

42 2g.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA



DISEÑO Y CONSTRUCCION DE TUNELES EN ZONAS LAGUSTRES PARA EL DRENAJE PROFUNDO DE LA CIUDAD DE MEXICO

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
I n g e n i e r o C i v i l
P R E S E N T A
P A B L O C H A R V E L O R O Z C O

Director de Tesis: Ing. Emilio J. Gil Valdivia
MEXICO, D. F. 1990.



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

INDICE.

1. Introducción.	1
2. Antecedentes.	4
Antecedentes Históricos.	4
2.2 El Problema del Hundimiento	6
2.3 Sistema de Drenaje Profundo de la Ciudad de México.	7
El Emisor Central.	7
El Interceptor Central.	9
El Interceptor Oriente.	9
El Interceptor Centro-Oriente.	9
Colector Semiprofundo de Iztapalapa.	10
Colector Semiprofundo Obrero Mundial.	10
2.4 Sistemas de Excavación Empleados.	12
Lumbreras.	13
Túneles.	13
Túneles de Arcilla.	14
Excavación con Aire Comprimido.	15
3. Proyecto.	19
3.1 Estudios Previos.	19
Métodos de Exploración.	19
Métodos Indirectos.	20
Fotointerpretación.	20

Métodos Sismológicos.	21
Métodos Eléctricos.	21
Método Gravimétrico.	23
Métodos Directos.	23
Reconocimiento Preliminar.	24
Levantamientos Geológicos Detallados.	24
Tajos y Pozos a Cielo Abierto.	25
Socavones y Pozos Interiores.	25
Perforaciones.	26
Diámetro, Distribución y Profundidad.	27
3.2 Diseño Estructural.	28
3.2.1 Presiones Verticales y Horizontales.	29
Presión Vertical.	37
3.2.2 Elementos Mecánicos.	39
3.2.3 Análisis Sísmico.	53
Período de Vibración.	53
3.2.4 Diseño de Revestimiento.	59
Revestimiento Primario.	60
Revestimiento Definitivo.	61
4. Construcción.	64
4.1 Lumberas Flotadas.	64
4.1.1 Construcción de Brocal Exterior e Interior.	65
4.1.2 Perforaciones Secantes.	68
4.1.3 Excavaciones de Trincheras y Formas de Ademar la Excavación.	68
4.1.4 Excavación del Núcleo.	71

4.1.5 Ubicación de los Muertos.	72
4.1.6 Procedimiento Constructivo del Tanque Flotador.	73
4.1.7 Preparaciones Finales para colocar el Tanque Flotador en la Excavación de la Lumbrera.	74
4.1.8 Procedimiento Constructivo de la Lumbrera Colado de Losa y Muros.	77
4.1.9 Bajada de Losa y Muros de la Lumbrera.	78
4.1.10 Ubicación de los Ocho Dados que tendrá como Función Principal la de Sujetar la Lumbrera.	80
4.1.11 Inyección al Tanque y Trinchera.	81
4.1.12 Hincado de Pilotos.	84
4.2 Procedimiento de Excavación con Escudo Cortador de Frente Presurizado.	85
4.2.1 Escudo Cortador de Frente Presurizado.	85
4.2.2 Descripción del Sistema de Excavación.	86
4.2.3 Descripción de las Partes del Escudo y sus Funciones.	89
Cuerpo del Escudo.	89
Cabeza Cortadora.	91
Cámara presurizada o de Mezclado.	91
Transmisión de la Cabeza Cortadora.	92
Gatos de Empuje.	96
Anillo Erector.	96
Tren de Equipo.	98

Módulo No. 1.	98
Módulo No. 2.	98
Módulo No. 3.	100
Módulo No. 4.	101
Unidad de Tubería Telescópica.	101
4.2.4 Sistema de Circulación de Lodos.	101
Bomba de Extracción de Lodos (P-2).	102
Bobas Intermedias o de Traspaleo para la Extracción de Lodos (P3, P4, P5, P6).	102
Medidores de la Densidad de Suministro y Descarga.	102
Válvula de Compresión de Suministro y Descarga y Válvula de Derivación o By-pass.	102
Tratamiento de Lodos.	104
Proceso de Recirculación del Lodo.	107
4.2.5 Trabajos Preliminares.	110
Trabajos en Superficie.	111
Subestación de Energía Eléctrica.	111
Planta de Energía.	112
Patio de Dovelas y Sistema de Manteo.	112
Compresor.	117
Tendido de Tubería y Cisterna para Agua Tratada.	117
Planta de Tratamiento de Lodos.	117
Tubería en Superficie.	118
Trabajos para Recepción del Escudo	118

Muro de Atraque.	119
Sello de Salida.	122
Plataformas en Lumbreras.	123
Planta de Inyección.	125
Tuberías y Cableado en Pared de Lumbreras.	126
Escalera del Caracol y Elevador de Personal.	129
Trabajos Previos al Inicio de la Excavación.	129
Instalación de los Dientes Sobrecortadores	
Demolición de la Pared y de la Inyección Perimetral de Lumbreras.	129
Colocación de Semianillos de Atraque.	131
Mejoramiento del Suelo.	132
4.2.6 Excavación del Túnel.	135
Avance y Conducción del Escudo.	135
Empuje.	135
Volumen Excavado y Volumen Desplazado.	136
Formas de Avance.	137
Procedimiento de Construcción.	138
Excavación de 50 m. Iniciales.	138
Presurización de la Cámara de Mezclado y Avance del Escudo.	139
Mezclado y Avance del Escudo.	139
Excavación de los siguientes 45 metros.	142
Retiro de Anillo de Atraque.	145

Procedimiento para Terminación de Excavación.	145
Casos de Emergencia.	147
4.2.7 Revestimiento Primario.	147
Tipos de Anillos de Dovelas.	148
Determinación de Tipos de Anillos en Curva.	151
Arreglo Propuesto.	152
Inyección de Contacto entre Dovelas y Terreno.	153
Actividades.	155
4.2.8 Control Topográfico.	155
4.2.9 Instalaciones en Túnel.	159
Equipo Complementario y sus Funciones.	162
4.2.10 Extracción, Bajada y Giro del Escudo.	167
4.2.11 Instrumentación y Medición del Túnel.	169
Deformaciones en la Feriferia de la Excavación (Convergencias).	172
Deformaciones en Superficie. Bancos de Nivel Superficial.	174
4.3 Revestimiento Definitivo.	175
Cimbra Telescópica.	176
Manejo del Concreto.	178
Problemas más Comunes.	179
5. Conclusiones.	182
Bibliografía.	185

INTRODUCCION.

Desde los primeros asentamientos humanos en el Valle de México se inició la lucha con el agua del valle debido a las condiciones geológicas y climáticas que tenía. Era una zona de lagos que formaban parte de una gran planicie rodeada de montañas cubiertas de pinos, encinos y numerosos ríos.

El Valle se encuentra localizado a 2,240 metros sobre el nivel del mar y está modelado por la acción del vulcanismo de millones de años, causado por las fallas tectónicas continentales denominadas la Falla de San Andrés, que corre desde Alaska por la Costa del Pacífico, sobre el eje del Golfo de California hasta la Bahía de Banderas, en donde la falla se trifurca en la de Chapala Acambay, la del Balsas y la trinchera de Acapulco, siguiendo la Costa del Pacífico y la falla Clarion que cruza el territorio siguiendo el Paralelo 19°. Al presentarse esta última falla se provocó un vulcanismo tan intenso que cerró la cuenca al formarse la cordillera llamado Neo-Volcánica, en donde se encuentran los más altos picos de la República como son el Pico de Orizaba, la Malinche, Iztaccíhuatl, Popocatepetl, Chichinautzin, Ajusco, Nevado de Toluca, Nevado de Colima y aún las islas Revillagigedo, cambiando la hidrografía del valle que antes drenaba hacia el Balsas. Dentro de esta cuenca cerrada las aguas formaron los lagos y estos se depositaron cenizas y arenas volcánicas que constituyen el suelo comprensible del Valle de México. (Fig. 1.1)

Desde el punto de vista geohidrológico, la cuenca del Valle de México es una gran olla cuyas paredes y fondos impermeables están constituidas por rocas volcánicas. Esa olla está rellena de sedimentos fluviales, lacustres y volcánicas que van desde arenas gruesas hasta arcillas con altos contenidos de agua. Dentro de ese marco histórico, geológico e hidrológico funciona el drenaje del Distrito Federal.

El sistema es combinado, conduciendo tanto aguas de lluvia como residuales a través de una red primaria de 1,212 kilómetros de longitud y una secundaria de 12,257 kilómetros con 63 plantas de bombeo, tanques de tormenta, calles abiertas, ríos entubados, presas, lagunas y 93 kilómetros de drenaje profundo. Si el conjunto de obras del sistema de drenaje, no sería posible dar una mejor solución al desalojo de las aguas de la ciudad.

A partir de 1975, año en que se concluyó la primera etapa del drenaje profundo, éste se convirtió en uno de los componentes más importantes del sistema de desagüe. Consta de varios interceptores que fluyen hacia un mismo conducto para evacuar las aguas. Por sus características de construcción y por la profundidad a que se encuentra, no es afectado por el hundimiento y opera por gravedad, por lo que es una obra durable y económica a largo plazo.

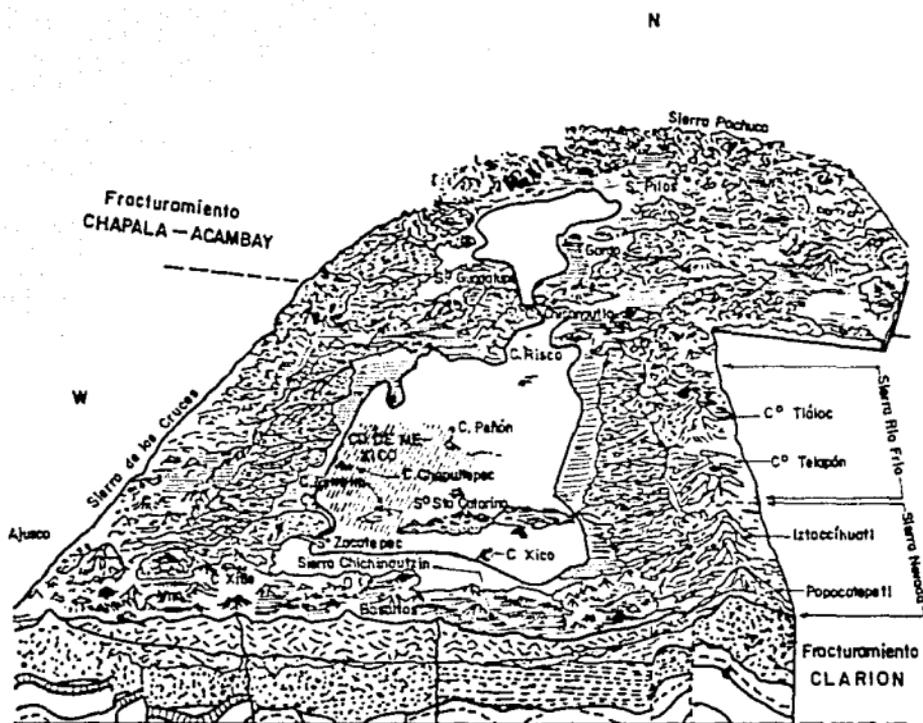


FIG. 1.1 GEOMORFOLOGIA CUENCA DEL VALLE DE MEXICO

2. ANTECEDENTES.

Antecedentes Históricos

La Gran Tenochtitlan fue fundada por los aztecas en un islote que emergía apenas unos cuantos centímetros de las aguas. Debido a una gran inundación por los años de 1449, el Rey Texcocano, Nezahualcoyotl, diseñó y dirigió la construcción de un albarradón de más de doce kilómetros de longitud y cuatro metros de ancho; éste iba desde la Sierra de Guadalupe hasta el Cerro de la Estrella y servía para controlar las aguas del Lago de Texcoco y para separar sus aguas saladas (debido al salitre de su lecho) de las aguas dulces de la laguna de México, beneficiándose también la agricultura.

Todo esto cambió al iniciarse la conquista. Durante el asedio de la ciudad por Hernán Cortes en 1521, se abrieron varios boquetes en el albarradón de Nezahualcoyotl para el paso de sus bergantines. La Ciudad de México se fundó sobre las ruinas de la Gran Tenochtitlan y posteriormente las lluvias torrenciales alertaron a las autoridades coloniales sobre el grave problema de inundaciones que afectaba la ciudad, por lo que en 1555 el virrey Velasco ordenó la construcción del albarradón de San Lázaro y se hizo un primer proyecto para el desagüe del Valle de México.

Sin embargo en 1604 y 1607 ocurrieron graves inundaciones, provocadas principalmente por los

escurrimientos del río Cuautitlán, que ocasionaron numerosas muertes y cuantiosos daños materiales. Enrico Martínez propuso a las autoridades un proyecto consistente en la construcción de un túnel en la zona de Nochistongo, al noroeste del Valle de México. Con esta gran obra que terminó en tan sólo once meses, se logró sacar de la cuenca a las aguas del río Cuautitlán con un socavón de 10.5 m² de sección, y 7.0 Km de longitud aproximada. El 18 de septiembre de 1608 por primera vez salieron las aguas de la cuenca hacia el Río Tula. La obra se malogró por falta de fondos para revestir el túnel y evitar los caídos y derrumbes que pronto lo obturaron. Después de graves y repetidas inundaciones, en 1630 se ordena que el desagüe se haga en tajo, para substituir el socavón por una excavación abierta. Debido a interrupciones por frecuentes derrumbes, inundaciones y problemas, esta salida tardó 159 años, dando al fin salida permanente a las aguas de la cuenca de México.

En 1803 y 1804, Humbolt, propone completar el plan de Enrico Martínez para drenar el Valle con un gran canal de desagüe. Pero la lucha por la independencia retrasó este proyecto casi un siglo.

La salida de la cuenca por tajo de Nochistongo empezó a alterar la ecología del valle e inició un nuevo proceso: el nivel de los lagos ya no crecía como antes, y la población se concentró aun más en las orillas de los antiguos lagos.

Esta zona sufría daños cuantiosos cuando los ríos que atravesaban la ciudad se desbordaban.

A principios de 1856 se abrió un concurso para el proyecto de las obras de desagüe. El plan más completo fue del ingeniero Francisco de Garay, que comprendía el Gran Canal de Desagüe y el primer Túnel de Tequisquiac. Ambas obras se inauguraron en 1900. Estas obras fueron proyectadas para una población esperada de 500,000 habitantes y para una capacidad de 17 m³/seg y siguen en uso.

Debido al crecimiento explosivo que continuó teniendo la ciudad, fue necesario recurrir a un procedimiento rápido para abastecerla de agua, perforando numerosos pozos profundos que al extraer las aguas subyacentes fue provocando el hundimiento de la ciudad de México y deteriorando el sistema y su capacidad para desalojar las aguas del Valle, lo que motivó la ampliación del Gran Canal y el segundo túnel de Tequisquiac

2.2. El Problema del Hundimiento.

Desde principios de siglo hasta 1936, los hundimientos de la ciudad de México se mantuvieron en el orden de cinco centímetros por año. Al aumentar la demanda de agua, se inició la perforación de pozos profundos, y entre 1938 y 1948, el hundimiento en el centro del Distrito Federal se incrementó a 18 centímetros por año, para llegar después a 30 y 50 centímetros anuales. Como consecuencia, el drenaje

proyectado para trabajar por gravedad, requirió de bombeo para elevar las aguas hasta el nivel del Gran Canal, con un incremento en los costos de operación y mantenimiento. No obstante, el desmesurado crecimiento de la ciudad requería de un sistema de drenaje que no fuera afectado por los asentamientos del terreno, que no necesitara bombeo y que expulsara las aguas por una cuarta salida artificial: era necesario construir el Sistema de Drenaje Profundo de la Ciudad de México (fig 2.1.)

2.3 Sistema de Drenaje Profundo de la Ciudad de México.

Actualmente el drenaje profundo esta compuesto por las estructuras que se describen a continuación (fig 2.2)

El Emisor Central.

Inicia en la lumbrera , ubicada en Cuauhtepac, Villa Gustavo A. Madero y en su recorrido desde Tenayuca hasta la obra derivadora de descarga (presa Requena) tiene una longitud de 49.742 km y es de sección circular con diámetro de 6.5 m y capacidad de 200 m³/seg.

La función más importante del Emisor Central es conducir fuera de la cuenca del Valle de México las aguas de los interceptores Centro-Poniente, Central y Oriente.

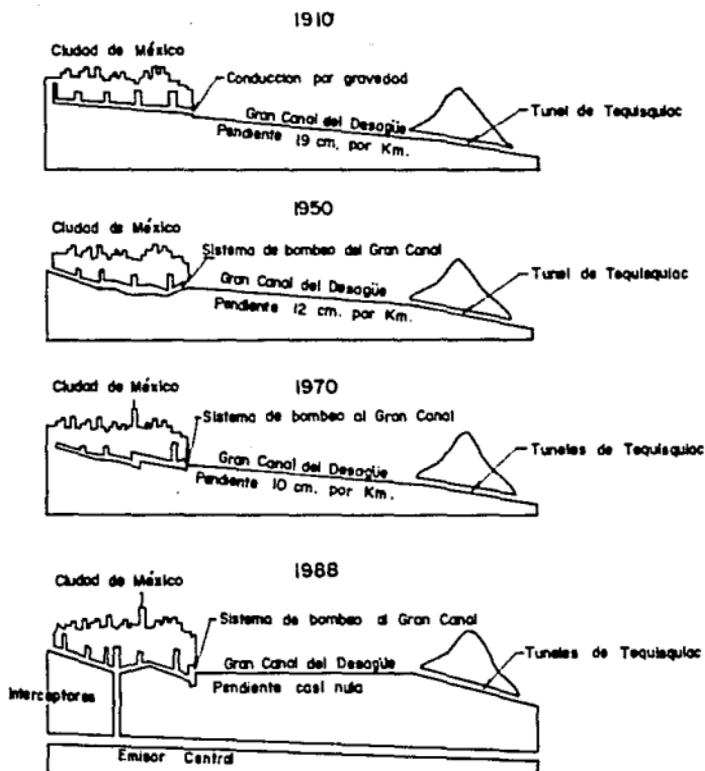


FIG. 2.1 EL HUNDIMIENTO DE LA CIUDAD DE MEXICO

El Interceptor Central.

Es un túnel que en su recorrido de la lumbrera 0 hasta la lumbrera 5, localizada en las calles de Dr. Vértiz y Dr. Arce, tiene una longitud de 14.901 km de sección circular, con un diámetro de 5.0 m. Beneficia a las delegaciones Gustavo A. Madero, Azcapotzalco, Cuauhtémoc y parte de la Benito Juárez.

El Interceptor Oriente.

Principia en el Gran Canal del Desagüe, donde se localiza la obra de toma que continúa con sección rectangular hasta la lumbrera 8C ubicada en la colonia Salvador Díaz Mirón y termina en la lumbrera 0 del Emisor Central, en Cuauhtémoc. Tiene una longitud de 10.286 km con un diámetro de 5.0 m.

Depende para su drenaje gran parte del centro y norte del D.F., y beneficia una parte de la delegación Gustavo A. Madero.

El Interceptor Centro-Oriente

Se inicia en la lumbrera 14 del Interceptor del Poniente, cerca del Museo Tecnológico, y termina en la lumbrera 1 del Emisor Central, en el cerro del Tenayo. Beneficia a gran parte de las delegaciones Miguel Hidalgo y Azcapotzalco. Además alivia al Interceptor del Poniente en la lumbrera 14.

En cuanto a la infraestructura de colectores semiprofundos, destacan dos que se pusieron en operación durante 1988:

Colector Semiprofundo de Iztapalapa.

Tiene una longitud de 5,500 metros, capta gran parte de la delegación Iztapalapa y menor de Iztapalapa, que beneficia la parte noreste de esa delegación.

Colector Semiprofundo Obrero Mundial.

Tiene una longitud de 800 metros, diámetro de 3.2 metros y dos lumbreras. Su trazo es paralelo al río la Piedad, capta a este último en la lumbrera 2 por medio del Colector Xochicalco, y captará, en un futuro próximo, los escurrimientos de la zona poniente de la delegación Benito Juárez a través del Colector Pestalozzi, actualmente en proyecto, para descargarlos posteriormente en lumbrera 4 del Interceptor Central.

2.4 Sistemas de Excavación Empleados.

Lumbreras.

Todos los accesos a los túneles en construcción se hacen por medio de las lumbreras; éstas son las excavaciones verticales de sección circular de tal diámetro que por ellas pueden bajar la maquinaria, extraer los productos excavados, o introducir los materiales de construcción necesarios hasta terminar el revestimiento definitivo de concreto del túnel. Estas lumbreras van desde 6 metros de diámetro, llegando en algunos casos hasta 15 metros, dependiendo del procedimiento constructivo que se va a utilizar para el túnel.

El material para el revestimiento primario de las lumbreras es: en suelos duros se pueden utilizar tabiques, bloques de concreto y concreto lanzado; en suelos medianamente estables, piezas prefabricadas de concreto simple o armado o, excepcionalmente, de hierro fundido y concreto colado in situ; en suelos blandos, el revestimiento debe ser de concreto reforzado.

Los procedimientos de excavación de las lumbreras, dependiendo principalmente del suelo donde se constituyen, pueden ser; con muros colados en el lugar; lumbreras hincadas; lumbreras ademadas con dovela y lumbreras flotadas. El procedimiento de construcción de las lumbreras flotadas será descrito posteriormente debido a que es un

método innovador desarrollado en México y es el que se está utilizando en la actualidad en la zona de suelos blandos.

Túneles.

Dadas las diferentes calidades del material por el que atraviesan los túneles, los métodos o sistemas de excavación también han variado. En términos generales, los sistemas de excavación se podrían agrupar de acuerdo al tipo de método constructivo empleado, de la siguiente manera:

1. Excavación a sección completa con ademe primario de concreto lanzado y/o marcos metálicos.
2. Excavación a media sección con ademe primario de concreto lanzado y/o marcos metálicos.
3. Excavación a media sección y con túnel o túneles piloto y ademes primarios de madera y marcos metálicos.
4. Excavación con ranura y a media sección con ademe primario de marcos metálicos.
5. Excavación con escudos:
 - 5.1 Excavación con escudo de frente abierto.
 - 5.2 Excavación con escudo de frente abierto y aire comprimido
 - 5.3. Excavación con escudo de frente presurizado.

Los cuatro primeros métodos se utilizaron en materiales cuyo valor de soporte, al realizar la excavación, era tal que permitía un lapso entre la excavación y la colocación del ademe primario, sin presentar problemas de "caído".

Las excavación con escudos se está realizando en zonas donde los suelos corresponden a la formación lacustre del Valle de México, los cuales por su poca cohesión deben ser soportados inmediatamente a la excavación.

Túneles de Arcilla

Durante la excavación de un túnel, la estabilidad en suelo duro puede lograrse de una manera relativamente fácil; por el contrario, el suelo blando, la estabilidad se logra a base de técnicas mas elaboradas.

En depósitos aluviales saturados con baja capacidad de carga, el mayor problema en el tuneleo con escudos lo plantea, además del soporte del frente de excavación, el manejo del agua en el sitio de trabajo.

La condición para admitir cualquier filtración al túnel es que ésta no debe estar combinada con pérdidas de suelo; por ejemplo, no debe contener partículas finas ni lavar éstas al suelo circundante. Este puede ser el caso cuando el agua se infiltra a través de fisuras en arcillas duras o desde suelos granulares gruesos. Los problemas más delicados en el control del agua se presentan en suelos arenosos finos y en arcillosos de alta plasticidad.

En los últimos años la tecnología para perforar túneles en suelos blandos ha evolucionado rápidamente con la aplicación del aire comprimido y el desarrollo de los escudos de frente presurizado.

Excavación con Aire Comprimido.

El aire comprimido como una herramienta para la excavación de túneles data desde 1830, en el que el británico Thomas Cochrane construyó lumbreras y túneles bajo el nivel freático, estabilizando las paredes por medio de aire comprimido; a partir de esa fecha se han excavado numerosos túneles utilizando esta herramienta y la combinación de aire comprimido y escudo; sin embargo, todas estas experiencias han sido casi al nivel del mar y no se tenían experiencias de excavaciones de aire comprimido a una elevación de casi 2240 metros sobre el nivel del mar.

Esto condujo a que la excavación con aire comprimido empleado entre el tramo 9 y 10 del Interceptor Central se haya efectuado con un número considerable de pruebas, tanto del comportamiento del material del frente del escudo, como del comportamiento fisiológico de los trabajadores.

Con la utilización de escudos de frente abierto y el uso de aire comprimido se logra estabilizar el frente sin estorbar las labores de excavación. Al túnel se le adiciona una presión de aire a baja presión, en exceso de la atmosférica, que actuará en las paredes y el frente, ayudando así a mejorar la estabilidad del frente y a evitar o disminuir las filtraciones hacia la excavación.

El empleo de aire comprimido, consiste fundamentalmente en lo siguiente:

Se coloca una mampara o un tapón en una sección del túnel, mediante una placa de acero, de tal forma que no exista comunicación de un lado hacia el otro sellando además el terreno con inyecciones para garantizar el aislamiento. En un lado del tapón, o sea el lado de la lumbrera, el aire tiene la presión atmosférica, del otro lado se empieza a inyectar aire; así la sección del túnel entre el frente de excavación y el talón queda sujeta a una presión de aire superior a la atmosférica.

La entrada y salida tanto del personal como de materiales a esta cámara de trabajo presurizada se hace por medio de esclusas, que consisten en cilindros de metal que cruzan la mampara con puertas selladas de entrada y salida; cuando se circula del lado de presión atmosférico al lado presurizado, se cierran ambas puertas y poco a poco se va inyectando aire a presión, hasta que la presión en la esclusa se iguala con la de la cámara de trabajo, en esas condiciones se abre la puerta del lado presurizado y el personal puede pasar a la cámara de trabajo. Cuando se transita en sentido contrario, se cambia la operación a la inversa.

Con la rezaga (material producto de la excavación) se efectúa la misma operación; sin embargo, la velocidad con la que se elimina o alza la presión en la rezaga, es mucho mayor. Para el personal es necesario tomar tiempos apropiados de compresión y descompresión, en base a tablas

preestablecidas en función de la magnitud de la presión, ya que una descompresión súbita puede causar problemas fisiológicos al personal.

Durante la permanencia del personal en el aire comprimido se disuelve más aire en la sangre y en los tejidos, que bajo presión atmosférica, por lo que, al terminar la jornada de trabajo, el personal debe ser descomprimido lentamente, evitando que se formen burbujas en la sangre.

Todo el personal que trabaje bajo el aire comprimido debe estar bajo un riguroso control médico; asimismo, la admisión del personal se hizo mediante una selección muy rigurosa, a base de exámenes radiológicos y clínicos para comprobar la salud de los trabajadores y su condición física. Fundamentalmente se revisan oídos, pulmones y los senos paranasales, exigiendo un perfecto estado de salud en todos los candidatos.

El objeto de formar una cámara presurizada es, principalmente, estabilizar el frente de la excavación. Para el caso de las arenas saturadas, el flujo del aire comprimido del frente de la excavación hacia el terreno, provoca tensiones capilares que evitan que la arena y el agua fluyan hacia el interior del túnel; en el caso de arcillas de baja resistencia, se tiene una presión que contraresta la presión del terreno, evitando así que la arcilla falle por extrusión y penetre hacia el túnel.

Al extenderse el Interceptor Central hacia el sur en 1977 se trabajó en un subsuelo compuesto por arcillas muy saturadas y blandas. Por esa razón fue necesario emplear escudos con presiones de aire de 0.8 a 1.3 Kg/cm². Presiones más altas crearían un riesgo de incidencia de enfermedades por descompensación en los trabajadores y reducirían el tiempo efectivo en las jornadas de trabajo.

3 PROYECTO.

3.1 Estudios Previos

La construcción de un túnel necesita de la geología en la etapa de anteproyecto y de proyecto, en la de construcción e inclusive durante la operación. Se requiere de una geología ingenieril a gran escala, que hable del comportamiento presente y futuro del suelo o macizo rocoso que va a ser modificado con la construcción del túnel.

Métodos de Exploración.

Son distintos los métodos o técnicas exploratorias que permiten llegar al conocimiento preciso del sitio donde se realizará la obra. Puesto que la mayor parte de estas técnicas son de aplicación relativamente costosa, el geólogo o geotecnista deben primero hacer la selección adecuada de la técnica que se debe aplicar y enseguida sacar el máximo de información que ésta proporcione.

En forma simplista los métodos de exploración se dividen en dos grupos o categorías principales que son métodos indirectos y métodos directos. Los primeros son aquellos que se basan en la información obtenida de fotografías aéreas verticales de contacto o en la medida de una propiedad física (mecánica, eléctrica, etc.) del terreno observable o no y son un antecedente o complemento de los segundos.

Los métodos directos a su vez son aquellos que permiten la observación ocular del terreno sea en la superficie o bien a profundidad ya sea por levantamiento geológicos o por muestras colectadas en perforaciones, pozos, o en socavones.

Métodos Indirectos.

Fotointerpretación.

Es un procedimiento utilizado para fines exploratorios tomando como base la interpretación de fotografías aéreas preferentemente verticales, considerando por una parte características relativas a coloración tonalidad y textura de las fotografías y por otra parte, características correspondientes a rasgos topográficos y morfológicos.

Las escalas de las fotografías que se emplean en la fotointerpretación varían para trabajos de detalle de 1:2000 a 1:5000 y para reconocimiento de 1:25000 a 1:50000.

Geofísica.

Los métodos geofísicos constituyen un procedimiento exploratorio que en los últimos años ha cobrado gran importancia en la geotécnica por lo exitoso de sus resultados y podría decirse que no hay obra civil, sobre todo si esta es grande que no incluya en su programa de investigación la aplicación de métodos sismológicos y eléctricos, que son por

otra parte métodos relativamente económicos y de aplicación rápida, naturalmente exigen el concurso de un especialista en geofísica.

Método Sismológico.

Este método se basa en medir las velocidades de propagación de las ondas elásticas en los diferentes medios del lugar, provocando artificialmente perturbaciones dinámicas en un punto del suelo que dan origen a ondas longitudinales y transversales, que permiten deducir por el estudio de sus reflexiones y refracciones las profundidades, espesores de capas y calidad de los materiales.

En geotécnia el método sísmico utilizado es el de refracción, que consiste en medir el tiempo requerido para que las ondas longitudinales viajen del punto en que se generan, a los detectores o geófonos colocados en líneas que captan la señal de llegada y que a su vez la envía a un aparato registrador.

El sismógrafo consta de tres partes básicamente: el mecanismo generador de la onda, el conjunto de geófonos y el aparato registrador.

Métodos Eléctricos.

Estos métodos se basan en la interpretación del campo eléctrico creado por la circulación de una corriente eléctrica en el subsuelo (natural o artificial);

estableciendo una relación entre los parámetros físicos que intervienen en la propagación de la corriente y las características físicas de los materiales empleando para ello aparatos receptores y transmisores. Se pueden aplicar para la localización de acuíferos y estructuras geológicas.

El método eléctrico de resistividad, consiste en la determinación de las resistividades aparentes de cada estrato, generando un campo eléctrico mediante el uso de un dispositivo cuadripolar que mide tanto la intensidad I creadora del campo como la caída del potencial V en dos puntos del campo, para visualizar en forma independiente o global la imagen de la estructura geológica del subsuelo.

La resistividad de un material se define como la resistividad de Ohms entre las caras de un cubo unitario de material. La unidad utilizada es el ohm-metro.

Para la exploración geolétrica se han desarrollado diversos métodos, de estos el más simple es el de Qenner, que opera de dos maneras: sondeo eléctrico que estudia la estratigrafía según una vertical y rastreo eléctrico que lo hace según una horizontal a cierta profundidad. Combinando ambas técnicas se puede tener una clara idea de las condiciones del sitio.

El equipo consiste de una fuente de poder, un voltímetro un amperímetro, cuatro electrodos y cables conductores.

Método Gravimétrico.

