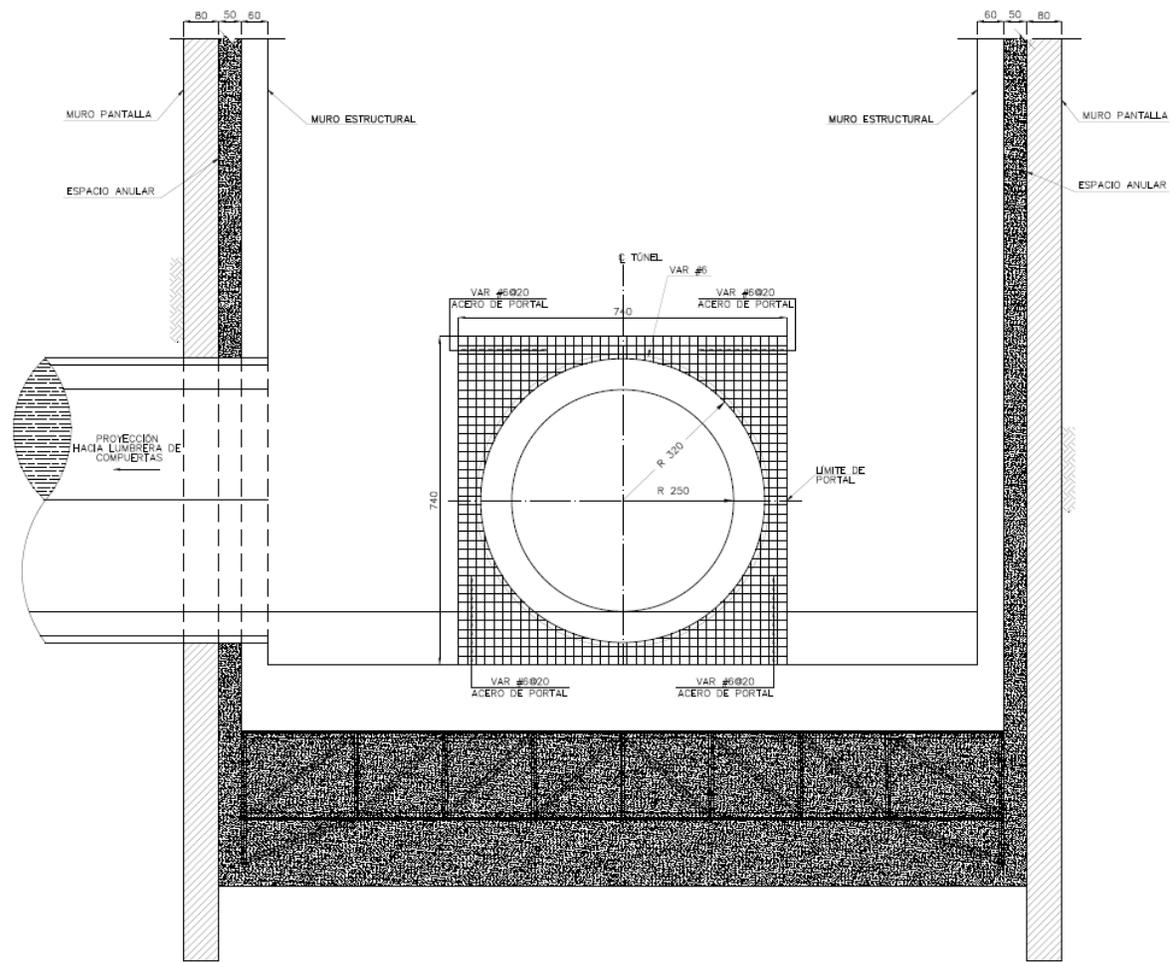


Figura 4.64.- Perfil de lumbra. Detalle del acero de refuerzo en sector de portales de entrada/salida.

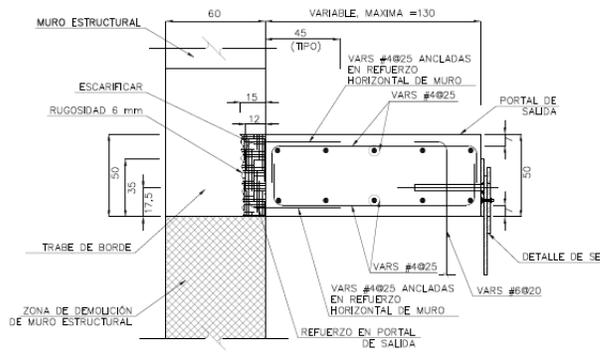


Figura 4.65.- Detalle 1. Portal de entrada/salida.

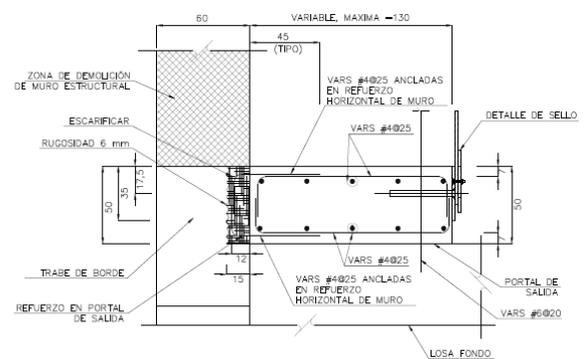


Figura 4.66.- Detalle 2. Portal de entrada/salida.

Las tres imágenes obtenidas de <https://compranet.funcionpublica.gob.mx/>

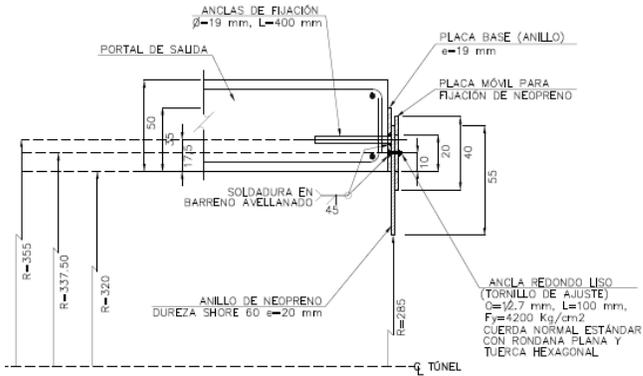


Figura 4.67.- Detalle 3. Portal de entrada/salida.

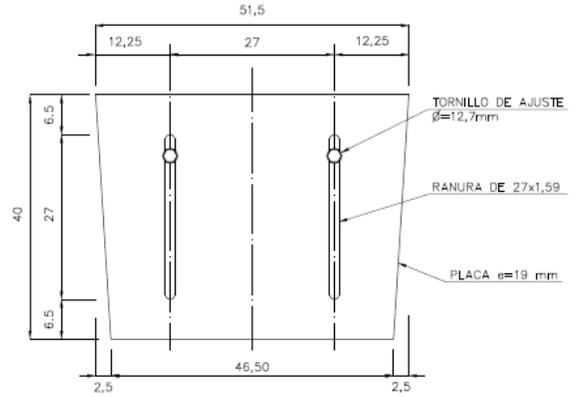


Figura 4.68.- Detalle de placa móvil.

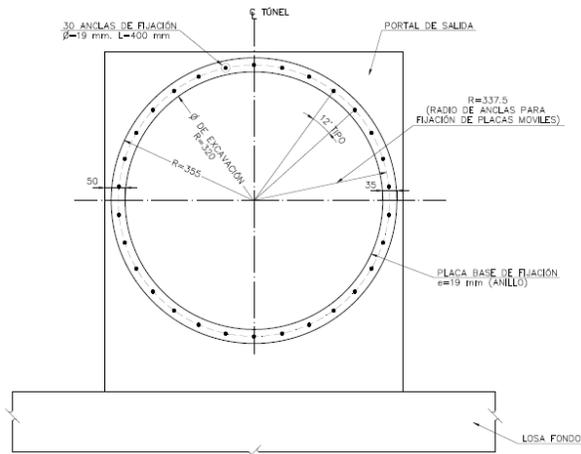


Figura 4.69.- Detalle de placa base.

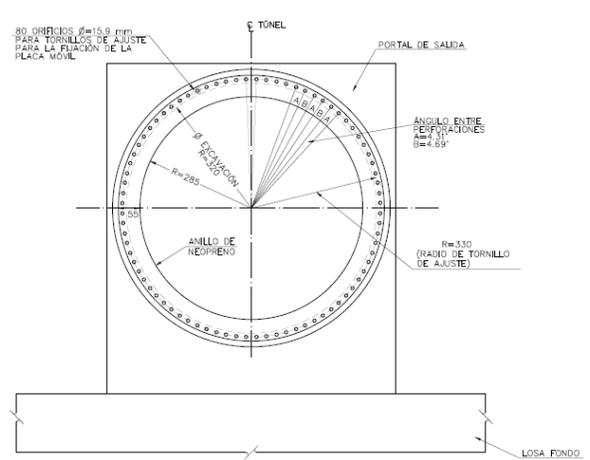


Figura 4.70.-Detalle de anillo de neopreno

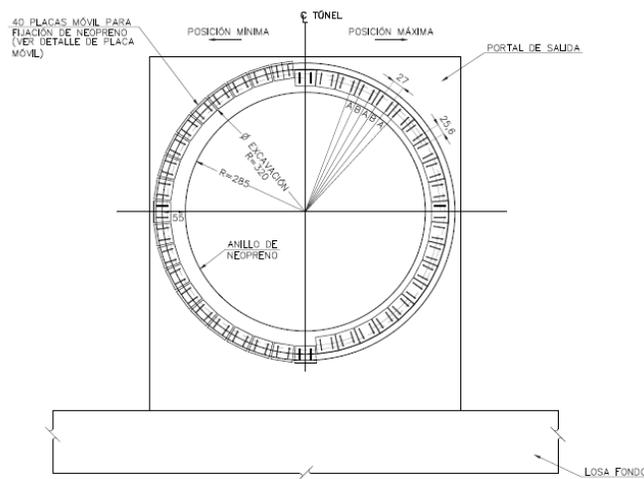


Figura 4.71.- Distribución de placas móviles.

Las cinco imágenes obtenidas de <https://compranet.funcionpublica.gob.mx/>

4.11) ESTRUCTURA DE MEDIA CAÑA

Al término del cuerpo de la lumbrera, y la ejecución de los trabajos de limpieza mediante agua a presión en las zonas del muro estructural y de la losa de fondo, se procede a construir la estructura de media caña. Las características que esta estructura posee, es la de poder comunicar los segmentos que conforman al túnel, a través de las lumbreras por medio de conductos abiertos, para el agua que será transportada y sea una guía para el equipo de excavación durante su paso por las lumbreras debido a sus características geométricas (similar a medio canal circular); por otra parte, esta estructura poseerá una caja de amortiguamiento que evita que las aportaciones de los colectores ocasionen daños al concreto debido a su impacto, como evitar turbulencias dentro de la lumbrera debido al flujo del agua del túnel y de los colectores mediante tuberías de drenaje que descargan el tirante de agua formado en esta caja hacia los canales que conforman a la media caña. Debido a las dimensiones de los muros que conforman a la caja de amortiguamiento se requerirá el uso de banda ojillada, para mitigar la infiltración del agua en las juntas de los muros de dicha caja. Los muros tendrán una altura de 2.44 m y en las juntas se dispondrá esta banda. Para poder brindar estabilidad al conjunto de la media caña, se anclarán los muros que unen a la caja de amortiguamiento con la media caña, a la losa de fondo que se construyó previamente, y por otra parte se anclarán traveses al muro estructural, y bajo estos marcos de concreto armado se hará un relleno de concreto simple, que en conjunto otorgarán la forma a toda la estructura de la media caña. La geometría de la media caña, como se hizo mención, posee la forma de un medio canal circular y coincidirá con las proyecciones que se tengan del túnel, es decir, sus rasantes hidráulicas deben de ser las mismas, para que no exista algún desnivel o perturbación en el flujo del agua.

Finalmente, se dejarán las preparaciones para la construcción de las captaciones de los colectores hacia las cajas de amortiguamiento, esto es, de los muros estructurales de la media caña se expondrán los disparos del acero de refuerzo, con la finalidad de que se puedan continuar y dar la forma adecuada para que una vez que se construyan los colectores correspondientes, posterior a la construcción de las lumbreras y el túnel, se comuniquen correctamente con el sistema del TDDP.

Las características que presentan los materiales son las siguientes:

Concreto Simple:

- Concreto estructural Clase II, fabricado con cemento resistente a los sulfatos, con base en la especificación: CPC 30 RS, o CPC 40 RS.
- Peso volumétrico, $\gamma = 22.00 \frac{kN}{m^3}$.
- Resistencia a la compresión simple a los 28 días, $f'_c = 10.00 MPa$, de acuerdo a Norma NMX-C414-ONNCCE, vigente.
- Adhesivo estructural tipo SIKADUR 32, o similar para unión de concreto existente y concreto fresco.

Concreto Reforzado:

- Concreto estructural Clase I, fabricado con cemento resistente a los sulfatos, con base en la especificación: CPC 30 RS, o CPC 40 RS.
- Peso volumétrico, $\gamma = 22.00 \frac{kN}{m^3}$.
- Resistencia a la compresión simple a los 28 días, $f'_c = 35.00MPa$, de acuerdo a Norma NMX-C414-ONNCCE, vigente.
- Adhesivo estructural tipo SIKADUR 32, o similar para unión de concreto existente y concreto fresco.
- En uniones soldadas de varillas, utilizar electrodos: Serie E-90xx
- Recubrimiento libre de 6.50cm.
- El **acero de refuerzo** tendrá un límite de fluencia, $f_y = 412.00MPa$.

Tubería de Drenaje (conexión entre Caja de Amortiguamiento y Media Caña):

- Tubería PEAD corrugada TDR Ultra o similar, de 4" de diámetro
- Alta resistencia a la abrasión y a la corrosión

Las figuras 4.72-4.79, indican los detalles de la distribución geométrica de la estructura de media caña, como la distribución del acero de refuerzo, banda ojillada y la tubería de drenaje:

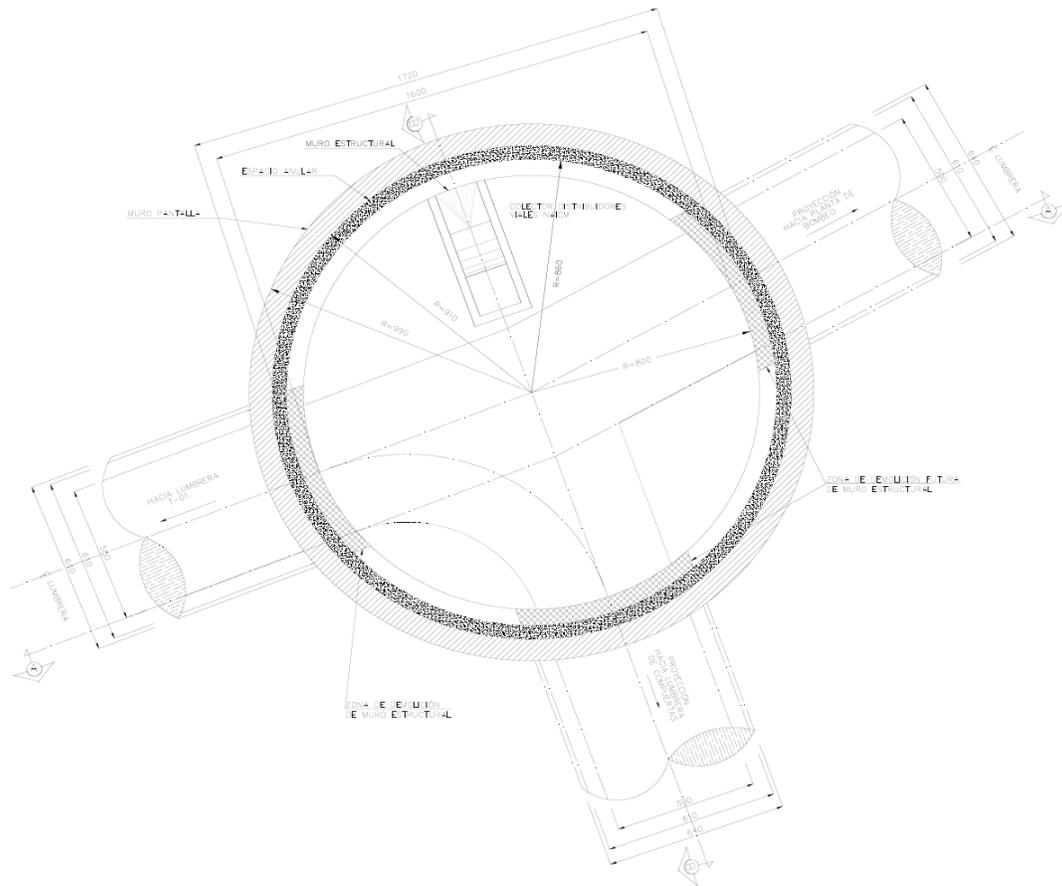


Figura 4.72.- Planta de media caña en lumbra (T-00).
Imagen obtenida de <https://compranet.funcionpublica.gob.mx/>

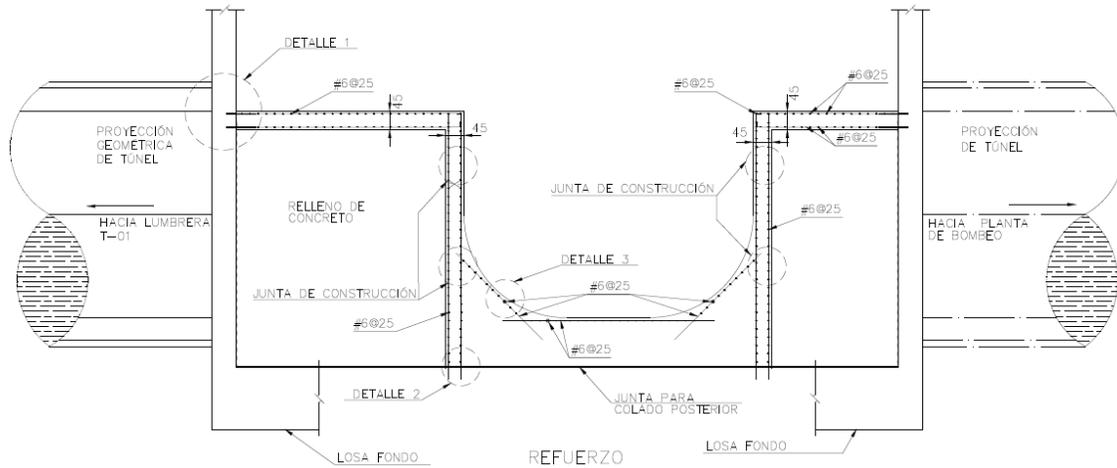


Figura 4.73.- Corte A-A. Detalle de media caña (hacia lumbrera T-01).

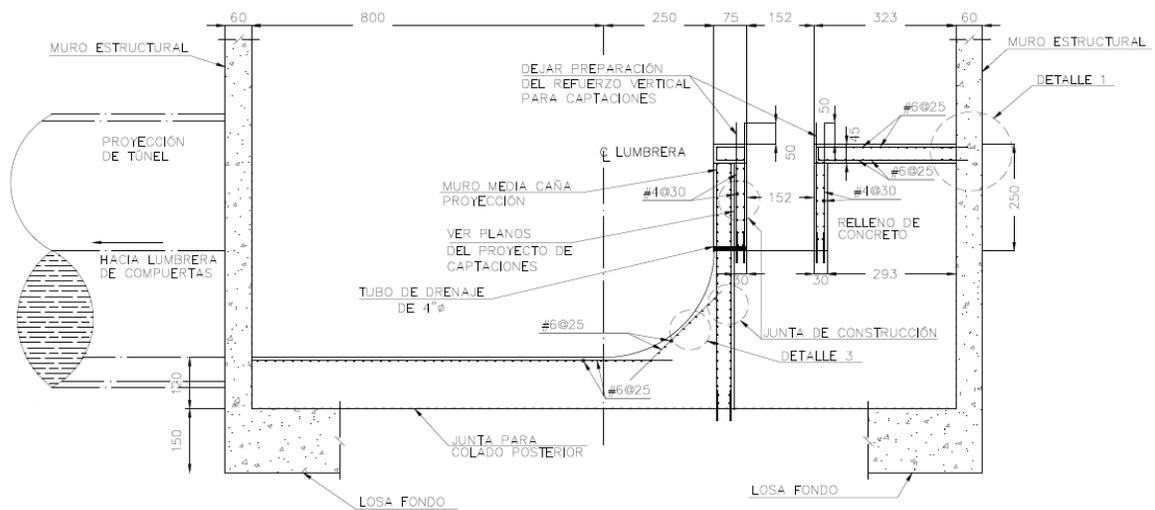


Figura 4.74.- Corte B-B. Detalle de media caña (hacia lumbrera de compuertas).

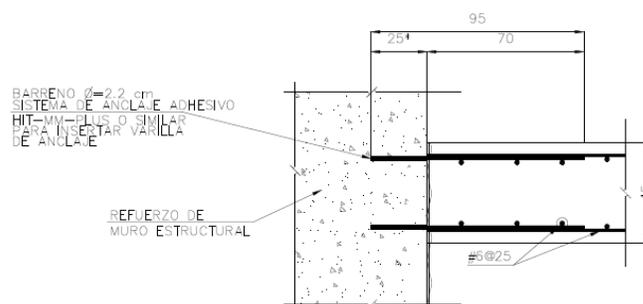


Figura 4.75.- Detalle 1. Detalle de refuerzo horizontal de trabes de media caña.

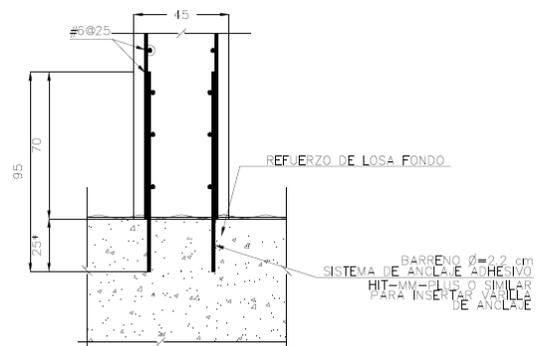


Figura 4.76.- Detalle 2. Detalle de refuerzo vertical de trabes de media caña.

Las cuatro imágenes obtenidas de <https://compranet.funcionpublica.gob.mx/>

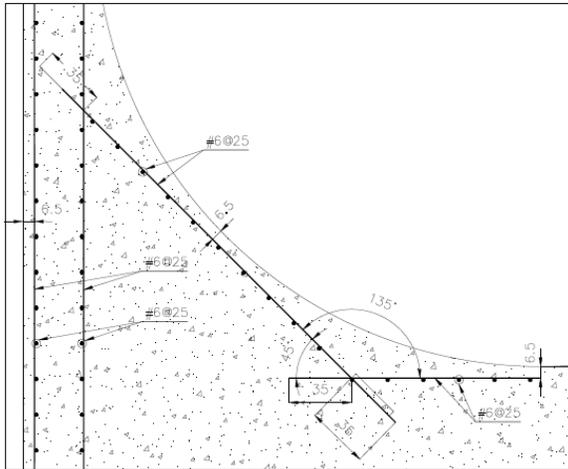


Figura 4.77.- Detalle 3. Detalle de refuerzo en curvatura de media caña.

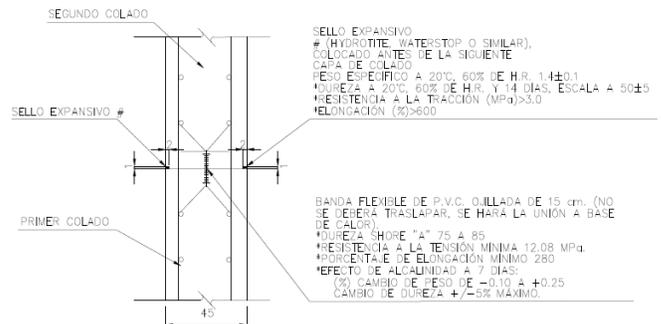


Figura 4.78.- Banda ojillada en juntas de media caña.

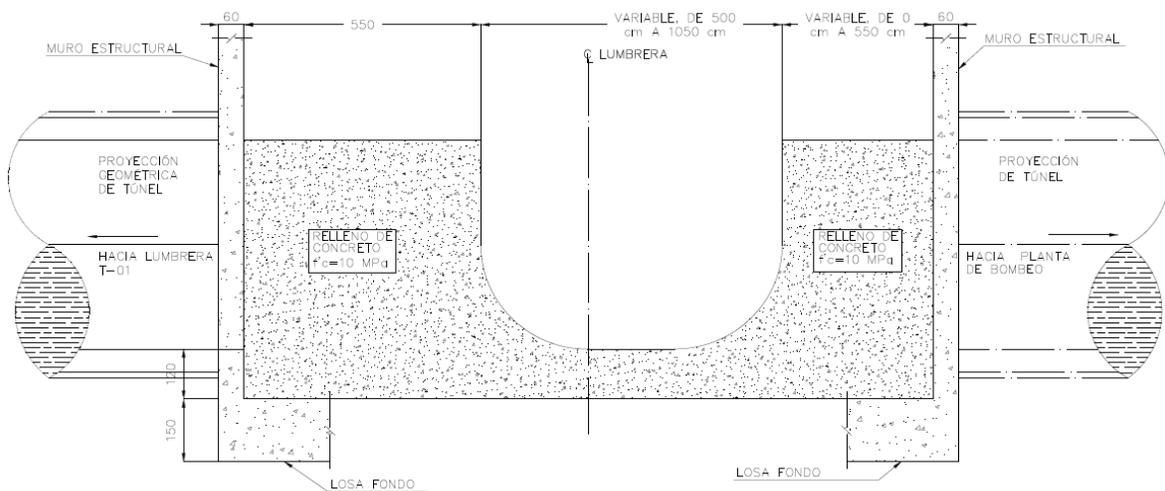


Figura 4.79.- Vista en perfil de estructura de media caña.

Las tres imágenes obtenidas de <https://compranet.funcionpublica.gob.mx/>

4.12) CONSTRUCCIÓN DE LOSA TAPA

La construcción de la losa tapa inicia una vez que se haya construido por completo las actividades ya mencionadas de la lumbrera, la construcción de los colectores, y de manera simultánea al avance de excavación del túnel.

La losa tapa es una medida de seguridad para los usuarios o las personas que se encuentren cerca de las lumbreras, mitigar los olores desagradables debido al transporte del agua vertida por los colectores y el túnel. Este elemento se apoya en el muro estructural en ménsulas de apoyo (ver figura 4.45), que se han construido durante el proceso de construcción del muro estructural y sobre espacios en los que se desplantaran los diversos elementos de carga de la losa tapa.

El sistema de losa tapa consiste en ensamblar un conjunto de piezas de concreto reforzado precoladas, por medio de equipos de carga, enganchados a los izajes de estas piezas. Las piezas primarias son elementos llamados trabes portantes. Las trabes 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 desplantaron una variedad de tabletas y también en las ménsulas de las trabes portantes. Por otra parte, este sistema de losa posee pozos de acceso para poder acceder al interior de las lumbreras mediante una escalera metálica. Los pozos de acceso se encuentran apoyados por medio de un par de perfiles estructurales anclados al muro estructural, y están compuestos por muros de mampostería (tabique) unidos mediante dalas inferiores y superiores de concreto reforzado, y en la parte superior poseen una Rejilla Irving funcionando como una tapa, además su función será aliviar las presiones al interior del túnel. Bajo la tapa de los pozos, se encuentra una escalera de acceso (escalera metálica) que dirige a los operadores y personal de construcción dentro de las lumbreras. Estos pozos se encontrarán al nivel del terreno natural, para que se pueda acceder con facilidad al interior de estas estructuras. Por otra parte, por encima de las tabletas y todos los elementos de concreto precolados, se coloca un firme de concreto equipado con malla electro-soldada y losacero. Por encima del firme, se coloca un relleno de materiales granulares, para impedir que los factores atmosféricos dañen el concreto reforzado y el sistema de losa tapa.

Las especificaciones de los materiales son las siguientes:

Elementos de concreto reforzado:

- Concreto estructural Clase I, fabricado con cemento resistente a los sulfatos, con base en la especificación: CPC 30 RS, o CPC 40 RS.
- Peso volumétrico, $\gamma = 22.00 \frac{kN}{m^3}$.
- Resistencia a la compresión simple a los 28 días, $f'_c = 35.00MPa$, de acuerdo a Norma NMX-C414-ONNCCE, vigente.
- Adhesivo estructural tipo SIKADUR 32, o similar para unión de concreto existente y concreto fresco.
- En uniones soldadas de varillas, utilizar electrodos: Serie E-90xx
- Primer estribo se coloca a 5 cm de cada extremo.
- Recubrimiento libre de 4.00cm.
- Sellador Tipo Sikaflex 1-a, o similar para la unión entre tabletas.
- El **acero de refuerzo** tendrá un límite de fluencia, $f_y = 412.00MPa$.

Firme de Compresión:

- Concreto estructural clase II.
- Resistencia a la compresión simple a los 28 días, $f'_c = 15.00MPa$.
- Malla electrosoldada, con límite a la fluencia, $f_y = 500.00MPa$.
- Losacero, lámina acanalada Cal. 22 reforzada en su valle, con 3 varillas de #3.

Pozos de Acceso:

- Rejilla Irving, cuyas dimensiones son: $\frac{3}{16} \times 1 \frac{1}{2}$ ".
- Tipo de mampostería: tabique.

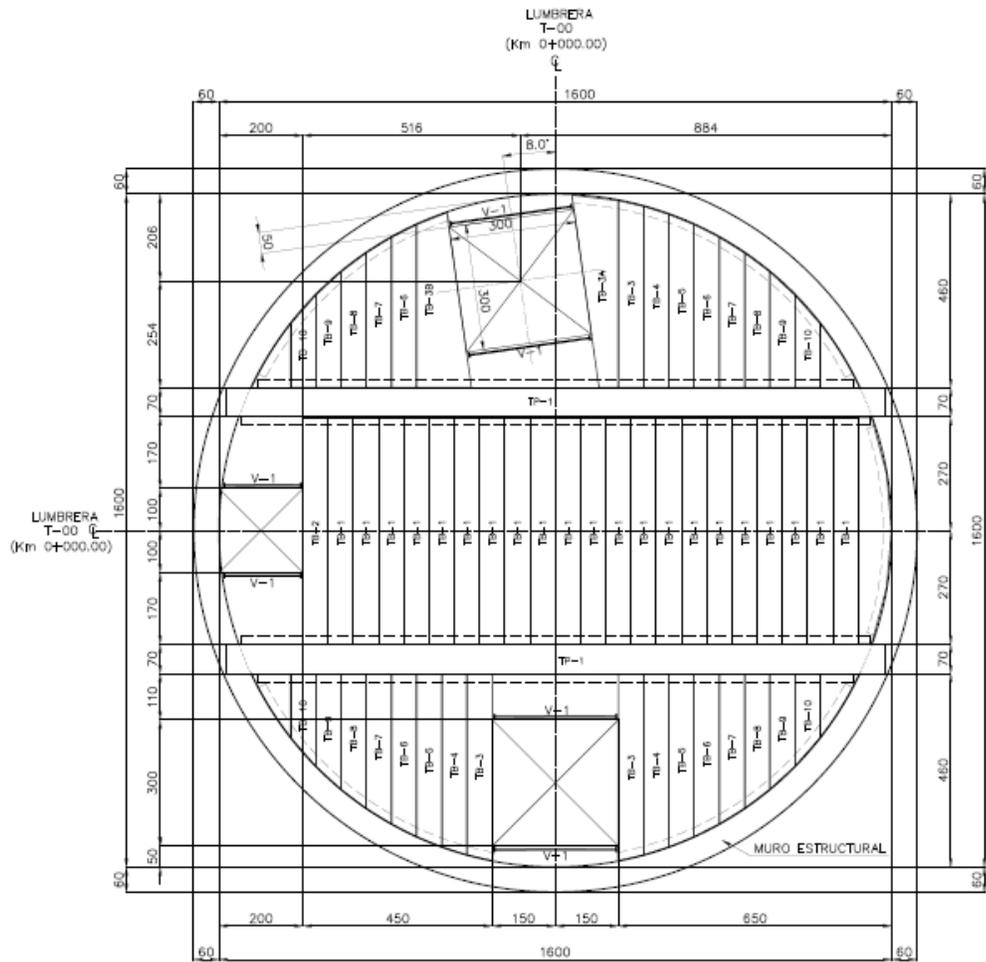


Figura 4.82.- Ubicación de trabes portantes y tabletas de concreto reforzado.

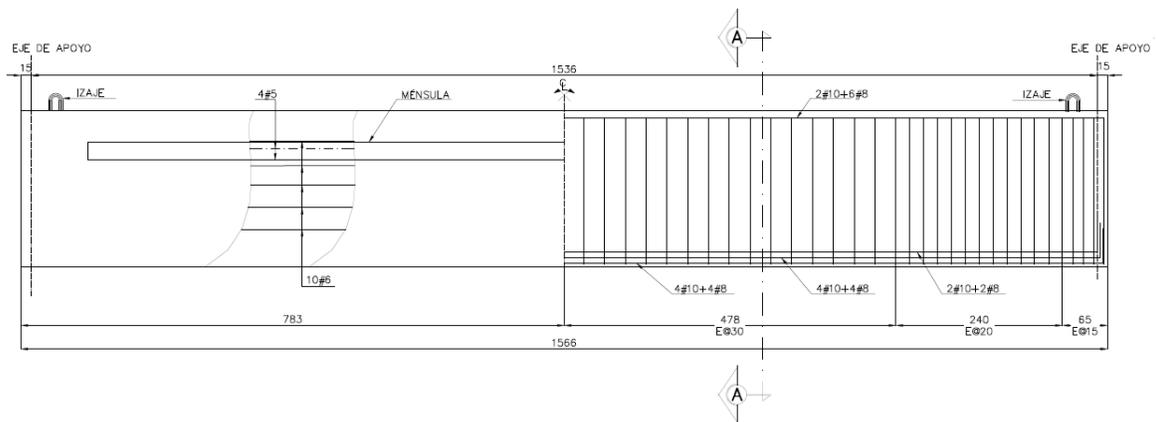


Figura 4.83.- Detalle de trabe portante.

Las dos imágenes obtenidas de <https://compranet.funcionpublica.gob.mx/>

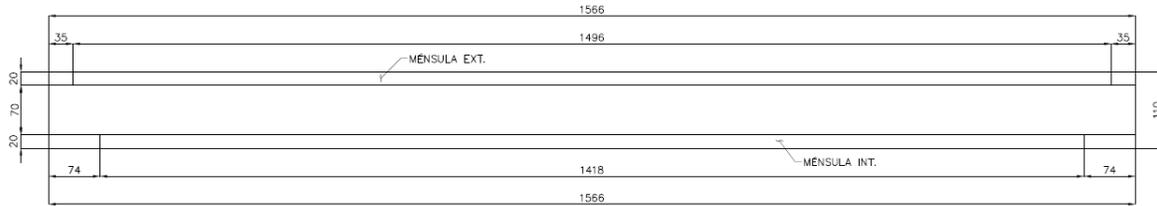


Figura 4.84.- Vista en planta de trabe portante.

Tabla 4.5.- Dimensiones de tabletas.

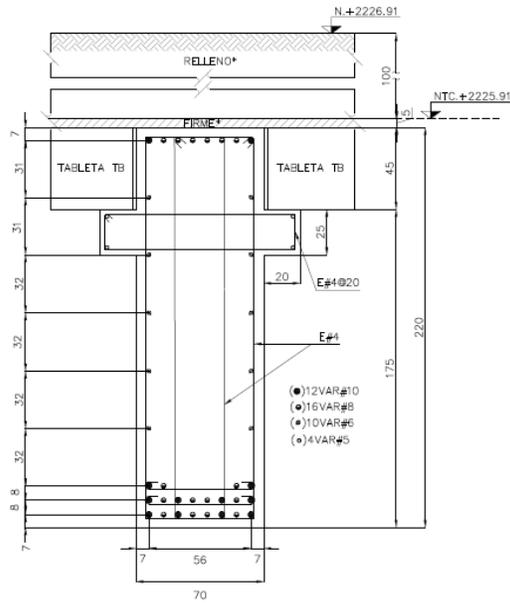


Figura 4.85.- Corte A-A. Sección de trabe portante.

DIMENSIONES DE TABLETAS						
TB	L1 (cm)	L2 (cm)	L3 (cm)	L4 (cm)	θ (°)	ARMADO TIPO
1	538.0	538.0	60.0	60.0	90.0	2
2	538.0	538.0	60.0	60.0	90.0	1
3A	443.8	464.4	60.0	134.1	74.4	3
3B	386.7	413.5	120	55.0	77.2	3
3	430.0	443.8	60.0	61.6	77.0	1
4	411.0	430.0	60.0	63.0	72.5	2
5	386.7	411.0	60.0	64.7	68.0	2
6	356.4	386.7	60.0	67.2	63.2	2
7	319.2	356.4	60.0	70.5	58.2	2
8	274.0	319.2	60.0	75.1	53.0	2
9	219.0	274.0	60.0	81.5	47.4	2
10	150.4	219.0	60.0	91.0	41.2	2

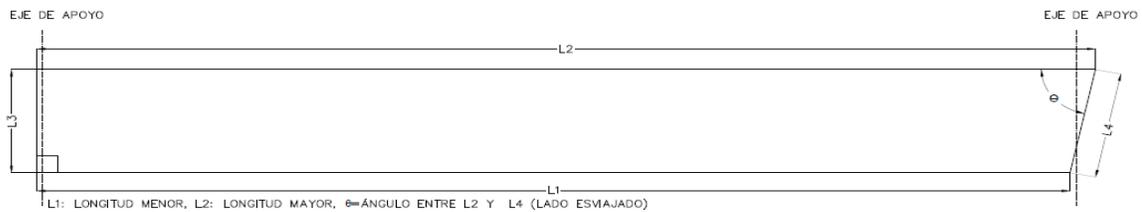


Figura 4.86.- Vista en planta de tabletas. (Ver tabla 4.5.-Dimensiones de tabletas.).

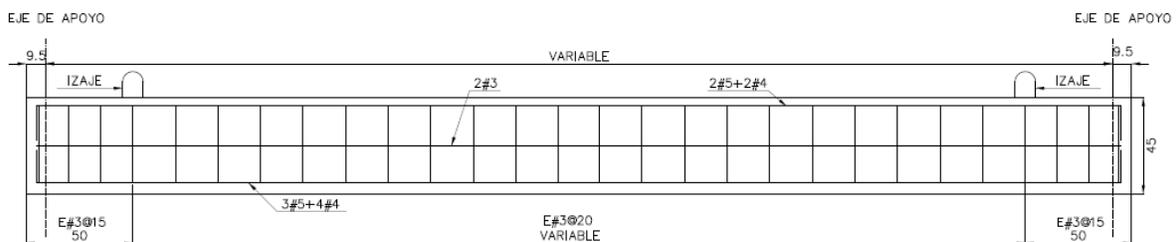


Figura 4.87.-Armado tipo 1. (Ver tabla 4.5.-Dimensiones de tabletas.)

Las 4 imágenes y la tabla 4.5, obtenidas de <https://compranet.funcionpublica.gob.mx/>

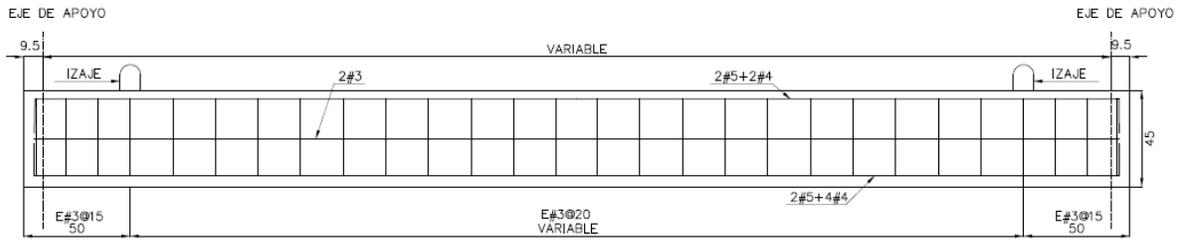


Figura 4.88.- Armado tipo 2. (Ver Tabla 4.5.-Dimensiones de tabletas.).

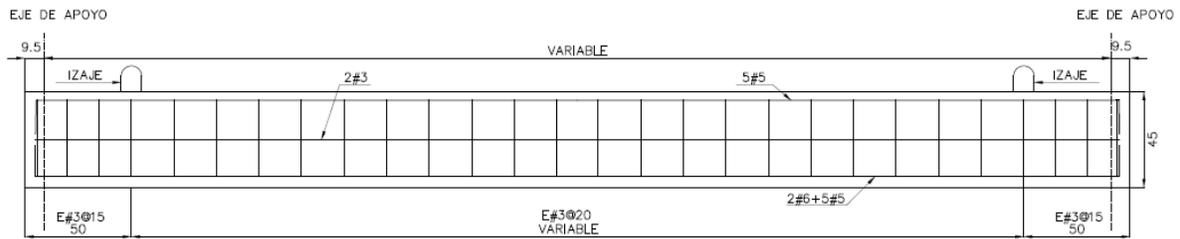


Figura 4.89.- Armado tipo 3. (Ver Tabla 4.5.-Dimensiones de tabletas.).

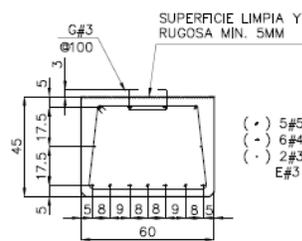


Figura 4.90.- Armado Tipo 1.

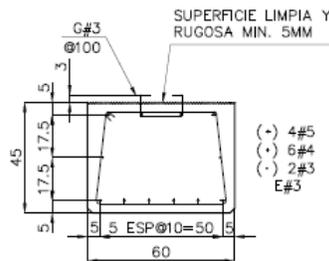


Figura 4.91.- Armado Tipo 2.

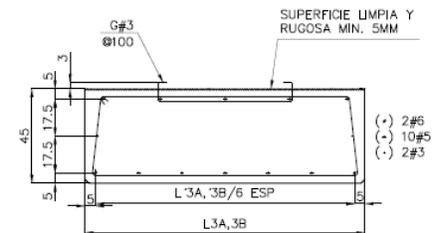


Figura 4.92.- Armado Tipo 3.

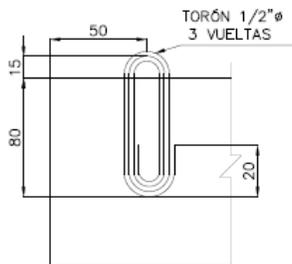


Figura 4.93.- Detalle de izaje para traveses portantes.

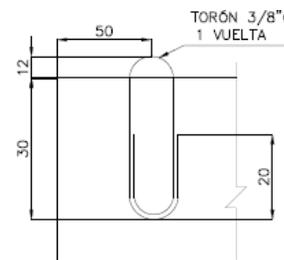


Figura 4.94.-Detalle de izaje para tabletas.

Las siete imágenes obtenidas de <https://compranet.funcionpublica.gob.mx/>

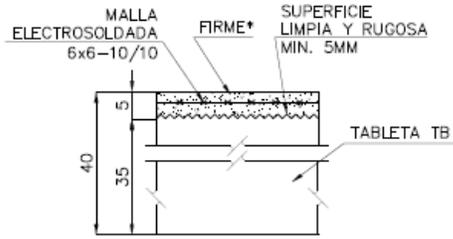


Figura 4.95.- Detalle de firme sobre tabletas.

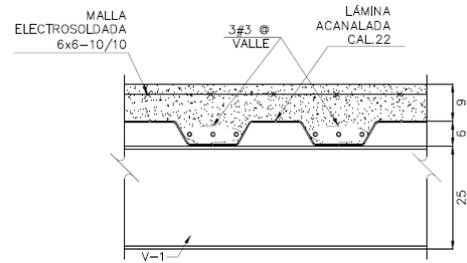


Figura 4.96.- Detalle de firme sobre acero estructural tipo IR.