La gravimetría es la medida de la aceleración de la gravedad que como se sabe no es constante en toda la superficie del planeta. Para cada punto existe un valor que depende de la latitud y de la altitud. La diferencia entre este valor y el valor medido recibe el nombre de anomalía de Bouguer. Esta se valora en general en fracciones de miligal (el gal corresponde a una aceleración de 1 cm/seg^2).

El equipo que se utiliza para este trabajo y que debe ser extremadamente sensible se denomina Gravímetro.

La anomalía de Bouguer se debe a una repartición no homogénea de las masas en la vertical del punto de medida. Este puede explicarse por la presencia en profundidades de una masa densa o bien de una deficiencia de masa, caso en el cual puede corresponder a una cavidad.

Métodos Directos.

Son éstos como ya se dijo los que permiten la observación ocular y en su caso la obtención de muestras como son: el recono cimiento preliminar, el levantamiento geológico en la superficie del terreno, las perforaciones, los socavones, trincheras y pozos a cielo abierto.

Reconocimiento Preliminar.

Por reconocimiento preliminar se entiende la visita o inspección al sitio, sobre todo de un estudio geológico que procede a cualquier tipo de investigación en el terreno.

Es de todos puntos de vista recomendable este tipo de reconocimiento, complementado con un estudio fotogeológico y con una buena recopilación de datos geológicos del sitio o de predios o zonas cercanas a la obra proyectada, ya que además de proporcionar información acerca de la accesibilidad, recursos humanos y materiales del lugar permite conocer el ambiente geológico del área sobre la cual se va a trabajar, información que se considera necesaria para orientar mejor los estudios posteriores.

Levantamientos Geológicos Detallados.

Estos levantamientos son aquellos que tienen por objeto la determinación precisa de las unidades litológicas presentes de un área en estudio, su grado de alteración y alterabilidad, sus contactos geológicos, posición (rumbo y echado) y los accidentes estructurales o discontinuidades que las afecten: fallas, fracturas y juntas, intensidad de plegamientos, etc. Por otra parte tratándose de morfología accidentada las observaciones durante los levantamientos deben ser también orientadas al conocimiento del equilibrio de taludes (fenómenos de geodinámica externa).

Este tipo de levantamiento, teniendo en cuanto la magnitud y características de la obra por construir, tienen un rango de escalas que pueden variar de 1:100 a 1:5000 tratándose de obras grandes.

Tajos y Pozos a Cielo Abierto.

Estos procedimientos de exploración, a un costo muy limitado, son excepcionalmente ventajosos para conocer el espesor y naturaleza de un material de relleno (suelo, depósito eluvial, aluvial, etc.), las características de la roca subyacente y su grado de alteración, fracturas, fallas y contactos.

Para su integración en el plano geológico y para la elaboración de perfiles, estas obras de exploración deben estar ligadas al plano topográfico o fotogramétrico del lugar y ser levantadas con brújula y cinta a lo largo de todo su desarrollo en las paredes y piso. El levantamiento debe hacerse con el grado de detalle que permita obtener el perfil geológico exacto y los accidentes estructurales existentes. Por otra parte si el estudio lo requiere se obtendrán muestras cúbicas o de otro tipo para ser estudiadas en el laboratorio.

Socavones y Pozos Interiores.

Este tipo de obras, aunque de costo elevado comparado con los tajos y pozos, a cielo abierto e inclusive con las perforaciones, permiten la observación directa de los

materiales y otros accidentes a profundidades a veces suficientemente alejadas de la superficie. Proporcionan valiosa información no solo sobre sus características de resistencia y permeabilidad sino también acerca del comportamiento de la roca, distribución y número de barrenos, etc. Por otra parte son sitios adecuados para efectuar algunas pruebas de campo (módulo de elasticidad, resistencias y permeabilidad).

Son sin duda de las exploraciones más recomendables en el caso de túneles y obras subterráneas. Son obras cuya estaca o machote de entrada deben estar ligados al plano topográfico del lugar, no solo para vaciar la información que se pueda obtener para el plano geológico correspondiente, sino también para tener un punto de amarse para la elaboración de perfiles.

El levantamiento se hace a partir de los machotes o referencias que para el efecto se hayan colocado, tomando datos de las tablas, piso y techo de la obra, en lo referente a accidentes estructurales, contactos y distintas unidades lito-estratigráficas.

Perforaciones.

En las perforaciones deben distinguirse dos tipos, aquellas para la obtención de muestras de roca, y las que se

ejecutan para muestrear suelos. En este caso se analiza las perforaciones en suelos, ya que es el caso de los túneles en la zona lacustre.

Los factores que influyen en la calidad del muestreo en suelos son:

- El procedimiento de hincado: a presión, a rotación o percusión.
- El tipo de muestreador; de pared gruesa (para sondeos alterados de tubo liso) o de pared delgada (para sondeos inalterados tipo Shelby o Denisson).
- El gasto de presión del agua o lodo de perforación.
- La forma de separar la base de la muestra ya introducida en el barril, del terreno circundante.
- El procedimiento de estabilización de las paredes del sondeo: lodo o ademe.

Diámetro, Distribución y Profundidad.

En general los diámetros más recomendables en las perforaciones son el de 2 1/8" y el de 1 5/8", particularmente el primero por permitir obtener muestras en las que se facilita no solo el examen megascópico, respecto de las características petrográficas y estructurales, sino que también la realización de pruebas en el laboratorio, pudiendo quedar inclusive testigos para pruebas o estudios adicionales.

No es posible establecer reglas precisas respecto al número, distribución y profundidad que en general deberán tener las perforaciones ya que no sólo la magnitud de las cargas impuestas por las estructuras al terreno y las características y funciones de la estructura proyectada sino sobre todo las condiciones geológicas del lugar, son las que gobiernan estos tres factores.

En el caso de túneles, el levantamiento geológico y algún método indirecto (geofísico) determinarán el número de perforaciones a lo largo del eje longitudinal que haya sido seleccionado y la profundidad siempre deberá alcanzar la plantilla del túnel. Cabe subrayar que en casos de topografía muy accidentada en que un cúmulo de condiciones impidan o hagan impracticables la ejecución de una perforación, es muy aconsejable que en caso de que se construya la obra, y si se presumen accidentes geológicos de consideración, se realicen perforaciones en el frente de ataque del túnel a fin de conocer de antemano con precisión las condiciones de las rocas que van a ser excavadas, inclusive pudiera ser necesario que estas perforaciones se hicieran en abanico.

3.2 Diseño Estructural.

De una manera general en el Distrito Federal y en especial en la zona del lago, donde predominan las arcillas blandas cuando se efectúa la excavación con escudo, el diseño para el revestimiento se hace en dos etapas.

La primera etapa de revestimiento o revestimiento primario tiene por objeto sustituir el confinamiento y evitar deformaciones instantáneas absorbiendo las cargas totales a corto plazo, este revestimiento actúa en forma temporal y generalmente corresponde al período de construcción; la segunda etapa de revestimiento o revestimiento definitivo se coloca sobre el primero reforzándolo para resistir las cargas que a largo plazo se presentan sobre el túnel.

La carga con la que se diseña el revestimiento primario o temporal del túnel y el secundario o definitivo, depende principalmente de las propiedades mecánicas del suelo donde se hace la excavación, de su relación esfuerzo-deformación-tiempo y de la geometría del túnel. El problema de la determinación de las cargas actuantes no está totalmente esclarecido, por lo que la práctica común para evaluarlas, está fundamentalmente en las experiencias obtenidas de otros túneles que a su vez se apoyan en mediciones de cargas sobre ademes primarios y definitivos y de sus deformaciones.

3.2.1 Presiones Verticales y Horizontales.

Para el cálculo de la presión vertical en los túneles, generalmente se hacen las siguientes consideraciones e hipótesis básicas:

El túnel se divide en tramos que se pueden analizar en forma independiente. Esta división se realiza en base al tipo de depósitos de suelo sobre la clave del túnel.

El subsuelo se idealiza considerándolo como homogéneo en cada uno de sus depósitos.

El método de construcción utilizado no altera las características mecánicas y de comprensibilidad del subsuelo.

Existen diversas teorías^{1/} para calcular las presiones verticales y horizontales que transmitirá el terreno al revestimiento de los túneles, las cuales se pueden clasificar principalmente en dos grupos. En el primer grupo se encuentran las teorías que proporciona la mecánica del medio continuo y que se subdividen básicamente en las teorías de la elasticidad o de la plasticidad. En el otro grupo, se encuentran los métodos empíricos de los cuales existen una gran diversidad dependiendo de las características geométricas del túnel, así como del tipo de subsuelo en el que se encuentra alojado.

El hecho de que los planteamientos teóricos que la mecánica del medio continuo ofrece para la evaluación de las presiones actuantes en los túneles no son lo suficientemente concordante con lo estimado en la realidad, ha motivado la aparición de métodos empíricos o semiempíricos para

^{1/} Széchy K "The Art of Tunnelling".

determinar las presiones por métodos sencillos que puedan emplearse con la información usualmente disponible y que concuerdan y recojan la experiencia de la construcción y de las mediciones realizadas del compartimiento.

A continuación se mencionan los dos criterios más utilizados en la práctica para la determinación de las presiones sobre el revestimiento de los túneles construidos en la ciudad de México.

La presión vertical se calcula con la teoría de Protodyakonov, cuando el túnel está localizado a una profundidad de más de 5 veces su diámetro. En términos generales esta teoría considera que existe una zona de relajamiento del suelo o roca que tiene forma de parábola y cuyo peso gravita directamente sobre el revestimiento.

Los parámetros de diseño necesarios para aplicar esta teoría son: el peso volumétrico (γ) el módulo de elasticidad del suelo (E), el factor de carga que depende de la naturaleza y resistencia del suelo (f) (Ver tabla A), el ángulo de fricción interna de los depósitos o formaciones del subsuelo (ϕ), para el caso de arcillas blandas $\phi = 0$. También es necesario conocer el diámetro (ϕ_1), profundidad del túnel (h) para obtener el valor de la presión vertical uniformemente distribuida. Esta teoría considera un ancho de parábola (zona delgada) (Fig. 3.1), igual al ancho de las excavación (B), y una altura dada por la siguiente expresión:

$$h = \frac{B \gamma}{2f}$$

Tanto en cuanto el área bajo la parábola, la expresión para calcular la presión vertical será:

$$W_r = \frac{\gamma B}{3f}$$

Es importante resaltar que la teoría de Terzaghi cuando considera el arqueado del subsuelo, proporciona una expresión para la presión vertical muy parecida a la de Protodyakonov.

La presión horizontal generalmente se maneja con la teoría clásica de presión de tierras y que básicamente consiste en multiplicar la presión vertical por un coeficiente de empuje de tierras. Protodyakonov propuso la siguiente expresión para el empuje horizontal total actuando en la pared del túnel:

$$E_t = \gamma D_e \left[\frac{1}{N \phi} \left\{ \frac{2}{3 \tan \phi} \left[B + D_e \frac{1}{\sqrt{N \phi}} \right] + \frac{D_e}{2} \right\} \right]$$

Donde:

D_e = Diámetro exterior del túnel.

$$N \phi = \tan^2 (45^\circ + \phi/2).$$

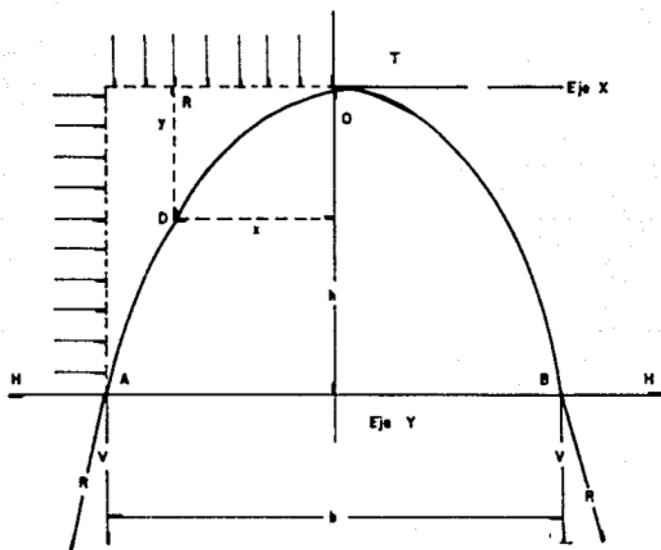


FIG. 3.1 MODELO PARA PLANTEAR EL METODO DE PROTODIAKONOV

Sin embargo no se indica claramente el punto de aplicación de este empuje aunque parece razonable situarlo a la mitad de la altura del túnel.

Debido a que el valor del coeficiente de empuje de tierras depende de la deformación horizontal que se permite en la práctica, la determinación de la presión horizontal considerando las deformaciones del terreno se hace tomando en cuenta que el valor de la rigidez (EI) del revestimiento es independiente del refuerzo y expresando el máximo desplazamiento radial (δ_0) de los puntos sobre el diámetro horizontal del revestimiento debido al peso propio (Wpp), presión radial no interior y exterior del agua, presión vertical uniforme (Wv) y presión horizontal (Wh), se tiene que:

$$\tau_0 = \tau_{pp} + \tau_{\text{pagua int}} + \tau_{wr} - \tau_{\text{pagua ext.}} - \tau_{wn} \quad (1)$$

En que:

$$\tau_{pp} = \frac{0.26 W_{pp} R^4}{EI}$$

$$\tau_{\text{pagua int}} = \frac{0.13 K R_1^5}{EI}$$

$$\tau_{wr} = \frac{0.17 W_v R^4}{EI}$$

$$\tau_{\text{pagua ext}} = \frac{0.13 K R^5}{EI}$$

$$\tau_{wh} = \frac{0.17 W_h R^4}{EI}$$

En donde:

K = peso volumétrico del agua.

R = radio al paño de excavación.

R₁ = radio al paño interior del revestimiento.

E = modulo de elasticidad del concreto.

I = momento de inercia de la sección.

Entonces quedo la expresión:

$$\delta_o = \frac{0.26 W_{pp} R^4}{EI} + \frac{0.13 K R n^5}{EI} + \frac{0.17 W R v^4}{EI} - \frac{0.13 K R^5}{EI} - \frac{0.17 W n R^4}{EI} \quad (2)$$

Expresando W_h en función del módulo de elasticidad de roca E_r y del desplazamiento δ_o como sigue:

$$2 W_n R = \frac{\delta E_r}{1.35}$$

$$\delta_o = \frac{2.70 W_h R}{E_r} \quad (3)$$

igualando (2) y (3) se obtiene la siguiente expresión de W_h:

$$W_h = \frac{0.26 W_{pp} R^3 + 0.17 W v R^3 + \frac{0.13 K R_1^5 - 0.13 K R^4}{R}}{270 E T / E_r + 0.17 R^3}$$

TABLA A

GRADO DE RESISTENCIA	NATURALEZA DEL SUELO	PESO VOLUMETRICO KG/M3	RESISTENCIA A LA COMP. CONF. KG/CM2	FACTOR DE RESISTENCIA
Muy alta	Cuercita densa, basaltos y rocas sanas de muy alta resistencia	2800 3000	2000	20
Muy alta	Granito, rocas y igneas, calizas y algunas areniscas de alta resistencia	2600 2700	1500	15
Alta	Granitos y rocas igneas, areniscas resistentes y calizas, conglomerados bien cementados	2500 2600	1000	10
Alta	Calizas, granito poco alterado, areniscas sanas, mármol y piritas	2500	800	8
Moderadamente fuerte	Areniscas competentes	2400	600	6
Moderadamente fuerte	Areniscas estratificadas	2300	500	5
Media	Lutitas, areniscas y caliza de baja resistencia, conglomerados mal cementados	2400 2800	400	4
Media	Pizarras y esquistos. Mármol denso	2400 2600	300	3
Moderadamente suelto	Pizarras sueltas y calizas muy suaves, yeso, terrenos de deshielo, mármol, areniscas en bloques, gravas y boleos cementados	2200 2600	200 150	2
Moderadamente suelto	Terrenos con gravas, pizarras en bloques y fisuradas, gravas y boleos compactos, arcillas duras	2200 2400	-----	1.5
Suelto	Arcillas densas, suelos arcillosos, arenas y gravas con poca cementacion	2000 2200	-----	1.0
Suelto	Gravas, loes, depósitos de arena suelta	1800 2000	-----	0.8
Suelos	Suelos con vegetacion, arenas sueltas húmedas, humus	1600	-----	0.6
Suelos granulares	Arenas limpias, gravas finas, rellenos superficiales	1400 1600	-----	0.5
Suelos plásticos	Suelos limosos, loes modificados y suelos en condiciones saturadas	-----	-----	0.3

Presión Vertical.

Cuando la profundidad de los túneles es menor de cinco diámetros, la aplicabilidad de la teoría de Protodyakonov no es aceptada. Cuando se presentan estos casos, la presión vertical se determina considerando todo el estrato del subsuelo que gravita sobre la clave del túnel, aplicando la siguiente expresión:

$$W_r = \sum_{i=1}^{i=n} \gamma_i h_i + \sum_{i=t}^{i=n} \gamma'_i h_i + \gamma_w h (t-n)$$

en donde:

γ_i = peso volumétrico de cada capa de suelo.

γ'_i = peso volumétrico sumergido de cada capa de suelo.

h_i = espesor de cada capa de suelo.

n = número de depósitos arriba del nivel piezométrico.

t = número de depósitos arriba de la clave del túnel. (Ver fig. 3.2)

γ_w = peso volumétrico del agua.

Para el cálculo de la presión horizontal se utiliza:

$$W_n = K_o \left[\sum_{i=1}^{i=n} \gamma_i h_i + \sum_{i=t}^{i=n} \gamma'_i h_i \right] + \gamma_w h (t-n)$$

En donde generalmente $K_o = 0.5$ que es el suficiente de empuje en reposos de la arcilla que se encuentra en la Ciudad de México.

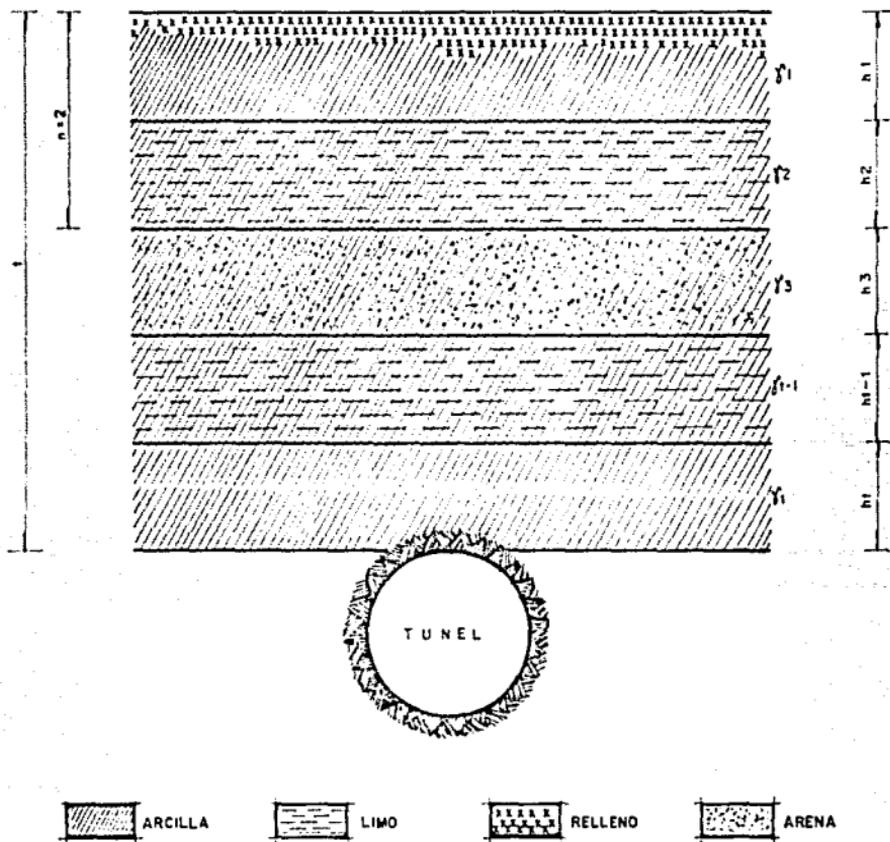


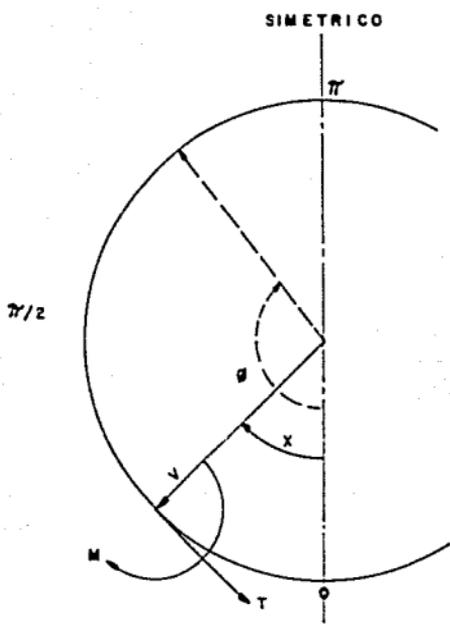
FIG. 3.2

3.2.2 Elementos Mecánicos.

Debido a las condiciones de excavación de los túneles en la zona blanda de la Ciudad de México, los túneles son de sección circular, de tal manera, que para calcular los elementos mecánicos, como son el momento flexionante (M), la fuerza normal (N), y la fuerza cortante (V), en una sección circular para diferentes condiciones de cargas actuantes, las cuales son presión vertical uniforme (wv), presión horizontal uniforme (wh), la presión horizontal triangular (wt), el peso propio del revestimiento (wpp), el peso del agua (ww), así como la presión externa (Pe), y la presión, interna (Pi) (esta última es importante para cuando el túnel está funcionando a tubo lleno), se dedujeron a partir de las ecuaciones dadas por Raymond J. Roark^{2/}. La deducción de las expresiones para determinar los elementos mecánicos se efectuaron debido a la simetría vertical en cargas y geometría, únicamente de 0 a 180°, también se consideró que el signo positivo es el indicado en la figura 3.3

Las ecuaciones para encontrar los elementos mecánicos para las diferentes condiciones de carga (Ver fig. 3.4) son las siguientes:

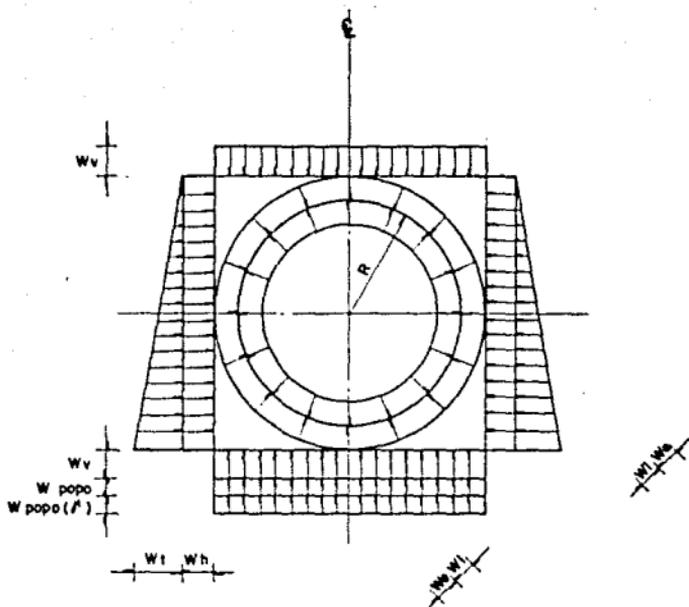
^{2/} Raymond J. Roark, "Formulas for Stress and Strain".



DE DONDE :

- β = ANGULO DE INTEGRACION
- x = ANGULO EN RADIANES
- M = MOMENTO
- V = FUERZA CORTANTE
- T = TENSION CIRCUNFERENCIAL

FIG. 3.3 SENTIDO POSITIVO DE LOS ELEMENTOS MECANICOS



DE DONDE

- R = RADIO
- W_v = CARGA VERTICAL
- W_h = CARGA HORIZONTAL
- W_t = CARGA TRIANGULAR
- W_{popo} = CARGA DEL PESO PROPIO
- $W_{popo} (l)$ = CARGA DEL PESO PROPIO DEL LIQUIDO
- W_e = PRESION EXTERIOR
- W_i = PRESION INTERIOR

FIG. 3.4 ESTADO DE CARGAS GENERAL.

Bajo la carga horizontal (wh) (Ver figura 3.5).

- Momento Flexionante (M):

$$M = w R^2 (1 / A - U^2 / 2)$$

- Fuerza Normal (N)

$$N = - w R U^2$$

- Fuerza Cortante (V):

$$V = w R Z U$$

Bajo la carga vertical (Wv) (ver fig. 3.6):

- Momento flexionante (M):

$$M = w R^2 (1/4 - z^2/2)$$

- Fuerza Normal (N):

$$N = -w R Z^2$$

- Fuerza Cortante (V):

$$V = -w R Z U$$

Bajo la carga triangular (wt) (Ver figura 3.7)

- Momento Flexionante (M):

$$M = w R^3 (3 / 12 + U / 8 - U^2 / 2 - U^3 / 6)$$

- Fuerza Normal (N):

$$N = w R^2 (U / 8 - U^2 - U^3 / 2)$$

- Fuerza Cortante (V):

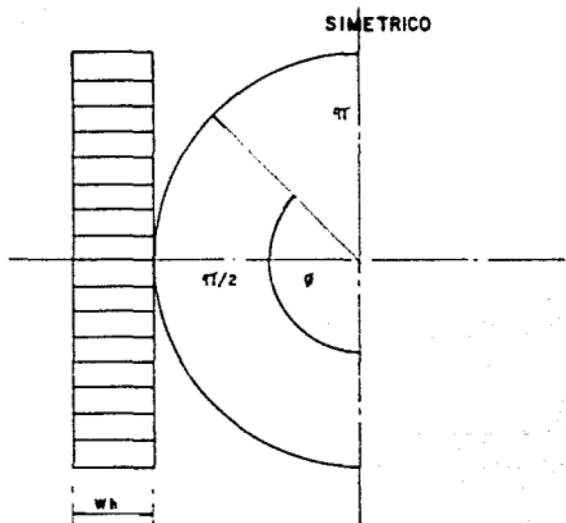
$$V = w R^2 Z (- 1/8 + U + U^2 / 2)$$

Bajo la carga del peso propio (Wpopo) (Ver figura 3.8):

De π a $\pi/2$:

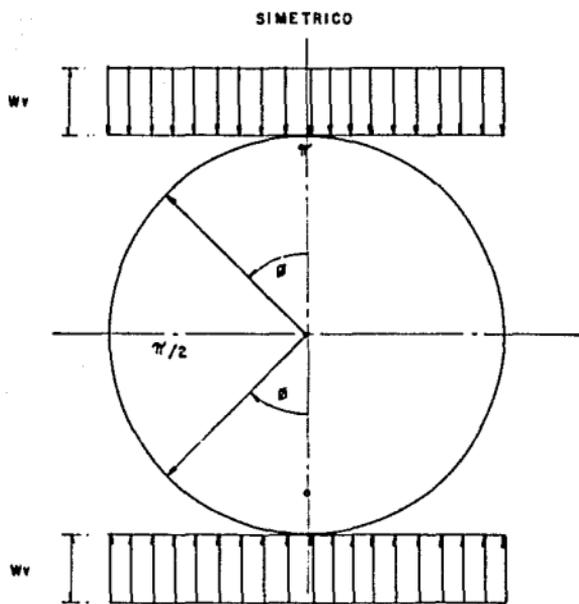
- Momento Flexionante (M):

$$M = w R^2 (- 1 + U / 2 + X Z) - w R Z'^2 / 2$$



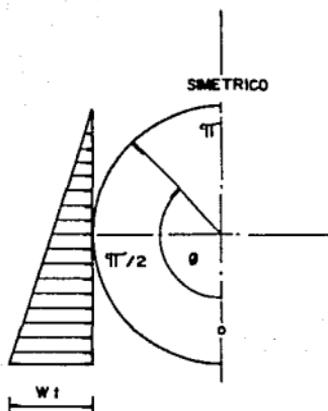
Si $W_h = w$
 Para $X = 0$ hasta $X = l$
 Cuando $\beta = \pi$
 De los parámetros generales
 $S = \sin \beta = \sin \pi = 0$
 $C = \cos \beta = \cos \pi = -1$

FIG.3.5 BAJO LA CARGA HORIZONTAL (W_h)



Si $W_v = w$
 Para $X = 0$ hasta $X = \phi$
 Cuando $\phi = \pi/2$
 De los parámetros generales
 $S = \sin \phi = \sin \pi/2 = 1$
 $C = \cos \phi = \cos \pi/2 = 0$

FIG. 3.6 BAJO LA CARGA VERTICAL (W_v)



DE DONDE :

$$Wt = w R (1 - \cos \phi)$$

Para $X = 0$ hasta $X = \phi$

Cuando $\phi = \pi$

De los parámetros generales

$$S = \sin \phi = \sin \pi = 0$$

$$C = \cos \phi = \cos \pi = -1$$

FIG. 3.7 BAJO LA CARGA TRIANGULAR (Wt)

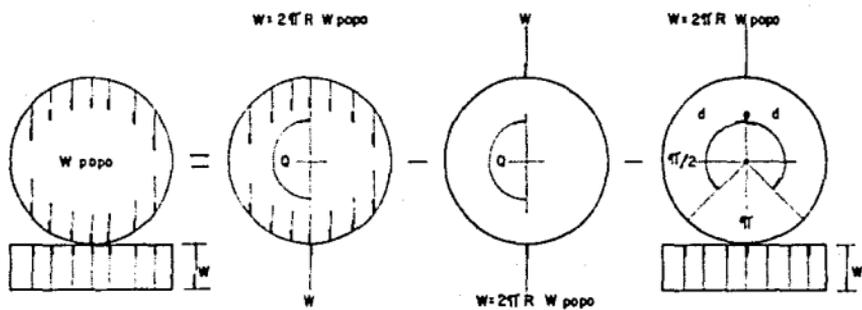


FIG. 3.8 BAJO LA CARGA DEL PESO PROPIO (W_{popo})

- Fuerza Normal (N)

$$N = w R (X Z - U / 2) - w R Z'^2$$

- Fuerza Cortante (V):

$$V = w R (X U + Z / 2) - w R Z' U$$

De $\pi/2$ a π :

- Momento Flexionante (M):

$$M = w R^2 (-1 + U / 2 + X Z) + \\ w R^2 (3 / 8 + 1 / \pi - 2' - U' / 3 \pi)$$

- Fuerza Normal (N):

$$T = w R (X Z U / 2) - w R (U' / 3 \pi + Z')$$

- Fuerza Cortante (V):

$$V = w R^2 (X U + Z / 2) + w R (2' / 3 \pi - U')$$

Bajo la carga del peso propio del elemento líquido
(w_{popo}) (Ver fig. 3.9)

De 0 a $\pi/2$:

- Momento Flexionante (M):

$$M = R^3 (-1 / 2 + U / 4 + X Z / 2) - R^3 Z'^2 / 4$$

- Fuerza Normal (N):

$$N = R^2 (1 + U/4 + XZ/2) - R^2 Z'^2 / 2$$

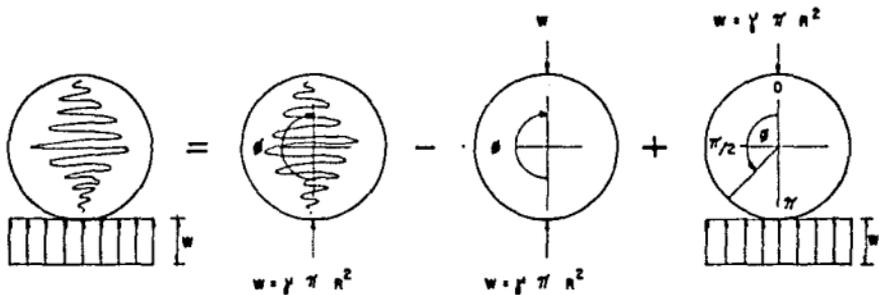


FIG. 3.9 BAJO LA CARGA DEL PESO PROPIO DEL ELEMENTO LIQUIDO (W propio (γ))

- Fuerza Cortante (V):

$$V = R^2 (X U / 2 + Z / 4) - R^2 Z' U' / 2$$

De $\pi/2$ a π :

- Momento Flexionante (M):

$$M = R^3 (-1/2 + U/4 + X Z/2) + R^3 (3/16 + 1/2 \pi - Z'/2 - U' / 6 \pi)$$

- Fuerza normal (N):

$$N = R^2 (1 + U / 4 + X Z / 2) - R^2 (U' / 6 \pi + Z' / 2)$$

- Fuerza Cortante (V):

$$V = R^2 (XU / 2 + Z / 4 + R^2 (Z' / 6 \pi - U' / 2))$$

Bajo la presión externa (W_e) (Ver figura 3.10):

- Momento flexionante (M):

$$M = 0$$

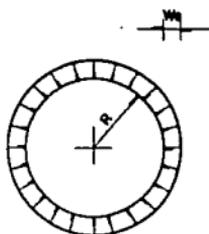
- Fuerza normal (N):

$$N = - W_e R$$

- Fuerza cortante (V):

$$V = 0$$

Bajo la presión interna (W_i) (Ver figura 3.11):



MOMENTO FLEXIONANTE (M) = 0

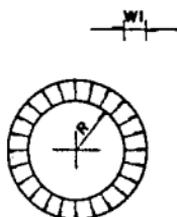
FUERZA CORTANTE (V)

$$V = 0$$

FUERZA CORTANTE (N)

$$N = -W_e \cdot R$$

FIG. 3.10:- BAJO LA PRESION EXTERNA (W_e)



MOMENTO FLEXIONANTE (M) = 0

FUERZA CORTANTE (V)

$$V = 0$$

FUERZA CORTANTE (N)

$$N = W_i \cdot R$$

FIG. 3.11 BAJO LA PRESION INTERNA (W_i)

- Momento flexionante (M):

$$M = 0$$

- Fuerza normal (N):

$$N = W_i R$$

- Fuerza cortante (V):

$$V = 0$$

De la fig. 33, θ significa el ángulo de integración que determina de dónde a dónde y en qué sentido se van calculando los elementos mecánicos a una distancia o ángulo X en radianes.