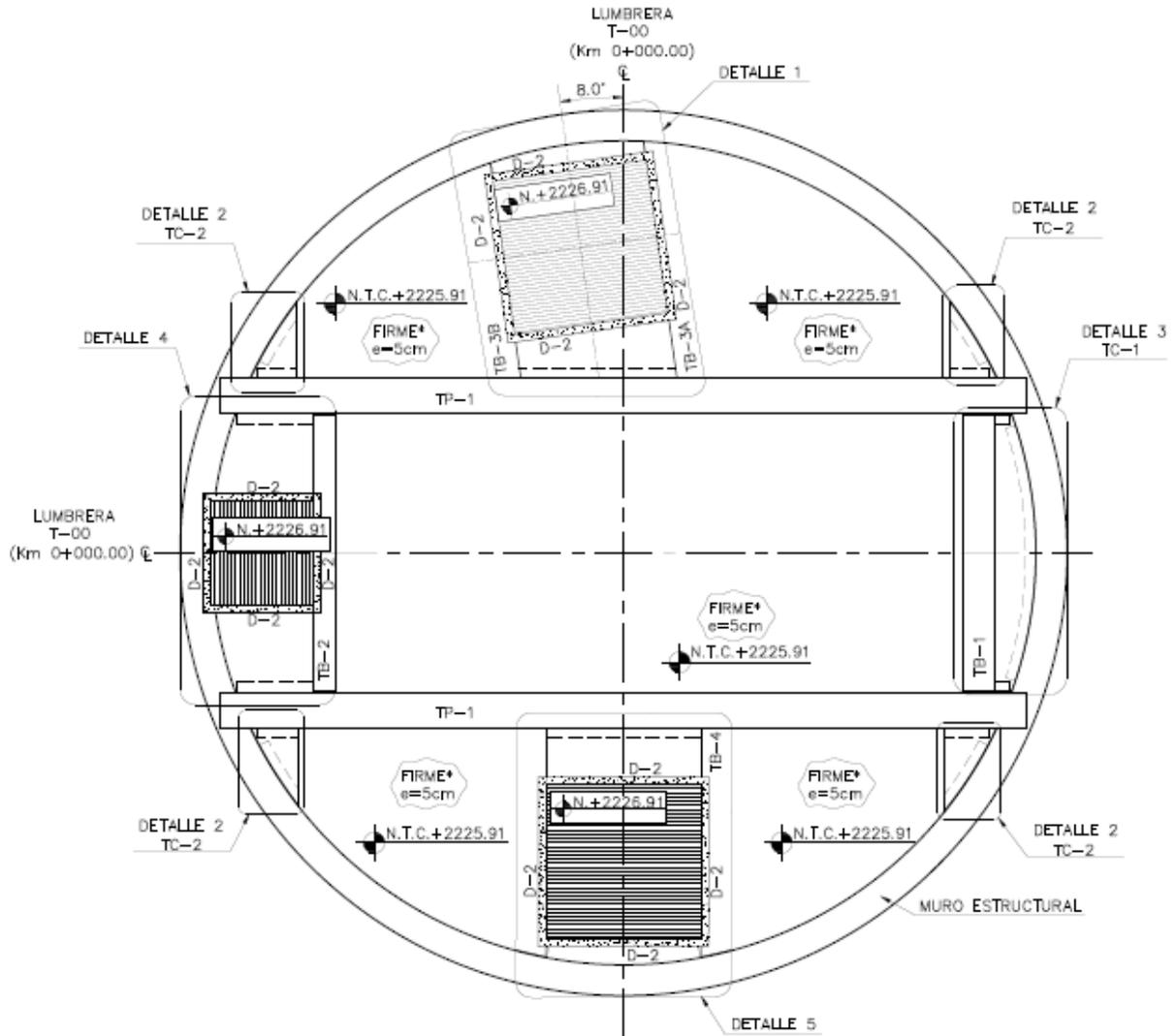


Figura 4.97.- Vista en planta de losa tapa. Detalles de pozos de acceso y secciones de su desplante. Detalles de tabletas de cierre.

Las tres imágenes obtenidas de <https://compranet.funcionpublica.gob.mx/>

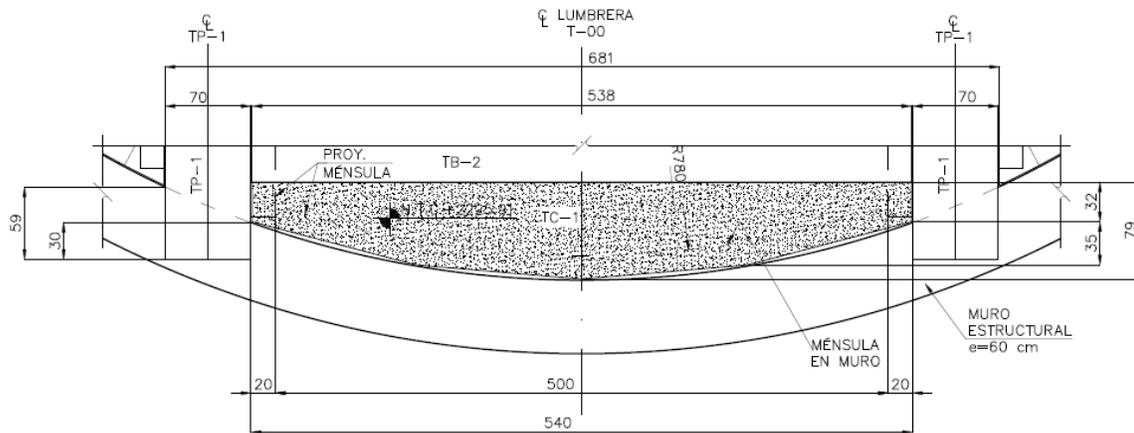


Figura 4.98.- Detalle 3. Trabe de cierre TC-1.

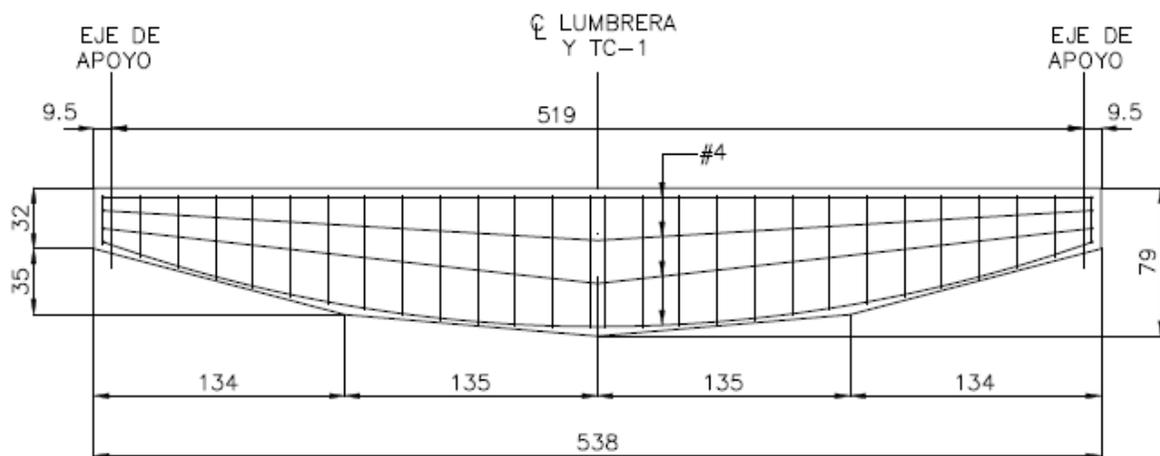


Figura 4.99.- Detalle 3. Acero de refuerzo en trabe de cierre TC-1.

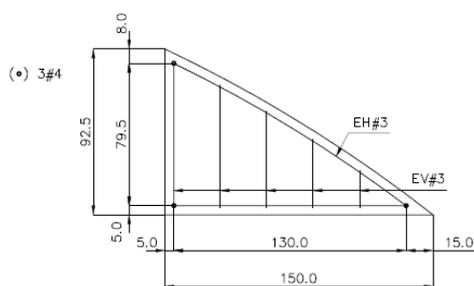


Figura 4.100.- Detalle 2. Trabe de cierre TC-2.

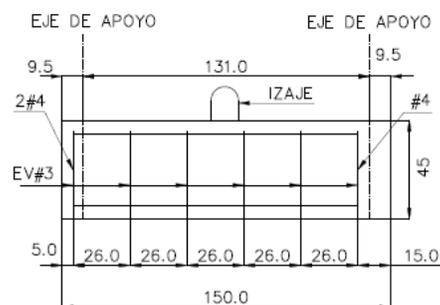


Figura 4.101.-Detalle 2. Acero de refuerzo en trabe de cierre TC-2.

Las cuatro imágenes obtenidas de <https://compranet.funcionpublica.gob.mx/>

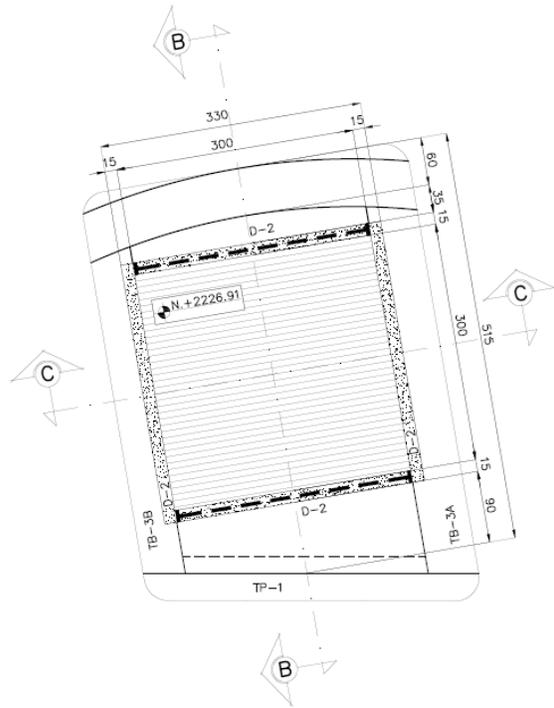


Figura 4.102.- Detalle 1. Pozo de acceso superior.

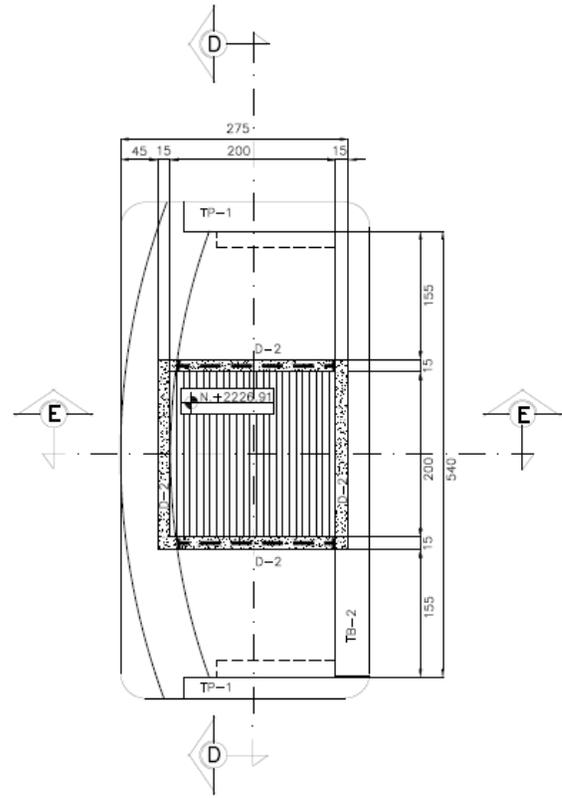


Figura 4.103.- Detalle 4. Pozo de acceso intermedio.

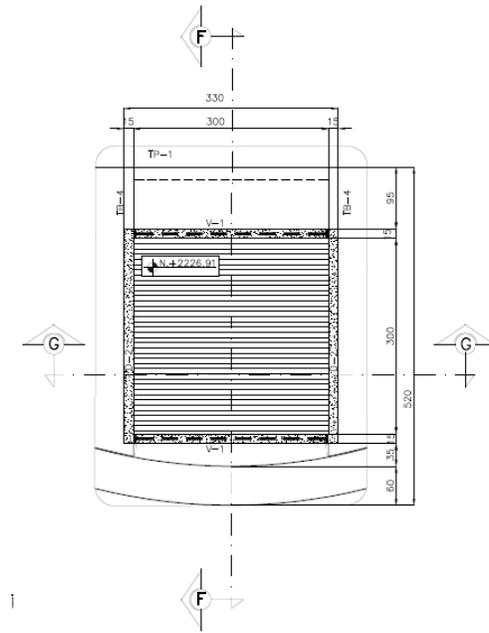


Figura 4.104.- Detalle 5. Pozo de acceso inferior.

Las tres imágenes obtenidas de <https://compranet.funcionpublica.gob.mx/>

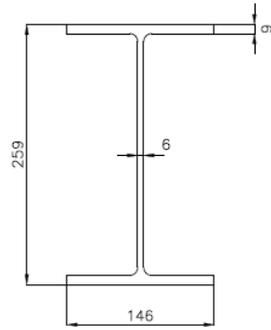


Figura 4.113.- Perfil del acero estructural para soporte de pozos de acceso.

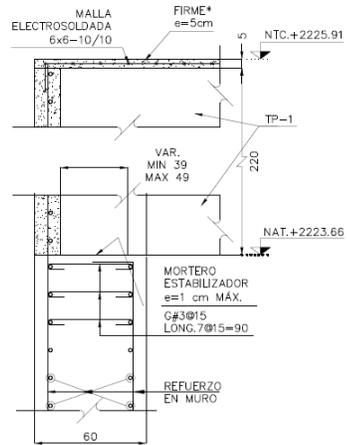


Figura 4.114.-Detalle de apoyo de traves portantes en muro estructural.

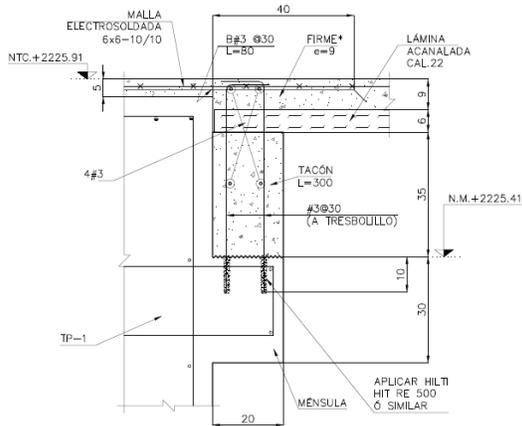


Figura 4.115.- Detalle de anclaje del firme de concreto con losacero en traves portantes.

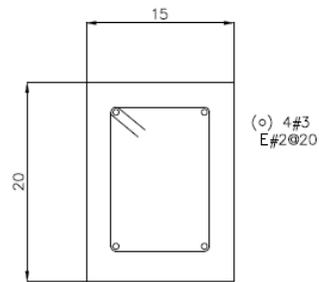


Figura 4.116.- Detalle de sección de dalas inferiores tipo D-1

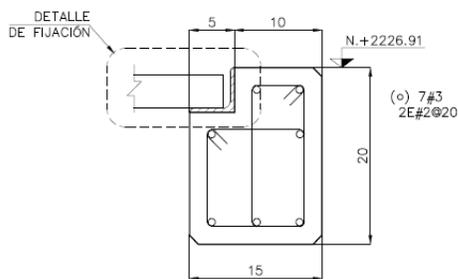


Figura 4.117.- Detalle de sección de dalas superiores tipo D-2.

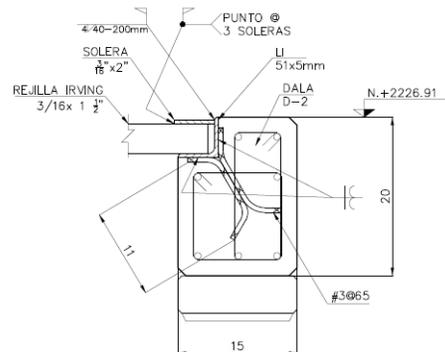


Figura 4.118.- Detalle de fijación de Rejilla Irving en dalas superiores tipo D-2.

Las seis imágenes obtenidas de <https://compranet.funcionpublica.gob.mx/>

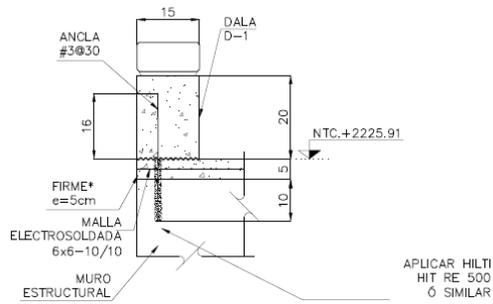


Figura 4.119.- Anclaje de pozos de acceso, sobre muro estructural.

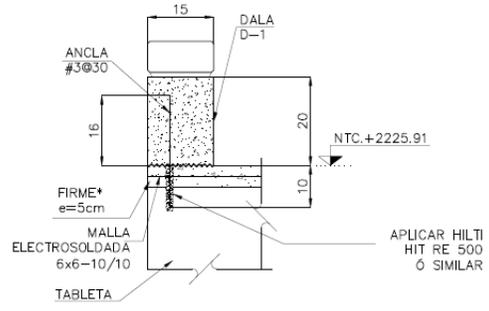


Figura 4.120.-Anclaje de pozos de acceso, sobre tabletas.

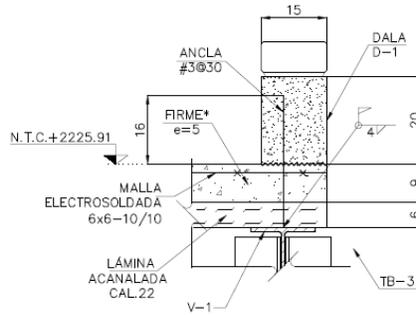


Figura 4.121.-Anclaje de pozos de acceso, sobre firme de concreto equipado con losacero.

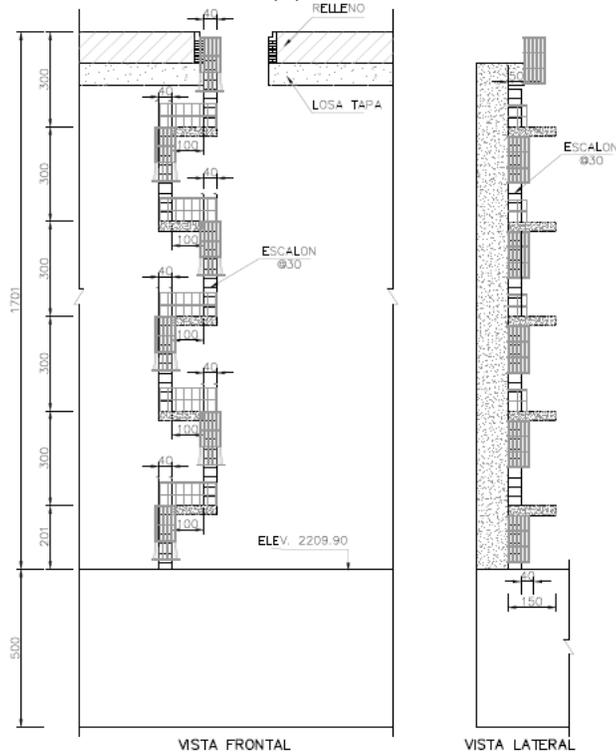


Figura 4.122.- Detalle de escalera metálica para acceso a lumbreras en pozo de acceso inferior.

Las cuatro imágenes obtenidas de <https://compranet.funcionpublica.gob.mx/>

CAPÍTULO 5: CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL UTILIZANDO EL MÉTODO DE EPB



Figura E.- Ejemplo de túnel en construcción (autoría propia).

5) CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL UTILIZANDO EL MÉTODO DE EPB

5.1) MEJORAMIENTO DE SUELO A LA ENTRADA Y SALIDA DE LOS PORTALES DEL TÚNEL

Previamente a comenzar la construcción del túnel por medio del equipo de excavación, se hacen mejoras en los primeros tramos de excavación del túnel, otorgando mayor seguridad ante el comportamiento del subsuelo debido a la excavación del túnel, a las lumbreras involucradas en cada sección.

Para realizar este mejoramiento, se realiza un procedimiento similar al de la extracción del material del terreno para las zanjas del muro pantalla, es decir, mediante un arreglo de tableros se hace posteriormente una sustitución de dicho material, por una mezcla de bentonita, cemento y agua (lodo fraguante), hasta alcanzar una resistencia óptima ante los diversas demandas durante la excavación del túnel.

Esta excavación y sustitución de material, se hace mediante equipo guiado (almeja guiada), dosificando la mezcla de materiales mencionada simultáneamente, para compensar el volumen extraído, hasta el nivel superior (o nivel tope) de concreto de los brocales en cada lumbrera, para poder estabilizar las paredes de excavación hasta su fraguado. Los tableros, se componen de primarios y secundarios, y bajo esa jerarquía se construyen de manera alternada, hasta la profundidad que el proyecto establece y podrán traslaparse 20cm como mínimo, como lo muestra la figura 5.

La superficie de mejoramiento tendrá un ancho constante de 12.80m, cada que inicia o termina un tramo del túnel en las lumbreras, mientras que su longitud, es variable de acuerdo a los espacios de las plataformas de trabajo, y de las construcciones y/o estructuras en la cercanía de las plataformas de trabajo.

Las características del **lodo fraguante**, son las siguientes:

- Peso volumétrico máximo, $\gamma_{max} = 14 \frac{kN}{m^3}$
- Módulo elástico mínimo, $E_{min} = 64.00 MPa$
- Resistencia a la compresión simple (a los 14 días), $q_u = 1.00 MPa$

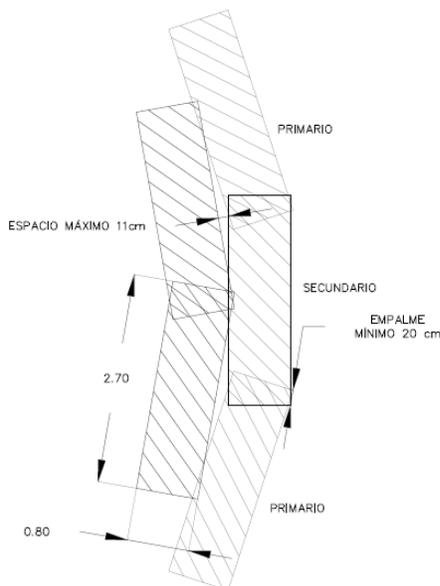


Figura 5.- Arreglo de tableros, para mejoramiento de suelo.

Imagen obtenida de <https://compranet.funcionpublica.gob.mx/>

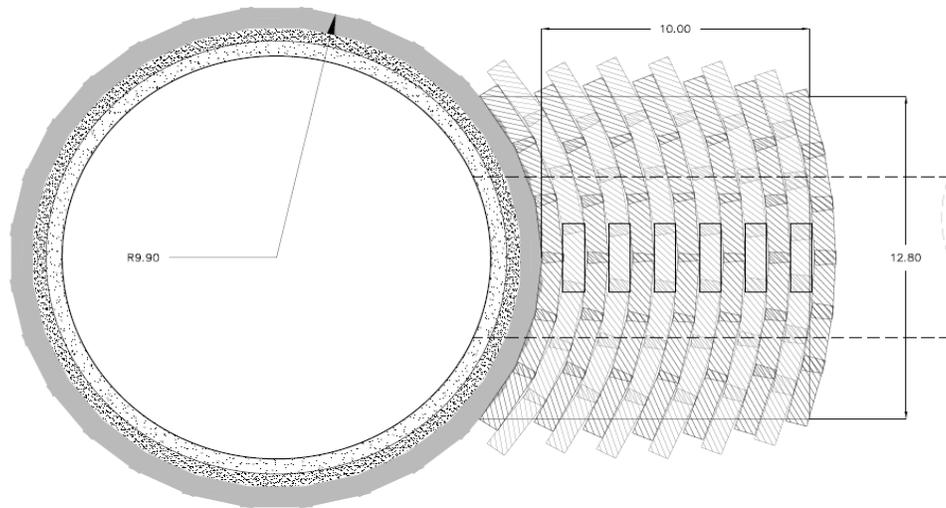


Figura 5.1.- Arreglo geométrico para mejoramiento de suelo.

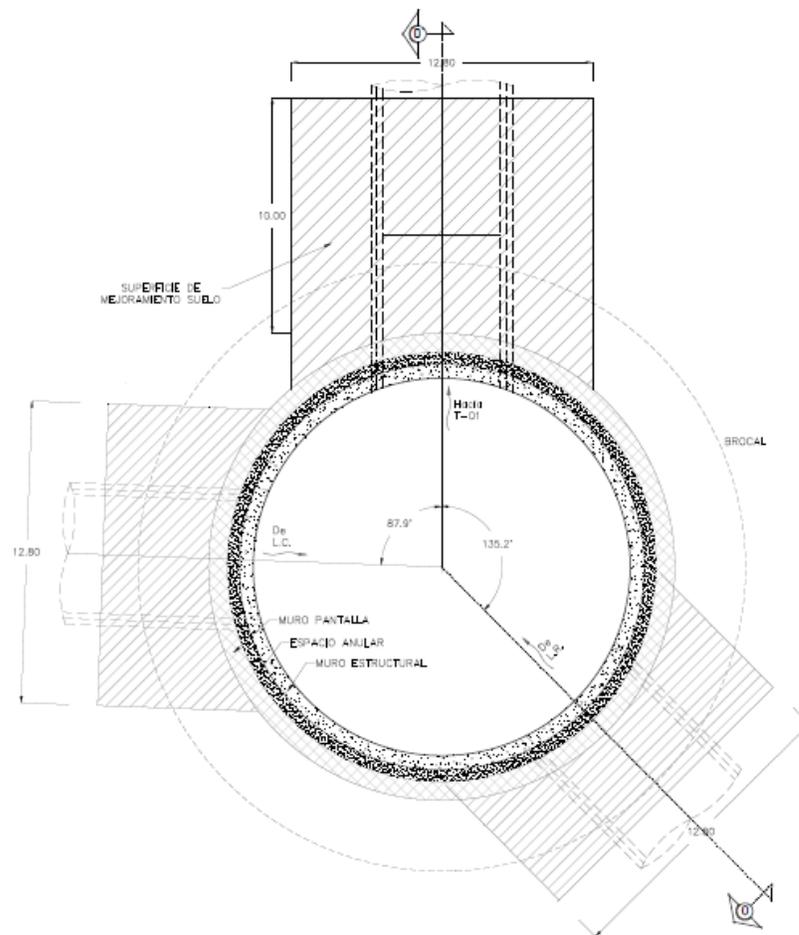


Figura 5.2.- Vista en planta de mejoramiento de suelo.

Las dos imágenes obtenidas de <https://compranet.funcionpublica.gob.mx/>

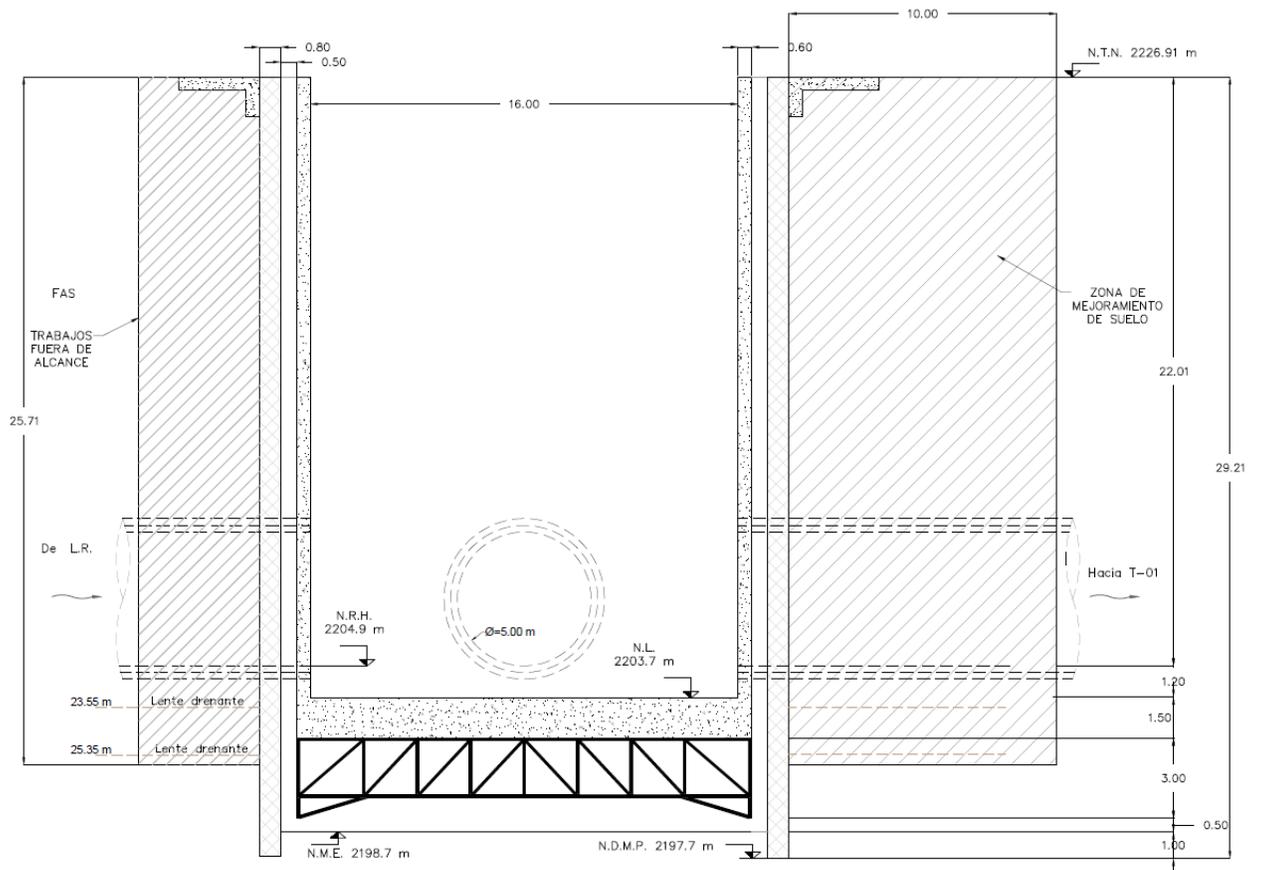


Figura 5.3.- Corte 0-0. Perfil de mejoramiento de suelo.
 Imagen obtenida de <https://compranet.funcionpublica.gob.mx/>

5.2) DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO CONSTRUCTIVO DE TÚNELES POR EARTH PRESSURE BALANCE (EPB)

El método de EPB (por sus siglas en inglés: Earth Pressure Balance, en español: Presión de Tierras Balanceada o Escudo de Presión Balanceada) consiste en un equipo mecánico-eléctrico de excavación de túneles, que posee un control de presión ejercida sobre suelos blandos. Durante el avance de este equipo, con apoyo de un tren de excavación, se van instalando de manera automatizada, una serie de elementos estructurales prefabricados de concreto reforzado, llamados dovelas.

El funcionamiento del equipo tunelador EPB consiste usualmente, en un escudo que empuja hacia adelante penetrando en el material del subsuelo con ayuda de una rueda de corte, sustentado por gatos de empuje apoyados sobre el espesor (o canto) del anillo de dovelas que han sido colocadas por medio de un brazo erector (o anillo erector), cuya función es colocar las dovelas en la posición adecuada, de acuerdo al arreglo de las piezas indicadas en el proyecto.

Cada empuje se planifica, a manera de seguir con el trazo establecido en el proyecto y evitar posibles desviaciones, para ello se tienen que tomar en cuenta los siguientes aspectos:

Una vez que sea instalado cada anillo de dovelas por completo, con apoyo del equipo de topografía se verifica la posición del último anillo instalado respecto a su alineamiento y elevación; mientras tanto, el escudo de excavación cuenta con dispositivos que indicarán la posición vertical y radial del escudo del equipo tunelador, cuya información será de utilidad para la puesta en marcha de la maquinaria. El escudo posee en su interior, una consola central de control (o centro de control) que mediante un equipo de cómputo, estima la relación entre el volumen excavado y el volumen desplazado ($\frac{\text{Volumen excavado}}{\text{Volumen desplazado}}$), es decir, que tanto material del subsuelo se ha retirado y transportado para su disposición en las plataformas de trabajo (en la superficie). Este monitoreo permite tener conocimiento y control para que no exista una sobre-excavación y sobre la magnitud de los esfuerzos inducidos en el subsuelo. En virtud a ello, la relación: $\frac{\text{Volumen excavado}}{\text{Volumen desplazado}}$ juega un papel importante, de acuerdo al resultado que se obtenga se pueden tener en cuenta los siguientes casos:

- Caso 1: $\frac{\text{Volumen excavado}}{\text{Volumen desplazado}} < 1$, indica que el terreno se está comprimiendo.
- Caso 2: $\frac{\text{Volumen excavado}}{\text{Volumen desplazado}} = 1$, indica una operación constante y adecuada.
- Caso 3: $\frac{\text{Volumen excavado}}{\text{Volumen desplazado}} > 1$, indica una sobre-excavación. Para controlar ello se debe disminuir la velocidad de avance del escudo, y/o ajustar las boquillas de la rueda de corte (Anguiano, Instrumentación y medición de túneles).

Para tener un control de las variables antes mencionadas, se cuenta con 2 tipos de avance del escudo:

- **Avance alternado:** consiste en un avance cíclico en el que, una vez instalado un anillo de dovelas, los gatos avanzan dejando el espacio para el siguiente anillo; mientras tanto, el escudo avanza sin realizar el giro de la rueda de corte, manteniendo la presión estable contra el frente de excavación, para ello se mantienen las boquillas cerradas, retrayendo la unidad de propulsión de la rueda de corte. En el instante que el escudo se desplaza 40cm, se acciona la rueda de corte con las boquillas abiertas, permitiendo el flujo del material del subsuelo en el instante que es excavado hacia el interior del equipo tunelador y por medio de tuberías, el lodo, material del subsuelo mezclado con el fluido de inyección (agua) es bombeado hacia las zonas de disposición de lodos, ubicado en la superficie de las lumbreras, donde es depositado, tratado y posteriormente trasladado hacia una zona de tiro. El ciclo es repetido hasta que inicia nuevamente, en el instante en que se cierran las boquillas de la rueda de corte y se avanza sin una acción de giro, 40cm. Este avance es poco recomendable debido a la serie de movimientos para equilibrar la relación $\frac{\text{Volumen excavado}}{\text{Volumen desplazado}}$, y de su dificultad de mantener valores aceptables de la relación mencionada.
- **Avance simultáneo:** es la operación usual y recomendable, del que se ha hecho mención y que consiste en que el escudo y la cabeza cortadora avancen de manera simultánea sin interrupciones hasta que los gatos se desplazan a manera que se pueda colocar el siguiente anillo de las dovelas.

(Anguiano, Instrumentación y medición de túneles)

A lo largo del escudo del equipo, se localiza una cubierta de acero, conocida como faldón que está compuesta por segmentos soldados entre ellos. El faldón cumple con el requisito de ser resistente ante las siguientes condiciones: la presión total ejercida por el material del terreno y la fuerza ejercida por los gatos de empuje para poder desplazar al escudo al frente de excavación para dar el trazo requerido por proyecto. El diámetro total del escudo deberá ser mayor al del diámetro del túnel solicitado en el proyecto, para poder dar el espaciado correcto a la inyección de mortero entre el anillo de dovelas y el material del subsuelo, este relleno será un apoyo lateral ante el pandeo y una separación de los anillos de dovelas ante las condiciones salitrosas del terreno. Se recomienda una presión para la inyección de mortero, no mayor de $1 \frac{kg}{cm^2}$, para el caso de suelos arcillosos de alta plasticidad, para evitar problemas de levantamiento y rompimiento de la estructura del pavimento, o la penetración del material inyectado en ductos aledaños al túnel. Por otra parte, se debe tener especial cuidado entre la separación del faldón del escudo con los anillos que serán instalados, guardando una distancia de 5mm, para evitar el contacto entre las dovelas con el escudo, que puedan ocasionar esfuerzos que afecten el funcionamiento de las dovelas o de las juntas de las mismas, que puedan provocar la infiltración y salida del material de inyección (*Anguiano, Instrumentación y medición de túneles*).

Posteriormente del escudo, hay un tren de excavación, de aproximadamente 100m de longitud, que avanza de manera sincronizada con el escudo de excavación, al estar conectado a este elemento. A lo largo de este tren se cuenta con los recursos e insumos necesarios para la inyección de mortero entre el espacio de las dovelas y la pared circular del terreno natural, inyectado a través de las dovelas que poseen orificios diseñados para realizar la inyección de mortero, desde su origen de fabricación para evitar perforaciones en obra a estos elementos, como para todas las actividades que se desarrollen para lograr la construcción del túnel. Una vez finalizada la colocación de los anillos de las dovelas y el respectivo relleno de mortero, en toda la longitud del túnel, se hace un relleno de concreto reforzado en el interior del túnel formado por los anillos de dovelas, mediante cimbra telescópica deslizable.



Figura 5.4.- Visita a sitio de equipos para excavación de túneles. Rueda de corte para exhibición (autoría propia).

5.3) PREPARACIONES, BAJADA Y CARACTERÍSTICAS DEL EQUIPO DE EXCAVACIÓN DEL TÚNEL

Para iniciar la etapa de excavación del túnel, se deben de realizar preparaciones del equipo de excavación de la tuneladora y la bajada de las piezas ya ensambladas del escudo y posteriormente del tren de excavación, una vez realizado el mejoramiento del terreno a la entrada y salida del túnel. Se debe de contar con los insumos necesarios para efectuar las actividades de montaje del escudo del equipo excavador en las plataformas de trabajo, y contar con instalaciones tales como:

- **Subestación eléctrica:** suministra la energía eléctrica al equipo del escudo y los diversos equipos que requieren de energía eléctrica a lo largo de las actividades de excavación, con tensión de alimentación de $23kV$, en 3 distribuciones:
 - ❖ Túnel: $4160 V$
 - ❖ Túnel y superficie: $220 V$
 - ❖ Superficie: $440 V$

Por otra parte, se debe de contar con un respaldo energético en caso de algún imprevisto o falla del suministro, y disponer de una planta de emergencia para poder continuar con los trabajos sin problemas.

- **Cisterna para agua tratada:** es necesario suministrar agua durante la excavación del material del subsuelo, a manera de fluido de inyección. En el caso que el suministro de agua no sea suficiente, la cisterna cuenta como un respaldo ante estos casos, su capacidad es de acuerdo al avance que se tenga de la instalación de anillos de dovelas, por lo menos para 10 empujes de anillos.
- **Sistema de circulación de lodos y planta de:** es un sistema que consta de tuberías conectadas a la superficie para disponer el material de rezaga (material del subsuelo mezclado con lodo de ademe) que se encuentra en la cámara de presurización, mediante bombas hacia el exterior de las lumbreras, en las zonas de las plataformas de trabajo. La planta de tratamiento funciona sedimentando el material excavado del subsuelo del lodo, es decir, por acciones gravitatorias (Anguiano, Instrumentación y medición de túneles).

Por otra parte, se procede a la construcción de dos estructuras de concreto reforzado para que el escudo empiece a operar en las preparaciones hechas en el muro estructural de la lumbrera, en conjunto con los portales de entrada, dichos elementos son: muro de reacción y cuna.

El **muro de reacción** es un apoyo vertical de concreto reforzado, colocado inmediatamente después del muro estructural de la lumbrera, en el que el escudo podrá realizar su desplazamiento hacia las zonas de demolición proyectadas en las lumbreras, mediante gatos de empuje. Para que estos gatos de empuje puedan lograr el avance, se apoyan de medios anillos de dovelas (semi-anillos de atraque) instalados de manera ordenada (de acuerdo al tipo de dovelas) y apoyado en el muro de reacción, mientras que la otra mitad, para evitar colocar más dovelas, se utilizan tuberías apoyadas en este mismo muro de reacción, y en el que los gatos de empuje realizarán su cometido, hasta que los gatos, una vez alcanzada su prolongación total mediante sus vástagos, permitan al escudo comenzar a excavar las preparaciones en el muro estructural y posteriormente seguir con el trazo y construcción del túnel. Cabe destacar, que las dovelas instaladas para el primer empuje del escudo, en el interior de la lumbrera, será provisional, para que puedan instalarse posteriormente y de manera correcta en el trazo del túnel, en el medio adecuado: el subsuelo.

La **cuna** es un apoyo horizontal de concreto reforzado, para que el escudo pueda desplantarse, una vez ensamblado tanto en las plataformas de trabajo, como en el interior de la lumbrera, donde están instalados una serie de rieles, para que con ayuda del muro de reacción, pueda desplazarse hábilmente hacia las preparaciones para la excavación del túnel.

La figura 5.5 muestra la ubicación de estos elementos, previamente a iniciar la excavación del túnel, en la lumbrera, mientras que la figura 5.6, muestra un ejemplo de una cuna para el soporte del escudo y posteriormente para el tren de excavación.

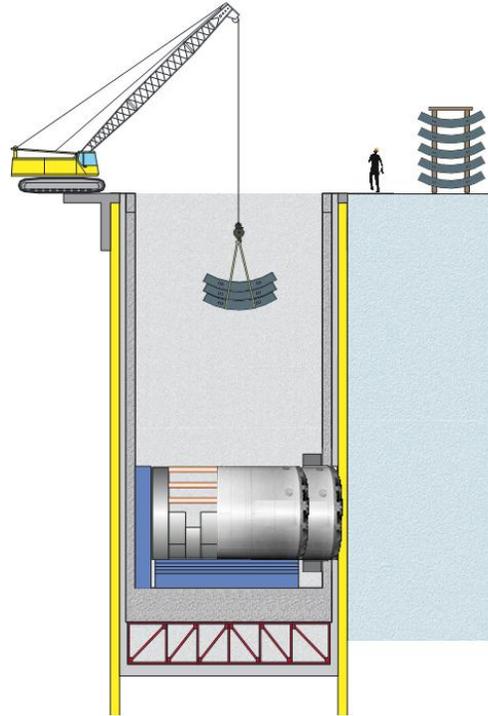


Figura 5.5.- Perfil de la ubicación del muro de reacción y cuna en lumbrera, indicados en azul marino.
(Cortesía: Ing. Luis Adrián Palomino Cortés)

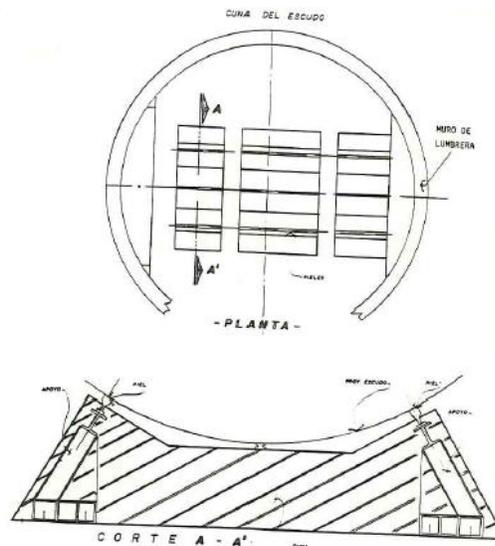


Figura 5.6.- Ejemplo de cuna.
(Cortesía: Ing. Juan Manuel Anguiano Lozada)

Mientras tanto, se realizan las actividades referentes al montaje de las piezas del escudo de excavación, para su bajada y ensamble, con el apoyo de equipos de carga, que bien pueden ser un par de grúas, una de ellas para el soporte de los equipos, y otra para las maniobras y ajustes de las diversas piezas del escudo y del tren de excavación.

Para ello, se tendrá un orden de montaje, que consiste en ensamblar las piezas del escudo en las plataformas de trabajo de las lumbreras, mediante diversas cuadrillas de trabajo, asignadas en sus respectivos talleres (por mencionar algunos: mecánicos, de soldadura, de corte, de mantenimiento, entre otros), y mediante los equipos de bajada colocar las piezas en la cuna en el interior de la lumbrera. El ensamble y bajada de los componentes del escudo tendrán el siguiente orden, que se observará, inicia desde los componentes interiores del escudo hasta la pieza exterior que será el faldón, de la parte inferior hasta la parte superior, con el objetivo de que todas las piezas permanezcan en su posición correcta y durante su bajada no sufran algún daño debido a las operaciones de colocación en el interior de la lumbrera.