Tomando como parámetros generales que: $S = \text{sen } \theta$ y $C = \text{cos } \theta$ para la deducción de formulas, $Z = \text{sen } X$ y $U = \text{cos } X$ para simplificar las ecuaciones; se encontraran los elementos mecánicos para cada uno de los estados de carga actuantes por separado y al final se suman para encontrar los elementos mecánicos finales.

TABLA B
RESUMEN GENERAL

X = ANGULO EN RADIANES Z = SEN X : U = COS X : Z' = SEN α : U' = COS α : α = 180 - X			
CONDICION DE CARGA	MOMENTO (M) FLEXIONANTE	TENSION (H) CIRCUNFERENCIAL	FUERZA CORTANTE
CARGA HORIZONTAL DE 0 A π W _H = w	$wR^2 (1/4 - U^2/2)$	$-wRZU^2$	$=wRZU$
CARGA VERTICAL DE 0 A π W _V = w	$wR^2 (1/4 - Z^2/2)$	$-wRZ^2$	$=-wRZU$
CARGA TRIANGULAR DE 0 A π w = WT/2R	$wR^3 (3/12 + U/B - U^2/2 - U^3/6)$	$wR^2 (U/B - U^2 - U^3/2)$	$=wR^2 Z (-1/B + U + U^2/2)$
CARGA POR POPO DE 0 A π/2 w = W _{popo}	$wR^2 (-1 + U/2 + XZ) - wRZ^2/2$	$wR(XZ - U/2) - wRZ'^2$	$=wR(XU + Z/2)$
DE π/2 A	$wR^2 (-1 + U/2 + XZ)$	$wR(XZ - U/2) - wR(U'/3 + Z')$	$wR(XU + Z/2) + wR(2'/3 - U')$
CARGA POR POPO (γ) DE 0 A π/2 γ = P. Vol	$\gamma R^3 (-1/2 + U/4 + XZ/2) - \gamma R^3 Z^2/4$	$\gamma R^2 (1 + U/4 + XZ/2) - \gamma R^2 Z^2/2$	$\gamma R^2 (XU/2 + Z/4) - \gamma R^2 Z' U'/2$
DE π/2 A π	$\gamma R^3 (-1/2 + U/4 + XZ/2) + \gamma R^3 (3/16 + 1/2\pi - 2'/2 - U'/6\pi)$	$\gamma R^2 (1 + U/4 + XZ/2) - \gamma R^2 (U'/6\pi + 2'/2)$	$\gamma R^2 (XU/2 + Z/4) + \gamma R^2 (2'/\pi + U'/2)$
PRESION RADIAL EXTERNA DE 0 A π		$-w_e R$	
PRESION RADIAL INTERNA DE 0 A π		$-w_i R$	

3.2.3 Análisis Sísmico.

Período de Vibración.

Los túneles construídos en la zona lacustre del Valle de México están sujetos a esfuerzos durante un sismo de cierta magnitud.

Si consideramos un estrato blando de subsuelo a gran profundidad excitado durante un sismo importante, las ondas transversales o de corte viajan del estrato firme a la superficie produciendo desplazamientos de corte en la masa del subsuelo.

Los períodos de onda producen amplificaciones de los desplazamientos del suelo, estos períodos son compatibles tanto con sus longitudes de onda como con el espesor del estrato blando.

Para un estrato homogéneo e isotrópico el período de vibración del suelo se puede calcular con la siguiente expresión:

$$T_n = 4D / (2n-1)$$

donde:

D = Al espesor del estrato blando.

n = Al modo de vibración del suelo.

T_n = Período de vibración del estrato en el modo n.

La longitud de onda (L_n) conocido el período de vibración (T_n) del estrato se determina con la siguiente expresión:

$$L_n = V_s T_n$$

donde:

V_s = es la velocidad de onda transversal de corte.

Las partículas del suelo a lo largo de una línea longitudinal se desplazan una de otra en forma relativa, formando en un cierto instante una configuración de onda aproximadamente senoidal. La ecuación del desplazamiento horizontal que representa la configuración promedio puede suponerse como:

$$(\delta s z) \times \delta n z \cdot \text{sen} \frac{2\pi}{L_n} \cdot x$$

donde:

$\delta n z$ = La máxima amplitud del suelo a una profundidad z .

La cual se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$\delta n z = G_a \cdot \frac{T_n^2}{(2\pi)^2} \cos \frac{\pi}{2D} z$$

donde:

z = Es la profundidad.

G_a = Espectro de aceleración del subsuelo.

Si consideramos que el revestimiento del túnel es lo suficientemente flexible para seguir la configuración del suelo, el túnel estará sujeto a fuerzas cortantes y a momentos flexionantes los cuales se pueden calcular aproximadamente por medio de las siguientes ecuaciones:

$$M = EI \frac{d^2 \delta}{dx^2}$$

$$V = EI \frac{d^3 \delta}{dx^3}$$

De la deformación del túnel (Fig. 3.12) en la profundidad z observamos que la flexión máxima ocurre cuando:

$$x = (1/4) L_n$$

y cuando:

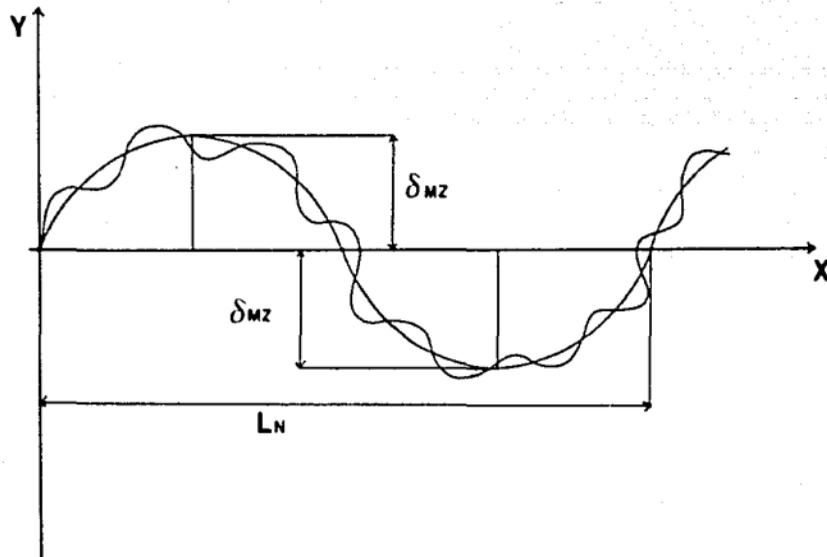
$$x = (3/4) L_n$$

Por lo tanto, el momento máximo se puede calcular como sigue:

$$M_{max} = -EI \delta n z \left(\frac{2\pi}{L_n} \right)^2$$

El cortante máximo ocurre cuando $x = 0$, $x = L_n/2$ y $x = L_n$; por lo tanto el cortante se determina de acuerdo a las siguientes expresión:

$$V_{max} = EI \delta n z \left(\frac{2\pi}{L_n} \right)^3$$



**DESPLAZAMIENTOS RELATIVOS DE UNA LINEA LONGITUDINAL
A LO LARGO DEL TUNEL**

FIG. 3.12

Sin embargo, en la práctica se ha visto que el esfuerzo por cortante no es significativo en el diseño del revestimiento de los túneles, por lo tanto, generalmente, se calcula el momento flexionante inducido por las ondas transversales. Se ha demostrado que el momento flexionante en túneles relativamente superficiales conocida la velocidad de onda de corte, se determina con la expresión siguiente:

$$M = aEI / (V_s)^2$$

en la que:

a = Aceleración máxima del suelo al nivel del túnel.

E = Módulo de elasticidad del revestimiento.

I = Momento de inercia de la sección transversal del revestimiento.

V_s = Velocidad de transmisión de la onda de cortante en el suelo.

Por otra parte:

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

en donde:

$$G = \text{Módulo de rigidez del suelo} = \frac{E_s}{2(1+\nu)}$$

E_s = Módulo de elasticidad del suelo (dinámico).

ν = Relación de Poisson del suelo.

$$P = \text{Masa del suelo} \frac{\gamma}{g}$$

γ = Peso volumétrico del suelo.

g = Aceleración de la gravedad.

Ondas sísmicas transversales (S) y longitudinales (P).

En un medio homogéneo, isotropo y linealmente elástico se propagan dos tipos de ondas:

- Las ondas de dilatación o compresión que son llamadas onda longitudinales P.
- Las ondas de distorsión o de cortante, también llamadas ondas transversales S.
- La velocidad de las ondas P se calcula con la expresión:

$$V_p = \left(\frac{\lambda + 2G}{\rho} \right)^{1/2}$$

y la velocidad de las ondas S con:

$$V_s = \left(\frac{G}{\rho} \right)^{1/2}$$

donde:

ρ = densidad del medio.

G = módulo de elasticidad al corte.

λ = módulo de elasticidad volumétrico.

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}$$

E = módulo de Young.

ν = módulo de Poisson.

En el estrato blando de la ciudad de México, los desplazamientos producidos por las ondas P son considerablemente menores que los ocasionados por las ondas S, de donde resulta que las ondas más importantes que pueden dañar a los túneles, son las ondas S y cuyo movimiento es normal al de propagación.

3.2.4 Diseño de Revestimiento.

Una vez conocidas las características geométricas y elásticas del túnel se proceda a diseñar el revestimiento primario y definitivo.

Por su flexibilidad el revestimiento primario se diseña como un anillo sujeto a una presión radial uniforme igual a la de inyección de mortero de retaque del espacio anular entre el suelo y el ademe: generalmente, esta condición de carga no es la más crítica ya que los esfuerzos generados por maniobras de fabricación y transporte, así como por las cargas concertadas aplicadas por los gastos de empuje del escudo suelen ser más altos, por lo que la capacidad estructural del revestimiento es mayor que la requerida para soportar la presión del terrenos, es decir que mientras la presión radial actuante sobre el revestimiento primario sea

uniforme, no se requiere ningún revestimiento adicional. Sin embargo, en la zona lacustre la condición anterior no se cumple, ya que el proceso de consolidación regional aún continúa; debido a ésto el revestimiento primario (dovelas) se deforma lentamente después de su colocación, disminuyendo su dimensión vertical y aumentando la horizontal. Este proceso es suficientemente lento para permitir que el revestimiento primario se comporte satisfactoriamente, en tanto se coloca el revestimiento secundario o definitivo.

El revestimiento secundario o definitivo se debe de diseñar para soportar las diferentes cargas que estarán actuando durante la vida útil del túnel, así como las condiciones de funcionamiento del mismo.

Revestimiento Primario.

En suelos blandos la excavación de túneles consiste en la utilización de escudo, tanto de frente abierto como de frente cerrado, con o sin la ayuda de aire comprimido como ademe primario dependiendo de las características del suelo.

El revestimiento primario más utilizado en la excavación de túneles en suelos lacustres es el de dovelas de concreto. El número de dovelas depende del diámetro del escudo, sin embargo para, los túneles del Sistema de Drenaje Profundo de la Ciudad de México es el de 5 dovelas y una cuña (6 piezas). Como se mencionó anteriormente, las dovelas suelen tener mayor resistencia para soportar las presiones

del terreno, siempre y cuando no exista una desigualdad importante en las presiones, pero sí es un factor importante la resistencia de las dovelas para soportar los esfuerzos producidos durante su izaje y colocación.

En el diseño de las dovelas se deben de considerar los siguientes aspectos: que las dovelas deberán sufrir deformaciones pequeñas y ser de fácil fabricación, así mismo, deberán ser capaces de resistir los esfuerzos producidos durante su maniobra y almacenamiento, así como el efecto de las cargas del subsuelo pero funcionando las dovelas como un anillo continuo. Un factor importante es considerar la continuidad entre las dovelas lo cual se hace mediante los tornillos de sujeción, los cuales, se analizan utilizando la analogía de una placa base, limitando los esfuerzos de compresión a un porcentaje de la resistencia del concreto al mismo efecto y los tornillos a un esfuerzo de tensión admisible, el cual dependerá del tipo de tornillo que se vaya a utilizar. Debido a que es imposible garantizar su continuidad al cien por ciento, ya que se producen rotación o deformación en sus uniones, en la práctica se acostumbra a diseñar las uniones considerando esfuerzos bajos en los materiales.

Revestimiento Definitivo.

Para el diseño estructural del revestimiento definitivo se consideran las siguientes cargas:

- a) Presión vertical W_v .
- b) Presión horizontal W_h .
- c) Peso propio del revestimiento.
- d) Presión piezométrica exterior.
- e) Cargas sísmicas.

También se deberán de considerar las condiciones de trabajo de túnel, ya que en el caso de los túneles para el Sistema de Drenaje Profundo de la Ciudad de México, pueden estar vacíos o llenos, y en este caso se pueden presentar una presión hidrostática interior, ya que en un momento dado se puede tomar carga debido a una lluvia intensa y prolongada.

El comportamiento estructural del revestimiento definitivo bajo cargas sísmicas se determina en la práctica como ya se mencionó anteriormente con la expresión:

$$M = \frac{a EI}{V_s^2}$$

donde:

a = Aceleración del terreno.

V_s = Velocidad de onda transversal.

E = Módulo de elasticidad del revestimiento.

I = Momento de inercia del revestimiento.

Para la zona lacustre del Valle de México se ha considerado que $a = 0.2g$ (donde g es la aceleración de la gravedad = 9.81 m/seg^2); en el temblor del 19 de septiembre de 1985, la componente S 60 E del registro del acelerógrafo instalado en el patio de la Secretaría de Comunicaciones y Transporte (SCT) dió una aceleración de 200 cm/s^2 , considerado hasta el momento como un registro excepcional. Se considera que el valor de la aceleración del terreno (a) que se usa para calcular el momento producido por un sismo para el revestimiento definitivo es adecuado. También es conveniente mencionar que para la zona de transición y de lomas, la aceleración (a) es de $0.10g$ y $0.04g$ respectivamente.

Conocido el momento inducido por las ondas sísmicas S, se propone un refuerzo longitudinal en el revestimiento de tal manera que el momento resistente sea igual o mayor al actuante. Conocidos los elementos mecánicos producidos por las diferentes condiciones de cargas estáticas que actúan sobre el revestimiento, se procede a diseñar el refuerzo transversal, utilizando el criterio de diseño por carga última para elementos a flexocompresión siguiendo los lineamientos marcados en la Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción para Estructuras de Concreto para el Distrito Federal (RCDF), que esté vigente en el momento del diseño.

4. CONSTRUCCION.

4.1 Lumbreras Flotadas.

El procedimiento de construcción por flotación consiste en la excavación de un brocal perimetral, en el cual se realizan perforaciones secantes ademadas con bentonita; una vez completo el anillo perimetral con estas perforaciones llenas de bentonita, se proceda a escavar el núcleo de la lumbrera, mediante una draga con cucharón de almeja; al mismo tiempo, la excavación se va llenando con lodos bentoníticos para evitar una falla del fondo. A medida que la lumbrera se profundiza, se aumenta la densidad de lodos de bentonita para lograr un equilibrio entre las presiones de las paredes de la lumbrera y la presión del lodo. Las paredes de la lumbrera fueron previamente excavadas con una máquina de rotación para limitar el pozo de la misma.

Excavada la lumbrera, se procede a colar en la superficie una parte de la altura de los muros laterales y la losa de fondo de la lumbrera, que son ligeramente menores en diámetro que la excavación. El fondo de la lumbrera así colada, se hace descender, y se continúan colando tramos de muro a medida que el fondo va trabajando en la excavación, flotando dentro de los lodos bentoníticos. Llega un momento en que la flotación de la lumbrera es tal que impide que

ésta baje; en el momento se empieza a llenar la lumbrera en el interior, con agua, para darle mayor peso y permitir que baje. El control de la verticalidad se efectúa mediante gatos hidráulicos. Se continúa bajando la estructura de concreto hasta asentarla en el fondo; en este momento se termina la construcción, llenando el espacio entre concreto y suelo con inyecciones de cemento. (Figura 4.1.)

La descripción detallada del procedimiento constructivo de las lumbreras flotadas es el siguiente:

4.1.1 Construcción de Brocal Exterior e Interior

Sobre el terreno se traza una circunferencia de 9.50 m. de radio y otra de 5.17 m. que limitarán el brocal exterior, también se hace el trazo del brocal interior de 4.45 m. de radio; a continuación en ambos brocales se traza un polígono de 14 lados. (Figura 4.2)

Cuando se ha terminado de hacer la excavación de los brocales interior y exterior respetando los polígonos de 14 lados, se procede a instalar el armado del brocal exterior; en el armado se dejan ancladas 24 preparaciones especiales.

Al finalizar el armado del brocal exterior, se procede a colocar la cimbra, de modo que se marquen perfectamente los vértices del polígono (14 lados).

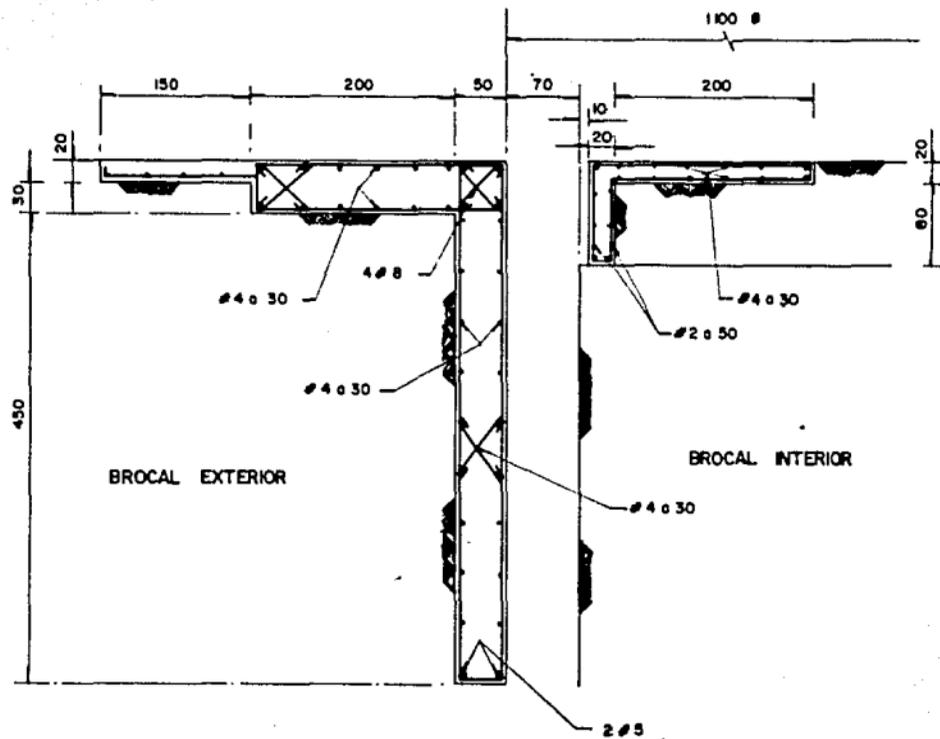
Cuando se ha terminado de colocar la cimbra, se hace el colado en dos etapas, se cuela primero una mitad del brocal, después la otra y en igual forma se hace para el colado del brocal interior (Fig. 4.3). En el núcleo que quedó sin colar, se hace un recipiente en forma de cazuela para almacenar lodo bentonítico.

4.1.2 Perforaciones Secantes.

El siguiente paso es llenar de lodo bentonítico el recipiente del centro, así como el hueco que quedó entre los brocales y se procede a enumerar los vértices del polígono, para identificar las perforaciones guías de 0.60 m que se llevarán a cabo a una profundidad de alrededor de 36 m. (según el caso). Se realizan primero las de los vértices impares. Las perforaciones se hacen con el fin de que sirvan de guía a la almeja que excavará toda la zanja perimetral de 70 cm. de ancho. (Figura 4.4.).

4.1.3 Excavación de Trincheras y Forma de Ademar la Excavación.

Al terminar de hacer las perforaciones secantes, se procede a hacer la excavación perimetral (entre ambos brocales), en forma similar a las perforaciones, es decir, como se tiene un polígono de 14 lados, se marcan los lados en que se hará primero la excavación (alternados), para luego continuar con los que quedan entre los ya excavados.



ACOTACIONES EN cm .

FIG. 4.3

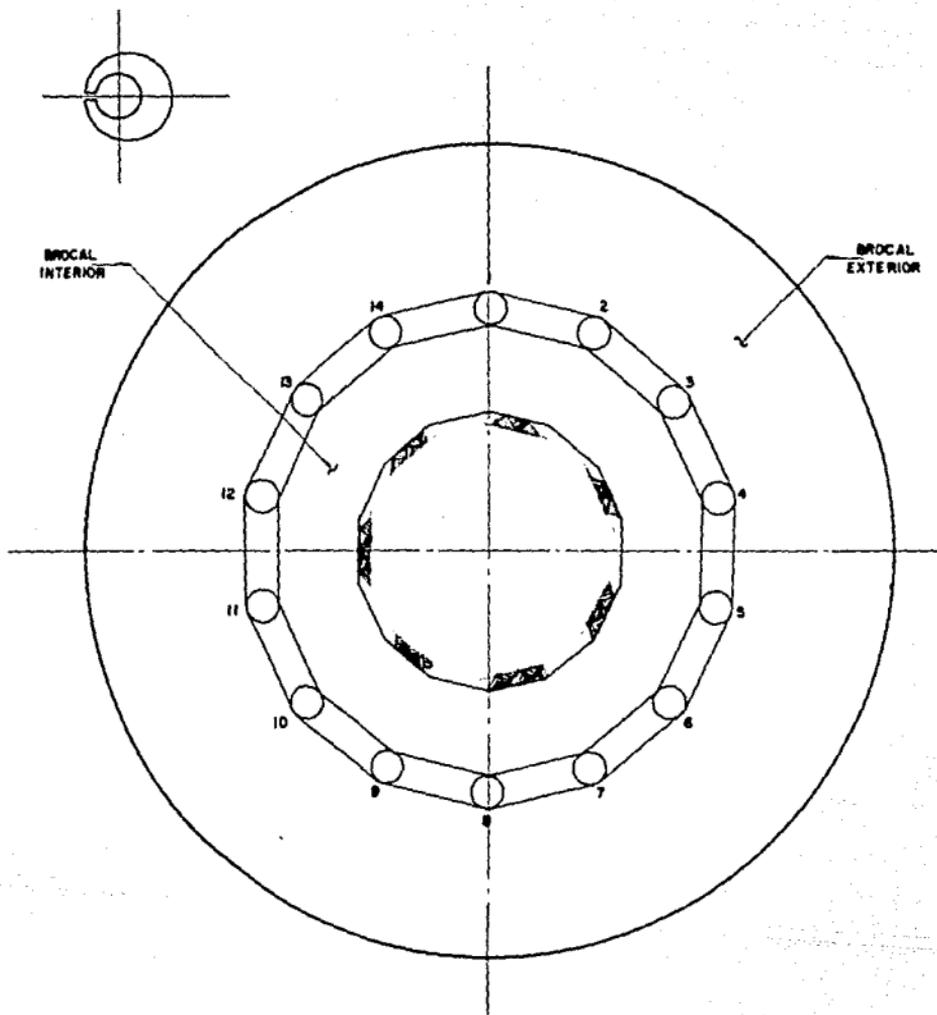


FIG. 4.4

Para hacer la excavación se requiere una draga, con cucharón de un ancho de 60 cm. que entrará justo en la ranura.

Conforme se va excavando la zanja perimetral de la lumbrera, se va ademandando con lodo bentonítico, cuando el material es de buena calidad (arcilla de plasticidad, CH) se utiliza para mezclarlo con la bentonita, para ahorrar consumo de ésta.

Para saber la profundidad a la que esta excavando la almeja, se tiene un dispositivo a base de cable de 1/4" con alma de nylon y contrapeso en la punta de un cilindro de 30 cm. de largo por 2" de diámetro y que termina en una punta y sobre esta trae otro contrapeso que a la vez sirve para no dejar introducir el cilindro en el material; al cable se le hacen marcas a cada 5 metros para saber la profundidad a que se excava.

4.1.4 Excavación del Núcleo.

Cuando se ha terminado de hacer la excavación de la trinchera a la profundidad de proyecto, se empieza a demoler el brocal interior para proceder a hacer la excavación del núcleo. Para tal fin se tiene un dispositivo para almacenar, hidratar y mezclar la bentonita, y hacer le bombeo cuando se requiera a la excavación de lumbrera. Para la extracción del material, se hace la instalación de tolvas a un costado de la lumbrera, donde no se interponga al libre desplazamiento

de la almeja. Esto se hace con el fin de seleccionar la arcilla que se deberá mezclar al lodo de excavación, por medio de licuadoras instaladas en los extremos de la tolva. Cuando la almeja deposita al material en al tolva, éste pasa por un enrejado que previamente se hizo, para luego continuar a la licuadora. Cuando se tiene licuado el material, se vierte en la excavación donde se mezcla con el lodo bentonítico de la planta. Lo anterior se repite sucesivamente hasta alcanzar la profundidad de proyecto.

4.1.5 Ubicación de los Muertos.

Cuando se ha terminado la excavación del núcleo, se procede a desmantelar la tolva receptora del material junto con las licuadoras y se hace una limpieza general de la zona de trabajo.

En el brocal exterior y en su perímetro, se hace la colocación de 8 muertos de concreto que servirán como apoyo a las plumas que se utilizaran para sustentar los muros de la lumbrera durante el colado de los mismos, estos muertos están situados por parejas y separados 90° entre ellos.

Posteriormente, se procede a introducir las 24 vigas "I" radiales de 12" en las preparaciones que se dejan en el brocal exterior; estas vigas tienen la función de sustentar el tanque flotador y posteriormente a la lumbrera, mediante preparaciones que se dejan expuestas en los muros.

4.1.6 Procedimiento Constructivo del Tanque Flotador.

La construcción del tanque flotador se realiza sobre una superficie libre (losa de concreto de 10 m. de diam.). El material requerido para la fabricación del tanque es: placa de 1/4" y ángulos de 2 1/2" x 1/4" y 4" x 1/4".

Cuando se termina de soldar, se procede a colocar la tapa del tanque con una placa de 1/4", sobre la cual se soldan dos vigas "H" 6 x 6" y sobre estas vigas se soldan 4 placas de 1" de espesor de 20 x 10 cm. con un orificio de 2" de diámetro, mismos que servirán para levantar el tanque y colocarlo sobre la excavación que previamente fue realizada y que se mantiene ademada con lodo bentonítico. En el perímetro exterior del tanque, se soldan 4 tubos de 2 1/2" de diámetro en 4 vértices, a los cuales se van uniendo tramos de tubería del mismo diámetro conforme se vaya bajando al fondo de la lumbrera, que sirven para hacer la inyección de mortero, para llenar la oquedad que quedó entre el terreno y las paredes de la lumbrera. (Figura 4.5)

Al tanque se le instalan cuatro tubos de 1" de diámetro en cuatro vértices, mismos que servirán para la inyección de aire comprimido cuando se requieren. En el centro del tanque se hace la instalación de otros tres tubos de 2 1/2" de diámetro, a los cuales en la parte superior se instalan tres

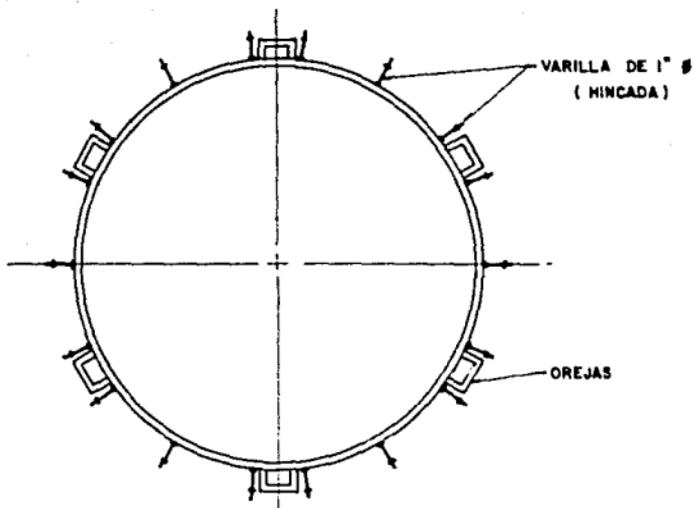
válvulas, marcándose para saber cuál tubo es el más profundo y el más corto; estos tubos tendrán como principal función el desalojo rápido de lodo bentonítico, así como el aire que se encuentra dentro del tanque.

4.1.7 Preparaciones Finales para colocar el Tanque Flotador en la Excavación de la Lumbrera.

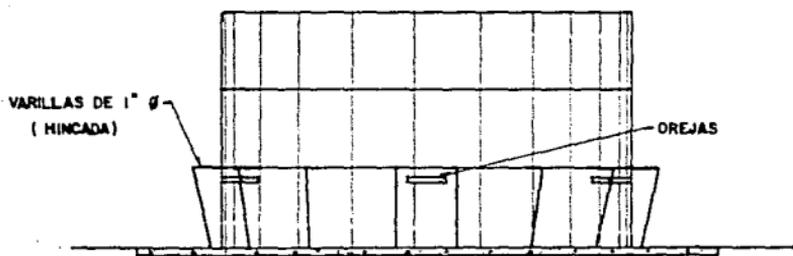
Cuando se ha terminado la excavación de la lumbrera, se instalan 8 preparaciones especiales sobre el brocal de la lumbrera en dirección de las vigas I-12" que se encuentran ancladas a los muertos, que servirán para soportar la pluma. La preparación es anclada con varilla de 1" a 1 m. de profundidad y soldada a la placa de preparación. (Figura 4.6)

Cuando se ha terminado la instalación de las mencionadas preparaciones, se procede a introducir las 24 vigas radiales que soportar el tanque flotador y posteriormente el muro de lumbrera.

Para trasladar el tanque flotador del lugar donde fue contruido, se utilizan 2 grúas con capacidad de 20 toneladas, teniendo mucho cuidado en las tuberías instaladas en el tanque, ya que cualquier mala maniobra podría averiarlas y presentar problemas posteriormente cuando se haga la inyección de aire.



P L A N T A



E L E V A C I O N

FIG. 4.5

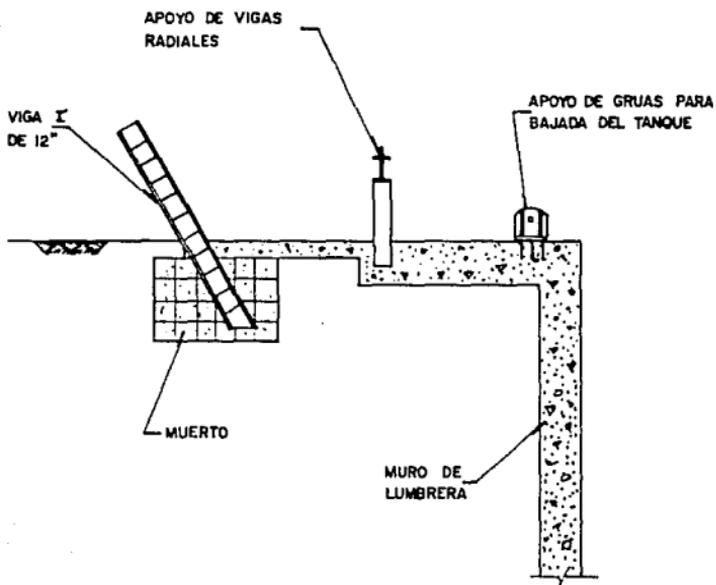


FIG. 4.6 ARREGLO DE ANCLAJES

Cuando el tanque está por entrar en contacto con el lodo bentonítico de la lumbrera, se abren las válvulas para dejar escapar el aire y que éste descienda poco a poco hasta que las 24 preparaciones que tiene el tanque, entren en contacto con las 24 vigas radiales.

4.1.8 Procedimiento Constructivo de la Lumbrera, Colado de Losa y Muros.

Al terminar de colocar el tanque sobre el lodo bentonítico de la lumbrera, se procede de inmediato a colocar las 4 plumas sobre el brocal de la lumbrera, las cuales se anclan a los muertos, al mismo tiempo se levanta un andamio a mitad de la lumbrera a 4.00 metros de altura apoyado en el brocal exterior; esta estructura tiene como finalidad soportar la tubería de 10" de diámetro, que servirán para conducir el concreto a un dispositivo instalado en el andamio, el cual mediante 4 canales repartirá uniformemente al concreto a los muros de lumbrera.

El armado de la losa y los muros se hacen sobre el tanque flotador, utilizando varillas de 1" de diam., el espesor de la losa de piso es variable y depende de la compensación que requiere el suelo excavado. Al finalizar el armado de la losa y parte de los muros, se coloca la cimbra de madera ennumerando cada parte de la misma para evitar pérdidas posteriormente de tiempo. En el armado de los muros

se colocan los separadores a discreción, esto es con el fin de que el recubrimiento sea homogéneo en los muros de la lumbrera (Figura 4.7).

Las preparaciones a base de cajas metálicas rectangulares que se dejan ahogadas en los muros de la lumbrera, son de vital importancia para la buena colocación y ubicación, tanto en altura como en posición.

La altura será de 2.20 m. del brocal a la preparación y posición de los mismos, será regida por las vigas radiales (24 vigas I 12") que se encuentran instaladas en las preparaciones cuando se baje el conjunto colocado y descimbrado (2.40 m. de muros).

Una mala colocación en las cajas metálicas ocasiona problemas tales como:

- a) El conjunto de losa y muros no quedarían sujetos.
- b) Las cuatro plumas tendrían que soportar el peso del conjunto.
- c) Desvío en la verticalidad y probable contacto con el terreno, lo que causaría problemas serios en el descenso.

4.1.9 Bajada de Losa y Muros de la Lumbrera.

Al terminar de hacer el colado y descimbrado de la losa de piso y parte de muros laterales de la lumbrera, se procede a bajar éstos.

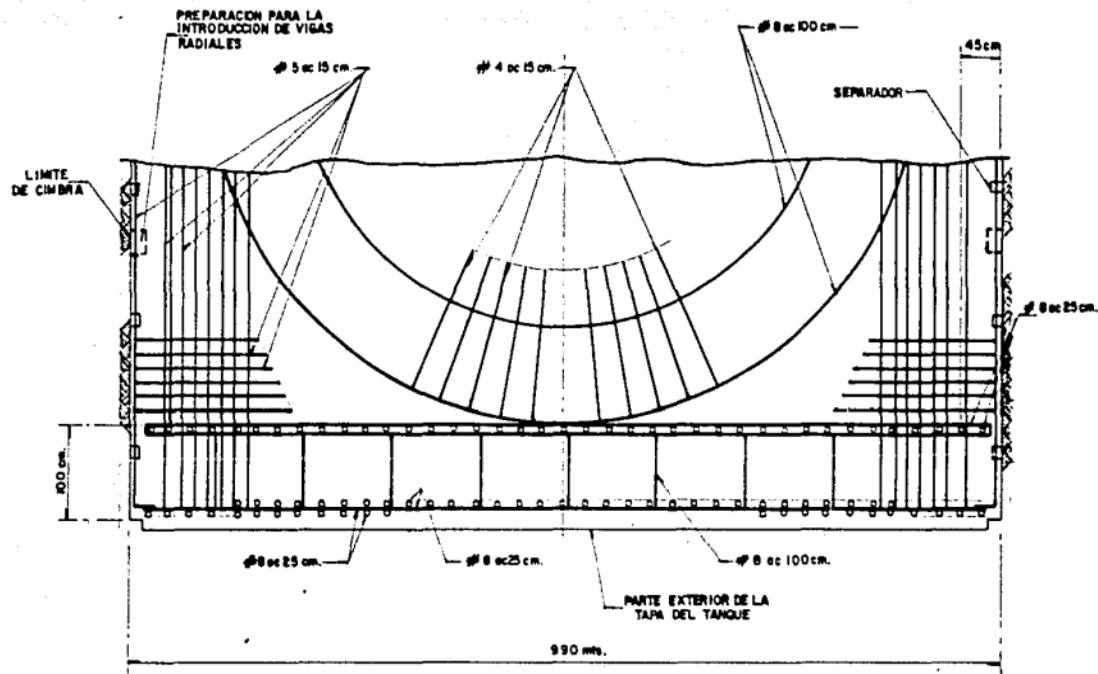


FIG. 4.7 CORTE DE LA LOSA DEL PISO Y MURO DE LA LUMBRERA

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

La operación es la siguiente:

A los tubos de 1" de diámetro instalados en el tanque flotador y ahogados en los muros de la lumbrera, se les inyecta aire a presión conforme se requiera, al mismo tiempo se acciona la bomba de succión para el desalojo del lodo bentonítico de la lumbrera, para que el conjunto (losa de piso y parte de los muros ya colados), vaya descendiendo paulatinamente hasta el sitio donde se localizan las vigas radiales que serán introducidas a las preparaciones que previamente se dejaron en los muros (24 preparaciones).

La función principal de las cuatro plumas, es la del descenso homogéneo de los muros de la lumbrera y la de sustentar el conjunto antes mencionado, mientras se hace la introducción de las vigas radiales en las preparaciones.

Al tener ya sujetos los muros de la lumbrera con las lumbreras radiales y las cuatro plumas, a una cierta profundidad, se procede a hacer el lastre de agua al interior de la lumbrera y así evitar el proceso de flotación. Este proceso es repetitivo hasta la profundidad de proyecto.

4.1.10 Ubicación de los Ocho Dados que tendrá como Función Principal la de Sujetar la Lumbrera.

Cuando se ha terminado de hacer el colado completo de los muros de la lumbrera, éstos se encuentran sujetos a las 4 plumas y a las 26 vigas radiales. En el brocal exterior y

muros de la lumbrera, se procede a perforar para colocar 8 dados de 160 por 100 por 70 cm., los cuales tendrán como principal función, la de sujetar perfectamente los muros de la lumbrera y en esa forma evitar cualquier movimiento de la misma. La posición de los 8 dados es de 45° entre cada uno de ellos. El anclaje de los dados se hace con las varillas sobresalientes de los muros de la lumbrera y el brocal exterior (Ver Fig. 4.8).

4.1.11 Inyección al Tanque y Trinchera.

Al terminar de sujetar completamente la lumbrera con los 8 dados, se procede de inmediato a hacer los preparativos para la inyección de contacto. La dosificación por bacha para inyectado del tanque, es la siguiente:

400 lts de agua.

500 kgs de cemento.

300 kgs de arena sílica.

vol. aproximado 0.688 m^3

La inyección en el tanque se efectúa en la siguiente forma:

En la tubería que se encuentra instalada en el tanque flotador de 2 1/2" a 2.50, 1.00 y 0.50 m. de profundidad y que sobresalen al lastre de agua de la lumbrera, se hace una primera inyección al tubo más profundo, para luego continuar con las otras 2 de mayor o menor profundidad. La presión de inyección es de 1.00 kg/m^2 .

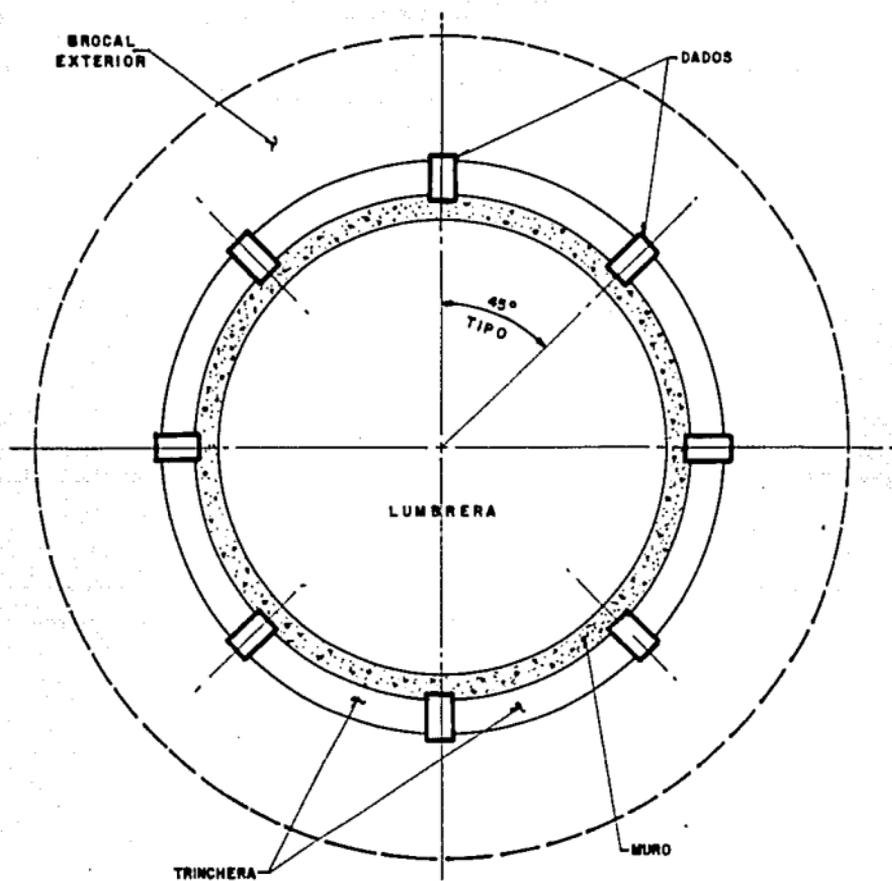


FIG. 4.8

Para saber cuando se ha terminado la inyección del tanque, se instala una tubería de retorno al tubo inyectado, que al estar saturado el tanque, la fuga de inyección aparece por el tubo de retorno, el cual señala con Ésto que el tanque ha quedado saturado, con lo que se da por terminada la inyección en el tanque.

Para ejecutar la inyección de la trinchera (muro de lumbrera y terreno) se utiliza lodo bentonítico que se encuentra en ella en la siguiente forma:

- a) Se tiene lodo bentonítico en el tanque de almacenamiento el cual será enviado a una licuadora para mezclarlo con cemento.
- b) El lodo bentonítico que se encuentra en la trinchera, será bombeado al tanque de almacenamiento del lodo bentonítico para ser inyectado a la trinchera.

La inyección de la trinchera se lleva a cabo de la siguiente forma:

Se hace la conexión de la manguera de inyección a uno de los cuatro tubos de 2 1/2" que fueron instalados a 90° uno con respecto del otro fuera del tanque y que posteriormente fueron ahogados en los muros de la lumbrera y llevados a la superficie en los muros de la lumbrera, por donde se inyecta a la trinchera (cemento-lodo bentonítico) holgura para dejar el libre paso del pilote cuando se ejecuta el hincado del mismo.

4.1.12. Hincado de Pilotos.

Para hacer el hincado de pilotes, se dejan previamente ahogados en el muro de la lumbrera pequeños dados de yeso, que tendrán la suficiente holgura para dejar el libre paso del pilote cuando se ejecuta el hincado del mismo.

Cuando se han terminado de hincar los pilotes, se procede a instalar una serie de vigas, cruzando la lumbrera para luego poner una tapa, dando así por terminada la construcción de la lumbrera. Dicha tapa será retirada cuando se inicien las preparaciones para el ataque del frente.

4.2 Procedimiento de Excavación con Escudo Cortador de Frente Presurizado.

4.2.1 Escudo Cortador de Frente Presurizado.

Como se mencionó anteriormente, las etapas posteriores de excavación del Sistema de Drenaje Profundo presentaron más dificultades por la menor resistencia del suelo que presentan las arcilla blandas de la zona lacustre de la Ciudad de México. Estas requieren una presión de 2.7 kg/cm^2 , que excede por mucho la ya mencionada de 1.3 kg/cm^2 , para utilizar un escudo de aire comprimido y estabilizar el frente de excavación. Debido a esto, fue necesario buscar una tecnología nueva capaz de realizar excavación de túneles de 6 metros de diámetro a 30 metros de profundidad en suelos con contenidos de agua variables entre 250% y 550%; que tuviera un soporte mecánico al frente en todo momento y que pudiera soportar presiones del orden de 2.7 kg/cm^2 .

En 1978, el Comité Técnico del Drenaje Profundo, integrado para el estudio de los métodos de excavación, estableció las bases para adquirir un escudo capaz de perforar con rapidez y seguridad las arcillas blandas del subsuelo de la ciudad de México.

Después de analizar y seleccionar dentro de la tecnología mundial existente, el diseño ejecutivo del escudo presurizado estuvo a cargo de una firma japonesa. El Departamento del Distrito Federal adquirió dos escudos

cortadores de frente presurizados para continuar la construcción del Sistema de Drenaje Profundo.

4.2.2 Descripción del Sistema de Excavación.

El acceso al frente de excavación se efectúa por medio de lumbreras de 12 metros de diámetro, por donde se introducen materiales y equipo con ayuda de grúas de gran capacidad. Por allí baja el escudo de frente cerrado con lodos presurizados para comenzar su labor de excavación. Su rendimiento ha superado las normas fijadas: logra perforar un promedio de 12 a 14 metros diarios y ha avanzado hasta 27 metros en un día.

La parte principal del sistema, es el escudo de frente presurizado, que tiene como principio de diseño la estabilidad del frente de excavación. Esta estabilización se logra mediante la presión mecánica que se ejerce con la parte frontal del escudo, denominada cabeza cortadora, la cual consiste en un disco provisto de dientes que al girar sobre su eje va cortando el suelo. El material que se va cortando, penetra a una cámara presurizada a través de unas compuertas de abertura regulable que están localizadas junto a los dientes cortadores. Este material, para ser extraído a la superficie, es mezclado con lodo de determinada densidad que es suministrado desde el exterior del túnel por medio de bombeo. (Figura 4.9).

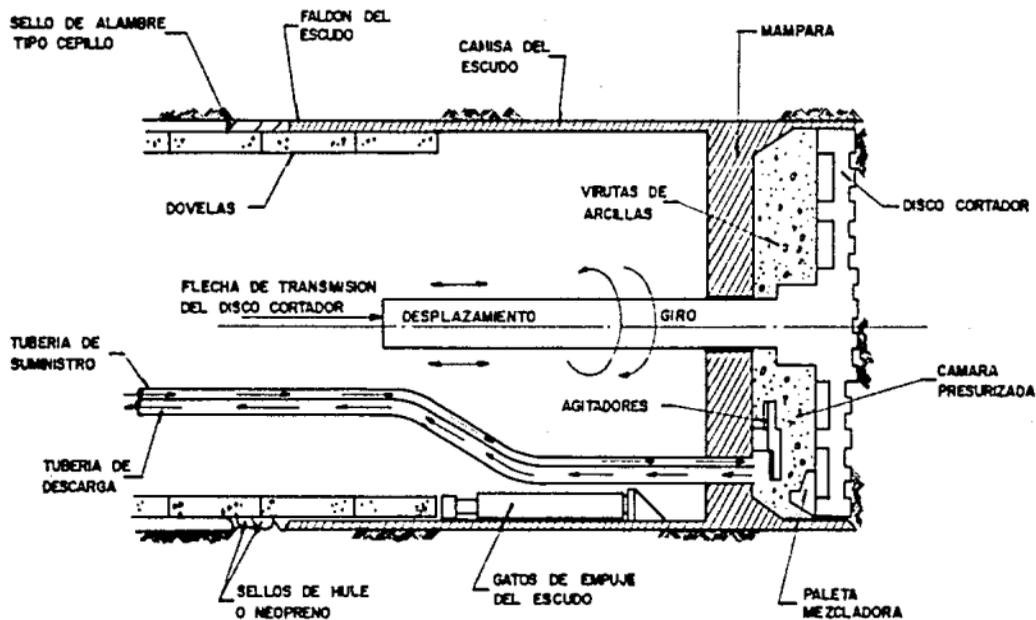


FIG. 4.9 EXCAVACION CON ESCUDOS DE FRENTE PRESURIZADO

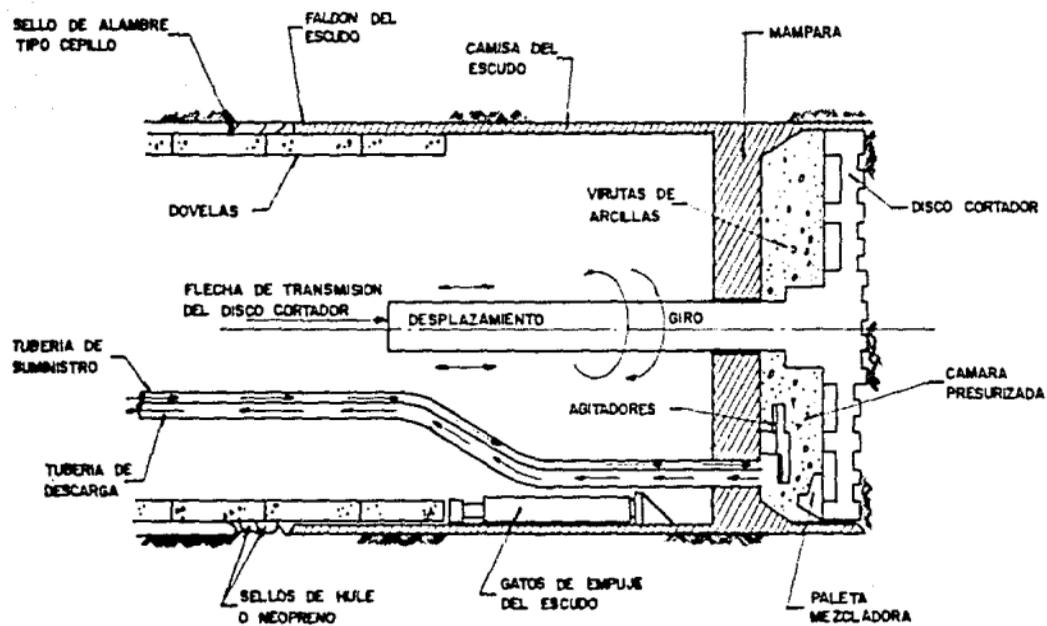


FIG. 4.9 EXCAVACION CON ESCUDOS DE FRENTE PRESURIZADO

Otra función del lodo suministrado del exterior es presurizar la cámara antes mencionada y así equilibrar la presión hidrostática del suelo. Esta mezcla de lodos es extraída a la superficie a través de tuberías.

El lodo extraído del frente durante el proceso de excavación se bombea hacia grandes estanques en la superficie, que permiten la sedimentación de los sólidos gruesos que posteriormente son eliminados. El lodo no sedimentable es bombeado y utilizado nuevamente.

El sistema de circulación de lodos está diseñado para operar densidades de 1.0 a 1.10 t/m³ para el suministro, y de 1.20 t/m³ para la extracción. Está formado por una bomba de suministro instalada en superficie, y de 5 bombas de extracción que se instalan en el túnel a cada 400 metros a medida que avanza la excavación.

El escudo excavador avanza impulsado por 24 gatos, con una fuerza total de empuje de 2880 toneladas. Estos gatos trabajan conjuntamente con la cabeza cortadora manteniendo la presión del frente y dejan espacio para la colocación de dovelas.

A cada metro de avance, se coloca un anillo de dovelas que está formado por 6 piezas de concreto reforzado que tienen en sus orillas sellos de hule duro y espumoso. Estas dovelas se unen entre si por medio de tornillos, formando de esta manera el revestimiento primario del túnel.

El espacio anular dejado por el espesor de la placa del cuerpo del escudo (faldón) y el anillo de dovela debe ser inyectado de manera inmediata con una mezcla de cemento, bentonita, arena sílica y agua para evitar asentamientos en superficie.

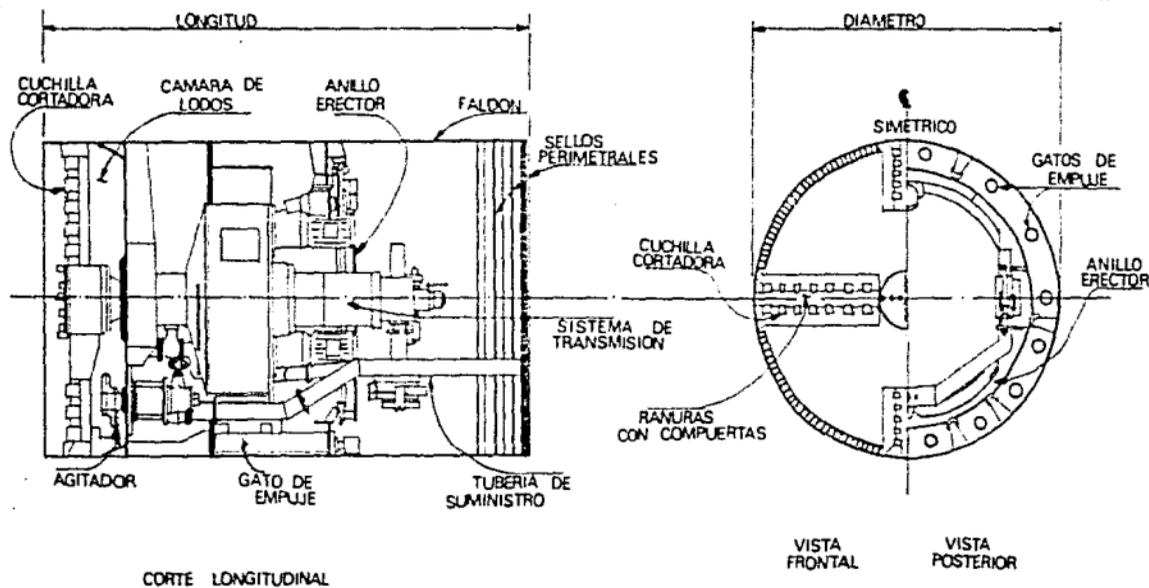
4.2.3 Descripción de las Partes del Escudo y sus Funciones.

Cuerpo del Escudo.

Es un cilindro metálico de 6.24 m. de diámetro exterior, 7.30 m. de longitud y 4.5 cm. de espesor, que tiene como finalidad soportar perimetralmente y en forma inmediata la excavación.

Dentro de ese cilindro se ubica la cabeza cortadora, la cámara presurizada o de mezclado, la transmisión de la cabeza cortadora, los gatos de empuje y el anillo erector de dovelas (Figura 4.10).

En la parte posterior de este cilindro se encuentra el faldón, que es el lugar donde se ensamblan las dovelas de concreto precoladas, que forman el revestimiento primario del túnel. Al final del faldón se localizan tres sellos perimetrales (dos de neopreno y uno de cerdas de alambre), cuya función es impedir la entrada al escudo de la mezcla de inyección que se coloca en el espacio anular. En el faldón del escudo se pueden instalar 2.5 anillos de dovelas con los gatos de empuje retraídos.



ESCUDO DE FRENTE PRESURIZADO

FIG. 4.10

Cabeza Cortadora.

Es un disco metálico de 6.12 metros de diámetro situado al frente del escudo, con desplazamiento horizontal de 40 cm. La cabeza cortadora gira sobre su eje, para excavar con velocidad de 0.67 y 1.0 revoluciones por minuto. Está prevista de 72 dientes cortadores, 24 compuertas de control y 12 paletas mezcladoras de suelo colocadas en la parte posterior, así como dos ecotillas para inspección del frente (Fig. 4.11).

Para liberar al cuerpo del escudo de fricciones adicionales al cruzar por las zonas de sueldo mejorado o en alguna situación particular, la cabeza cortadora tiene dos preparaciones diametrales opuestas, para colocar dientes de sobre-excavación que sobresalen 1.5 cm. del cuerpo del escudo (Fig. 4.12).

La cabeza cortadora tiene como funciones principales: La estabilización del frente de la excavación mediante la presión mecánica que se ejerce con un gato de 36 toneladas, y el corte del suelo o excavación propiamente dicha.

Cámara Presurizada o de Mezclado.

Es el espacio comprendido entre la cabeza cortadora y una mampara metálica. Las funciones de la cámara del mezclado son equilibrar la presión hidrostática del suelo mediante la inyección del lodo, el cual es suministrado a

través de superficie por bombeo; y la de permitir el mezclado del suelo, producto de la excavación, con el lodo.

La mampara metálica está diseñada para una presión de lodo hasta 2.3 kg/m^2 y para sostener el eje de la cabeza cortadora.

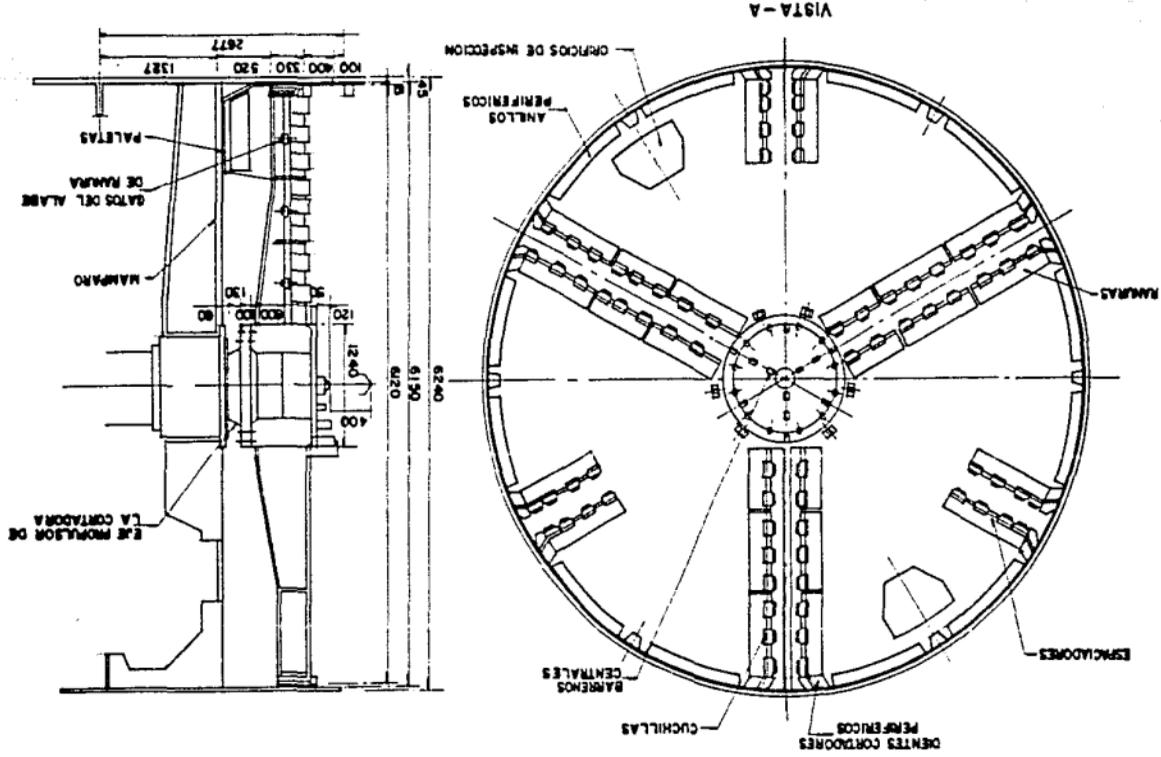
En la mampara metálica que forma la cámara se localizan (Figura 4.13):

- a) Dos puertas para inspección que se utilizan para revisar el frente de excavación. Previamente se vacía la cámara de mezclado.
- b) Una válvula para eliminación del aire de la cámara durante la presurización del frente de excavación.
- c) Sensores de presión de la cámara presurizada que indican la presión frontal de trabajo. Uno registra la presión en las consolas y el otro directamente en un manómetro colocado en la mampara.
- d) Clinómetros para medir el giro del escudo. Indican la posición del escudo respecto a su eje vertical.
- e) Clinómetro para medir la inclinación del escudo. Indica la posición del escudo respecto a su eje horizontal (pendiente).
- f) Válvulas para suministro y retiro de la cámara presurizada. Se operan manualmente.

Transmisión de la Cabeza Cortadora.

Su función es la de proporcionar el torque necesario al cortador, por medio de ocho motores eléctricos.