1. Accionamientos (motores)
2. Diversas piezas internas (tornillo sinfin, gatos de empuje, unidad propulsora de la cortadora, gato de transmisión)
3. Rueda de corte
4. Anillo (o brazo) erector
5. Faldón

Las figuras 5.7 y 5.8, mostrarán las diversas piezas que componen al escudo de excavación, así como un ejemplo del detalle de la rueda de corte del escudo:

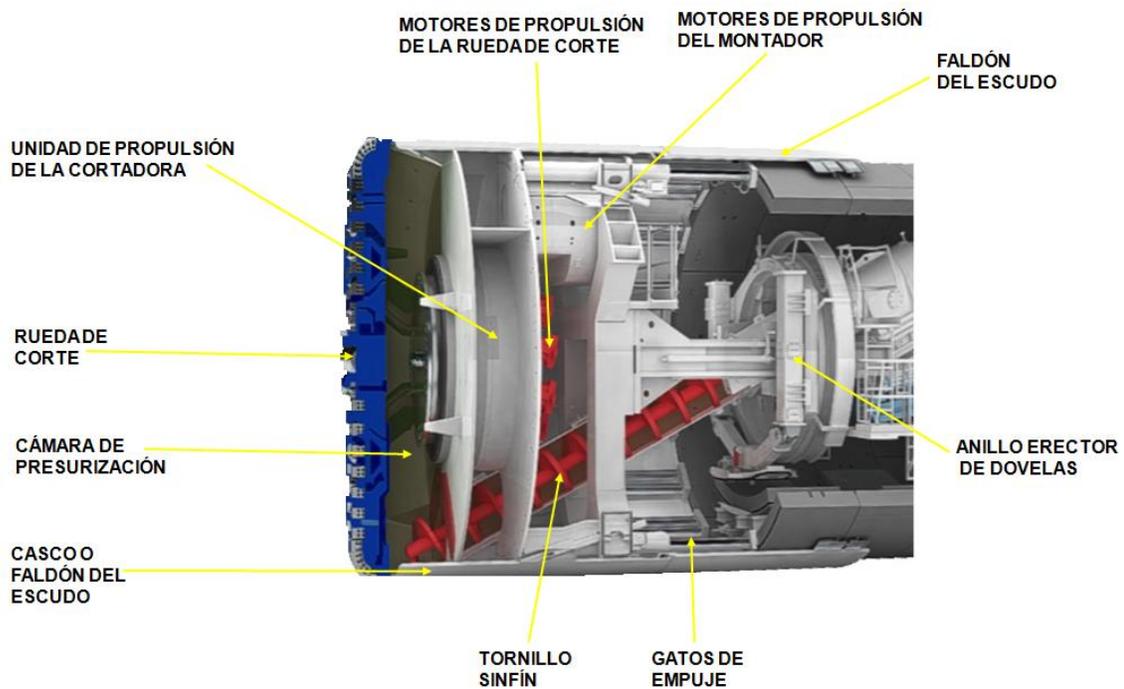


Figura 5.7.- Componentes del escudo de excavación de un equipo tunelador EPB.
(Cortesía: Ing. Luis Adrián Palomino Cortés)

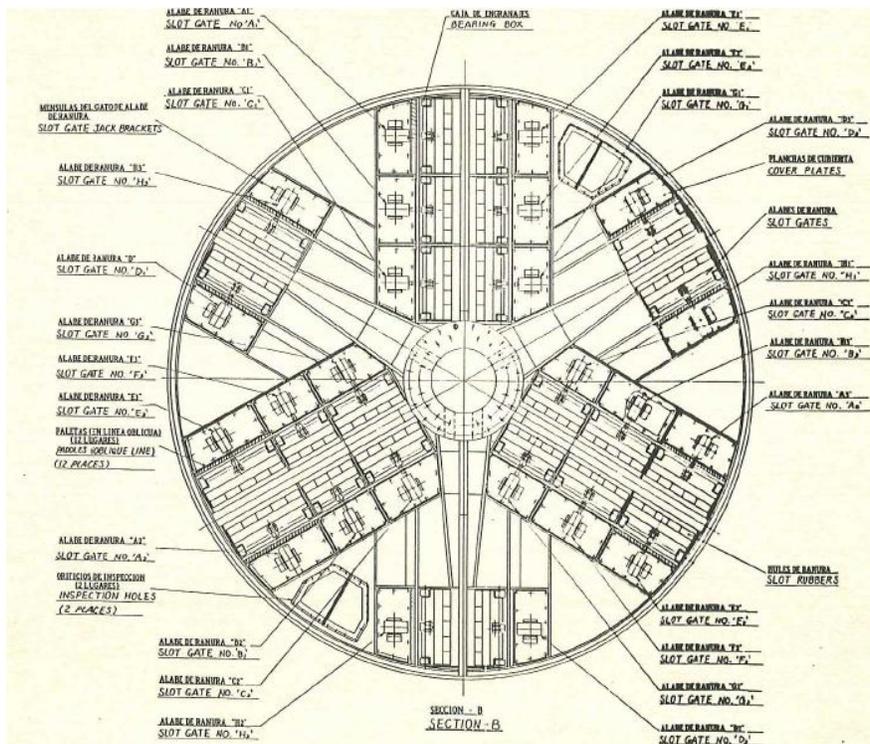


Figura 5.8.- Detalle de rueda de corte del escudo de excavación.
(Cortesía: Ing. Juan Manuel Anguiano Lozada)

Las características que posee un escudo de excavación, son usualmente las siguientes, para trabajos relacionados con el drenaje de la Ciudad de México, aunque pueden ser variables:

- Longitud del escudo: 7.30m
- Diámetro exterior del escudo: 6.24m, para este proyecto: 6.40m sugerido.
- Diámetro de rueda de corte:
- Peso del escudo: 240ton
- Número de gatos de empuje: 24 piezas, distribuidas en 12 pares, cada uno con capacidad de empuje de 120ton, con una carrera de 1.15m (estiramiento del gato)
- Gato de transmisión (articulación): 360ton de capacidad.
- Número de mezcladoras de la cámara de mezclado: 24

Cabe destacar que todo el personal involucrado en las actividades de montaje, debe ser certificado y altamente calificado para realizar estas actividades, debido a que las piezas en su mayoría son soldadas y atornilladas, y deben garantizar que el escudo funcionara correctamente en cada una de sus componentes, de la misma manera que el tren de excavación.

Por otra parte, el tren de excavación, se realizará su montaje de igual forma, en las plataformas de trabajo, sin embargo, su bajada estará en función del avance de excavación de la rueda de corte, para ello, una vez que se libre la longitud que posean los carros del tren de excavación (también llamado tren de apoyo), se procede a bajar los carros sobre la cuna, y conectarlos al escudo de excavación, para que avancen simultáneamente con este equipo.

Cabe destacar que en cuanto se vayan colocando los anillos de dovelas, se instalarán rieles, para que el tren de apoyo pueda avanzar adecuadamente, como también diversas instalaciones como: ventilación en zona atmosférica, suministro de aire a alta y baja presión, suministro de agua en alta presión, instalaciones de bombeo, para transportar el material de rezaga, como de iluminación, para facilitar los trabajos durante la excavación del túnel.

La figura 5.9, muestra un ejemplo de la distribución de las instalaciones antes mencionadas, al momento de instalar los anillos de dovelas, durante las actividades de excavación, para túneles con aire comprimido.

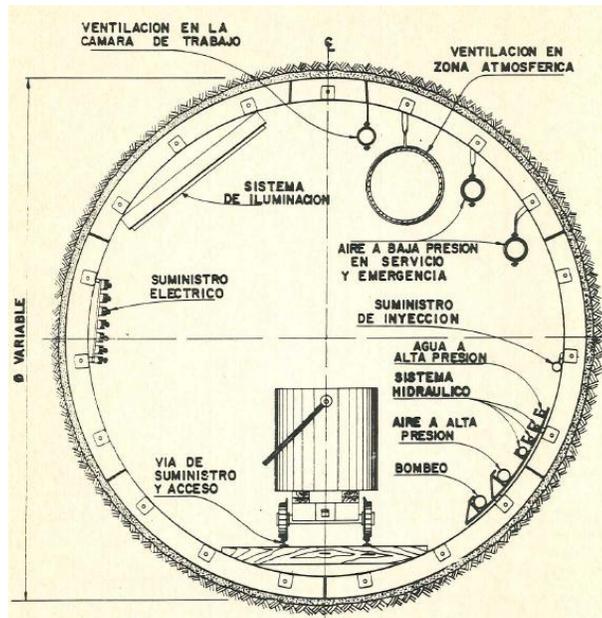


Figura 5.9.- Distribución de instalaciones para correctas operaciones del túnel con equipos.
(Cortesía: Ing. Juan Manuel Anguiano Lozada)

Se tiene que tomar en cuenta que los portales de salida, estén listos para recibir al equipo de excavación (como se mencionó en el subcapítulo 4.10) descrito anteriormente. Para ello, durante la construcción del mismo portal se tiene que demoler hasta descubrir el segundo lecho de la sección de demolición del muro estructural para la llegada del equipo de excavación, mediante cuadrillas de demolición, para que posteriormente el escudo de excavación, ya armado y posicionado, se introduzca hasta demoler el tramo restante de las preparaciones del muro estructural, e iniciar la excavación del túnel.

5.4) INSTALACIÓN DEL REVESTIMIENTO PRIMARIO DEL TÚNEL Y RETIRO DEL EQUIPO DE EXCAVACIÓN

El revestimiento primario es la primera capa que conforma al túnel, posee a lo largo del túnel una serie de anillos compuestos por dovelas y un relleno de mortero entre las paredes del subsuelo excavado por el equipo de excavación EPB y la dovelas colocadas por este mismo sistema de excavación.

Las **dovelas** son elementos estructurales de concreto reforzado prefabricado que en conjunto forman el soporte inicial del túnel también llamados anillos de dovelas o revestimiento primario. Se tienen para el caso de este proyecto 6 tipos de dovelas, que indican el orden en que se deben de colocar: A1, A2, A3, B, C, K.

Las dovelas tipo A, conocidas también como dovelas normales son las primeras en colocarse, siguiendo también su numeración de manera ascendente, y de acuerdo al arreglo del proyecto se ubican en la parte inferior de lo que será el túnel (llamado **cubeta**); las dovelas tipo B y C, se les conoce también como dovelas tangenciales, y se ubican en las secciones laterales: izquierda y derecha, de la circunferencia del túnel (llamados **hastiales**); finalmente las dovelas tipo K o de cierre, son las que poseen dimensiones más pequeñas que las demás dovelas, se encuentran ubicadas en la parte superior del túnel (llamada **clave**). Estos elementos estructurales poseen las siguientes características:

- Espesor (peralte): 25cm
- Ancho (en el sentido del túnel): 150cm
- Longitud de curvatura: variable por dovela
- Concreto estructural Clase I, fabricado con cemento resistente a los sulfatos, con base en la especificación: CPC 30 RS, o CPC 40 RS.
- Peso volumétrico, $\gamma \geq 22.00 \frac{kN}{m^3}$.
- Resistencia a la compresión simple a los 28 días, $f'_c = 35.00MPa$, de acuerdo a Norma NMX-C414-ONNCCE, vigente.
- En uniones soldadas de varillas, utilizar electrodos: Serie E-90xx
- Recubrimiento libre de 5.00cm.
- El **acero de refuerzo** tendrá un límite de fluencia, $f_y = 412.00MPa$.

Por otra parte, las dovelas poseen una serie de elementos para su fijación entre ellas y formar los anillos de dovelas, así como la unión entre anillos de dovelas para formar el túnel, estos elementos son tornillos y otras piezas conocidas como insertos.

Los **insertos** son elementos hechos a base de polímeros o materiales similares que quedan embebidos en el concreto armado y que facilitan el manejo de las dovelas, así como la unión entre estas piezas. Podemos encontrar una gran variedad de estas piezas en todas las dovelas, aunque en distintas distribuciones, como son los siguientes:

Rebaje para tornillo.- Es una muesca trapezoidal en la dovela, en cuyo espacio se encuentra un orificio para introducir un **inserto roscado**, las dimensiones de este orificio son:

Diámetro interior: 30mm

Diámetro exterior: 34mm

Inserto roscado.- Es un fijador Bolting System T25/140 (1 socket+1 tornillo), tipo Sofrasar o similar, con las siguientes características:

- | | |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> ▪ Tornillo T25x370 ❖ Longitud total: 370mm ❖ Longitud de cuerda: 140mm ❖ Diámetro de redondo macizo: 22mm ❖ Diámetro exterior de cuerda: 25.65mm ❖ Diámetro interior de cuerda: 20.65mm ❖ Material: Acero C45, o similar galvanizado ❖ Resistencia: $0.002 > 400 MPa$ | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Arandela plana ❖ Diámetro interior: 26mm ❖ Diámetro exterior: 50mm ❖ Espesor: 4mm ❖ Material: Acero A-33 o A-37 ▪ Inserto roscado (o socket) ❖ Longitud: 140mm ❖ Diámetro exterior: 35mm ❖ Material: POLIAMIDA +F.V. ❖ Resistencia a la tensión: $> 220kN$ |
|---|---|

Inserto para inyección.- Por medio de estas piezas se inyectará el mortero para dar una separación entre el revestimiento primario con el subsuelo para evitar su contaminación o agentes que puedan afectar a las piezas estructurales, posee las siguientes características:

- Longitud: 250mm
- Diámetro exterior: 38mm
- Material: Polietileno o similar
- Resistencia a la tensión: 37 ton

Juntas de estanqueidad.- Son piezas de material adaptable para sellar dos caras, son utilizadas genéricamente en cualquier elemento hidráulico y/o neumático para la conducción de algún fluido y/o sólido, también se le conoce como empaque o junta mecánica (Fuente: www.cpisefa.com/juntas-de-estanqueidad-y-sellado/). Para el caso del proyecto, permite en conjunto con el tornillo roscado y un sello hidroexpansivo, garantizar la unión y el buen sellado entre las dovelas, posee las siguientes características:

- Fabricante: Phoenix
- Tipo: Caracas
- Modelo: M383 92

Existen 2 tipos de juntas, en este proyecto: longitudinal y transversal.

La **junta longitudinal** es aquella que une a dos dovelas de un mismo anillo y posee sólo una junta de estanqueidad (en el eje de la dovela) y unos insertos roscados, mientras que la **junta transversal** es aquella que une a dos dovelas de anillos diferentes y consta de la junta de estanqueidad y unos **insertos de acoplamiento**.

Insertos de acoplamiento.- Son piezas roscadas de sección variable, que poseen las siguientes características:

- | | | |
|---|---------------------------------|------------------------------|
| • Clavija | • Resistencia a tensión | • Socket |
| ❖ Longitud: 216.3mm | ❖ Nominal: 60kN | ❖ Longitud: 96.50mm |
| ❖ Diámetro: 67.60mm | ❖ Última: 100kN | ❖ Diámetro exterior: 57.30mm |
| ❖ Material: POLIAMIDA 6+, Núcleo de acero M16 | ❖ Resistencia a cortante: 160kN | ❖ Material: POLIAMIDA 6.6 |

Las figuras 5.11- 5.37 indicarán el detalle de una de las dovelas como de los tornillos e insertos para su ensamble y formar el revestimiento primario con las demás dovelas.

Una de las actividades para la construcción del túnel como ha sido descrita, es la colocación de las dovelas y su ensamble de manera simultánea al avance de la excavación con el escudo. Para lograr esto, se inicia un proceso que involucra el transporte de las dovelas, situadas en una planta de dovelas, hasta el patio de dovelas en las lumbreras, de acuerdo al área de cada una de ellas, posteriormente se pueden ir apilando de acuerdo a su tipo (A1, A2, A3, B, C, y K). Como se mencionó, se inicia una vez ensamblada la maquinaria, preparada topográficamente y encendidos los componentes eléctricos y motores necesarios una vez suministrados y conectados a la subestación eléctrica.

El equipo pasa por el portal de entrada/salida, con apoyo de los gatos de empuje, en conjunto con los medios anillos de atraque, y las tuberías apoyadas en el muro de reacción, demoliendo la parte restante del muro estructural previamente preparada, posteriormente penetra en los mejoramientos del terreno, hasta librar un espaciamiento para colocar el primer anillo de dovelas.

Para ello, los portales de entrada/ salida, juegan un papel importante, puesto que con los sellos de neopreno y las placas móviles en el exterior de estos portales, impedirán, que el mortero que se inyecta entre el primer anillo de dovelas y el subsuelo no se desplace, impidiendo la unión entre el anillo de dovelas y el subsuelo; y por otra parte impedir, que debido al apoyo y fuerza aplicada de los gatos de empuje en el canto del primer anillo de dovelas se desplace incontroladamente hasta salirse, o bien mover la posición del anillo, respecto de su posición original. De manera simultánea, se van instalando las dovelas en la posición adecuada, hasta formar el anillo con apoyo del anillo erector, que gracias al sistema de polipastos que posee, las dovelas son colocadas en el anillo erector, que se encarga de situar cada dovela en su lugar.

Hasta este punto, se tiene listo el primer anillo de dovelas, y para poder continuar con la excavación, los gatos de transmisión (o articulación) posicionan, con apoyo de la brigada de topografía la dirección de avance del escudo. Una vez conciliada la dirección y posición, los gatos de empuje, se desplazan y empujan al escudo (cuya operación es un **avance simultáneo**). El escudo corta al material del subsuelo debido a la rueda de corte, con ayuda de la cámara de presurización que se encarga de equilibrar las fuerzas de empuje de tierras y el empuje de la presión de poro por medio del aire comprimido. El material que se ha excavado, se mezcla con agua y con aire a presión por medio de los mezcladores para evitar altas temperaturas dentro de la cámara, adherencia del material de rezaga que afecten las operaciones, siempre teniendo en cuenta la relación $\frac{\text{Volumen excavado}}{\text{Volumen desplazado}}$, y posteriormente el material de rezaga, es transportado por medio del tornillo sinfín (o tornillo helicoidal) hacia las tuberías dispuestas para el transporte de este material, por medio de equipos de bombeo, hacia el exterior de las lumbreras para su disposición y tratamiento.

Una vez que se libre un espaciamiento en el que se puedan ir introduciendo los carros para el tren de excavación (o "gantrys"), se van bajando, por medio de las grúas sobre la cuna y conectando con el equipo de excavación, para que en estos trenes se vayan colocando las instalaciones en apoyo a las actividades de construcción del túnel. El tren de apoyo, posee la cabina de operaciones, en donde se hace el control de operaciones, unidades e instalaciones de potencia eléctrica, neumática, sistemas de válvulas y de tuberías para la distribución de los diversos insumos, como agua, aire a presión, mortero y el sistema de bombeo para la subida de estos materiales al exterior de la lumbrera. En la figura 5.10, se mostrará un ejemplo de un tren de apoyo en perfil, para su visualización y en la figura 5.11 un renderizado del equipo de excavación con el tren de excavación. Finalmente, este procedimiento se repite, hasta llegar a la siguiente lumbrera, en donde se hará la revisión del equipo de excavación, como su mantenimiento.

Por mencionar, la bajada de las dovelas es posible, gracias a equipos como grúas, que mediante una banda de neopreno, se colocan, hasta situarlas en un "truck", que es un medio de transporte que se desplaza en las vías instaladas a lo largo del tramo del revestimiento primario que ya se ha construido. El "truck" se encuentra en condiciones de recibir a las dovelas y transportarlas hasta el frente de excavación, y lo puedan recibir los polipastos para que el anillo erector pueda instalar las dovelas y se pueda realizar la inyección de mortero a través de los insertos de inyección dispuestos en estos elementos estructurales. Este ciclo es repetido, hasta que se finalice la construcción del túnel, con la variación de que uno de los patios de dovelas de las 11 lumbreras sea, el que tenga en almacén (o stock) a estos elementos estructurales y todo el proceso de transporte mencionado, en virtud de la lumbrera más cercana al frente de excavación. Esto implica, que las lumbreras deberán estar listas en su totalidad para recibir al equipo de excavación, para poder dar seguimiento al proceso de excavación, dependiendo del avance que se tenga del túnel y para poder cumplir este requisito, se pueden priorizar la construcción de las lumbreras para agilizar los trabajos.

Una vez que se termine, el proceso de excavación del túnel, se procede a desmontar y subir los equipos a las plataformas de trabajo de la lumbrera, para el retiro de este equipo. De manera similar a la bajada del equipo, se emplean un par de grúas para la subida de las piezas del escudo en el siguiente orden:

1. Rueda de corte
2. Faldón
3. Diversas piezas internas (tornillo sinfin, gatos de empuje, unidad propulsora de la cortadora, gato de transmisión)
4. Anillo erector
5. Unidad articulada (donde se ubican los gatos de articulación)
6. Tornillo sinfín
7. Gatos de transmisión
8. Accionamientos (motores)
9. Instalaciones del tren de excavación
10. Carros del tren de excavación

Hasta este punto, se concluye la instalación del revestimiento primario, y se continúa con la construcción del revestimiento definitivo.

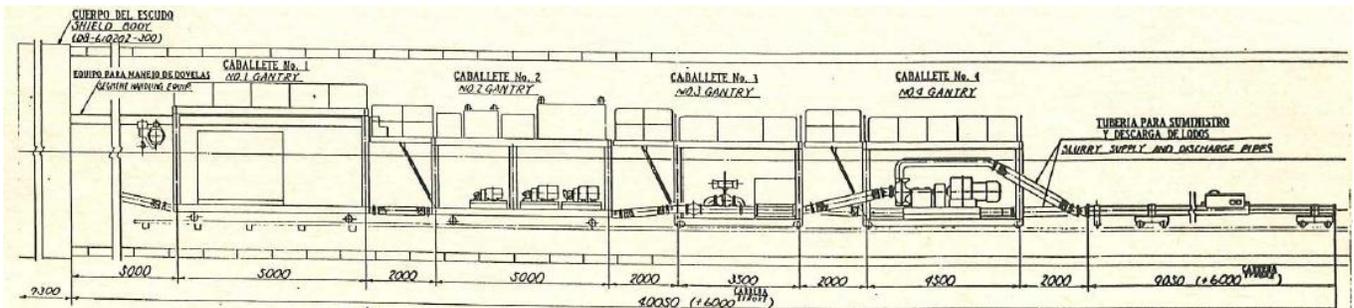


Figura 5.10.- Ejemplo de tren de excavación (o tren de apoyo).
(Cortesía: Ing. Juan Manuel Anguiano Lozada)

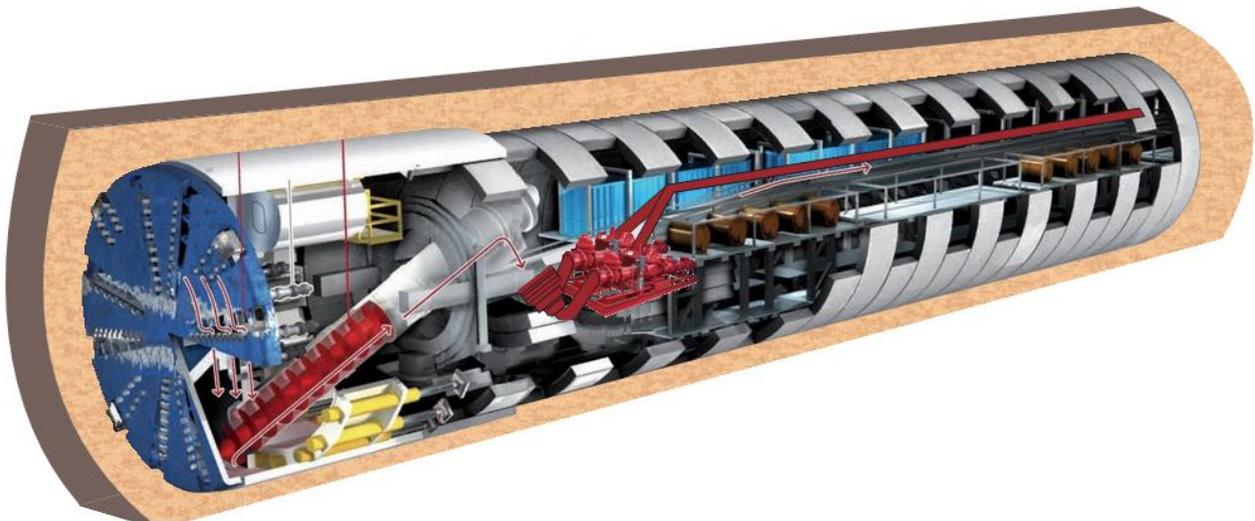


Figura 5.11.- Escudo con tren de apoyo, en funcionamiento.
(Cortesía: Ing. Luis Adrián Palomino Cortés)



Figura 5.12.- Distribución de dovelas para formar un anillo.

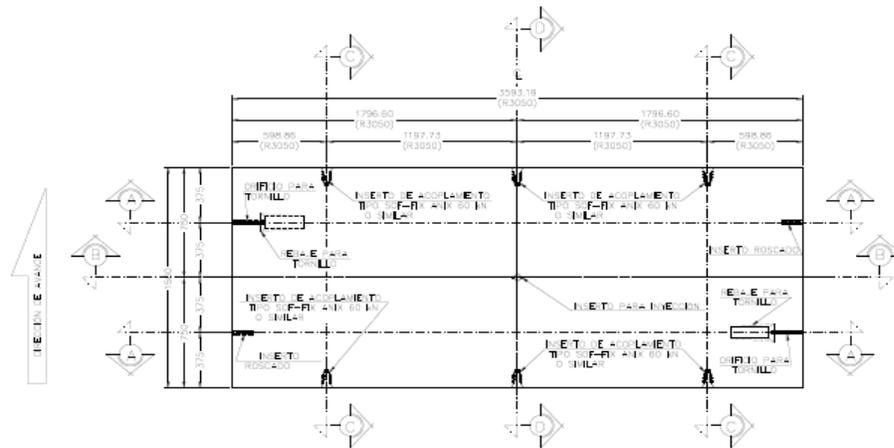


Figura 5.13.- Vista superior en planta de la dovela A1 (cara exterior del túnel).

Las dos imágenes obtenidas de <https://compranet.funcionpublica.gob.mx>

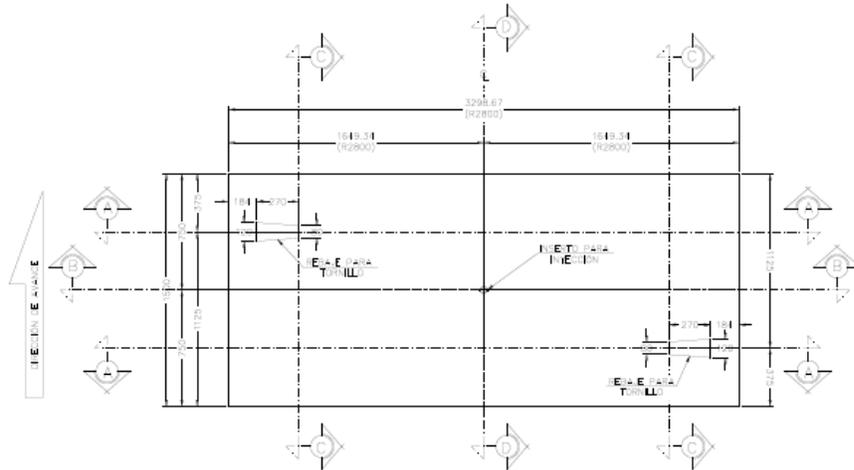


Figura 5.14.- Vista superior en planta de la dovela A1 (cara interior del túnel).

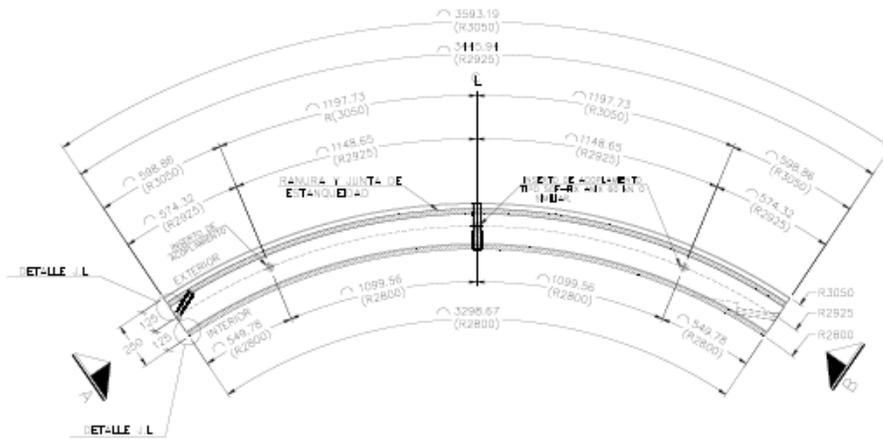


Figura 5.15.- Elevación de la dovela A1, en el sentido de avance del túnel.

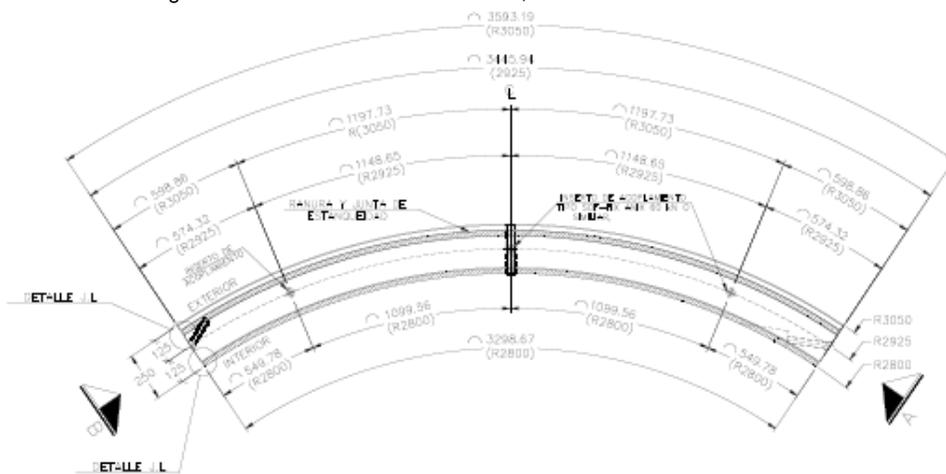


Figura 5.16.- Elevación de la dovela A1, en el sentido contrario de avance del túnel.

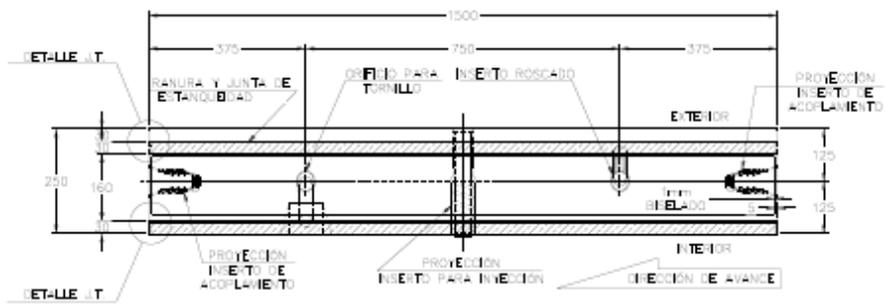


Figura 5.17.-Vista A. Dovela A1.

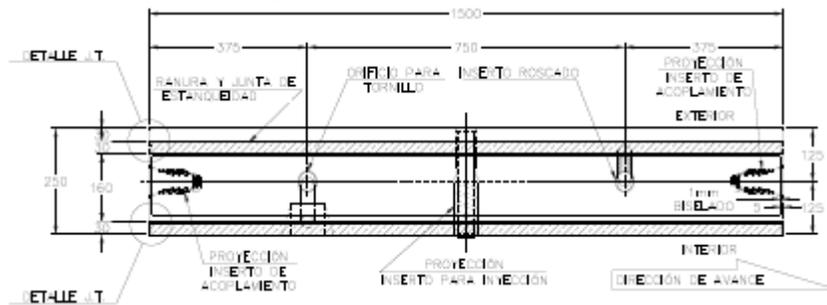


Figura 5.18.-Vista B. Dovela A1.

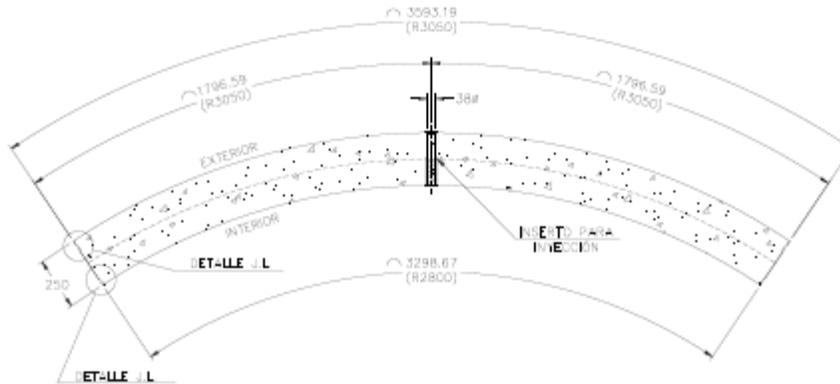


Figura 5.19.-Corte A-A. Dovela A1.

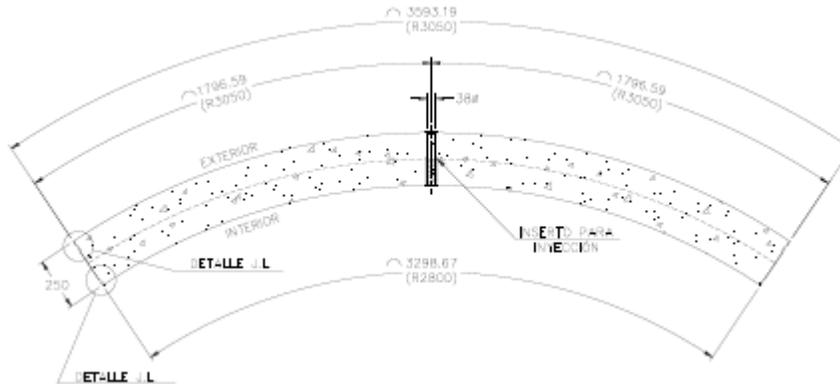


Figura 5.20.-Corte B-B. Dovela A1.

Las cuatro imágenes obtenidas de <https://compranet.funcionpublica.gob.mx/>

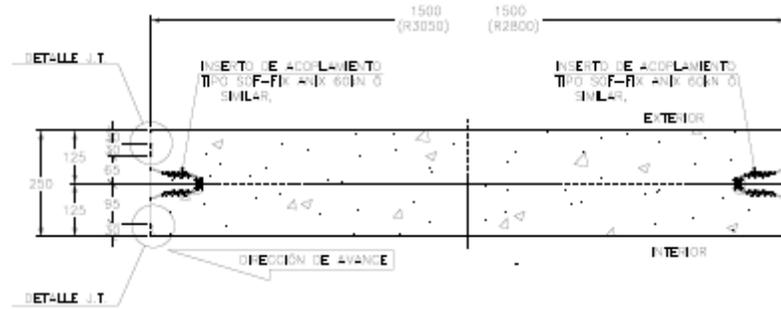


Figura 5.21.-Corte C-C. Dovela A1.

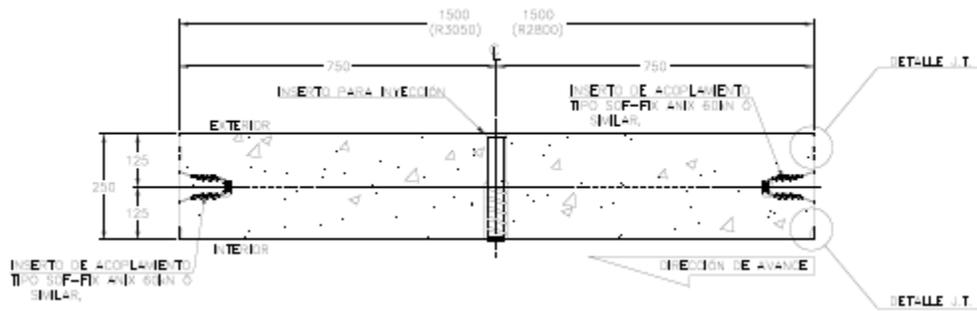


Figura 5.22.-Corte D-D. Dovela A1.

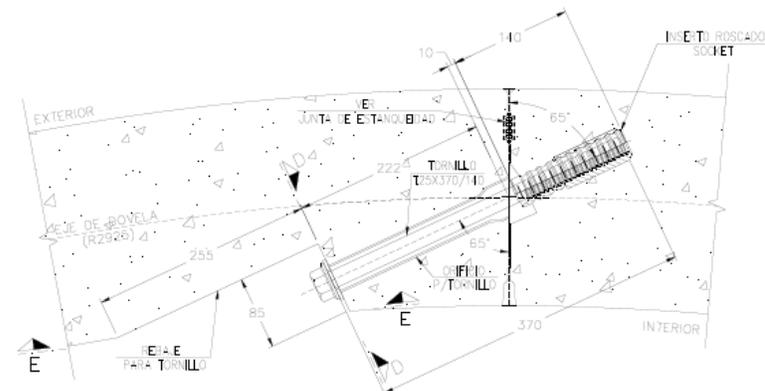


Figura 5.23.- Inserto roscado en rebaje para tornillo. Corte A-A.

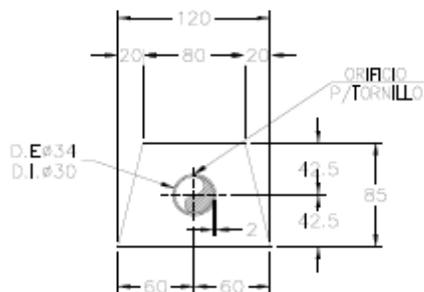


Figura 5.24.- Corte D-D. Detalle geométrico de rebaje para tornillo, equipado con arandela plana.

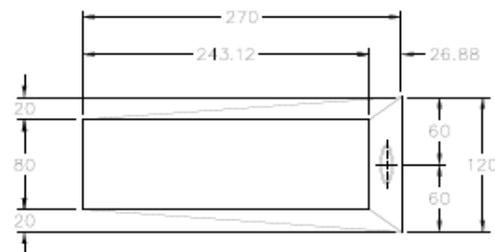


Figura 5.25.-Vista E-E. Detalle geométrico de rebaje para tornillo.

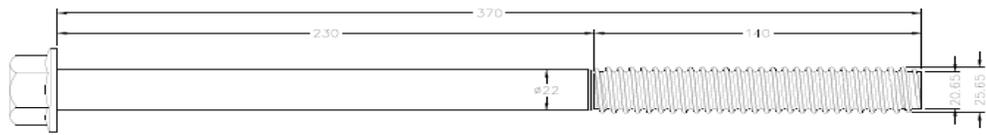


Figura 5.26.-Dimensiones de inserto roscado.

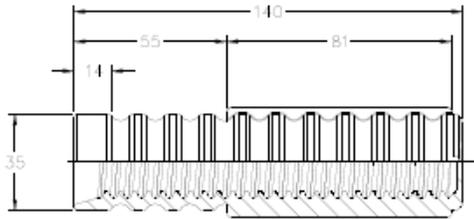


Figura 5.27.- Dimensiones de socket de inserto roscado.

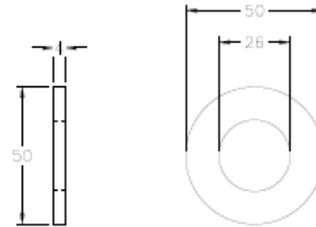


Figura 5.28.- Detalle geométrico de arandela plana.

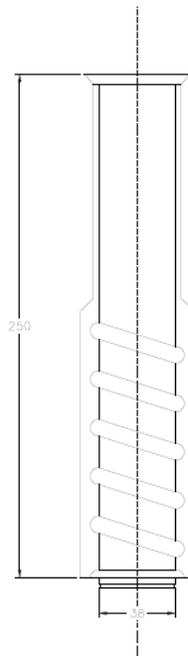


Figura 5.29.- Detalle geométrico de inserto para inyección.

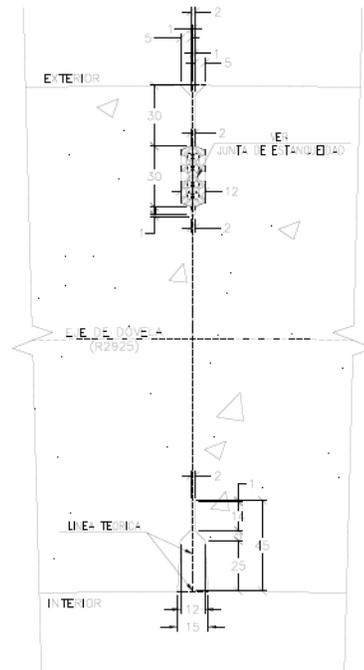


Figura 5.30.-Corte B-B. Detalle de juntas de dovelas.

Las cinco imágenes obtenidas de <https://compranet.funcionpublica.gob.mx/>

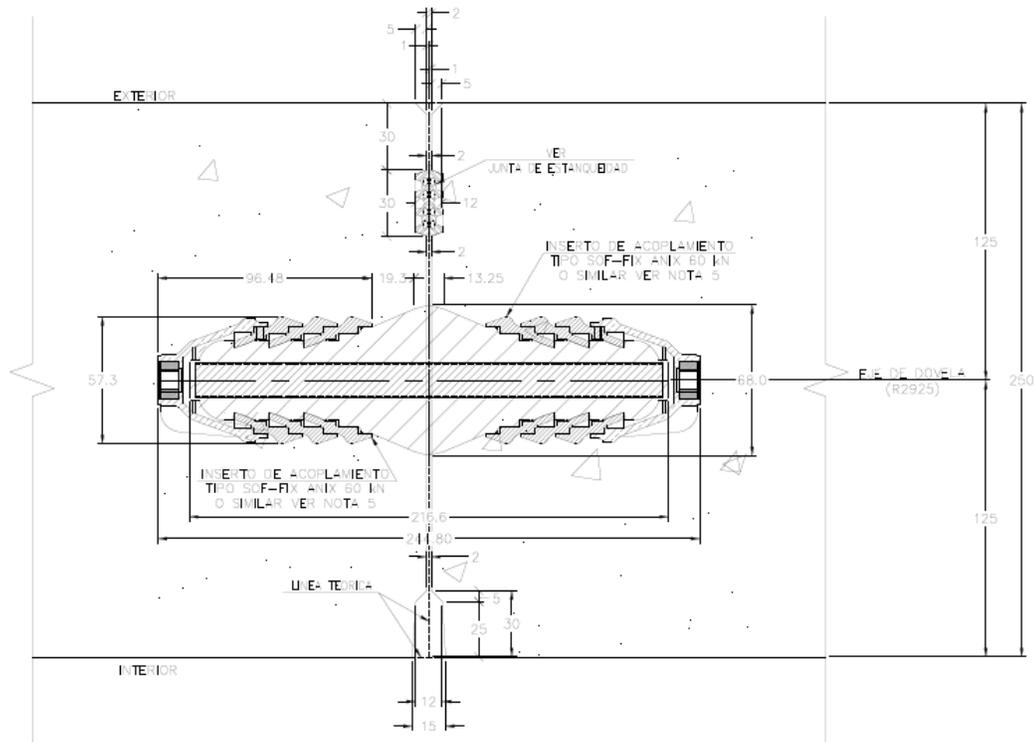


Figura 5.31.- Corte C-C. Detalle de juntas de dovelas.

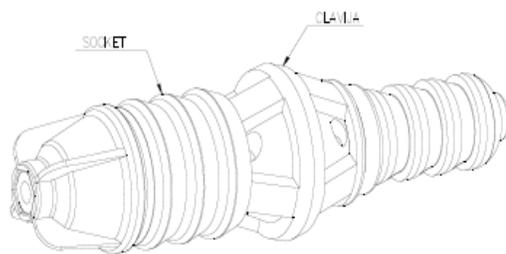


Figura 5.32.- Isométrico y detalle de inserto de acoplamiento.

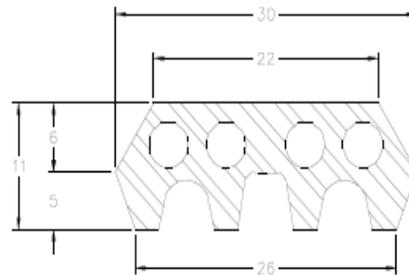


Figura 5.33.- Detalle geométrico de junta de estanqueidad.

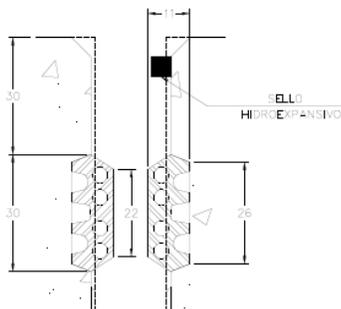


Figura 5.34.- Detalle de junta de estanqueidad sin comprimir.

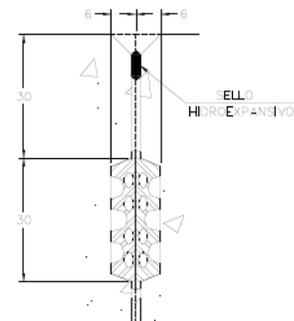


Figura 5.35.- Detalle de junta de estanqueidad comprimida.

Las cinco imágenes obtenidas de <https://compranet.funcionpublica.gob.mx/>

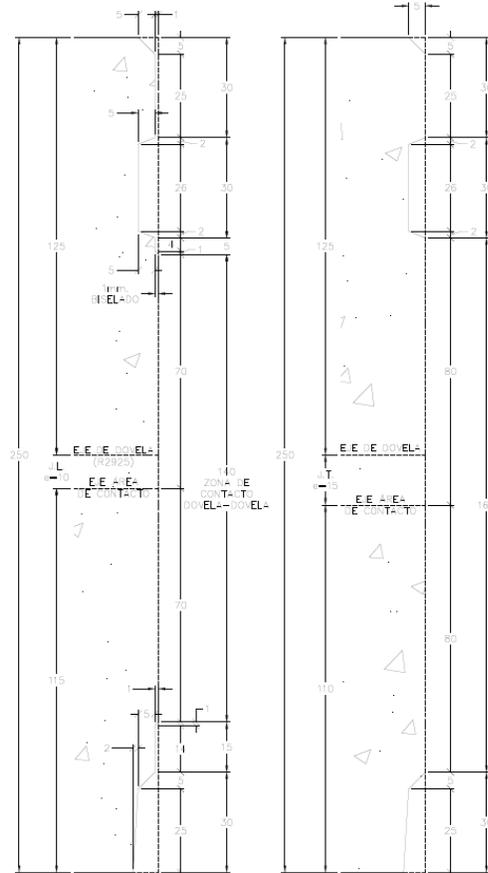


Figura 5.36.-Detalle geométrico de junta longitudinal y junta transversal. (Izquierda y derecha, respectivamente).

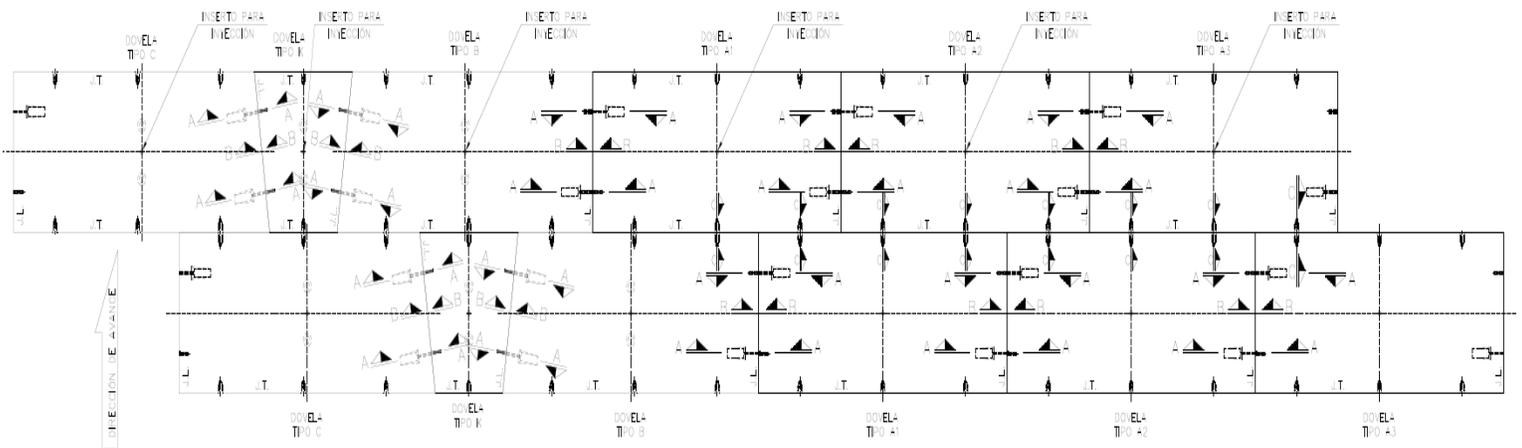


Figura 5.37.-Detalle de arreglo de uniones entre dovelas y anillos de dovelas.