FIG. 4.11 CABEZA CORTADORA



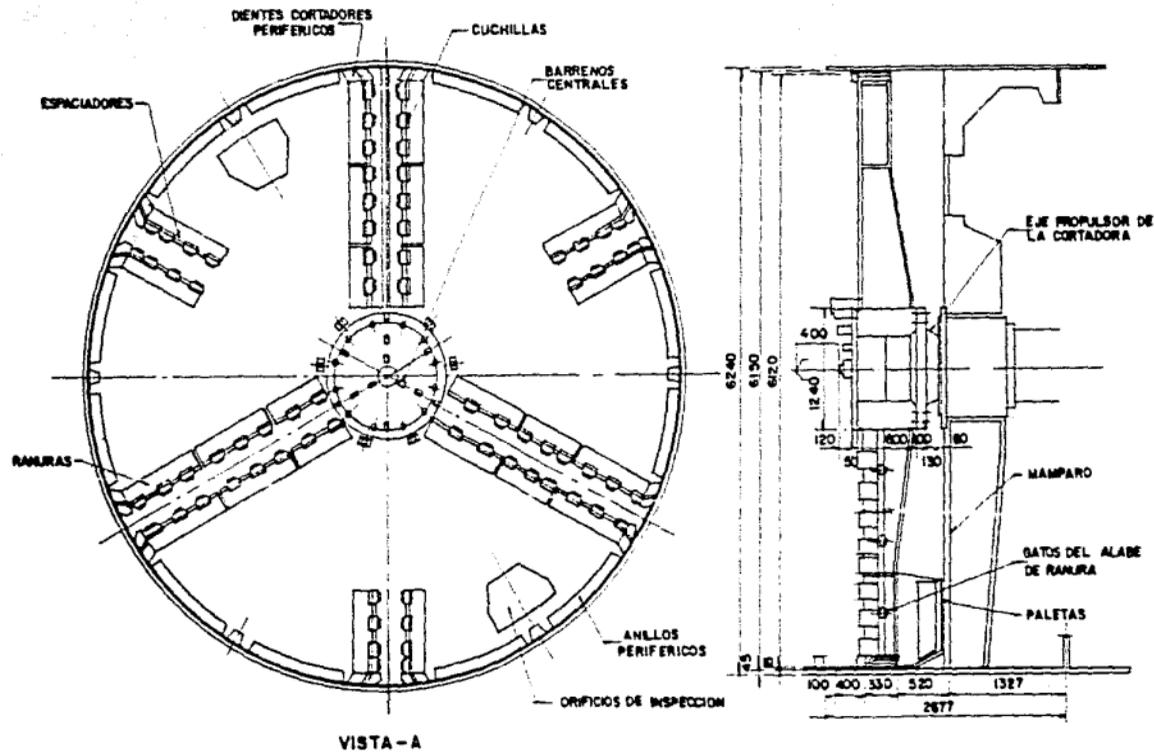


FIG. 4.11 CABEZA CORTADORA

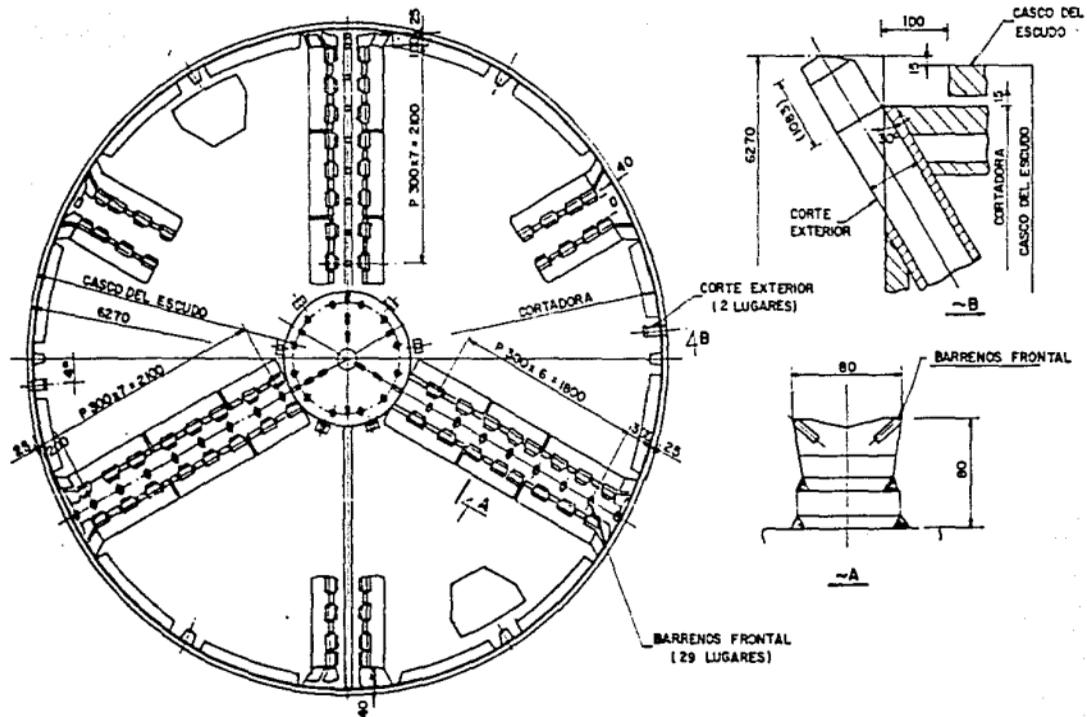


FIG. 4.12

DIENTES DE SOBRE EXCAVACION

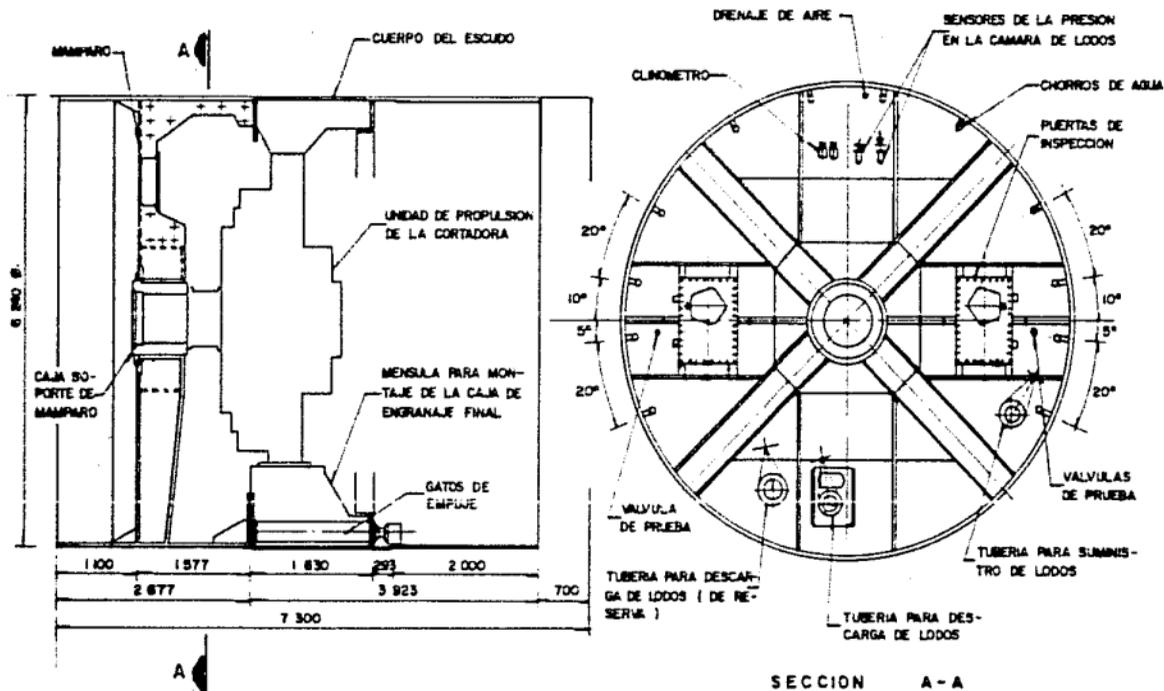


FIG. 4.13 MAMPARA METALICA

Gatos de Empuje.

Proporcionan el avance del escudo durante la excavación, apoyándose en el último anillo de dovelas colocado. Con los gatos de empuje también se hace la conducción del escudo de acuerdo a las líneas de proyecto (Figura 4.14).

El escudo cuenta con 24 gatos de empuje, instalados en el perímetro interno del escudo con una capacidad de 120 toneladas cada uno, lo que proporciona una fuerza total de empuje de 2880 toneladas. La longitud de carrera de los gatos es de 1.15 m. y cuentan con dos sensores que indican la longitud de extensión que es regulable hasta de 5 cm/min.

Cada gato puede operarse de manera independiente para la conducción del escudo.

Anillo Erector.

Es el dispositivo encargado del montaje de las dovelas y tiene capacidad para deslizar, girar y colocar las dovelas en su posición final (Figura 4.14).

El anillo erector tiene 3.66 m. de diámetro; velocidades de 9.5 a 0.8 rpm; con movimiento circular (330° reversible), radial (64 cm) y axial (20 cm), controlados a control remoto.

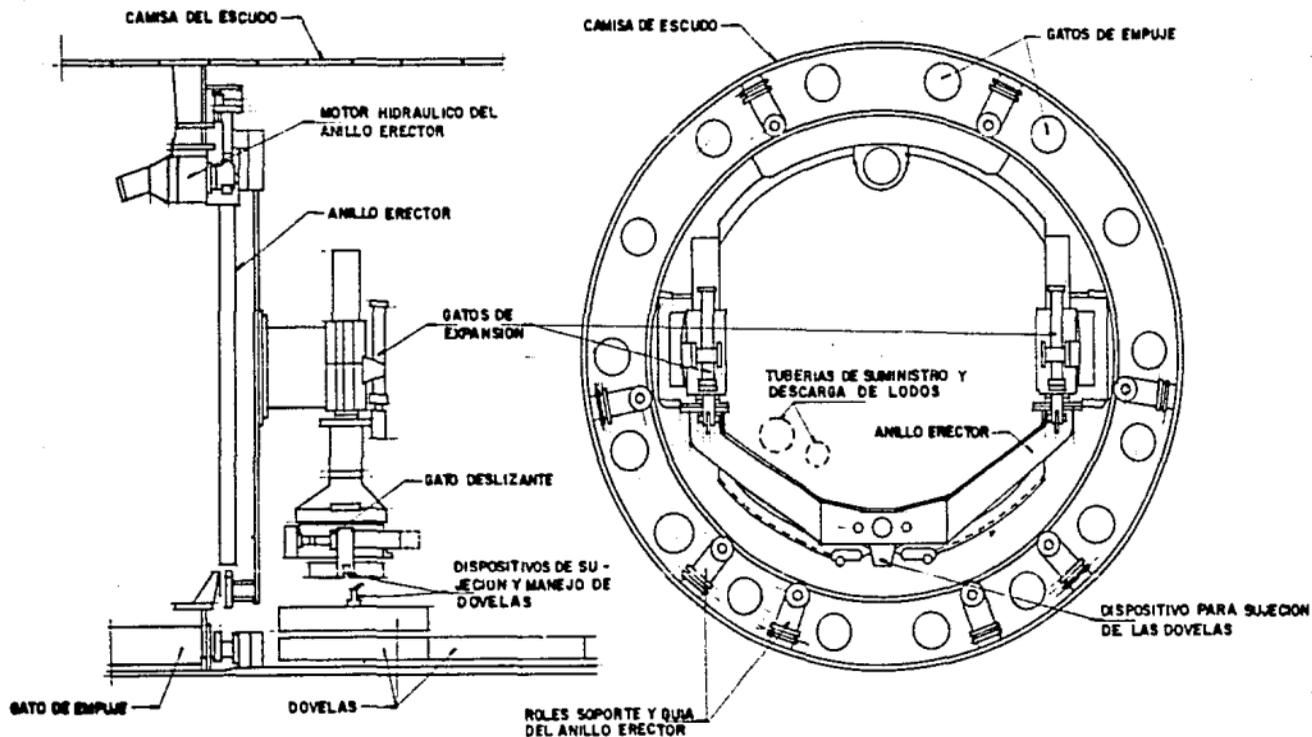


FIG.4.14 ANILLO ERECTOR Y DISTRIBUCION DE LOS GATOS DE EMPUJE

Tren de Equipo.

Atrás del cuerpo del escudo van instalados los equipos que sean necesarios para su operación. Estos son remolcados por el propio escudo durante el avance de excavación.

El tren está formado por 4 módulos y una unidad de tubería telescópica; a continuación se indican los equipos que contienen estos módulos, así como sus funciones (Figura 4.15).

Módulo No. 1.

Está formado por la cabina del operador y un polipasto montado en una trabe carril, por medio de la cual se llevan las dovelas al alcance del anillo erector.

Desde la cabina del operador se opera el sistema de la cabeza cortadora, los gatos de empuje, las compuertas de control de excavación, las unidades de energía hidráulica y de lubricación. La cabina cuenta con los indicadores necesarios para monitorar la operación del escudo.

Módulo No. 2.

Está integrado por la unidad de poder hidráulico, el gabinete de circuitos eléctricos (en la parte superior un transformador de 450 KVA) y los depósitos de aceite hidráulico.

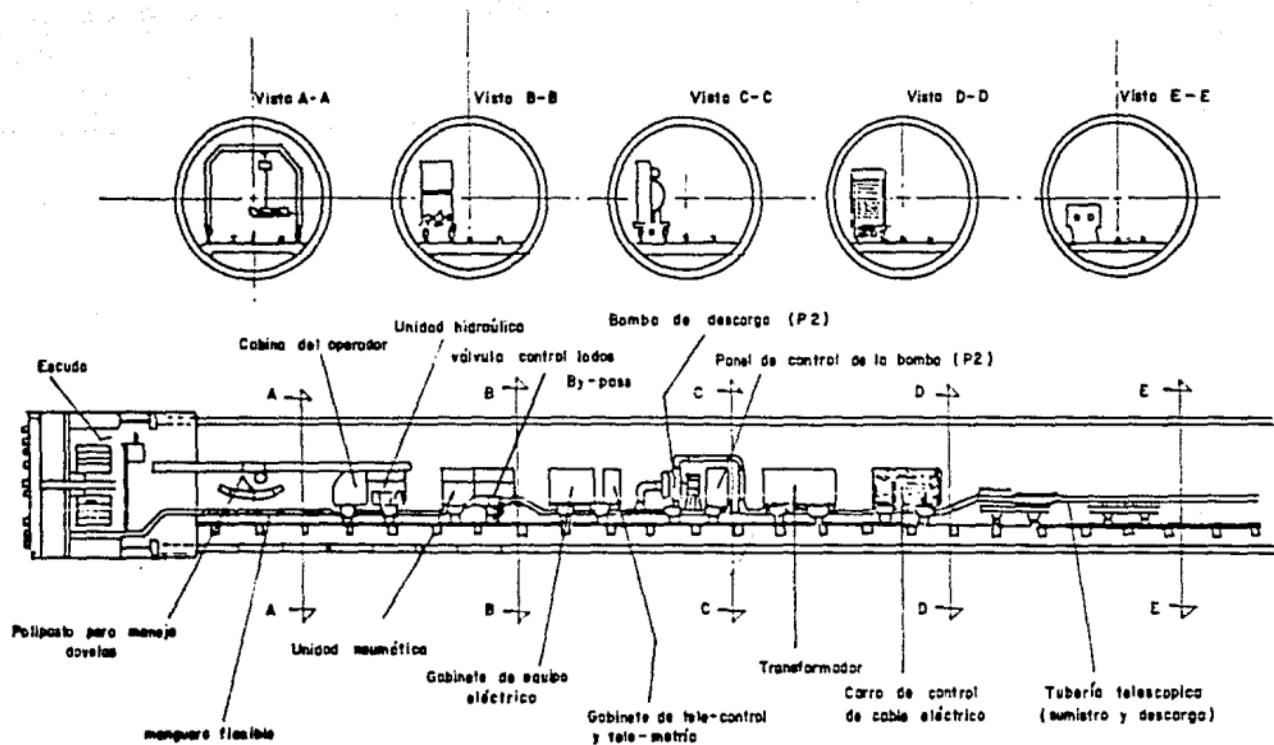


FIG. 4.15 TREN DE EQUIPO DEL ESCUDO CORTADOR DE FRENTE PRESURIZADO

La unidad hidráulica está integrada por tres unidades de energía hidráulica para operar:

- a) Los gatos de empuje.
- b) El gato de la cortadora y el anillo erector.
- c) Los gatos de las compuertas de control de excavación (alabes de ranura).

El gabinete de circuitos eléctricos contiene los circuitos de suministro de energía a las unidades hidráulicas, a la bomba de lubricación, a los motores de la cabeza cortadora, al compresor de aire y a los circuitos de iluminación. Tiene un tablero para operación local de las válvulas de circulación de lodos.

Módulo No. 3.

Está formado por la unidad de derivación de lodos o By-pass, las válvulas de compresión de suministro y extracción, y la unidad neumática.

Mediante la unidad de derivación de lodos o By-pass se controla el suministro y la extracción de lodos de la cámara presurizada.

La unidad neumática consta de un compresor de aire de 7 kg/cm² para operar las válvulas de compresión del sistema de circulación de lodos y la válvula de derivación o By-pass.

Módulo No. 4.

Esta formado por la bomba de extracción de lodos.

Unidad de Tubería Telescópica.

Es la que permite que el escudo pueda avanzar hasta 6 m. sin instalar tuberías rígidas para el suministro y extracción de lodos y está formada por una tubería externa y una interna que se deslizan a través de un sistema de cremallera.

4.2.4 Sistema de Circulación de Lodos.

Adicionalmente al equipo antes mencionado, se tiene instalada en superficie la consola de control central desde la cual se opera el sistema de circulación de lodos. La consola cuenta con los indicadores necesarios para monitorear el funcionamiento de operación del escudo y en dos graficadores va registrando la información obtenida por los sensores del escudo.

El sistema de circulación de lodos es el procedimiento mediante el cual con lodo a presión suministrado desde superficie por medio de bombeo, se equilibra la presión hidrostática del suelo y a través del mismo sistema de bombeo, el suelo excavado es llevado a superficie para su tratamiento y reutilización parcial en la planta de lodos.

Bomba de Extracción de Lodos (P-2).

Es una bomba centrífuga con capacidad de 3.4 m³/min, con una velocidad variable hasta 1350 rpm, que va instalada en el módulo No. 4 del tren de equipo.

Bombas Intermedias o de Traspaleo para la Extracción de Lodos (P3, P4, P5, P6).

Son bombas centrífugas con capacidad de 3.4 m³/min a una velocidad de 1185 rpm, las que van siendo instaladas en el túnel a cada 400 m. a medida que avanza la excavación para tener la potencia requerida para la extracción de lodos.

Medidores de la Densidad de Suministro y Descarga.

Registra la velocidad del lodo que está circulando por las tuberías y sus resultados se utilizan para ajustar las velocidades de las bombas de suministro y extracción de lodos. Van instalados en el muro de la lumbrera.

Válvula de Compresión de Suministro y Descarga y Válvula de Derivación o By-pass.

Controlan el suministro y extracción de lodo mediante dos formas de circulación:

- **Circulación Frontal.** Suministra y extrae lodo de la cámara presurizada y es empleado durante la excavación.

En esta forma las válvulas de compresión de suministro y descarga están abiertas y la derivación permanece cerrada.

- **Circulación de Derivación.** Se circula el lodo por las tuberías del suministro y extracción sin pasar por la cámara presurizada. Es utilizado antes y después de la excavación para igualar densidades en las tuberías. En esta forma las válvulas de compresión de suministro y descarga se mantienen cerradas y la válvula de derivación permanece abierta (van instaladas en el módulo No. 3 del tren de equipo del escudo).
- **Unidad Neumática.** Proporciona la energía para operar las válvulas de compresión de suministro y descarga y la válvula de derivación. Va instalado en el módulo No 3 del tren de equipo del escudo.

La secuencia de trabajo del sistema de circulación de lodos es la siguiente:

1. Se ponen en operación las bombas de suministro y extracción de lodos en la forma de circulación de derivación y se ajustan las velocidades de las bombas P-1 y P-2, de acuerdo a la presión frontal para igualar los flujos y densidades de lodos.
2. Para iniciar la excavación se pasa el sistema al modo de circulación frontal, se ajustan las velocidades de suministro y extracción para igualar flujos.
3. Al terminar la excavación se pasa el sistema al modo de circulación de derivación para igualar densidades en las tuberías.
4. Una vez igualadas las densidades de suministro y extracción, se paran las bombas en el siguiente orden:

bombas intermedias, bombas de extracción P-2 y bomba de suministro P-1.

Tratamiento de Lodos.

Conjuntamente a las actividades del frente de la excavación de lodos, en la superficie se trabaja en la planta de tratamiento de lodos para llevar a cabo eficientemente el sistema de circulación de lodos.

Los estanques para el manejo de lodos son constuídos en superficie y tienen como función principal separar por medio de sedimentación el producto de la excavación del lodo que se utiliza en la perforación del frente. Su localización debe estar cerca de la boca de la lumbrera. Esta planta de tratamiento cuenta con el siguiente equipo:

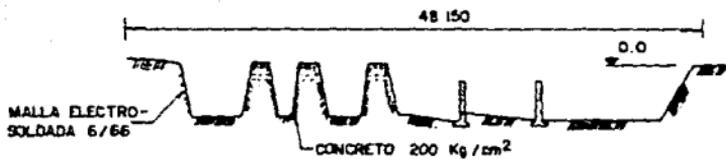
- Bomba sumergible.
- Bomba P-1 para suministro al túnel.
- Bomba centrífuga para suministrar agua tratada al tanque compensador.
- **Bomba Sumergible.** Esta bomba tiene como función principal el desalojar lodo producto de la excavación que se deposita a través de una tubería que viene desde el escudo hasta el tanque de sedimentación y este lodo es desalojado por medio de la bomba sumergible a través de una tubería hasta las pipas donde se depositará en el tiro que asigne la dependencia.
- **Bomba P-1** para suministro al túnel. La bomba P-1 de suministro (velocidad variable) es operada desde la consola de control instalada en superficie para

mantener la presión en el frente de excavación. Esta se regula de acuerdo a la velocidad del flujo de suministro el cual varía de $3.4 \text{ m}^3/\text{min}$ a $4.0 \text{ m}^3/\text{min}$.

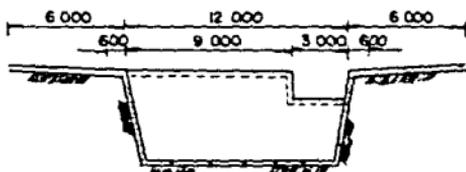
- **Bomba Centrífuga.** Se encuentra instalada en el tanque de almacenamiento de agua tratada para el suministro de agua al tanque compensador, para bajar la densidad de suministro del lodo que será utilizado para la excavación del túnel. La densidad varía de 1.0 a $1.06 \text{ gr}/\text{dm}^3$.

De lo descrito anteriormente se concluye que la planta de tratamiento de lodos debe cumplir con los siguientes requerimientos, con la finalidad de que ésta sea funcional (Figura 4.16):

- a) **Cárcamo de Sedimentación:** El lodo proveniente del frente de excavación inicia su proceso de sedimentación de los grumos de arcilla que han sido acarreados por el lodo de suministro a través de la tubería de descarga, cuya densidad de descarga varía dependiendo de la de suministro. Al encontrarse sedimentados los grumos, son extraídos mediante una draga.
- b) **Carcamo de Ajuste y Suministro:** Una vez tratado el lodo de descarga, es necesario reducir su densidad con la inclusión de agua tratada del estanque respectivo, para que el lodo pueda ser suministrado al frente de excavación, la densidad debe fluctuar entre 1.0 y $1.06 \text{ gr}/\text{dm}^3$.
- c) **Carcamo de Almacenamiento de Agua Tratada:** En esta estructura es donde se almacena el agua para suministrar al estanque de ajuste para bajar la densidad y que el lodo esté en condiciones de uso.

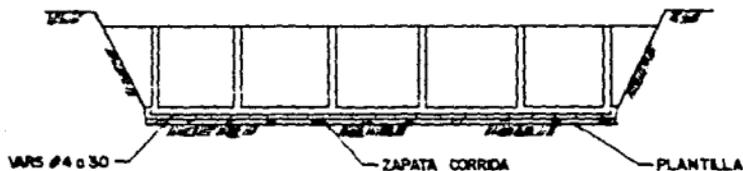
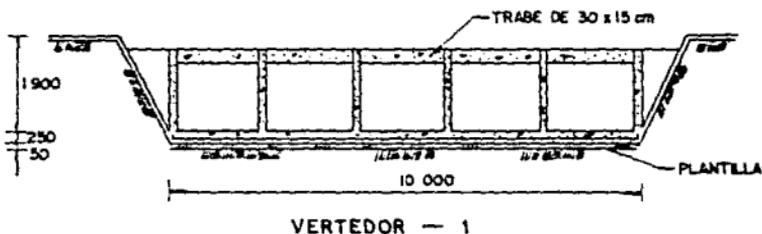


CORTE A - A'



CORTE B - B'

DETALLE DE CONSTRUCCION DE VERTEDORES V-1 Y V-2



ACOTACIONES EN mm.

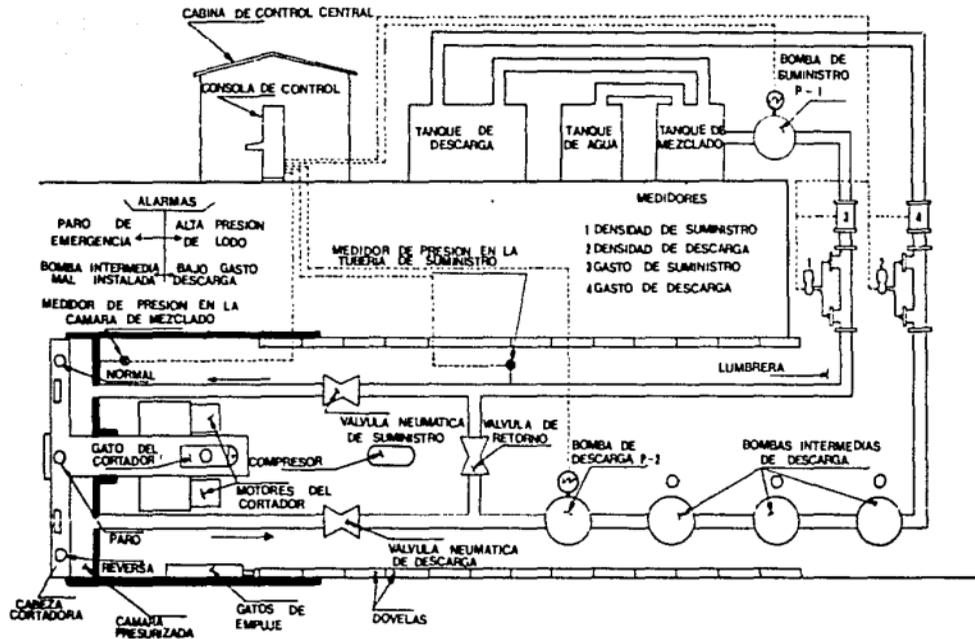
FIG. 4.16 ESTANQUE PARA EL MANEJO DE LODOS

Proceso de Recirculación del Lodo (Figura 4.17):

Del tanque de suministro se envía el lodo una vez que éste tiene las características necesarias. El suministro se realiza con la ayuda de la bomba centrífuga P-1 de 55 KW de velocidad variable y un gasto de 3.4 a 4.0 m³/min, dependiendo de la presión frontal del lodo, para contrarrestar los empujes del suelo la cual está colocada a una tubería de 8" de diam. que conduce el lodo hasta la cámara presurizada que es el sitio donde el material excavado se introduce para ser mezclado por el lodo de suministro mediante las paletas que están fijadas en la paleta cortadora.

Simultáneamente, el lodo que se encuentra en la cámara de mezclado es rezagado mediante la bomba P-2 de 90 Kw de velocidad variable y un gasto de 3.4 a 5.0 m³/min a través de tubería de 6" de diam. A medida que la excavación del túnel se incrementa, se instalan las bombas P-3, P-4, P-5 y P-6 de 75 KW de velocidad constante y gasto de 3.4 m³/min que están conectadas en la misma tubería para ser retirado el lodo al estanque de desecho y de ahí iniciar nuevamente el ciclo de utilización del lodo.

A continuación se presenta un cálculo teórico del volumen necesario de lodo para efectuar el empuje del escudo para la colocación de un anillo de dovelas.



VV=VELOCIDAD VARIABLE

SISTEMA DE CIRCULACION

FIG. 4.17

Datos:

Diámetro de excavación 6.24 m.

Longitud de excavación 1.00 m.

(FSCL) Flujo en el sistema de circulación de lodos 3.4 a 4.0 m³/min

Velocidad de avance del escudo.

Cálculo:

(TE) Tiempo de empuje = 100 cm / 6 cm/min = 16.6 min.

(VR) Volumen requerido = (TE) * (FSCL) = 16.6 * 3.7
= 61.42 m³

Volumen total = (VR)*(0.15) + VR = 61.42 * 0.15 + 61.42
= 70.63 m³

El factor 0.15 es debido a imprevistos durante el proceso de recirculación.

Tomando como base las densidades de descarga obtenidas en el tanque de sedimentación mediante la balanza "baroy", se realizaron varias pruebas para conocer la relación de agua tratada que hay que adicionar con el objeto de bajar la densidad del lodo para ser reutilizado nuevamente durante el proceso de excavación, concluyendo los siguientes:

A un litro de lodo se le adiciona 0.25 litros de agua y se obtiene su densidad; nuevamente se le agrega 0.25 litros

de agua obteniéndose su densidad, y así sucesivamente hasta obtener el incremento teórico que es de 0.60 litros.

Teóricamente podemos concluir que después de haber terminado la excavación de un metro lineal de túnel, del producto de la excavación (lodo) se puede utilizar el siguiente porcentaje:

Volumen de lodo necesario para realizar un empuje = 70.63 m^3

Volumen excavado por un metro lineal de túnel = 30.58 m^3

La sumatoria nos da el volumen total extraído = 101.21 m^3

Volumen a retirar en pipa y volteo = 57.00 m^3

Volumen de reuso = Vol. total extraído - Vol. retirado
 $101.21 - 57.00 = 44.21 \text{ m}^3$

Volumen de lodo a utilizarse = 44.21 m^3

Adicionando agua tratada en un 60% del volumen de lodo a reutilizarse para bajar la densidad + 26.53 m^3 de agua.

Tenemos un vol. total del lodo a reutilizarse con la densidad apropiada de suministro = 70.74 m^3

4.2.5 Trabajos Preliminares.

Para trabajar con un escudo de frente presurizado se requiere de una serie de equipos e instalaciones tanto en superficie como en lumbrera que permitan no solo el

funcionamiento de la máquina misma, sino también un ciclo ágil de excavación.

Trabajos en Superficie.

Las instalaciones generales que conforman el campamento, además de talleres (carpintería, electricidad, mecánica y soldadura), almacenes, vestidores, baños y oficinas, son las siguientes:

- Subestación de energía eléctrica.
- Planta de emergencia.
- Patio de dovelas y sistema de manteo.
- Compresor.
- Cisterna para agua tratada.
- Planta de tratamiento y sistema de circulación de lodos.
- Tuberías en superficie.

Subestación de Energía Eléctrica.

Tanto el escudo de frente presurizado como el equipo complementario requieren de energía eléctrica para su funcionamiento; por lo tanto es necesario instalar una subestación cuya capacidad esté en función de los equipos por alimentar. La tensión de alimentación (acometida) debe ser de 23 KV, con tres diferentes distribuciones; 4160 V (túnel), 440 V (superficie) y 220 V (túnel y superficie).

Las derivaciones para cada equipo se alojan sobre la superficie en trincheras con el objeto de darles protección sin que interfieran con la circulación normal dentro del campamento.

Planta de Emergencia.

Puede considerarse la opción de contar con una planta de emergencia de capacidad suficiente para que en caso de un corte temporal en el suministro de energía eléctrica, puedan cerrarse las ventanillas del cabezal cortador del escudo, así como las válvulas del sistema de circulación de lodos necesarias para mantener la presión en el frente. También es importante para mantener el alumbrado necesario en el interior del túnel y en superficie, así como para que pueda operarse el elevador de personal en el caso de contar con uno.

Patio de Dovelas y Sistema de Manteo.

Como en cualquier excavación de túneles con escudo, se requiere un sitio adecuado para el almacenaje en obra de dovelas prefabricadas que constituyen el revestimiento primario del túnel, de tal forma que puedan estibarse eficientemente y que sean de fácil acceso para la grúa del sistema de manteo.

Las dimensiones del patio de dovelas están regidas por el área disponible para el campamento. Se trata de que sea por lo menos lo suficientemente grande para albergar el

"stock" de dovelas requerido para el avance diario programado del escudo (Figura 4.18).

Las dovelas se deben colocar sobre polines anclados al firme del patio, para que su peso no se concentre en un solo punto, provocando con ello fisuramientos. De la misma forma al estibar una dovela sobre otra, se colocan polines intermedios, siguiendo la línea de los inmediatos anteriores (Figura 4.19).

El manteo generalmente se realiza por medio de una grúa pórtico, que además de suministrar las dovelas al túnel, baja todos los materiales indispensables para la excavación, como lo son: durmientes, rieles, tubos y todo el equipo que se vaya requiriendo en el interior del túnel. Esta grúa pórtico puede substituirse por una motogrua, que además de las funciones mencionadas, se encargue de extraer la rezaga de los cárcamos, siempre y cuando la disposición de las instalaciones en superficie lo permitan (Figura 4.20).

Cualquiera que sea el tipo de grúa que se selecciones para el manteo, debe tener capacidad suficiente para manejar los materiales o equipos de mayor peso que deban suministrarse durante la excavación del túnel. Tal es el caso de las dovelas, con un peso aproximado de dos toneladas cada una, y de la locomotora de tres toneladas.