Las dos imágenes obtenidas de <https://compranet.funcionpublica.gob.mx/>

5.5) CONSTRUCCIÓN DEL REVESTIMIENTO DEFINITIVO DEL TÚNEL

Una vez que se ha colocado por completo el revestimiento primario a lo largo de todo el túnel, se procede a colocar un revestimiento encima de los anillos de dovelas. Este revestimiento consistirá en una sección de concreto reforzado, y que para facilitar el colado de estas secciones se hace uso de una cimbra telescópica deslizable.

La **cimbra telescópica** es una estructura auxiliar metálica que permite sostener el concreto en estado fresco durante su colocación dentro de la estructura hasta alcanzar la resistencia óptima para su descimbre. Está compuesta por 9 módulos de 9m, cubriendo una distancia de 45m (longitud total de la cimbra telescópica), en función de las características geométricas del proyecto, con un diámetro interior terminado de 5m.

Las características que posee la cimbra son las siguientes:

- Acero estructural de cimbra: A-36.
- Resistencia a la fluencia: $f_y = 2530 \frac{kg}{cm^2}$.
- Número de articulaciones: 3, por módulo ensamblado, en el sentido horizontal.
- Número de secciones para desplazamiento por módulo ya ensamblado: 2. La **sección inferior** contiene en la **cubeta** del túnel, mientras la **sección superior** consiste en los **hastiales** y la **clave** del túnel.
- Transportador que consiste en los siguientes elementos:
 - ❖ Grúa pórtico deslizable en el interior de la cimbra
 - ❖ Trabe carril sobre grúa pórtico
 - ❖ Piernas de apoyo, colocadas radialmente
- Ventanas para vaciado de concreto en hastiales y clave, distribuidas a tresbolillo.
- Número de anillo metálicos por módulo: 6

Se inicia con las actividades de habilitado y de la colocación del acero, limpiando las zonas donde se colocará el armado, posteriormente se dan referencias topográficas que servirán como guías para la colocación del lecho inferior del armado de la sección. Se baja el acero de refuerzo mediante grúas o dragas equipadas con canastillas, y se acarrearán hasta las zonas del armado, una vez que han sido cortadas y habilitadas en las plataformas de trabajo, para su colocación sobre el revestimiento primario, dándole el recubrimiento necesario, mediante separadores de plástico, o de mortero, comenzando con la **sección inferior**, y para la **sección superior**, se colocan los correspondientes andamios para poder realizar el mismo procedimiento; se coloca después el acero transversal del lecho inferior, con el apoyo de la cuadrilla de topografía, y se repite este procedimiento para la colocación del lecho superior de la sección del revestimiento definitivo. Durante el avance de la colocación y habilitado del acero de refuerzo, se van retirando los objetos ajenos al armado, hasta completar el armado de todo el túnel.

Se procede, a la bajada y ensamble de la cimbra, el ensamble inicia en las plataformas de trabajo de las lumbreras, para ensamblar la sección inferior y superior para tener los 5 módulos de 9m, después se bajan las secciones inferiores, equipadas con piernas de apoyo en su base. Se procede a bajar la grúa pórtico y el ensamble de la trabe carril para crear el transportador, colocándolo sobre la sección inferior. Cabe mencionar que se hacen las preparaciones para la colocación de la sección inferior con las piernas de apoyo, desplazando el acero estructural ya instalado, que impiden el apoyo de estas piernas. Se descienden las secciones superiores equipadas con las piernas de apoyo. Una vez que están preparadas las dos secciones, se fijan, y se colocan las instalaciones de aire e inyección hidráulica. Posteriormente, se desciende el equipo de bombeo de concreto y se hace una prueba del equipo electromecánico y se verifica que no existan fugas ni de aire ni de aceite.

A partir de ahora, se colocan vibradores de pared sobre la cimbra telescópica, cuya función es la de un motor que inyecta aire desde el exterior de la cimbra, al interior, donde se construirá la capa de concreto reforzado.

El concreto reforzado del revestimiento definitivo, posee las siguientes características:

- Concreto estructural Clase I, fabricado con cemento resistente a los sulfatos, con base en la especificación: CPC 30 RS, o CPC 40 RS.
- Peso volumétrico, $\gamma = 22.00 \frac{kN}{m^3}$.
- Resistencia a la compresión simple a los 28 días, $f'_c = 35.00MPa$, de acuerdo a Norma NMX-C414-ONNCCE, vigente.
- En uniones soldadas de varillas, utilizar electrodos: Serie E-90xx
- Recubrimiento libre en lecho interior de 6.50cm, y en el lecho exterior de 5.00cm
- Sellador Tipo Sikaflex 1-a, o similar para la unión entre tabletas.
- El **acero de refuerzo** tendrá un límite de fluencia, $f_y = 412.00MPa$.

El colado se hace de manera continua mediante un brazo mecánico (o snorkel), que girará de manera alternada en la ventana izquierda y luego en la derecha, hasta ir llenando los módulos de la cimbra telescópica. La forma del llenado de la cimbra generará un talud a medida que se vaya llenando el espacio que otorga la cimbra, una vez que el colado llega al nivel de los hastiales, se dosifica el concreto, por medio de las ventanas en tresbolillo dispuestas y se completará su llenado, mediante una última inyección de concreto, en las ventanas de la cimbra, ubicadas en la clave del túnel; repitiendo este proceso hasta desplazarse y e ir librando todo el tramo del túnel.

Una vez que el concreto ha alcanzado su óptima resistencia, a lo largo de todo el túnel, se procede al retiro de la cimbra; mediante el transportador se retira la sección superior de un molde (soportadas por las columnas de la grúa pórtico), y mediante el balancín de la viga riel, se desmoldará y tomará la sección inferior; el desplazamiento será ágil en virtud de las articulaciones entre secciones, y se llevarán por medio de grúas, todo el equipo de la cimbra telescópica al exterior de las lumbreras, para trasladar a estos equipos a su zona de pertenencia.

Una vez que se han hecho las preparaciones anteriores, se hacen perforaciones para aplicar una inyección de contacto para mejorar la fijación entre el revestimiento primario y el definitivo. El proceso de barrenos e inyección se hace en 2 fases:

1. 3 barrenos, de manera numérica ascendente (de acuerdo al arreglo de la figura 5.36).
2. 1 barreno.

El material de inyección es una mezcla de materiales de: cemento, bentonita, arena y agua; su dosificación será la siguiente:

- Para los tres barrenos:
 - ❖ Cemento: 150kg
 - ❖ Bentonita: 37 l
 - ❖ Arena: 50 l
 - ❖ Agua: 136 l
- Para los barreno únicos
 - ❖ Cemento: 150kg
 - ❖ Bentonita: 37 l
 - ❖ Arena: --
 - ❖ Agua: 136 l

Finalmente, se aplica una capa de sellador, en todo el revestimiento definitivo, para evitar agrietamientos, e infiltración del agua que será transportada.

Por último en las figuras 5.38-5.40, se mostrarán algunos detalles que posee la cimbra telescópica, la figura 5.41, la distribución de los barrenos de la inyección de contacto, y la figura 5.42, el detalle del revestimiento definitivo.

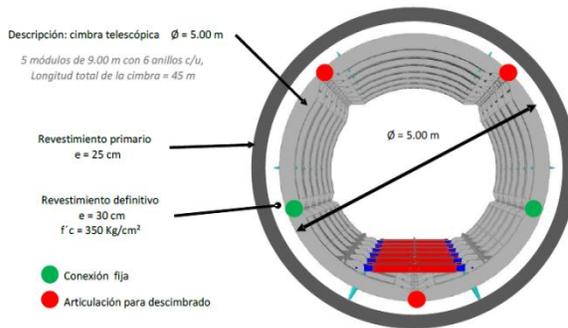


Figura 5.38.- Sección frontal de cimbra telescópica. Detalle de conexiones.

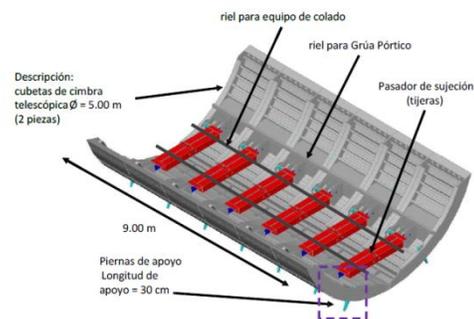


Figura 5.39.- Sección inferior de un módulo de la cimbra telescópica.

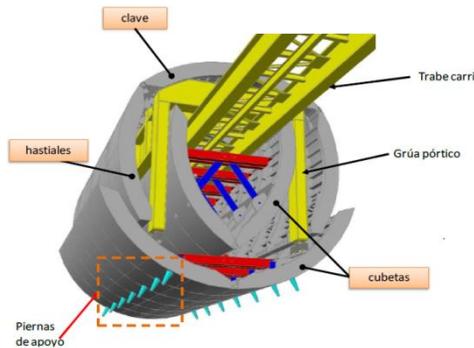


Figura 5.40.- Desmolde de cimbra telescópica.

Las tres imágenes obtenidas de <https://compranet.funcionpublica.gob.mx/>

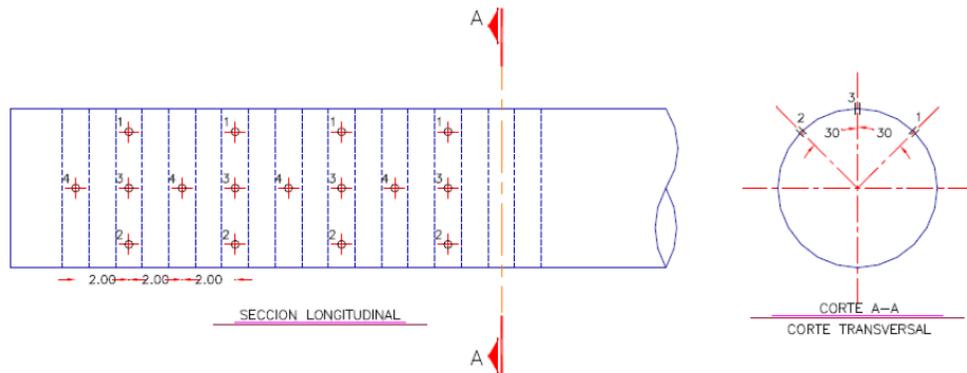


Figura 5.41.- Arreglo de barrenos e inyección entre revestimientos primarios y definitivo.

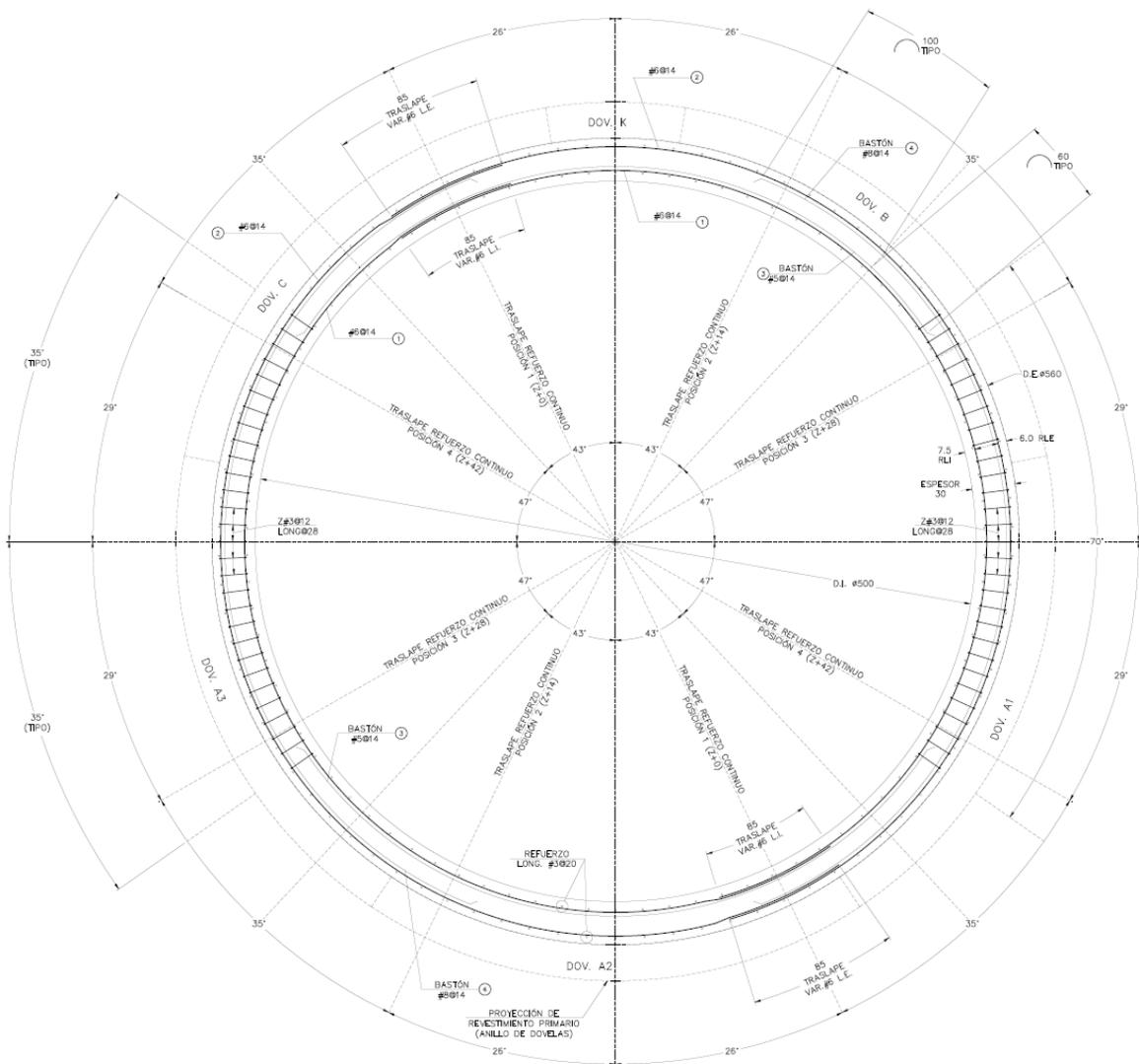


Figura 5.42.- Detalle de revestimiento definitivo.

Las dos imágenes obtenidas de <https://compranet.funcionpublica.gob.mx/>

CAPÍTULO 6: INSTRUMENTACIÓN



Figura F.- Toma de lecturas con ayuda de instrumentación (autoría propia).

6) INSTRUMENTACIÓN

6.1) INTRODUCCIÓN A LA INSTRUMENTACIÓN

La instrumentación en obras tan complejas, como la construcción de lumbreras por el método de flotación y de túneles por medio de EPB particularmente en suelos blandos con alto contenido de agua y baja resistencia al corte, es necesario tener control de los movimientos que estos acusen durante las diferentes etapas de los procesos constructivos del Túnel de Drenaje Pluvial Profundo.

Por ello, se emplea la instrumentación adecuada que permita analizar durante el periodo de ejecución de las obras y durante la etapa de operación del drenaje profundo, el comportamiento del terreno, como de las obras que conforman a este drenaje (túnel y lumbreras), y demande los esfuerzos y deformaciones que se presenten. Con base a la información otorgada por el equipo de instrumentación geotécnica, se tomarán decisiones y acciones preventivas y correctivas que garanticen la seguridad del proyecto del NAICM y el cumplimiento de los objetivos de calidad, salvaguardando la vida útil del proyecto.

Por otra parte, la instrumentación instalada en la superficie, a la que se hará mención, es sugerido que se instale a cada 100m en dirección del túnel y poder detectar las zonas que puedan presentar algún asentamiento debido a la presencia del túnel por efecto de la excavación de este o su operación. A continuación en la tabla 6, se muestra la instrumentación empleada, para poder analizar las variables como son los desplazamientos horizontales y verticales, presión de poro, deformaciones y esfuerzos, en las diferentes etapas del proceso constructivo que se ha descrito de este proyecto. Por otra parte, la figura 6 muestra una toma de lecturas de la instrumentación que se hizo para corroborar los niveles del terreno natural y del NAF.

Tabla 6.- Instrumentación geotécnica.
Tabla basada de información de <https://compranet.funcionpublica.gob.mx/>

Instrumentación geotécnica.
Bancos de nivel superficial
Inclinómetros en terreno natural y muro pantalla
Pozos de alivio
Piezómetros eléctricos de cuerda vibrante



Figura 6.-Toma de lecturas en estación de instrumentación para lumbreras (autoría propia).

6.2) DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS DE INSTRUMENTACIÓN Y SUS VARIABLES DE MEDICIÓN

De acuerdo a la tabla 6, se hará a continuación una breve descripción y características de los instrumentos utilizados para medir las variables que se ha hecho mención:

Los **bancos de nivel superficial**, tienen como objetivo la medición de los desplazamientos horizontales como verticales, referidos a un banco de nivel maestro fijo, es decir, este banco de nivel maestro es la referencia principal para los bancos de nivel superficial del proyecto, para poder determinar el comportamiento de las lumbreras en el sentido horizontal y vertical. Un banco de nivel superficial consiste en una varilla anclada en el terreno mediante un monolito de concreto cubierto por una tapa galvanizada, que se construyen al término de la construcción de las plataformas de trabajo de las lumbreras, y se instalan por cada lumbrera 3 pozos de alivio, instalados a cada 120° entre ellos tomando como referencia el centro de la lumbrera y separados del paño externo de los brocales exteriores en los siguientes valores: 1m, 3m, 5m y 10m. La figura 6.1 muestra el detalle de los bancos de nivel superficial.

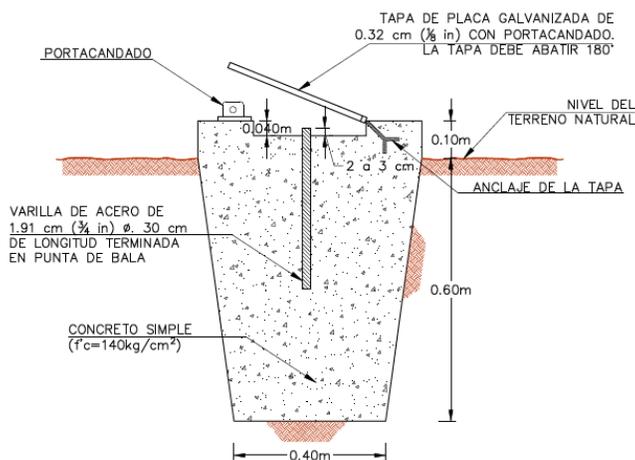


Figura 6.1.- Detalle de los bancos de nivel superficial.
Imagen obtenida de <https://compranet.funcionpublica.gob.mx/>

Los **pozos de alivio** son perforaciones verticales en el que se introduce una tubería de PVC, protegida del material del subsuelo, por una serie de rellenos: el primero de arena gruesa con gravillas al fondo de la perforación, continuando con una capa de arena bien graduada en las paredes laterales y finalmente una capa de lodo fraguante en el resto de las paredes laterales hasta la superficie, que posteriormente será conectada a un equipo de bombeo con la capacidad necesaria para poder abatir la presión de poro existente en las zonas de las lumbreras. Su operación comienza una vez que se inicien las actividades de excavación del núcleo de la lumbrera hasta finalizar el fraguado del relleno del concreto simple, de la zanja anular ubicada entre el muro pantalla y el muro estructural. Se instalan al menos 6 pozos de alivio hasta llegar a la capa dura, por cada lumbrera. Los pozos en conjunto con el equipo de bombeo trabajarán hasta que la lectura indicada en los piezómetros eléctricos de referencia para la presión de poro, no represente un riesgo durante el procedimiento constructivo de las lumbreras.

Estos instrumentos se encontrarán dentro de la zona de los brocales, y por tal motivo, se deben dejar las preparaciones para ellos al momento de construir los brocales, considerando que ningún pozo debe encontrarse en los sitios en donde se tenga proyectado el mejoramiento del suelo, para el paso del túnel, y evitar interferencias y afectaciones para la operación de los pozos de alivio como la integridad de estos instrumentos. La figura 6.2, mostrará el detalle de los pozos de alivio:

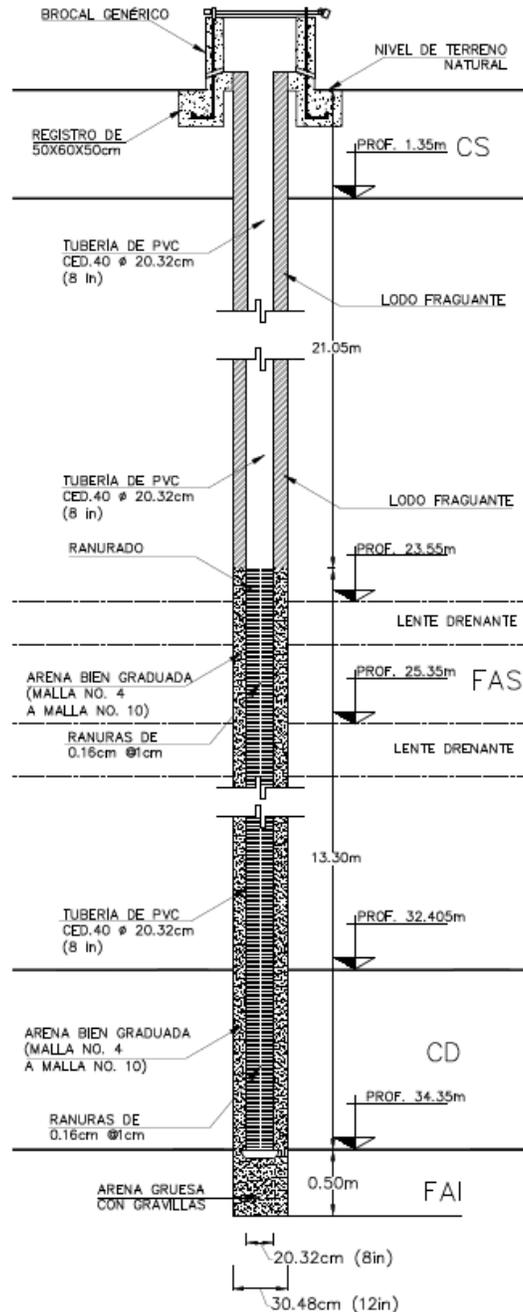


Figura 6.2.- Detalle de los pozos de alivio.