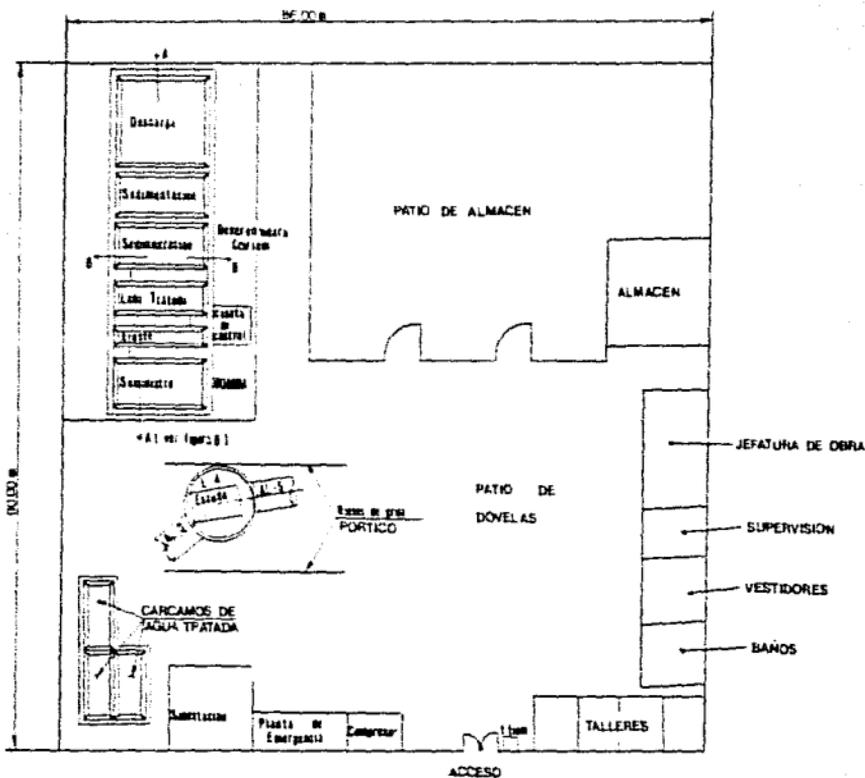
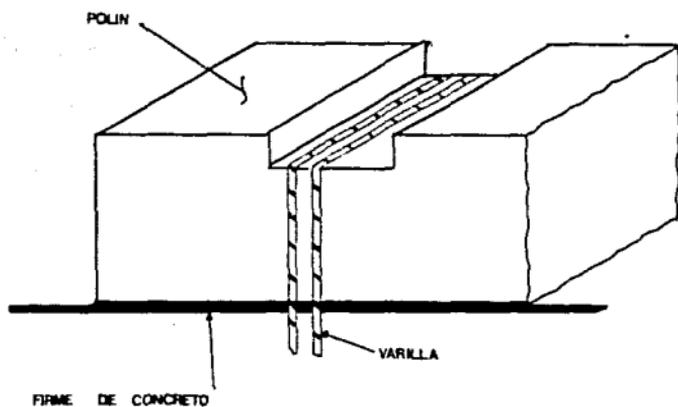


FIG. 4 15



**DETALLE DE ANCLAJE DE POLINES EN
PATIO DE DOVELAS**

FIG. 4.19

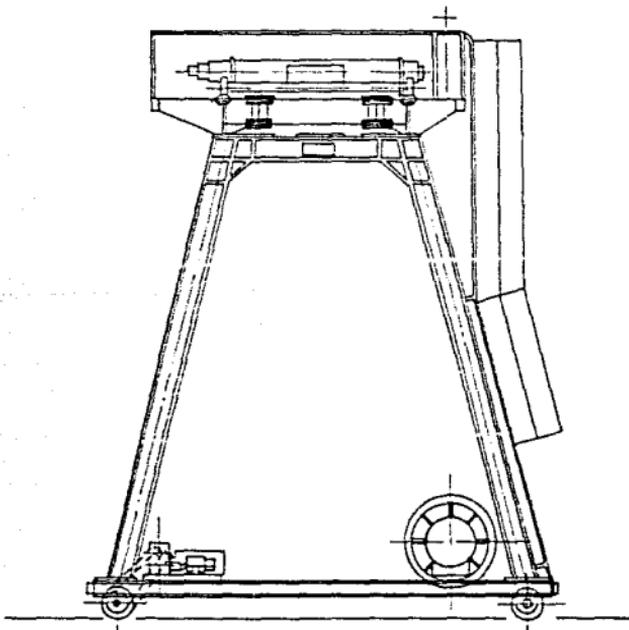
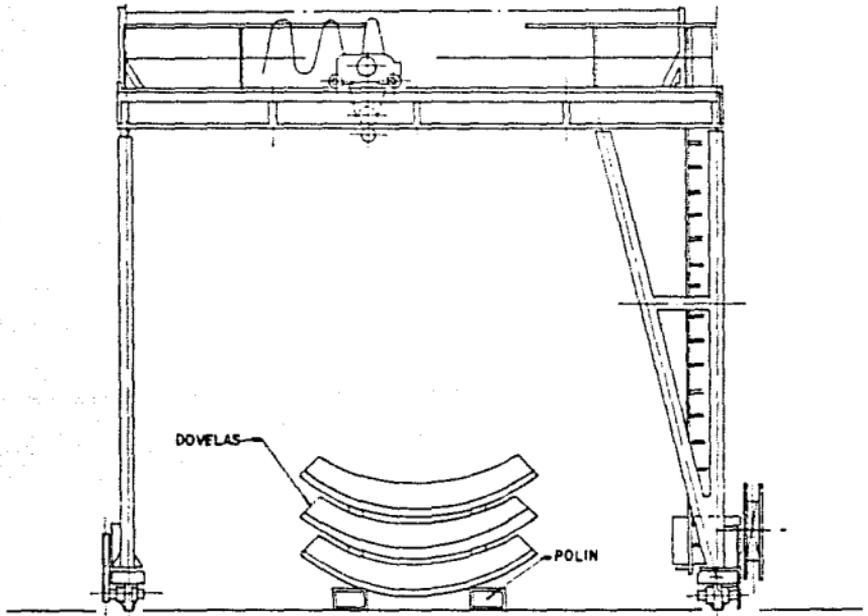


FIG. 4.20 ALMACENAJE DE DOVELAS Y EQUIPO DE MANEJO

Compresor.

Se requiere la instalación de un compresor en superficie con capacidad suficiente para alimentar a las bombas de achique que se localizan en el fondo de la lumbrera y en el túnel.

Tendido de Tubería y Cisterna para Agua Tratada.

Debido a que se requieren grandes volúmenes de agua para la excavación con escudos de frente cerrado (aproximadamente 34 m³ por anillo), se emplea agua tratada en lugar de agua potable. Para tal efecto es necesario tender una tubería de suministro desde la línea de agua tratada más cercana hasta el campamento. Al llegar a la obra, el agua se almacena en una cisterna que tiene la capacidad suficiente para proveer a la planta de lodos por lo menos durante diez empujes de anillos, para cuando el gasto de la línea de alimentación es bajo o nulo.

Planta de Tratamiento de Lodos.

Como se ha expuesto anteriormente, la planta de tratamiento de lodos se compone básicamente de:

- Cárcamo de desecho o descarga.
- Cárcamo de sedimentación.
- Cárcamo de ajuste.
- Cárcamo de suministro.
- Caseta central de control.

Tubería en Superficie.

Como complemento a las instalaciones en superficie, es indispensable el tendido de una serie de tuberías cuya finalidad es el suministro de agua tratada de la cisterna a la planta de lodos y a la lumbrera; el suministro de aire a presión desde el compresor; el transporte del agua de achique del túnel; etc.

Trabajos en Lumbrera.

Se requiere de trabajos especiales en lumbrera, algunos de los cuales se emplearán exclusivamente al inicio de la excavación y otros permanecerán durante todo el transcurso de ésta.

Cuna para Recepción del Escudo.

La cuna es una estructura de concreto reforzado, anclada a la losa de fondo de la lumbrera, cuya finalidad es proporcionar apoyo al escudo y conformar un elemento de continuidad del túnel en lumbrera. Sus dimensiones están dadas en función de los datos del proyecto y del escudo propiamente dicho (Figura 4.22).

La cuna cuenta con tres rieles a todo lo largo de su cara superior. Estos se encuentran ahogados en el concreto y su objetivo es facilitar el deslizamiento del escudo durante los empujes. Se debe tener un cuidado especial en el alineamiento y nivel de estos rieles, debido a que son la

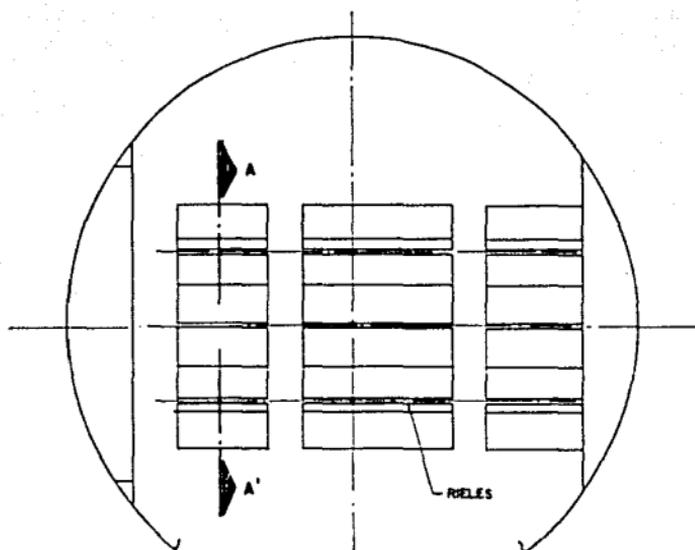
guía del escudo. Así mismo, pueden dejarse preparaciones a base de acero estructural en los hombros de la cuna, sobre los cuales se apoye posteriormente una plataforma de trabajo en el fondo de la lumbrera.

Es indispensable que la cuna se construya en dos o tres secciones, dejando pasillos entre éstas para que el fondo de la lumbrera del quede comunicado formando un cárcamo de captación agua proveniente del túnel, la cual se bombea a la superficie.

Existen algunas variantes en cuanto al diseño básico de una cuna, mismas que se aplican cuando el escudo va a sufrir un cambio de dirección al término de la excavación de un tramo de túnel e inicio de otro.

Muro de Ataque.

En forma similar a la de cualquier escudo, el de frente presurizado requiere de un muro de ataque que es una estructura de concreto reforzada anclada a la pared de la lumbrera. Esta estructura se encuentra orientada transversalmente respecto al eje del túnel y su finalidad principal es servir de apoyo a los semianillos de dovelas (anillos provisionales) sobre los cuales reaccionan los gatos de empuje del escudo al momento de efectuar los primeros empujes (Figura 4.23).



P L A N T A

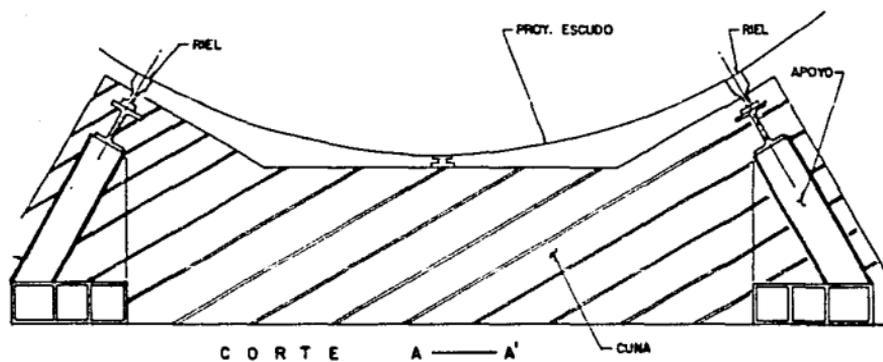
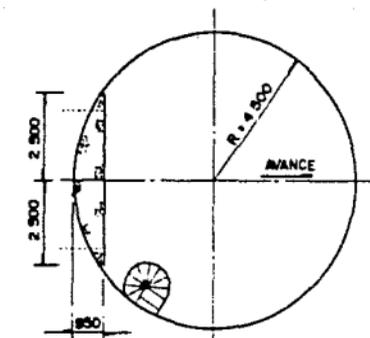
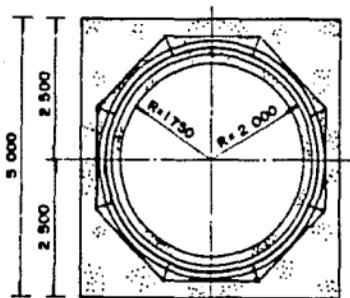


FIG. 4.22

CUNA DEL ESCUDO

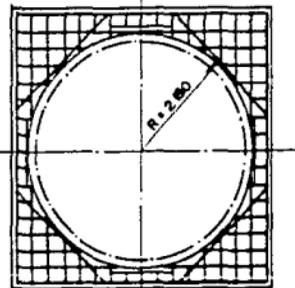
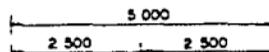
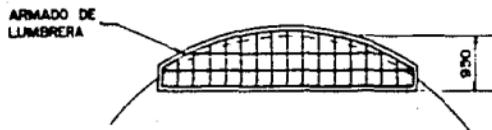


PLANTA
MURO DE ENTRADA

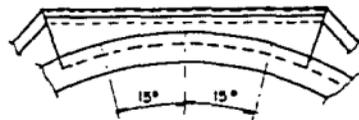


VISTA FRONTAL

ACOTACIONES EN mm.



ARMADO DEL MURO



DETALLE DE ENSABLES

FIG. 4.23 MURO DE APOYO (ATRAQUE)

En caso de que el escudo haya sido girado, probablemente ya no sea posible construir el muro de concreto, ya que la pared de la lumbrera habrá perdido continuidad; entonces puede construirse un atraque tubular o de perfiles estructurales, cuya función será exactamente la misma.

Sello de Salida.

Este dispositivo tiene como objeto proporcionar un elemento de contención que impida la circulación del lodo del frente hacia la lumbrera, por la holgura existente entre la camisa del escudo y la pared de la excavación durante los primeros empujes.

El sello consiste en un conjunto de anillos metálicos y de hule, de diferentes diámetros, que atornillados entre sí forman uno solo que permite por su interior el paso del escudo (Figura 4.24).

Los anillos que forman el sello de salida para el escudo de frente presurizado de 6.24 m. de diámetro, son los siguientes:

- a) Anillo metálico formado por un ángulo rolado de 100 x 100 x 13 mm (4 x 4 x 1/2") y 6.40 m de diámetro interior.
- b) Anillo de hule natural de 25 mm. (1") de espesor y 46.50 cm. de ancho, con un diámetro interior de 5.66 m.

- c) Anillo metálico de placa de acero estructural de 19 mm. (3/4") de espesor y diámetro interior de 6.30 m.

Es importante mencionar, que al construir la estructura del sello de salida se suelda una válvula en la parte superior del anillo metálico, cuya función es liberar el aire atrapado al momento de iniciar la presurización con lodo de las cámaras frontal del escudo.

Plataformas en Lumbrera.

Al iniciar la excavación con un escudo de frente presurizado, se cuenta exclusivamente con el espacio exterior de la lumbrera para alojar el tren de equipo, cuya longitud aproximada instalado en el túnel es de 50 metros. Por tal motivo se hace necesario un arreglo o acomodo especial de los carros que lo integran.

Para lograr este acomodo especial y aprovechar el espacio al máximo, se construyen plataformas ancladas a la pared de la lumbrera, a una elevación mayor que la cuna del escudo. De esta forma, al iniciar los trabajos de excavación la ubicación del tren de equipo no interferirá con las actividades que se realicen en la lumbrera, tales como demolición, rezaga, colocación de semianillos, etc. (Figura 4.24).

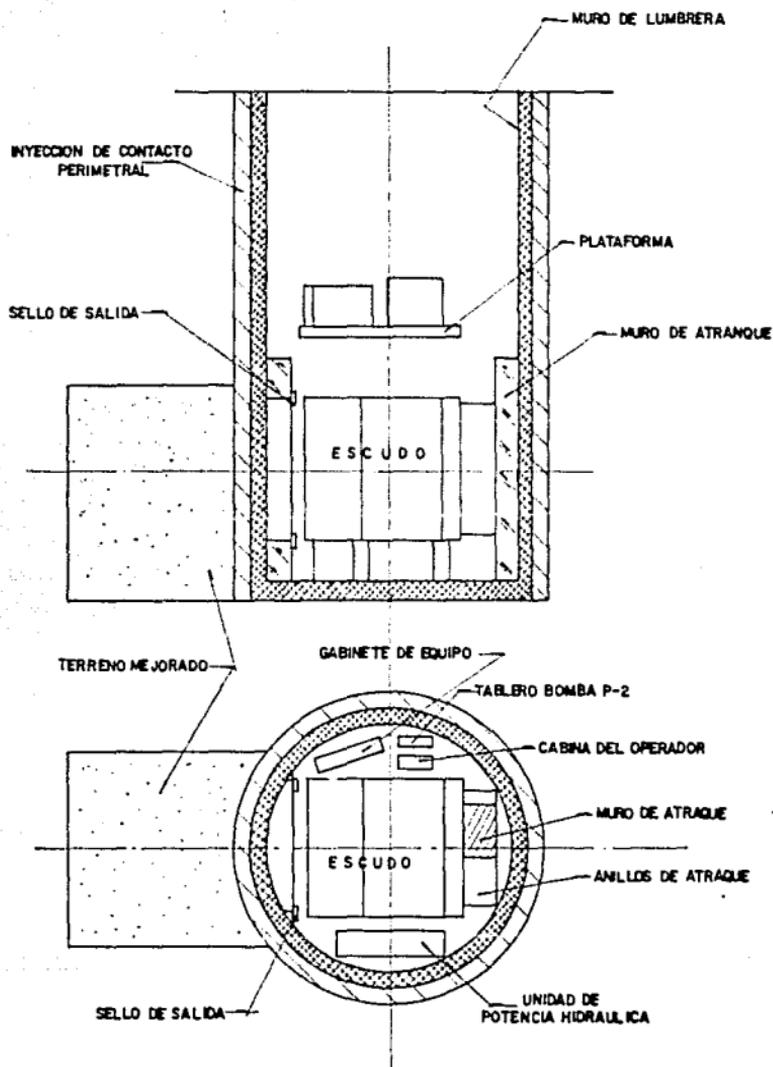


FIG. 4.24 PLATAFORMAS EN LUMBRERA

Conforme la excavación del túnel avanza, el equipo se va instalando en su interior, hasta que las plataformas quedan vacías y pueden ser retiradas de la lumbrera.

Una vez que todo el equipo del escudo ha entrado al túnel y ha sido retirado el sistema de atarque (troqueles y semianillos), resulta conveniente la construcción de otra plataforma en el fondo de la lumbrera (plataforma de trabajo), con la cual se obtendrá un mayor espacio para maniobras.

Planta de Inyección.

Los anillos de dovelas tienen un diámetro exterior menor al de excavación, ya que estos se ensamblan bajo la protección del faldón del escudo. Por esta razón, cuando los anillos salen de la camisa, va quedando un hueco anular entre las dovelas y el terreno.

Esto puede provocar asentamientos superficiales. Para reducir este problema se requiere que dicho espacio sea llenado con una lechada de bentonita-arena-cemento, que se inyecta a presión a través de las perforaciones con que cuentan las dovelas para este fin.

Todo anillo se inyecta conforme va saliendo de la protección del escudo, por lo tanto la inyección es simultánea a la excavación. Para esto debe contarse con una

planta que garantice la rápida y eficiente elaboración de la mezcla para no entorpecer el ritmo de avance del escudo.

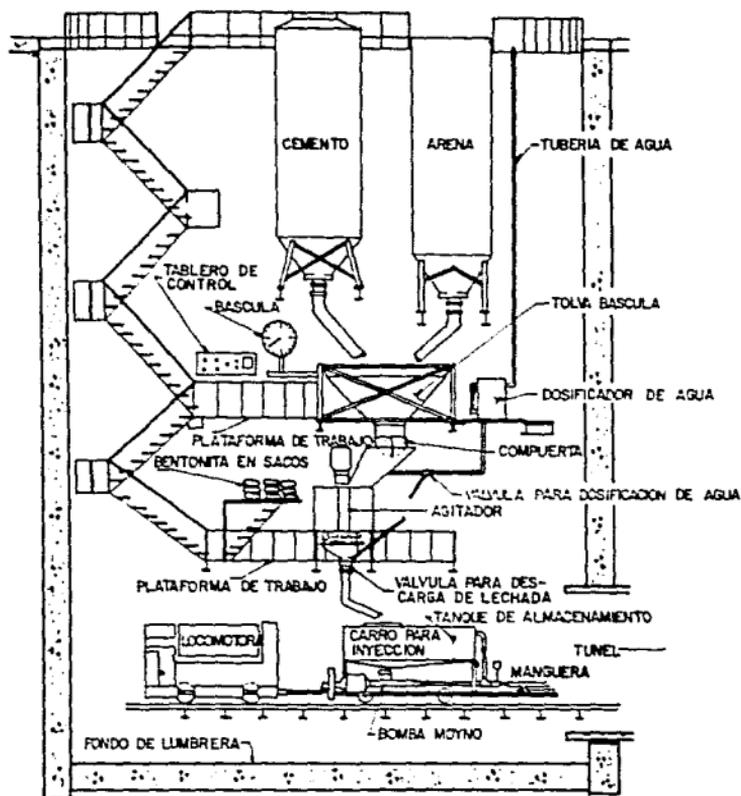
La Planta dosificadora generalmente se localiza en el interior de la lumbrera, anclada a la pared de ésta siendo sus componentes los que se mencionan a continuación: silo para cemento, silo para arena sílica, tolva bascula, tolva mezcladora (agitador), dosificador para agua, plataforma de trabajo y almacenaje de bentonita. En este tipo de planta la dosificación se efectúa en forma semi-automática, de acuerdo a las especificaciones de la obra (Figura 4.25).

No es indispensable que la planta de inyección se instale en el interior de la lumbrera; también puede instalarse en superficie junto al brocal y estar formada por elementos más simples. En esta forma la dosificación es manual.

Tuberías y Cableado en Pared de Lumbrera.

Algunas de las tuberías que se colocan en la superficie se prolongan hasta el túnel por el muro de la lumbrera (achique, suministro de aire y agua, etc.).

De igual forma, el cableado de los diversos equipos eléctricos que se emplean durante la excavación debe llevarse por el muro de la lumbrera para ser introducido posteriormente al túnel (Figura 4.26).



**FIG. 4.25 PLANTA DOSIFICADORA PARA INYECCION
INSTALADA EN PARED DE LUMBRERA.**

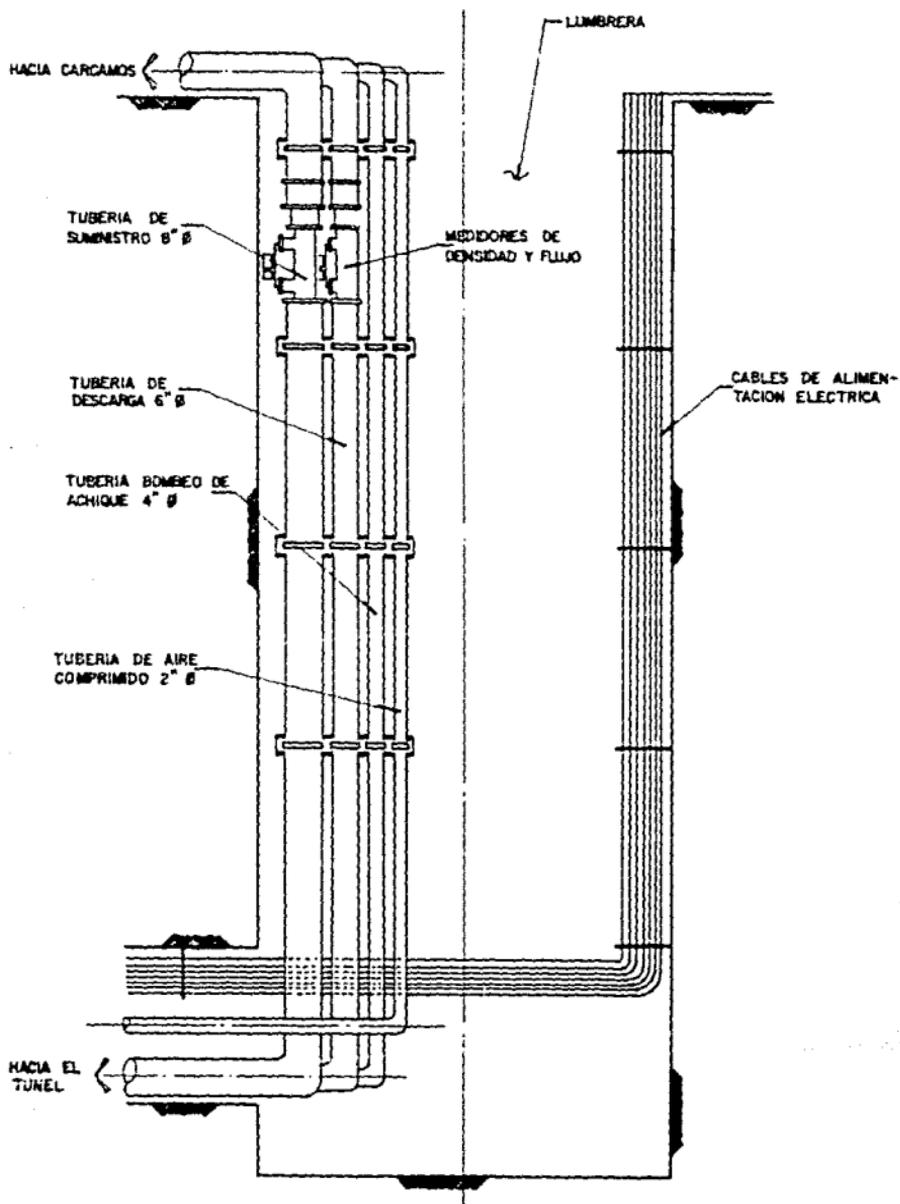


FIG. 4.26 INSTALACIONES EN PARED DE LUMBRERA

Escalera de Caracol y Elevador de Personal.

Para el acceso del personal se requiere la instalación de una escalera de caracol, debidamente protegida, adosada al muro de la lumbrera. Opcionalmente se puede utilizar un elevador de personal.

Trabajos Previos al Inicio de la Excavación.

Los trabajos previos al inicio de la excavación son aquellas actividades que se realizan cuando están terminadas las instalaciones en superficie y lumbrera, y el escudo se encuentra en condiciones de operar. Estos trabajos son:

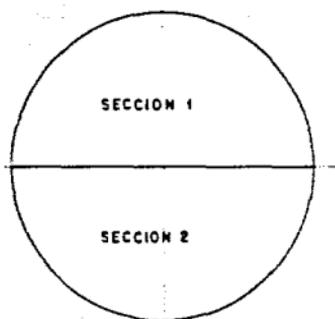
- Instalación de los dientes sobrecortadores.
- Demolición de la pared y de la inyección perimetral de lumbrera (Figura 4.27).
- Colocación de semianillos de atraque.

Instalación de los Dientes Sobrecortadores.

La función de los sobrecortadores que se instalan en el cabezal, es reducir la fricción entre el suelo tratado y la camisa del escudo.

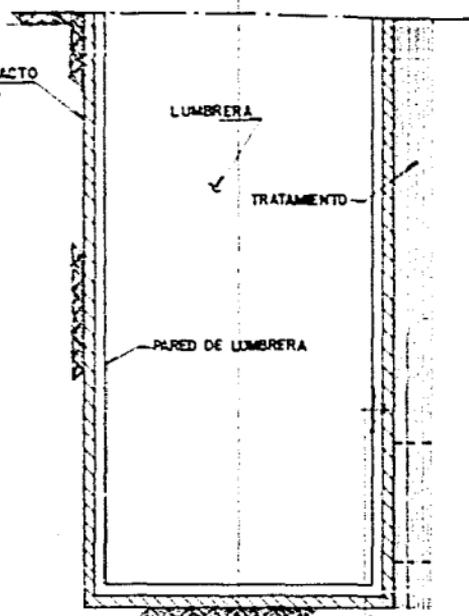
Demolición de la Pared y de la Inyección Perimetral de Lumbrera.

La pared de la lumbrera se demuele con martillos neumáticos, por etapas, hasta tener contacto con el suelo mejorado.



SECCION DEL TUNEL

INYECCION DE CONTACTO PERIMETRAL



LUMBRERA

TRATAMIENTO

PARED DE LUMBRERA

- 1.- DEMOLER LA SECCION 1
- 2.- TROQUELAR Y APUNTALAR CON DURMIENTES Y POLINES EL FRENTE DEL TERRENO.
- 3.- DEMOLER LA SECCION 2.
- 4.- TROQUELAR Y APUNTALAR CON DURMIENTES Y POLINES EL FRENTE DEL TERRENO.
- 5.- RETIRAR EL MATERIAL DEL APUNTALAMIENTO
- 6.- AVANZAR (+)
 - A) AVANZAR HASTA COLOCAR UN ANILLO.
 - B) AVANZAR EL ESCUDO.
 - C) EXTENDER EL GATO DE LA CABEZA CORTADORA TOLTALMENTE.
 - D) INSTALAR LOS SOBRECORTADORES.
 - E) HINCAR EL ESCUDO EN LA PARED.
 - F) EFECTUAR PRUEBA DE CIRCULACION EN EL FRENTE.

FIG. 4.27 DEMOLICION POR ETAPAS DE LA PARED DE LUMBRERA

- a) Primero se costurera (ranura) el concreto, formando una cuadrícula (sin alcanzar la zona de la inyección perimetral). El hueco demolido debe de ser geoméricamente mayor que el diámetro del escudo.
- b) A continuación se procede a cortar el acero de refuerzo y a retirar los bloques de concreto, de arriba hacia abajo.
- c) Se prosigue con la demolición de la inyección perimetral, también de arriba hacia abajo, quedando al descubierto el suelo mejorado.
- d) Se limpia la zona de escombros y material suelto.

Al realizar estas actividades, deben tomarse las precauciones necesarios para que en caso de presentarse cualquier indicio de falla del frente, pueda controlarse adecuadamente (contar con madera para ademar, tubería para canalizar flujos de agua, etc). Así mismo, cabe recalcar que estos trabajos se deben realizar con la mayor rapidez.

Colocación de Semianillos de Atraque.

En forma simultánea a la operación de demolición, en la parte trasera del escudo se colocan las dovelas de atraque (primer semianillo), para formar el apoyo del escudo. Este semianillo se rigidiza mediante el colado de un muro de ajuste adosado al muro de atraque.

Al terminar ambas operaciones se inicia el avance del escudo, cuando los gatos de empuje reaccionan sobre el semianillo, comenzando ésta a deslizarse sobre la cuna.

Cuando el cabezal del escudo hace contacto con el terreno mejorado, el avance se detiene para proceder a realizar las actividades de presurización de la cámara de lodos.

Mejoramiento del Suelo.

Antes de iniciar la excavación de un túnel con escudo de frente presurizado, o antes de terminar ésta, se realiza un tratamiento en el suelo circundante a la salida o llegada del escudo a la lumbrera, cuya finalidad es incrementar su resistencia y cohesión, evitando así que el material fluya hacia el interior de la excavación en el tiempo que transcurre entre la demolición de la pared de la lumbrera y el momento en que empieza el escudo a ejercer presión sobre el suelo.

El mejoramiento se efectúa cubriendo un volumen con las siguientes dimensiones (Figura 4.28).

Largo = 1.5 (D).

Ancho = 2.0 (D)

Profundidad = H + 0.5 (D)

en donde:

D = diámetro del escudo excavador.

H = Distancia de la superficie a la plantilla de la excavación.

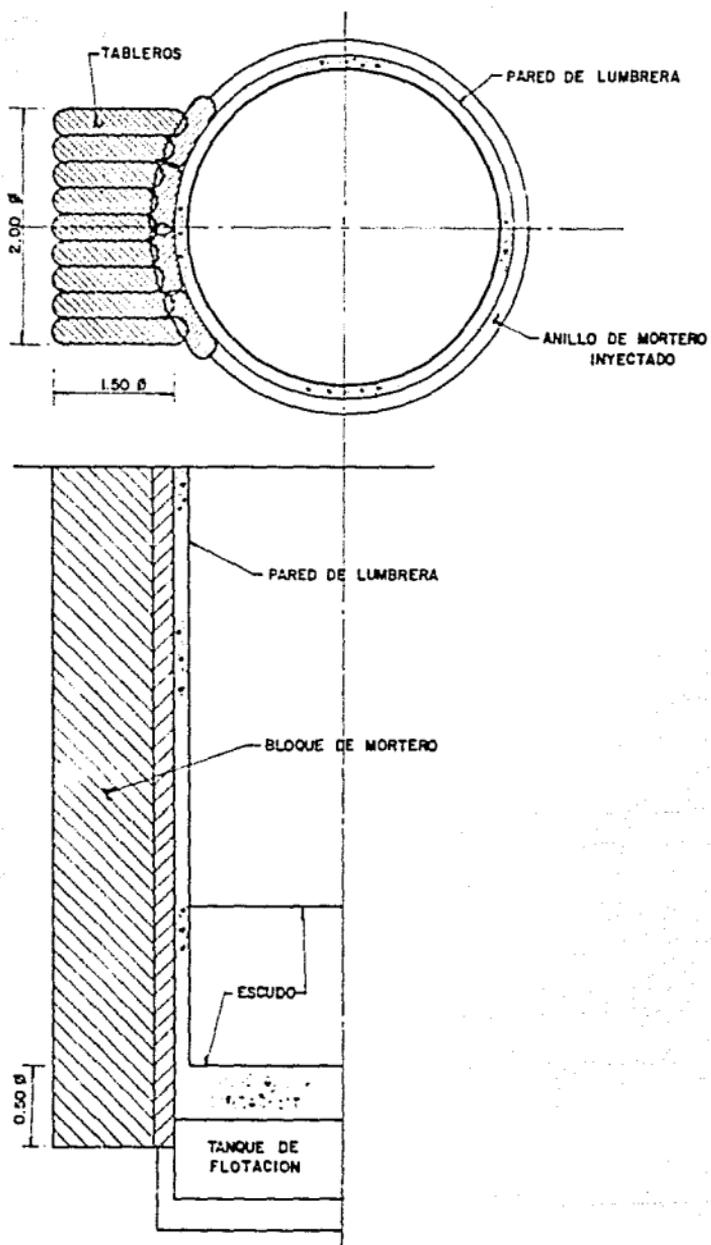


FIG. 4.28

MEJORAMIENTO DEL SUELO

El proceso para mejoramiento del suelo que se ha aplicado a la excavación con escudos de frente presurizado de 6.24 m. de diámetro, es el de sustitución de suelo, que consiste en lo siguiente:

1. Se excavan tableros con almeja guiada, ademando con lodo bentonítico, hasta la profundidad de proyecto. Las dimensiones de los tableros dependerán de las características geométricas del equipo de excavación.
2. Los tableros se cuelan con una mezcla de suelo-cemento de mayor resistencia que la del terreno natural, con tubería tipo tremie, desplazando el lodo de ademe por diferencia de densidades.

Al realizar este mejoramiento, deben tomarse las siguientes precauciones:

- Los tableros deben excavarse y colarse en forma alternada.
- No debe iniciarse la excavación de un tablero, si existe otro contiguo que no haya alcanzado su fraguado inicial.
- Al excavar, debe seguirse un estricto control de las características del lodo de ademe, de tal forma que sea el adecuado para garantizar la estabilidad de la excavación.
- Durante el colado, debe verificarse cuidadosamente el ensamble de la tubería, colocación del balón de latex (diablo) y la posición del extremo de la tubería respecto al nivel superior del colado.
- La dosificación de la mezcla debe ser tal que proporcione la resistencia requerida ya colocado (in situ).

4.2.6 Excavación del Túnel.

Avance y Conducción del Escudo.

Como se ha mencionado, por medio de los 24 gatos de empuje, el escudo avanza y es conducido durante la excavación de acuerdo a los requerimientos del proyecto. Para realizar con éxito la excavación de un túnel, no se debe perder de vista de que cada empuje debe reponder a una planeación general de la conducción del escudo, por lo que cualquier corrección a las desviaciones que se presenten respecto a la línea de proyecto, debe ser estudiada detenidamente.

Empuje.

Al iniciar cada ciclo de excavación, para efectuar cada empuje, se deben considerar los factores que a continuación se indican:

- **Topografía.** Es necesario conocer la elevación y posición con respecto al alineamiento del proyecto del último anillo colocado (dentro del faldón), así como de los anillos anteriores, para verificar si los resultados de los empujes previos corresponden a lo planeado. En función de ésta verificación se determina la necesidad de reprogramar las modificaciones o correcciones que se consideren necesarias.
- **Posición y orientación del escudo.** El escudo cuenta con los dispositivos (clinómetros) para indicar en forma constante la posición con respecto a su eje longitudinal (pitching) y respecto a su eje vertical

(rolling). El pitching nos determina las acciones inmediatas por ejecutar, para corregir desviaciones, en caso de que existan.

- **Espacio anular entre anillos de dovelas y faldón del escudo.** Es el espacio existente entre el diámetro exterior del anillo de dovelas y el diámetro interior del faldón del escudo (galibos). Por especificaciones, la separación mínima es de 5 mm.

En todos los empujes se debe cuidar que la separación entre dovelas y faldón no rebase la separación mínima, para evitar que al pegarse el revestimiento primario y el cuerpo del escudo, se generen en las dovelas esfuerzos que puedan dañarlas, lo que además puede afectar los sellos de neopreno en esa zona, provocando con esto que se presenten fugas de mortero al interior del escudo. La posición ideal es mantener concéntricos los anillos con respecto al faldón del escudo.

Cuando se requiere despegar el escudo del endovelado, se dejan de usar de 2 a 4 gatos de empuje en la zona donde las dovelas y el faldón se encuentran pegados, para provocar un desbalanceado de las fuerzas aplicadas en el empuje, lo que hará que el empuje avance menos en esa zona, lográndose de esta manera despegar las dovelas del faldón.

Volumen Excavado y Volumen Desplazado.

Durante los empujes, en la consola del control central, se cuenta con una computadora que va calculando en forma

continúa la relación entre el volumen excavado (VE) y el volumen desplazado (VD), que debe mantenerse en la unidad, para evitar sobre-excavación o inducir esfuerzos de compresión en el terreno.

- **Volumen excavado (VE):** Es la unidad de material que pasa por las compuertas de control de excavación. Es determinado por la computadora a partir de los datos registrados por los medidores de flujo de suministro y extracción de lodos.
- **Volumen desplazado (VD):** Es el volumen ocupado por el escudo durante su avance. Es determinado por la computadora a partir de los datos registrados por los sensores de carrera de los gatos de empuje.

Cuando la relación VE/VD es mayor que la unidad, indica que se está excavando más volumen que el desplazado, lo que indica que se debe ajustar la velocidad del avance del escudo o abrir más las compuertas de control de excavación.

Formas de Avance.

Los controles independientes para desplazamiento de la cabeza cortadora y de los gatos de empuje, permiten al escudo tener dos formas de avance.

- **Avance alternado:** Es la repetición del ciclo, hasta que los gatos de empuje estén totalmente extendidos.
- a) El cuerpo del escudo avanza cortando el terreno; la cabeza cortadora mantiene una presión contra el frente, sin girar, con las compuertas de control de excavación cerradas. Se va retrayendo el gato de la cabeza cortadora conservando la presión del frente.

- b) Una vez que el cuerpo del escudo tiene un avance de 40 cm. se detiene para iniciar la excavación, la que se efectúa con la cabeza cortadora avanzado 40 cm., girando con las compuertas de control de excavación abiertas, mientras el cuerpo del escudo permanece fijo con respecto al suelo.

La repetición de este ciclo se efectúa hasta concluir el empuje. Esta forma de avanzar se recomienda para familiarizarse con la operación del escudo.

- **Avance simultáneo:** En esta forma el cuerpo del escudo y la cabeza cortadora avanzan simultáneamente. Esto se hace extendiendo los gatos de empuje con la cabeza cortadora girando y manteniendo fijo su desplazamiento.

Procedimiento de Construcción.

Excavación de 50 m. Iniciales.

Al inicio de la excavación de un tramo de túnel el equipo del escudo se instala en la lumbrera. La introducción de este equipo, se realiza durante el avance de los primeros 50 m. de túnel que es la longitud que ocupa el tren de equipo, el cual posteriormente es remolcado por el propio escudo.

La excavación de los 50 metros iniciales se puede dividir en dos etapas:

1. **Excavación de los primeros 5 metros de túnel:** Una vez que el escudo esta próximo a la zona de mejoramiento del suelo, debe cruzar 4 metros de un material con una resistencia aproximada de 20 kg/cm^2 , lo que hace

necesario la colocación de los dientes de sobre-excavación, para liberar el cuerpo del escudo de fricciones adicionales.

El proceso para la instalación de estos dientes es el siguiente:

- Expandir el gato de la cabeza cortadora los 40 cm. de carrera.
- Girar la cabeza cortadora, con pequeños impulsos, para que las preparaciones para los dientes queden cerca de una de las puertas de inspección de la cámara presurizada.
- Colocar los dientes de sobre-excavación.

Nunca se debe retrar la cabeza excavadora con los dientes de sobre-excavación colocados.

Presurización de la Cámara de Mercado y Avance del Escudo.

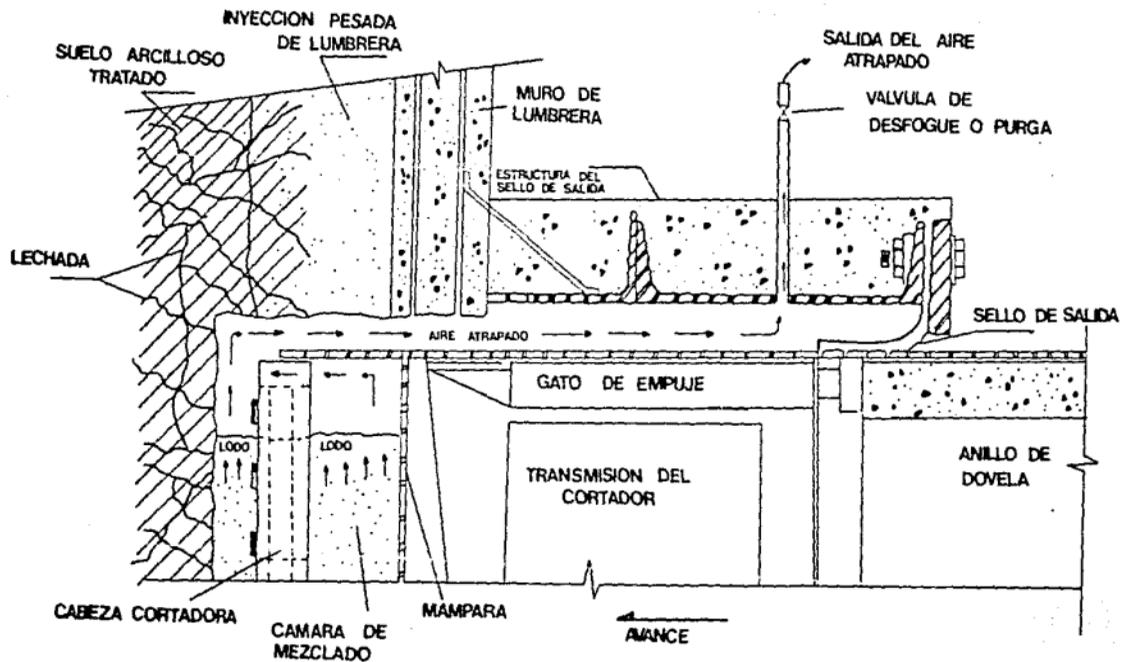
Una vez que se instalaron los dientes de sobre excavación, se procede al llenado de la cámara presurizada (con agua tratada proveniente de la planta de tratamiento) y el espacio que existe entre el cuerpo del escudo y el sello de salida de la lumbrera, hasta alcanzar una presión de 1.0 kg/cm^2 . El aire atrapado es expulsado por la válvula colocada en la parte superior del sello de salida. Posteriormente se operan la cabeza cortadora y los gatos de empuje (apoyándose en los anillos de ataque) para iniciar el movimiento del escudo. Una vez que el escudo tiene un metro

de avance, se procede la colocación de los anillos de dovelas y así sucesivamente (Figura 4.29).

Al cruzar la zona de mejoramiento del suelo, es frecuente que se presenten taponamientos en la tubería de extracción de lodo. El procedimiento para destapar la línea es desconectar las mangueras flexibles para intercambiar los ductos de suministro y extracción de lodo. El flujo de lodo en dirección opuesta deberá liberar la línea del obstáculo existente. Si el taponamiento continúa, se deberá buscar el obstáculo desacoplando la tubería en otro puntos, tales como cambios de dirección, etc.

El avance del escudo, durante su penetración en el terreno, se debe efectuar en forma horizontal para eliminar las posibilidad de que el cuerpo de escudo pueda golpearse con el marco metálico del sello de salida.

Una vez que la cabeza cortadora cruza la zona tratada, se deben retirar los dientes de sobre-excavación. Asimismo, se debe ajustar la presión frontal de acuerdo a la indicado al estudio de mecánica de suelos, o se puede determinar aumentanto en 0.2 kg/cm^2 , la presión señalada en el manometro instalado en la mampara metálica. Este segundo procedimiento, se efectúa manteniendo el lodo de la cámara presurizada en reposo, con las válvulas de suministro y extracción cerradas.



PRESURIZACION DE LA CAMARA DE MEZCLADO
 AL INICIO DE LA EXCAVACION
 SISTEMA DE DRENAJE PROFUNDO
 CD. DE MEXICO, D.F.

Cuando el escudo se introduce totalmente en el sello de salida de la lumbrera, se deben cerrar las placas perimentales del marco metálico, para evitar que el sello de hule se regrese.

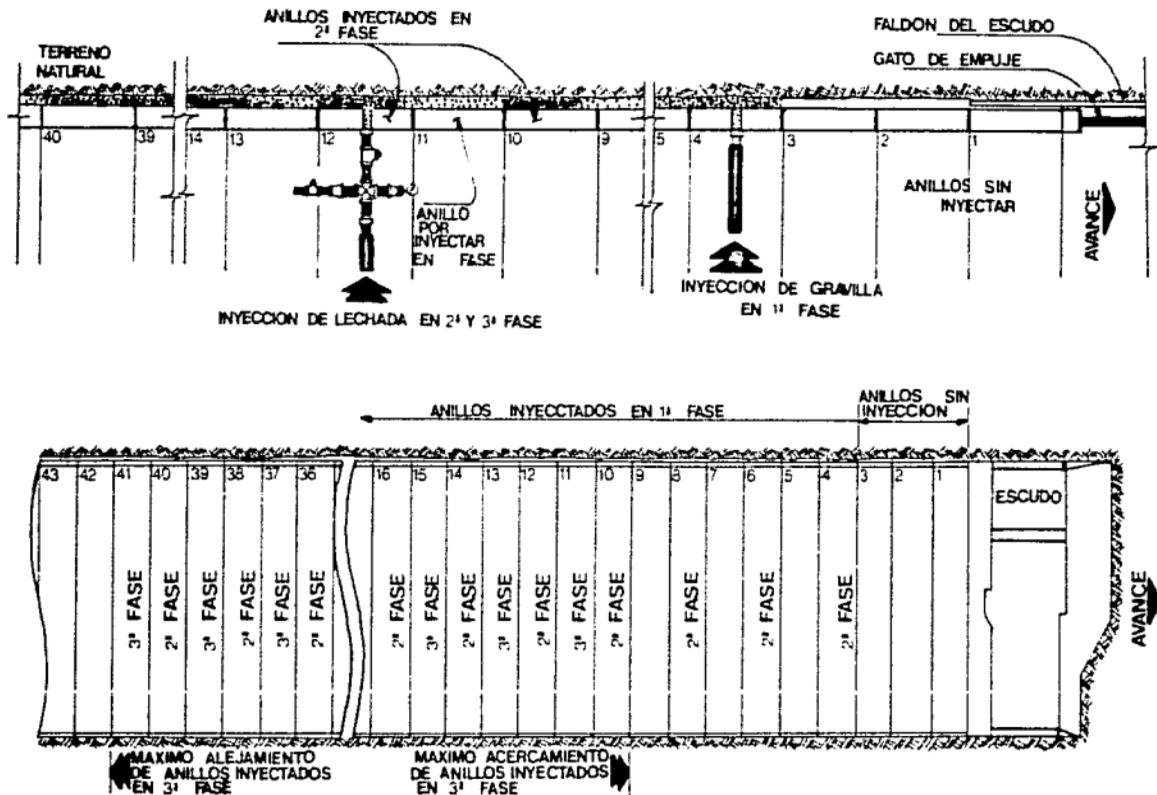
La primera inyección entre dovelas y terreno que normalmente se efectúa durante el empuje para el cuarto anillo del túnel, no se limita en volumen debido a que es necesario inyectar el espacio entre dovelas y sello de salida de lumbrera, siendo la presión lo que gobierna (1 kg/cm² (Figura 4.30).

Excavación de los siguientes 45 metros.

La instalación en el túnel del tren de equipo se efectúa de acuerdo al avance de la excavación. La longitud del tren de equipo es de 40 metros, con la carrera de la tubería telescópica retraída.

Como se ha mencionado, el tren de equipo consta de cuatro módulos y una unidad de tubería telescópica que van instalándose en el túnel a medida que se tiene el espacio para cada módulo. A continuación se indica la secuencia de instalación del equipo en túnel (Figura 4.31).

- El módulo No. 1, se instala al tener 8 m. de avance.
- El módulo No. 2, se instala al tener 15 m. de avance.
- El módulo No. 3, se instala al tener 21 m. de avance.



INYECCION DE CONTACTO POR FASES

FIG. 4.30

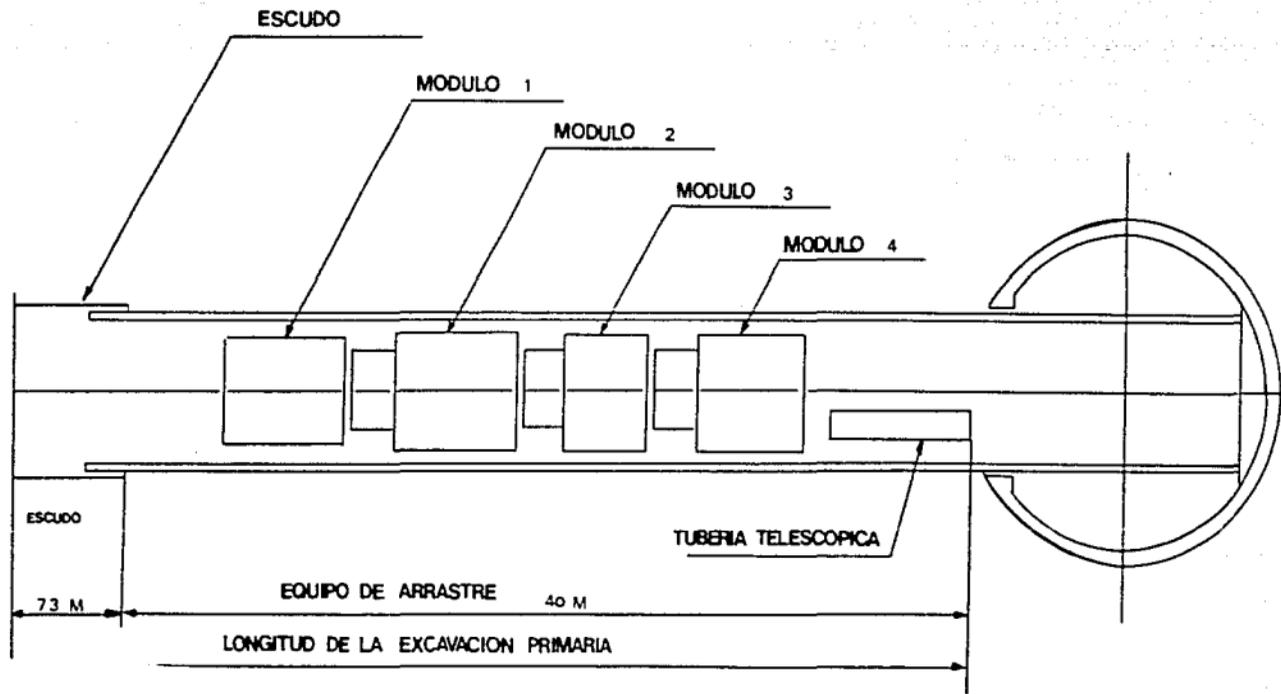


FIG. 4.31

- La unidad de tubería telescópica, se instala al tener 42 m. de túnel, lo que permite avanzar hasta 51 m. antes de iniciar la colocación de las tuberías de suministro y extracción.

La excavación de los metros subsecuentes se vuelve cíclica, es decir, empujar, inyectar, colocar dovelas y colocar las instalaciones de acuerdo al avance.

Retiro de Anillos de Atraque.

Cuando el túnel tiene una longitud de 60 metros aproximadamente, se pueden retirar los semianillos de atraque, ya que esta longitud permite absorber la fuerza de los gatos de empuje del escudo sin desplazar los anillos instalados. Los anillos de atraque deben almacenarse para usarse nuevamente en otro tramo de excavación.

Para facilitar el suministro de dovelas y materiales al túnel, en la zona de clave de los semianillos de atraque se coloca una estructura tubular, para sustituir los dovelas faltantes.

Procedimiento para Terminación de Excavación.

Al finalizar la excavación de un tramo, el escudo debe cruzar por una zona de mejoramiento de suelo, similar al de la salida de lumbrera.

A continuación se indica el procedimiento requerido para terminar la excavación de un tramo, así como la colocación del escudo en la lumbrera de llegada:

1. Cuando la cabeza cortadora se encuentra a 1.0 m. del muro de la lumbrera, se despresuriza la cámara de mezclado debido a que ya no es necesario utilizar el sistema de circulación de lodos. Asimismo se suspende la inyección de contacto.
2. Se realiza la demolición de una parte del muro de la lumbrera y se descubre parcialmente la cabeza cortadora para ubicar físicamente la posición del escudo y definir el área total que se demolerá.
3. Al finalizar la demolición del muro, se avanza el escudo sin girar la cabeza cortadora, para empujar el material del frente al interior de la lumbrera, de donde es extraído posteriormente. El escudo se avanza hasta que la cabeza cortadora llegue al paño de la lumbrera.
4. El escudo es recibido en la lumbrera en una cuna, que puede ser de concreto o metálica. Una vez verificado el nivel de la cuna, el escudo avanza hasta quedar sobre dicha cuna.
5. Cuando el escudo termina su desplazamiento, se procede a retirar a los anillos que no forman parte del túnel, pero que se requieren para apoyo y colocación del escudo en el centro de la lumbrera. Estos anillos son reutilizados.
6. El espacio perimental entre dovelas y muro de lumbrera, se calefatea para efectuar la inyección entre dovelas y terreno que había sido suspendida, terminando con esta actividad la excavación.

Casos de Emergencia.

Para evitar eventuales inestabilidades en el frente, el cuerpo del escudo cuenta con 12 preparaciones localizadas junto a las mamparas. Cada preparación cuenta con una válvula.

Por medio de estas preparaciones, se pueden hincar hacia el frente tuberías y a través de ellas efectuar un tratamiento de inyección para mejorar el suelo y poder continuar con la excavación del túnel. El tipo de mezcla y volumen por inyectar deberá estudiarse previamente. La inyección debe efectuarse con las compuertas de control de excavación cerradas totalmente.

4.2.7 Revestimiento Primario.

El escudo de frente presurizado va dejando un revestimiento primario formado por anillos de dovelas de concreto reforzado de una resistencia $f'c = 350 \text{ kg/cm}^2$, de 6.06 m. de diámetro exterior y 25 cm de espesor (Figura 4.32).

El anillo de dovelas consta de seis piezas: tres tipo A o normales, dos tipo B o tangenciales y una tipo K o cuña para cerrar el anillo.

La fijación de los anillos se realiza por medio de 33 tornillos de 1 1/8" de acero grado 5 con tuerca y rondana. Cada dovela tiene en el centro una perforación llamada

inserto que se utiliza para su manejo durante la colocación y posteriormente, por el mismo inserto se ejecuta la inyección de contacto entre dovela y terreno.

Las dovelas tienen una preparación perimentral que se utiliza para colocar un sello de neopreno. La función del sello es impedir la entrada de filtraciones al túnel (Figura 4.33).

Tipos de Anillos de Dovelas.

Se cuentan con dos tipos de anillos de dovelas: normales y correctivos.

Los anillos normales tienen un metro de ancho en todo su perímetro y se usan en los tramos en tangente.

Los anillos correctivos tienen un ancho que varia de 1.00 m a 0.95 m. Su función es facilitar el cambio de dirección del escudo, que se manifiesta al colocar el siguiente anillo.

Los anillos correctivos se utilizan en tramos de tangente para corregir las desviaciones del escudo y para despegar el endovelado del faldón.

El principal uso de los anillos correctivos es en curvas. La ejecución de los empujes en curvas se efectúa de acuerdo a la modulación, (que se calcula previamente) de los anillos normales y correctivos por colocar.

REVESTIMIENTO PRIMARIO

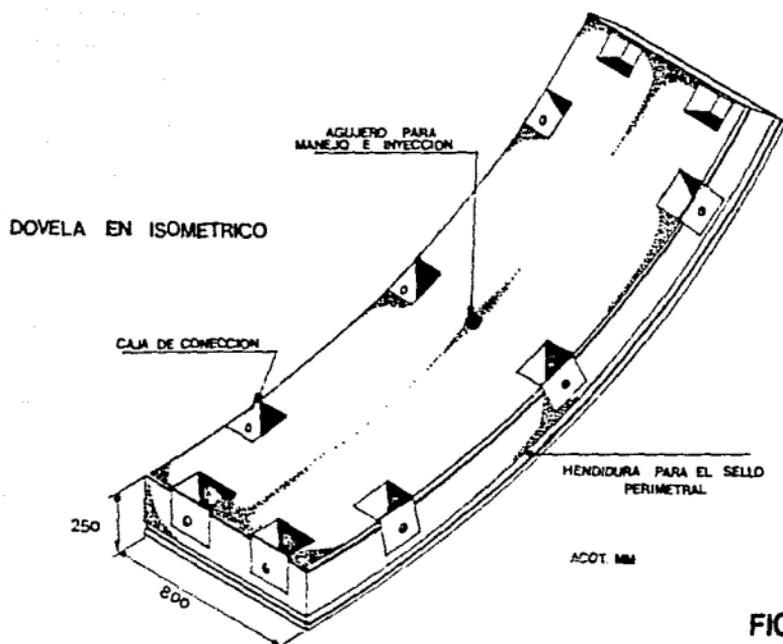
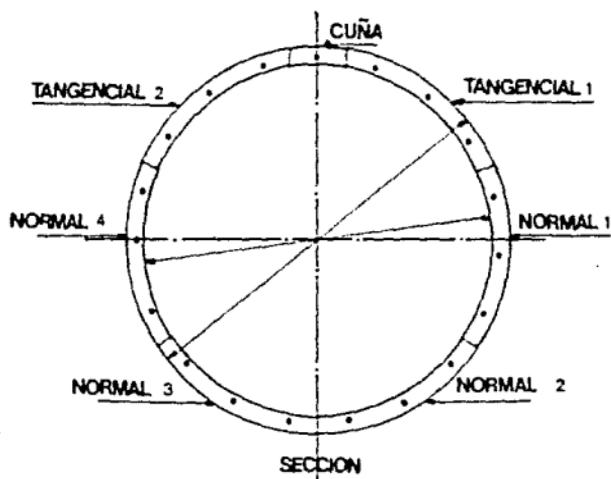
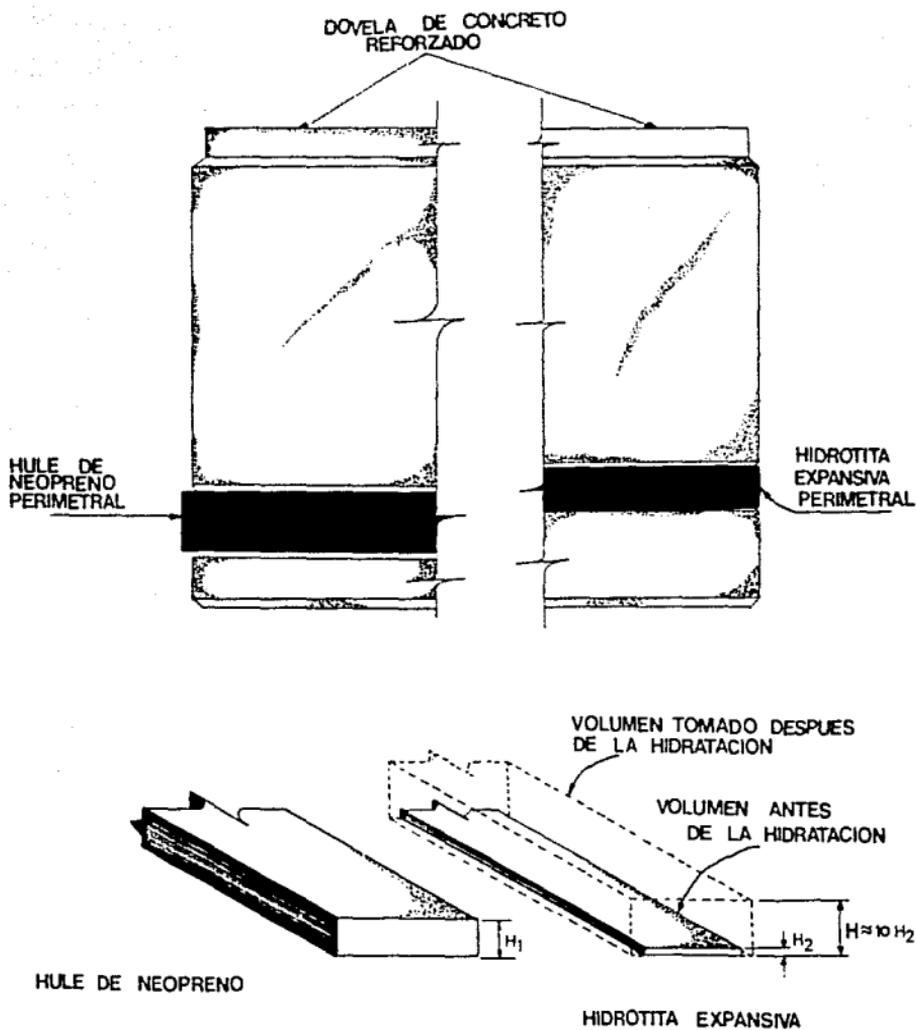


FIG. 4.32



SELLOS PERIMETRALES EN DOVELAS

Durante los empujes para anillos correctivos se dejarán de utilizar 2 o 4 gatos laterales en el sentido de la curva.

Para verificar que el escudo responde de acuerdo a la programación del empuje, se debe cuidar que en la carrera de los gatos, se vaya reflejando la diferencia de anchos del anillo correctivo, de tal manera que al finalizar el empuje se deben de tener 5 cm de diferencia entre uno y otro lado del escudo. No debe olvidarse que se debe respetar la separación mínima entre dovelas y faldón.

Determinación de Tipos de Anillos en Curva.

EN virtud de que cada curva tiene diferentes radios y longitudes, se debe calcular la modulación de anillos para cada caso. A continuación se presenta un ejemplo del cálculo para la modulación de anillos:

Datos:

P.C. = 1+588 (principio de curva en m)

P.T. = 1+638.2143 (punto de tangencia en m)

L.C. = 99.116 (longitud de curva en m)

A. = $18^{\circ} 38' 40.35''$ (cambio de dirección en grados)

R. = 303.5894 (radio en m)

Longitud exterior de la curva (LCE):

$L_{Ce} = R_e * T \dots 1$ (Re es radio de curva exterior)

$R_e = R + D/2$ (Des diam. exterior del anillo)

$R_e = 304.5894 + 3.05 = 307.6394$ m

Despejando:

$$T = LC/R = 99.116/304.5894 = 0.3254.$$

Sustituyendo en 1.

$$LCe = 307.6394 * 0.3254 = 100.106 \text{ m.}$$

Longitud interior de la curva (LCi):

$$LCi = Ri * T = (304.5894 - 3.05) 0.3254 = 98.121 \text{ m}$$

Determinación de anillos correctivos y normales:

Diferencia de curvas:

$$100.106 - 98.121 = 1.985 \text{ m.}$$

Número de anillos correctivos:

$$1.985/0.05 = 39.7 = 40 \text{ anillos correctivos.}$$

Número de anillos normales:

$$39.70 * 0.95 = 37.715$$

$$98.121 - 37.715 = 60.406 = 60 \text{ anillos normales}$$

Total: 100 anillos.

Esto concuerda con la longitud de curva exterior, ya que el desarrollo de todos los anillos en la curva exterior es de 1.00 m.