Imagen obtenida de <https://compranet.funcionpublica.gob.mx/>

Los **inclinómetros** son instrumentos que se localizan hincados tanto en el terreno, como en el muro pantalla. Para el caso de aquellos que se encuentran embebidos en el terreno, se empotran hasta llegar a la serie estratificada superior (SES) a 1.00m, mientras los

inclinómetros en el muro pantalla son empotrados hasta llegar a la capa dura (CD), a 0.50m. Están compuestos por una tubería vertical formada por segmentos conocidos como coples, y a lo largo del barreno de 6.00 pulgadas de este instrumento, los segmentos son separados del subsuelo de la zona, mediante lodo bentonítico y lodo fraguante (en el terreno y en el muro pantalla, respectivamente), en virtud del medio en el que está instalado. Por medio de este sistema es posible obtener los desplazamientos que sufre la tubería en el medio que está embebida, mediante un sondeo en el que se observa el grado de inclinación que ha sufrido el inclinómetro en toda su longitud respecto de su eje vertical, a diferentes profundidades. Su construcción inicia una vez que se han construido las plataformas de trabajo de las lumbreras, y para aquellos instalados en el muro pantalla se deben dejar las preparaciones de ellos en este elemento, para que indiquen el comportamiento del muro pantalla durante el procedimiento constructivo de la lumbrera, con énfasis durante la bajada del tanque de flotación al ser la condición de cargas de mayor magnitud, mientras que los instalados en el terreno, indican el comportamiento tanto del terreno durante todo el procedimiento de las lumbreras como del túnel. Las figuras 6.3 y 6.4 muestran el detalle de estos instrumentos.

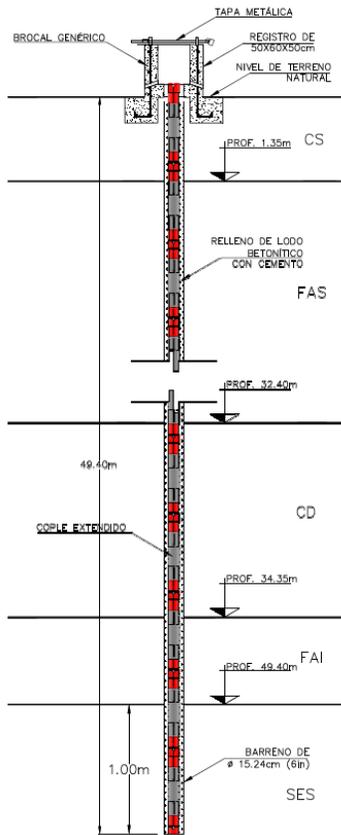


Figura 6.3.- Detalle de inclinómetro en suelo.

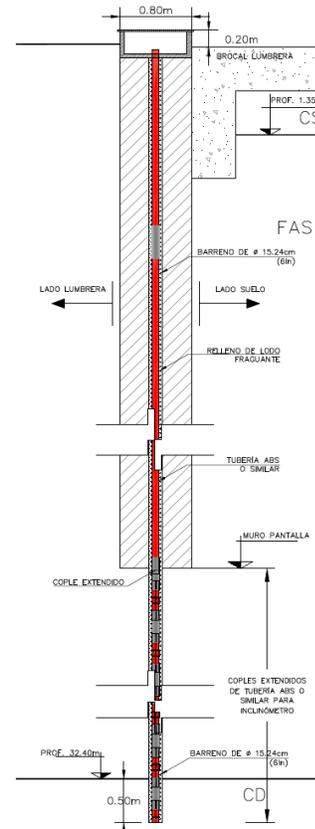


Figura 6.4.-Detalle de inclinómetro en muro pantalla.

Las dos imágenes obtenidas de <https://compranet.funcionpublica.gob.mx/>

Los **piezómetros eléctricos de cuerda vibrante** son instrumentos que miden la presión de poro a través de un transductor de cuerda vibrante. Su función es la de registrar valores de frecuencias de vibración y mediante factores de calibración obtener la presión de poro, útil para poder dar operación a los pozos de alivio y otorgar el abatimiento necesario en cada una de las lumbreras. Uno de ellos se

instala en el núcleo de la lumbrera antes de iniciar su excavación y se toman registros de la presión de poro, cuyos valores serán comparados posteriormente con otro piezómetro externo, y una vez que inicia el retiro del núcleo de la lumbrera, este instrumento no se vuelve a recuperar debido a las operaciones de excavación, este piezómetro es conocido como **piezómetro de referencia**. Por otra parte, el piezómetro externo, se conoce como **piezómetro de operación**, sus lecturas son de utilidad para dar seguimiento al abatimiento de la presión de poro en las distintas etapas del procedimiento constructivo de las lumbreras, y es instalado por fuera de la lumbrera, evitando su colocación en las zonas de mejoramiento para el túnel. Es importante medir la presión de poro, antes, durante y después del abatimiento realizado por los pozos de alivio para analizar el comportamiento de las estructuras, y tomar las decisiones y acciones oportunas, como también tomar las lecturas de las variables correspondientes, de los demás instrumentos de los que se hizo mención. Las figuras 6.5 y 6.6 mostrarán el detalle de los inclinómetros.

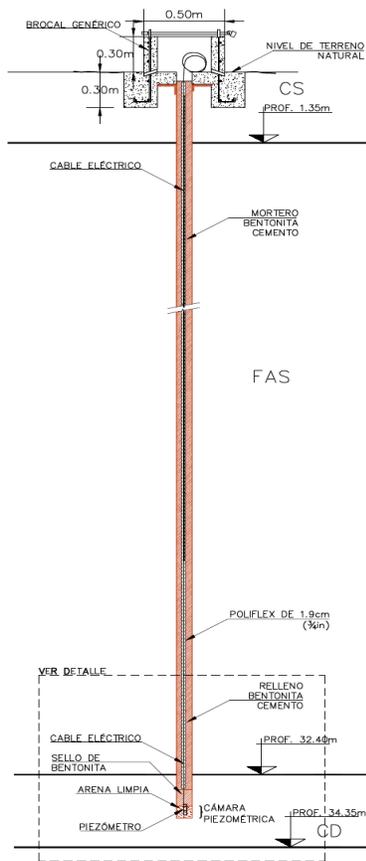


Figura 6.5.- Detalle del piezómetro eléctrico.

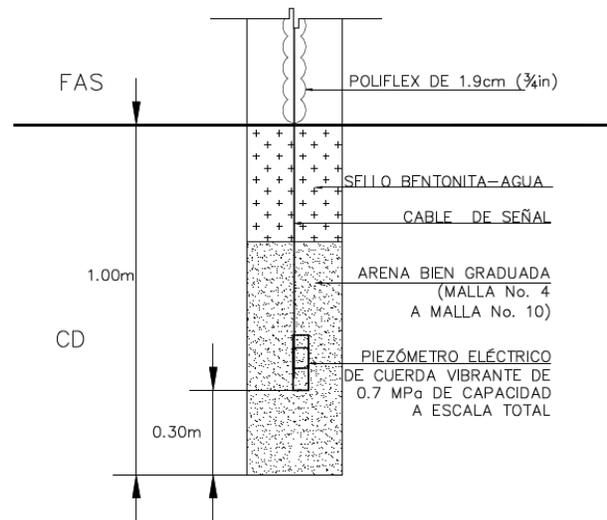


Figura 6.6.- Detalle de los componentes del piezómetro.

Las dos imágenes obtenidas de <https://compranet.funcionpublica.gob.mx/>

Finalmente, la distribución de los instrumentos ya mencionados, se hace de manera similar a la que se presenta en la lumbrera T-00 (de acuerdo a su simbología dispuesta en la tabla 6.1), en las figuras 6.7 y 6.8. La figura 6.8, mostrará también la información geotécnica del sitio de la lumbrera T-00, que debe de ser considerada y comparada con la información que se obtenga de las lecturas de la diversa instrumentación.

Tabla 6.1.- Nomenclatura y simbología de la instrumentación.

Instrumento	Nomenclatura	Simbología
Banco de nivel superficial	BNS	□■
Pozo de alivio	PA	△
Inclinómetro en suelo	IN-S	●○
Inclinómetro en muro pantalla	IN-M	●○
Piezómetro eléctrico de referencia	PE-R	■□
Piezómetro eléctrico de operación	PE-O	■□

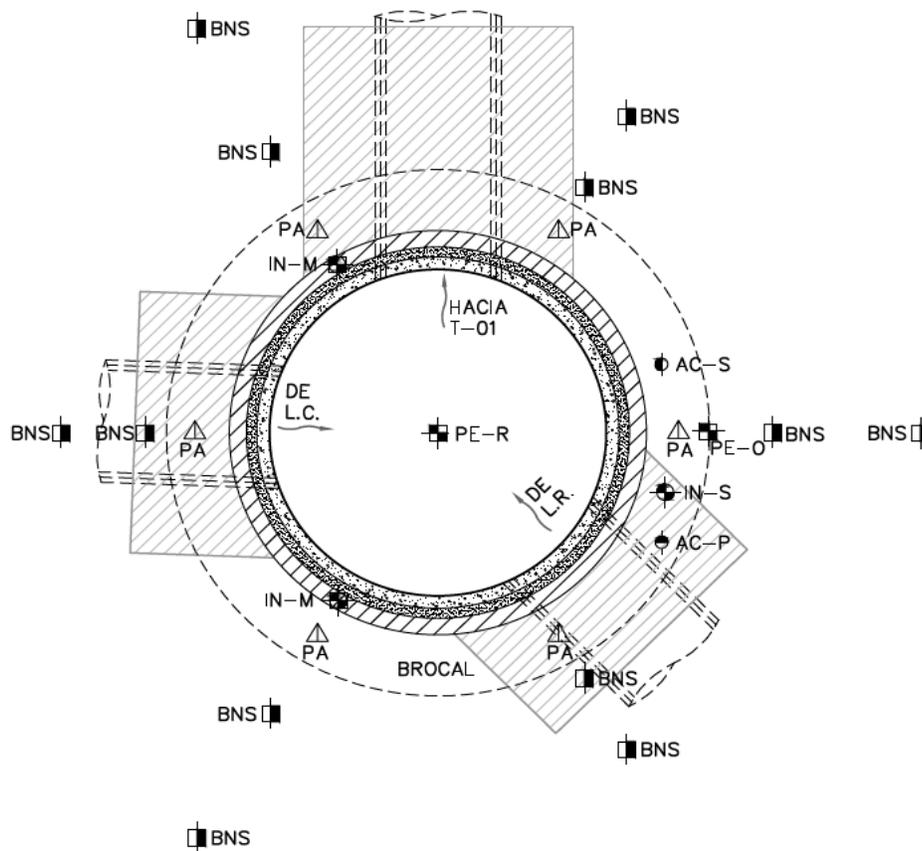


Figura 6.7.- Distribución en planta de la instrumentación en lumbrera T-00.

Imagen y tabla obtenida de <https://compranet.funcionpublica.gob.mx/>

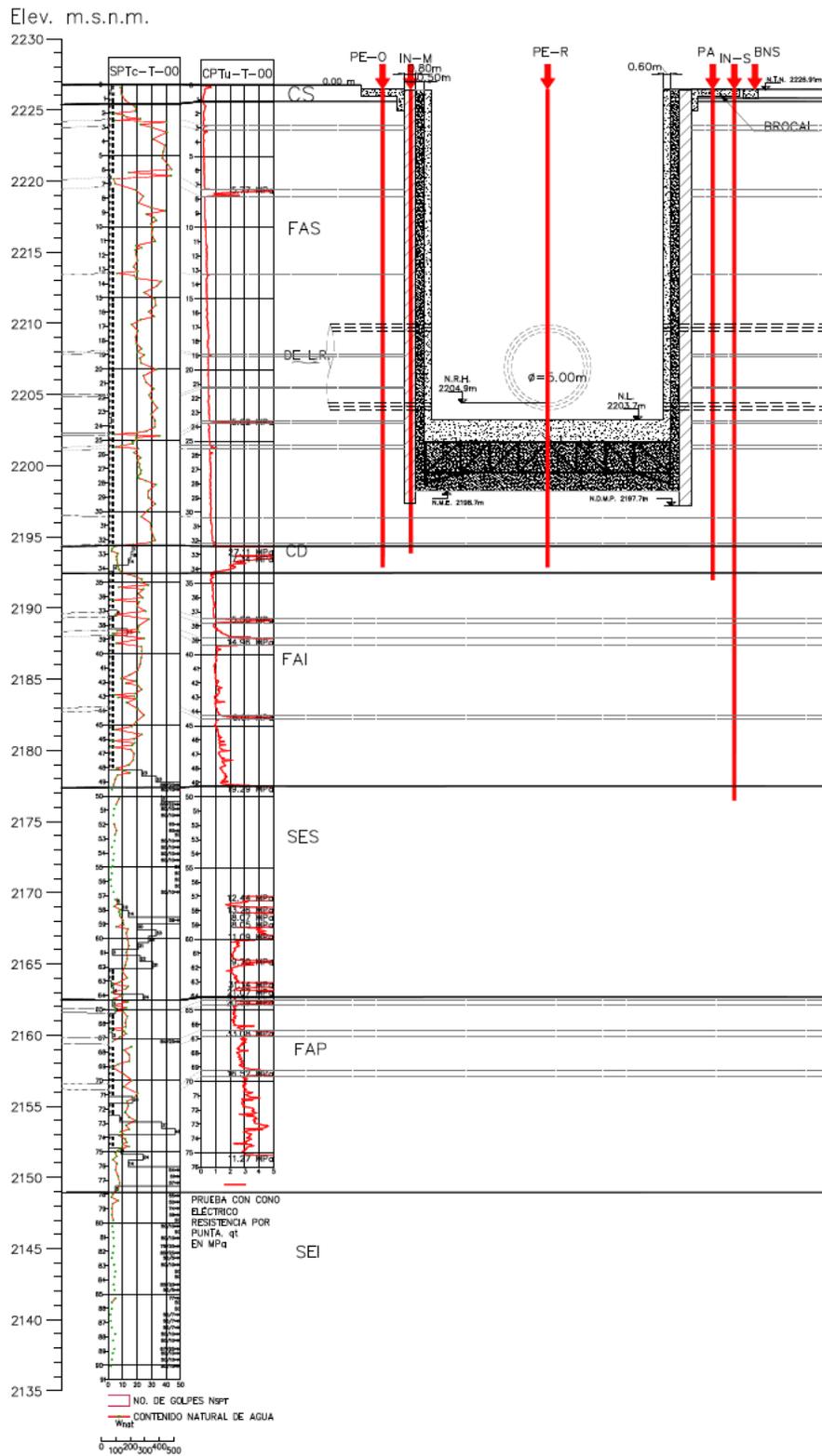


Figura 6.8.- Distribución en perfil de la instrumentación en lumbrera T-00, e información geotécnica. Imagen obtenida de <https://compranet.funcionpublica.gob.mx/>

CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES Y COMENTARIOS FINALES



Figura G.- Visita a zona de construcción de túnel (autoría propia).

7) CONCLUSIONES Y COMENTARIOS FINALES

La construcción de lumbreras es un punto de partida para la construcción de túneles, en cualquiera de las modalidades de su procedimiento constructivo; particularmente, en lumbreras flotadas, se ha descrito como un proceso de excavaciones compensadas con lodos, y bajo el principio de Arquímedes es posible la construcción de elementos estructurales hasta su bajada en el fondo de la excavación, para que en ellas se puedan hacer las diversas operaciones para la construcción y operación del túnel.

Por su parte, la construcción de túneles por el método del EPB, se ha descrito como un proceso de excavación subterráneo, por medio de equipos electro-mecánicos, que permiten equilibrar el empuje del subsuelo del terreno, gracias a su escudo que permite, por medio de aplicación de aire comprimido el equilibrio de estas fuerzas, y simultáneamente la expulsión del material excavado hacia el exterior, al cual se le denomina como material de rezaga. Ambos procedimientos constructivos se apoyan siempre de la instrumentación apropiada para su evaluación y la toma de decisiones, antes, durante y posterior a su construcción.

El presente informe, es de carácter académico, y es una recopilación de experiencias e información referente a la construcción de lumbreras y túneles. Particularmente el suelo blando del antiguo Lago de Texcoco, representa un reto para cualquier construcción, en especial aquellas obras subterráneas, ante las diversas y adversas condiciones del terreno. La ingeniería, la arquitectura, la construcción y todas las disciplinas involucradas, con el paso del tiempo deben enfrentarse ante retos de gran magnitud y dificultad, como lo fue este proyecto, y cada vez mayores. Independientemente de la clausura de esta mega construcción, ha representado para nosotros, las nuevas generaciones, la transmisión de nuevos conocimientos y experiencias por parte de las generaciones de profesionistas antes de nosotros, por las experiencias que fuimos viviendo en obra y/o oficina, que con el paso del tiempo, es nuestro deber mejorarlos, cada que sea posible, y la aplicación de los conocimientos brindados en el caso propio, por la Facultad de Ingeniería de la UNAM. Este informe es un reflejo de ello, los conocimientos que he adquirido con el apoyo de los equipos de trabajo del proyecto del túnel, durante mi estancia de mis prácticas profesionales y los conocimientos académicos. Este proyecto ha sido de mi satisfacción, debido a que la construcción de un túnel, involucra a todas las ramas de la ingeniería y demuestra que todas ellas, pueden estar estrechamente relacionadas entres sí, como con otras profesiones, haciendo del túnel un proyecto multidisciplinario, y que al estar todas las profesiones sincronizadas, es posible enfrentar diversas situaciones, y solucionarlas de manera eficaz, integral y completa. Este informe, presenta tan sólo uno de los diversos métodos de construcción de lumbreras y de túneles, y a su vez, pueden existir variaciones o actualizaciones con el tiempo, de los procedimientos constructivos aquí descritos, que obliguen al lector, como a mi persona a actualizar e incorporar nuevos aspectos a la construcción de estas obras. Hasta el momento, se incorporaron la gran mayoría de los aspectos para llevar a cabo la construcción de estas estructuras, en cuanto me fue posible respecto a las fuentes de información disponibles, como los conocimientos que adquirí, gracias al apoyo de los profesionistas, referencias bibliográficas y los apuntes que logré tomar en virtud de las visitas a obra y labores que desempeñé, como de las observaciones que percibí y dudas resueltas con el apoyo del personal y los equipos de trabajo con los que colaboré.

FUENTE DE REFERENCIAS DE FIGURAS Y TABLAS

FIGURAS

- Figura B.- https://www.fosterandpartners.com/es/projects/new-international-airport-mexico-city/#bocetos_y_dibujos
- Figura 0.- <https://www.fosterandpartners.com/es/projects/new-international-airport-mexico-city/>
- Figura 1.2.- <https://www.herrenknecht.com/en/>
- Figura 2.- <https://www.autodesk.com/solutions/bim/hub/what-is-bim>
- Figura 4.9.- <http://www.gandara.com.mx/products.php?cat=almejasmuromilan>
- Figuras 1-1.1, 1.3-1.4; 3.5-3.6, 3.8-3.9; 4.2-4.8, 4.10-4.11,4.15-4.19, 4.21-4.36, 4.39-4.59, 4.61-4.122.- Autoría: <https://compranet.funcionpublica.gob.mx/>; bajo la referencia del expediente: LPI-OP-DCT-SPL-017-18
- Figuras 5.6, 5.8- 5.10.- Cortesía: Ing. Juan Manuel Anguiano Lozada.
- Figuras 4.1, 4.12-4.14, 4.20, 4.37-4.38, 4.60; 5.5, 5.7, 5.11.- Cortesía: Ing. Luis Adrián Palomino Cortés.
- Figuras A, C,D,E,F,G, 3-3.4, 3,7, 3.10, 4, 5.4, 6.-Autoría propia

TABLAS

- Tabla 1.- Basada en datos aprendidos durante mi estancia profesional.
- Tabla 1.1.- Basada en la información pública de la página de CompraNet referida al proyecto del TDPP del NAICM.
- Tabla 1.2.- Basada en la información pública de la página de CompraNet referida al proyecto del TDPP del NAICM.
- Tabla 1.3.- Basada en la información pública de la página de CompraNet referida al proyecto del TDPP del NAICM.
- Tabla 1.4.- Basada en la información pública de la página de CompraNet referida al proyecto del TDPP del NAICM.
- Tabla 1.5.- Basada en la información pública de la página de CompraNet referida al proyecto del TDPP del NAICM.
- Tabla 4.- Basada en la información pública de la página de CompraNet referida al proyecto del TDPP del NAICM.
- Tabla 4.1.- Basada en la información pública de la página de CompraNet referida al proyecto del TDPP del NAICM.
- Tabla 4.2.- Basada en la información pública de la página de CompraNet referida al proyecto del TDPP del NAICM.
- Tabla 4.3.- Contenida en la página de CompraNet del proyecto del TDPP del NAICM.
- Tabla 4.4.- Contenida en la página de CompraNet del proyecto del TDPP del NAICM.
- Tabla 4.5.- Contenida en la página de CompraNet del proyecto del TDPP del NAICM.
- Tabla 6.- Basada en la información pública de la página de CompraNet referida a proyecto del TDPP del NAICM.
- Tabla 6.1.- Basada en la información pública de la página de CompraNet referida a proyecto del TDPP del NAICM.

BIBLIOGRAFÍA

- Anguiano Lozada Juan Manuel, Apuntes de túneles, México, Ciudad de México
- Anguiano Lozada Juan Manuel, Instrumentación y medición de túneles, México, Ciudad de México
- Auvinet Gabriel, Méndez Edgar, Juárez Moisés, El subsuelo de la Ciudad de México, vol III, Instituto de Ingeniería, México, Ciudad de México, 2017
- Ceballos Dayana, Lodos de perforación base agua y base aceite, Puerto Píritu, Venezuela, 2011
- CONAGUA, Manual de Agua Potable y Alcantarillado y Saneamiento (Drenaje Pluvial Urbano)
- De Buen López de Heredia Oscar, Estructuras de acero para edificaciones, tomo III, Fundación ICA, México, Ciudad de México, 2017
- Deméneghi Colina Agustín, Puebla Cadena Margarita, Apuntes de comportamiento de suelos, México, Ciudad de México
- Euclid Group Toxement, Guía básica para el concreto tremie, Tocancipá, Colombia, 2017
- <https://compranet.funcionpublica.gob.mx/>; **bajo la referencia del expediente: LPI-OP-DCT-SPL-017-18 (Construcción del túnel del drenaje pluvial profundo del Nuevo Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México)**
- Norma AASHTO T-180-74; respaldada en N-CMT-1-01/16
- Norma AASHTO Estándar; respaldada en N-CMT-1-01/16 "Materiales para terraplén" de la SCT.
- Norma Internacional ISO 9000:2015, Sistemas de gestión de la calidad-Fundamentos y vocabulario
- Norma Oficial Mexicana NOM-002-STPS-2010, Condiciones de seguridad. Prevención y protección contra incendios en los centros de trabajo
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), Norma SCT, N-CTR-CAR-1-04-002/11, Tema: CAR.Carreteras, Parte: 1. Conceptos de obra, Título: Pavimentos, Capítulo: 002 Subbase y bases
- Széchy Károly, The art of tunneling, Akadémiai Kiadó, Budapest, Hungary, 1970
- www.cpisefa.com/juntas-de-estanqueidad-y-sellado/