Arreglo Propuesto:

20 repeticiones de 2 anillos correctivos y 3 anillos normales.

Manejo de Dovelas.

Las dovelas suministradas a la obra se almacenan en un patio especialmente dispuesto para ello. El personal de superficie se encarga de estrobarlas para posteriormente ser izadas por medio de la grúa del sistema de manteo, que las

moverá hacia la lumbrera y las bajara hasta el fondo de esta, depositándolas sobre un vagón dispuesto para ello. El vagón es llevada hasta el frente por medio de una locomotora.

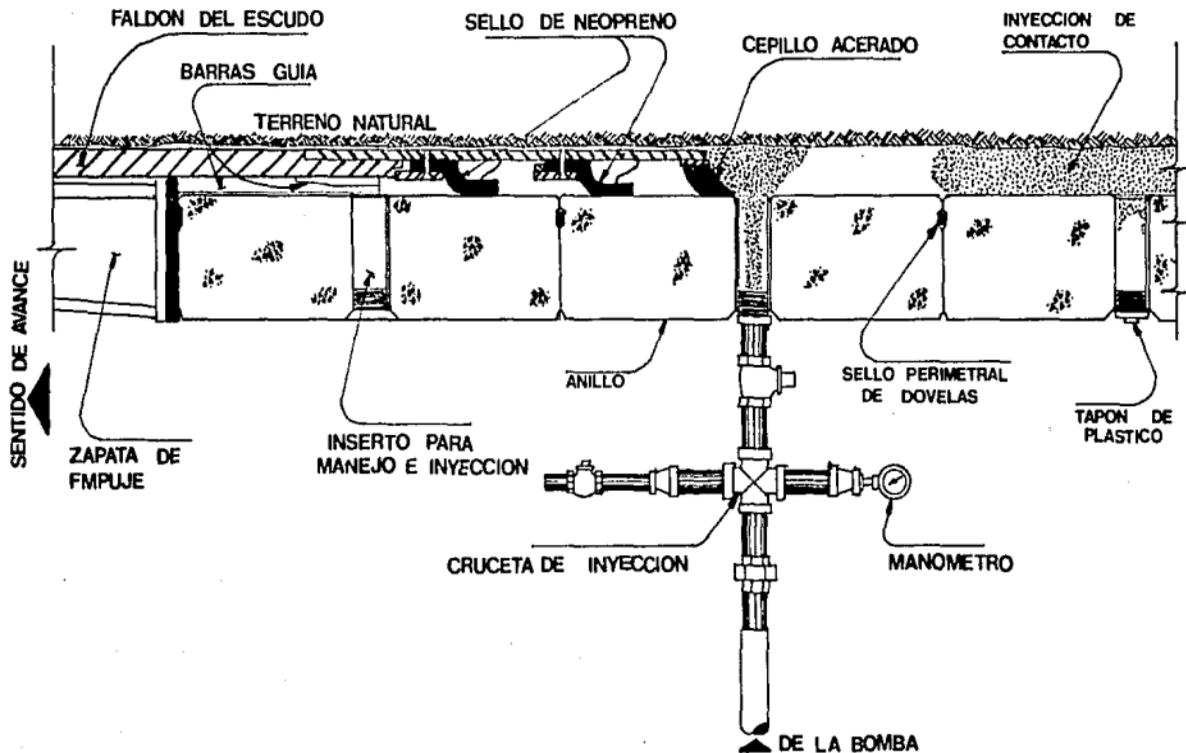
Una vez en el frente, las dovelas son izadas por medio del polipasto del escudo y depositadas en la cubierta, en el espacio formado por el último anillo colocado y la zapata de los gatos ya retraídos. Es aquí donde el anillo erector del escudo las toma para colocarlas radialmente en forma coordinada, logrando con esto la colocación de un anillo completo.

Cabe aclarar que es indispensable un cuidadoso manejo de las dovelas, evitando en lo posible movimientos bruscos o roses innecesarios, ya que sus aristas pueden dañarse con facilidad o puede desprenderse el sello de neopreno.

Inyección de Contacto entre Dovela y Terreno.

Al avanzar el escudo y salir las dovelas del faldón, existe un espacio anular que corresponde al espesor del faldón y la holgura de las dovelas respecto al mismo. Este espacio debe ser inyectado de manera inmediata para evitar asentamientos en superficie (Figura 4.34).

La inyección se realiza a través de los insertos de las dovelas, una vez que los anillos van saliendo del faldón del escudo.



INYECCION DE CONTACTO ENTRE ENDOVELADO Y TERRENO

La dosificación de la mezcla de inyección utilizada por bacha de 0.5 m^3 es:

Cemento	200 kg.
Arena sílica	0.243 m^3 .
Betonilla	50.0 kg.
Agua	380.0 lts.

La inyección está limitada a 1.5 kg/cm^2 de presión o 2.0 m^3 de mezcla por anillo (lo que ocurra primero).

Actividades.

Las actividades críticas para el ciclo de excavación son los empujes y la colocación de anillos. El resto de las actividades (complementarias) para la construcción del túnel, se pueden efectuar paralelamente a las actividades críticas.

Las actividades complementarias son: colocación de durmientes y vía, que se puede realizar durante el empuje; la instalación de tuberías para lodos, se puede realizar durante la colocación de anillos. En forma similar estarían la colocación de andadores, tuberías para agua y aire, iluminación de túnel, etc.

4.2.8 Control Topográfico.

Al terminar la colocación del anillo de dovelas, se procede a obtener la línea y el nivel que guarda el escudo en ese punto, con respecto a los datos de proyecto; los

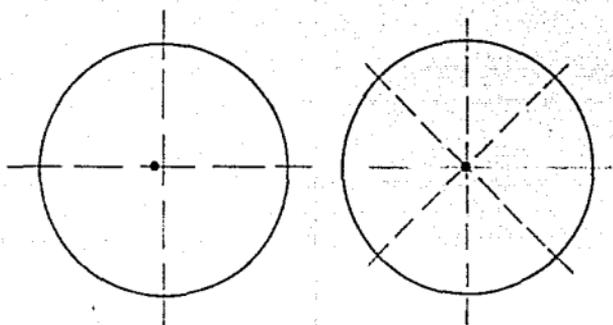
resultados obtenidos sirven de base para seleccionar los gatos a usar en el próximo avance. Para efectuar los empujes programados del escudo se va tomando como guía la longitud de los vástagos de cada gato, comparándolos con los definidos teóricamente.

Se da especial importancia al claro que existe entre la cara exterior de las dovelas y el diámetro interior del faldón del escudo (holgura), para evitar que se dañen los sellos de este al producirse una excentricidad entre los anillos y el mismo faldón.

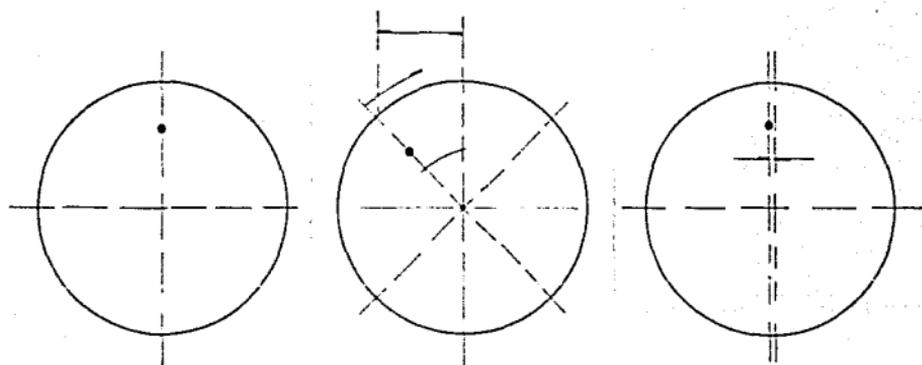
El control topográfico se puede manejar en forma convencional, con tránsito y nivel, o bien con el apoyo de un rayo laser instalado sobre los anillos del túnel y proyectado hacia unas tarjetas previamente calculadas con el trazo a seguir; que se colocan en el interior del escudo. Periódicamente deben efectuarse orientaciones giroscópicas, con el propósito de verificar la veracidad del trazo.

Cabe hacer mención que además de los anillos normales para lograr las curvas del proyecto, así como para corrección de desvío en el alineamiento horizontal o vertical, se cuenta con anillos de geometría especial, denominados "correctivos" que ya han sido descritos.

Otra situación a la que no hay que restarle importancia, es el giro del escudo sobre su eje durante el proceso de excavación.



a) CONTROL TOPOGRAFICO AL CENTRO DEL ESCUDO,
NO AFECTA EL GIRO.



b) CONTROL TOPOGRAFICO FUERA DEL CENTRO DEL ESCUDO,
HAY QUE REALIZAR COMPENSACION POR GIRO.

FIG. 4.36 GIRO DEL ESCUDO

Esto nos lo indica la máquina misma en un indicador de la cabina del operador. En ocasiones se logra apreciar este giro del escudo a simple vista.

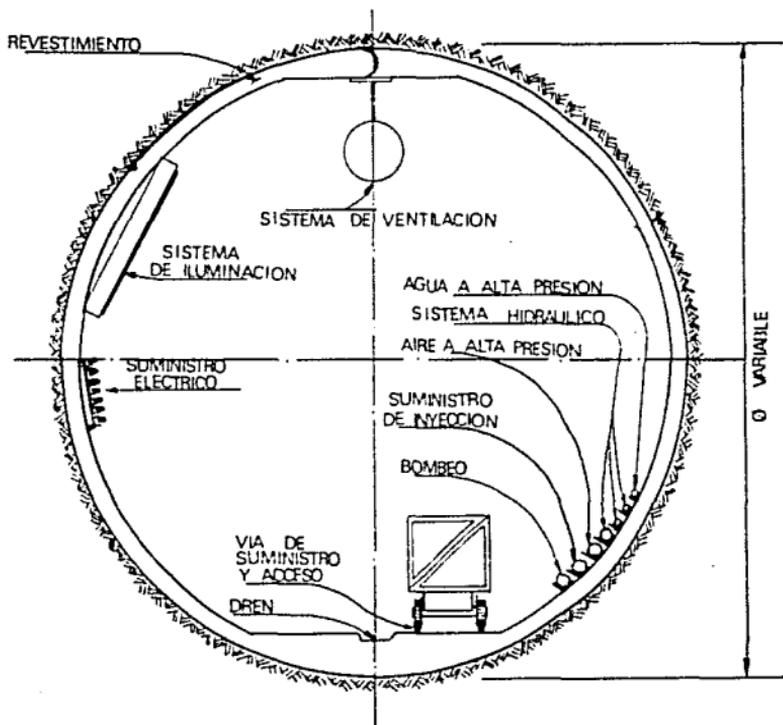
Este fenómeno se puede comparar con el vaso de una licuadora. En ocasiones, al estar funcionando una licuadora, se puede apreciar que el vaso de ésta, gira en sentido contrario de las aspas. El giro del escudo sobre su propio eje se basa en el mismo principio. Por esto, una forma de corregir este giro es cambiando el sentido del giro del cabezal cortador con el cual se viene realizando la excavación. Dependiendo de la magnitud del giro que tenga el escudo y del procedimiento con el que se esté llevando el control topográfico, se tendrá que realizar una compensación.

En ocasiones, no se logra corregir el giro cambiando el sentido del cabezal cortador y lo que se hace es lastrar el escudo por medio de contrapeso, para evitar que se siga girando y hacer que este tienda a corregirse.

4.2.9 Instalaciones en Túnel.

La colocación de instalaciones en túnel, responde a la necesidad de suministrar al frente de trabajo los materiales y equipo requeridos, así como proveer un medio de circulación para personal y equipo.

Las instalaciones para la excavación de un túnel con escudo presurizado son las siguientes: (Figura 4.37)



INSTALACIONES NECESARIAS EN EL TUNEL

1. Para circulación de Equipos y Personal.

Son durmientes de 8" * 6" colocados a cada metro, vía para la circulación del equipo de transporte y tablonces de 2" * 10" como andadores.

2. Para Suministro y Extracción de Lodos.

Son tuberías de acero de 8" * 6" de diámetro, que van instaladas sobre los durmientes, del lado izquierdo del túnel en el sentido de avance. En estas tuberías se instalan válvulas de compuerta a cada 100 m., seleccionándolas para facilitar la localización de taponamientos.

3. Iluminación y Energización del Escudo.

La instalación para iluminación del túnel es una línea trifásica de 220 V que va instalada en bastidores con siete aisladores colados a cada 5 metros y lámparas de 2 * 74 W coladas a cada 10 metros. La instalación para suministro de energía al escudo es una línea trifásica de 4160 V que puede ir instalada en bastidores especiales.

4. Ventilación.

El ducto de ventilación es de lona ahulada de 36" de diámetro, el cual es alimentado por ventiladores del mismo diámetro, con capacidad suficiente para proporcionar una condición adecuada de trabajo en el frente. Va instalada en la clave del túnel.

5. Tuberías para Agua y Aire.

El suministro de agua y aire que se requiere para la limpieza, bombeo neumático, etc., se suministra instalando en la zona lateral derecha del túnel, dos tuberías de 2" de diámetro, con conexiones rápidas a

cada 100 metros. El sistema de sujeción es hecho en obra con placa de 1/4" de espesor, el cual se fija a los tornillos de las dovelas.

Equipo Complementario y sus Funciones.

Dentro del proceso constructivo de un túnel excavado con un escudo de frente cerrado y presurizado con lodos, es necesario contar con un equipo complementario que requiere el sistema de excavación, el cual mencionaremos a continuación dividiéndolo en dos grupos y mencionando sus funciones:

1. Equipo en Superficie:

- A) Grúa pórtico para 8 toneladas o grúa autopropulsada con capacidad equivalente.

Se requiere para bajar todos los materiales y equipo que se necesitan en la excavación del túnel como son: Dovelas, durmientes, rieles, tuberías, bombas, transformadores, etc.

Normalmente, se ha utilizado la grúa pórtico en la excavación de túneles con escudo, tomando en cuenta la visibilidad que se tiene hasta el fondo de la lumbrera, pero queda a juicio del contratista utilizar esta o una grúa autopropulsada de una capacidad equivalente.

- B) Planta dosificadora o agitadores de 2.0 m³ de capacidad.

Equipo con el que se elabora el mortero utilizado en la inyección de contacto dovela-terreno natural y que sirve para llenar el espacio anular que queda entre la dovela y el terreno.

C) Draga LS-68 (1).

Se utiliza en la planta de lodos para rezagar el material sólido producto de la sedimentación de los cárcamos, que reciben el material de excavación, se debe usar con una almeja sin dientes y sin barrenos para evitar que se vacíe el lodo al momento de rezagar.

D) Bombas de lodos de 6" y 20 HP. (2).

Se requieren para cargar los camiones pipa con el lodo producto de la excavación del túnel para transportarlo al tiro.

E) Bombas de 4" y 20 HP. (2).

Estas se utilizan para el manejo del agua tratada en la planta de lodos, para mantener uniforme la densidad que requiere el escudo en la fosa de suministro y para limpieza general de la planta.

F) Agitador vertical. (3).

Se requiere de este equipo para ajustar la densidad del lodo, después de que esta ha pasado por el proceso de sedimentación y se puede utilizar nuevamente en la excavación.

G) Bomba de lodos de 6" (2).

Equipo utilizado para el traspaleo de lodos del carcamo de descarga al de suministro.

H) Planta generadora de energía eléctrica de 125 KVA (1).

Equipo que se requiere en casos de emergencia, cuando el suministro de energía eléctrica por parte de la Compañía de Luz se suspende. La capacidad de la planta debe ser la necesaria para mantener únicamente la iluminación del túnel, ya que el escudo cuenta con un sistema de seguridad propio que cierra las válvulas del by-pass, manteniendo el frente presurizado en el momento del corte de la energía eléctrica.

I) Compresor de 600 a 700 PCM (1).

Suministra el aire comprimido para el equipo neumático que se encuentra tanto en el interior del túnel como en superficie.

J) Equipo para talleres.

Se debe contar con el equipo necesario para cada uno de los siguientes talleres: carpintería, mecánico y eléctrico.

K) Camiones pipa.

Se utilizan para transportar el lodo de desecho de la obra al tiradero oficial.

L) Camiones de volteo.

Equipo que se encara de llevar el material sólido producto de la sedimentación en los cárcamos al tiradero oficial.

2. Equipo en Túnel.

A) Locomotoras (2).

Son las encargadas de transportar los trucks en los cuales se llevan tanto los materiales como el equipo necesario que será utilizado en el frente de excavación. Pueden ser eléctricas o diesel y con una capacidad de tracción mínima de 25 toneladas.

B) Trucks (3).

Equipo que se necesita para llevar al frente los materiales requeridos en la excavación del túnel, es necesario que este equipo esté habilitado de tal forma que la plataforma tenga una curvatura igual al de las dovelas para facilitar la cara y el manejo de las mismas.

C) Truck tolva (1).

Es un truck que se debe equipar con una tolva de 2.0 m^3 de capacidad y una bomba para inyectar mortero a una presión de 1.5 kg/cm^2 , se usa para transportar el mortero que se elabora en la planta dosificadora o en los agitadores y llevarlo al frente de excavación para que al momento de

efectúa esta, se lleve a cabo simultáneamente la inyección de contacto en el anillo saliente del faldón del escudo.

D) Polipasto de 3 toneladas con control eléctrico.

Aún cuando el escudo cuenta ya con este equipo, es conveniente tener uno como reserva, ya que es de los equipos que más se deterioran y que pueden parar todo el proceso de excavación.

E) Ventiladores axiales de 15 HP.

Se requieren para la ventilación del túnel, con objeto de suministrar aire fresco para sanear el medio ambiente y a la vez expulsar hacia el exterior los gases, producto de la combustión interna de la maquinaria que labora dentro del túnel. Actualmente en los tramos que se encuentran en proceso de excavación los ventiladores están colocados a cada 400 metros.

F) Bombas de 2" (2).

Este equipo se usa para taspalear el agua que se acumula en el faldón del escudo y que dificulta la colocación de las dovelas en la cubeta del túnel.

G) Bomba de 4" y 20 PH (1).

Equipo que se instala en la lumbrera y que sirve para bombear al exterior el agua y lodo que escurre a través del túnel.

H) Elevador Alimak.

Es un equipo con capacidad para 10 personas y se utiliza para el acceso del personal que labora en el túnel.

4.2.10 Extracción, Bajada y Giro del Escudo.

La excavación de túneles con escudo requiere de maniobras para el movimiento del equipo del punto de terminación de un túnel al punto de inicio de otro. Estas maniobras presentan características especiales cuando se trata de un escudo de frente presurizado de 6.24 m. de diámetro.

1. Extracción del Escudo.

Para la maniobra de extracción es necesario aligerar el escudo, que tiene un peso total aproximado de 240 toneladas; para el efecto, se desmontan primero las siguientes estructuras:

- Cabezal cortador.
- Plataformas de trabajo.
- Faldón.

Peso total aproximado = 40 ton.

Posteriormente se sueldan en la cara exterior de la camisa del escudo, unos canales de acero estructural, cuya función será la de alojar los estrobos con los que se

sujeterá la maquina, impidiendo que estos se deslicen a lo largo de su eje (Figura 4.38).

Con esto, el peso total a levantar se reduce a 200 toneladas. El movimiento se realiza con dos o tres grúas de 250 a 350 toneladas de capacidad cada una, dependiendo del área disponible en superficie (tomando en cuenta la inclinación de la pluma de las grúas, Así como las posibilidades de giro, avance y/o retroceso, etc.) (Figura 4.39).

Una vez en superficie, el transporte del escudo de una obra a otra se efectúa sobre una plataforma autoalineable de 96 llantas.

2. Bajada del Escudo.

Esta maniobra se realiza de forma similar a la extracción, moviendo primero al fondo de la lumbrera el cuerpo del escudo y posteriormente el cabezal y las plataformas.

Es importante tomar en cuenta que no solo se requieren grúas para el movimiento del escudo en sí, sino que también son necesarias para las maniobras y retiro o reinstalación del cabezal, aunque estas sean de mucho menos capacidad.

3. Giro del Escudo.

En ocasiones es necesario girar el escudo en el fondo de la lumbrera para continuar con la excavación del otro

tramo de un mismo túnel. Para ello se puede emplear una cuna cruzada o una cuna metálica.

Una cuna cruzada es una cuna convencional, construida con concreto armado y anclada al fondo de la lumbrera, cuya característica especial consiste en tener dos superficies de deslizamiento con diferente dirección: una de ellas es la llegada del escudo y la otra la salida. Esto requiere que el escudo sea izado, por medio de grúas, de su posición original y bajado nuevamente en la posición que se requiere para el inicio del nuevo tramo.

La cuna metálica se construye con perfiles estructurales, de acuerdo a la elevación de proyecto. Esta no requiere el empleo de grúas; sin embargo, es necesario instalar sobre la losa de fondo de la lumbrera un sistema de rieles sobre el cual se deslizará la cuna metálica, desde la posición de llegada hasta la posición de salida del escudo. Además, deben colocarse varios gatos hidráulicos en la pared de la lumbrera, mismos que al reaccionar contra la cuna, provocarán el movimiento de ésta.

4.2.11 Instrumentación y Medición del Túnel.

La instrumentación dentro de las obras subterráneas es de gran importancia debido a que ellas nos indican el grado de deformación que se presenta durante la excavación de un túnel, por los diferentes esfuerzos que ejerce el subsuelo sobre el revestimiento primario y el definitivo.

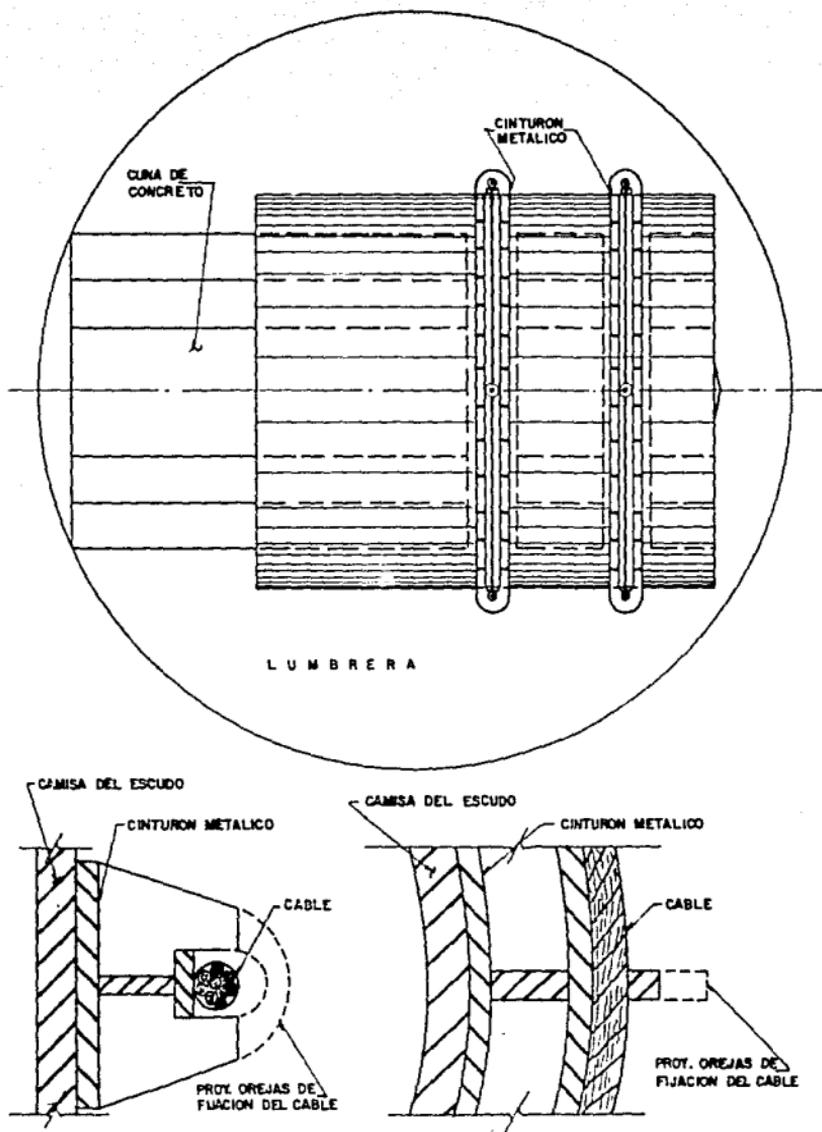


FIG. 4.38 ESTROBADO DEL ESCUDO PARA SU EXTRACION DEL FONDO DE LUMBRERA

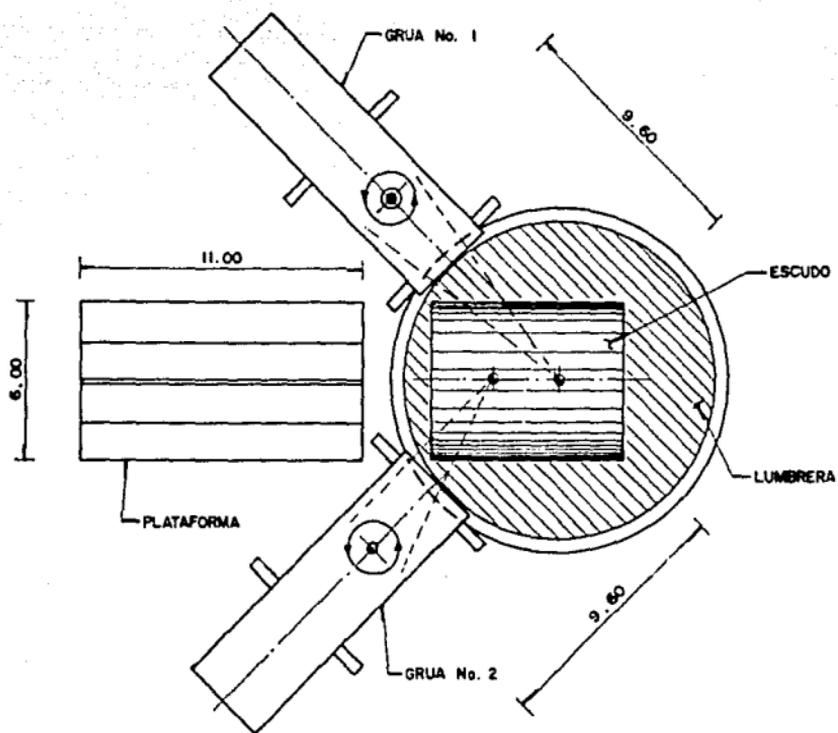


FIG. 4.39 POSICION DE GRUAS

La construcción de túneles en suelos blandos necesariamente provocan movimientos del suelo, y en consecuencia, deformaciones que pueden dañar construcciones vecinas, así como tuberías de servicio.

Se entiende con instrumentaciones de un túnel, la serie de mediciones de esfuerzos y deformaciones que presenta el subsuelo al ser excavado el túnel. El número, tipo y características de los instrumentos de medición, están o son definidos por el grado de estudios previos que se hayan realizado y que el proyectista requiere conocer in situ.

En términos generales, en la excavación con escudos de frente presurizado, las mediciones que se realizan, son del tipo de convergencias y bancos de nivel superficiales. Cabe aclarar que también se utilizan los inclinómetros, bancos de nivel semiprofundo, extensómetros y piezómetros.

Deformaciones en la Periferia de la Excavación (Convergencias).

Se denomina convergencias a los desplazamientos o corrimientos de puntos en la superficie expuesta de un túnel por efecto de la compresión en la periferia del túnel al removerse el núcleo de suelo durante las operaciones de excavación.

El fenómeno se puede explicar, si se considera una placa sujeta a una presión uniforme (tipo hidrostático) en la cual se hace un orificio circular y se extrae el núcleo.

Al efectuar esta operación todos los esfuerzos de dirección radial en la periferia se hacen nulos y, en cambio, los esfuerzos normales de dirección tangencial crecen considerablemente; este cambio provoca deformaciones instantáneas (elásticas) y graduales (elasto-plásticas), si se exceden los límites de resistencias del suelo.

En la práctica el fenómeno es bastante más complejo ya que, por un lado, el estado de esfuerzos no es uniforme, por otro, la excavación no se efectúa instantáneamente y, finalmente, existe un efecto tridimensional en el cual, en la medida que avanza la excavación, el túnel se deforma hacia el interior del mismo hasta que el frente sale del radio de acción de la sección considerada.

Los aspectos más importantes que se deben conocer son el ritmo o velocidad con que las deformaciones crecen, así como el tiempo en que se estabiliza una excavación. También es importante conocer el modo en que se deforma la excavación, lo que se infiere de la magnitud y dirección de las convergencias en distintos puntos de la periferia. El estudio de las convergencias del túnel, permite asignar el tipo de presión del terreno que actuará contra el revestimiento. En algunas ocasiones es posible deducir de las deformaciones de convergencia observadas, las características de deformabilidad del medio que circunda la excavación.

Los instrumentos idóneos para las mediciones de convergencia son aquellos que utilizan alambre Invar de diámetro pequeño, tensionado a valor constante y que cuentan con dispositivos de medición de deformaciones y ajuste de las tensiones de alta calidad y confiabilidad. Además, en estos instrumentos se corrigen continuamente las lecturas por fluctuaciones de temperatura y los dispositivos se "ambientan" antes de llevar a cabo las mediciones y se calibran antes y después de estas.

En base a la experiencias que se tienen en cuanto a mediciones de convergencias, resulta conveniente localizar las secciones de medición cuando menos a cada 20 m., alternando secciones simples y completas.

Deformaciones en Superficie. Bancos de Nivel Superficial.

Haciendo un comparativa con los asentamientos que se han registrado con este tipo de escudo y con el uso de un escudo de frente abierto y aire comprimido para la excavación de túneles en suelos blandos, se observa que los asentamientos registrados actualmente a lo largo de todo la excavación, de aproximadamente 9.2 km., la diferencial de asentamientos es 6 veces más baja; es decir mientras en la excavación con aire comprimido se registran 150 mm., con el nuevo procedimiento se registrarán en promedio 25 mm.

4.3 Revestimiento Definitivo.

Debido al alto contenido de partículas sólidas que tienen las aguas residuales de la Ciudad de México, los túneles del drenaje profundo requieren de un revestimiento definitivo que va sobre el revestimiento formado por los anillos de dovelas (revestimiento primario). Lo más común es colocar el revestimiento definitivo después de que se ha terminado la excavación de todo el túnel, aún en túneles largos, en donde la interferencia entre la excavación y el acarreo del concreto sería mínima. Sin embargo, puede colocarse antes en aquellos lugares en donde las condiciones del terreno y el equipo empleado lo hagan necesario, siempre y cuando los carros de la rezaga tengan espacio suficiente para pasar a través de la cimbra.

En los últimos años se han mejorado el equipo y los métodos para el mezclado, acarreo y colocación del concreto, así como el diseño y fabricación de las cimbras. El uso de cimbras metálicas es el que se utiliza en las obras de túneles para el drenaje profundo, en particular la cimbra telescópica. El uso de cimbra de madera resulta obsoleto; solo se utiliza en curvas muy forzadas o en estructuras especiales como intersecciones, pequeñas galerías, transiciones, etc.

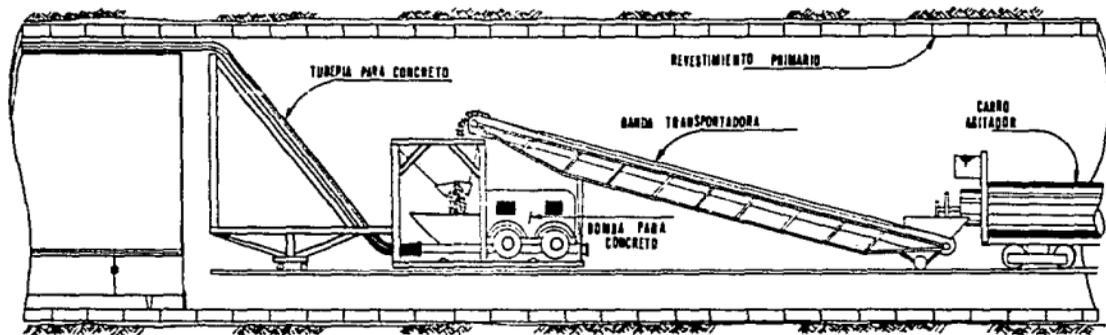
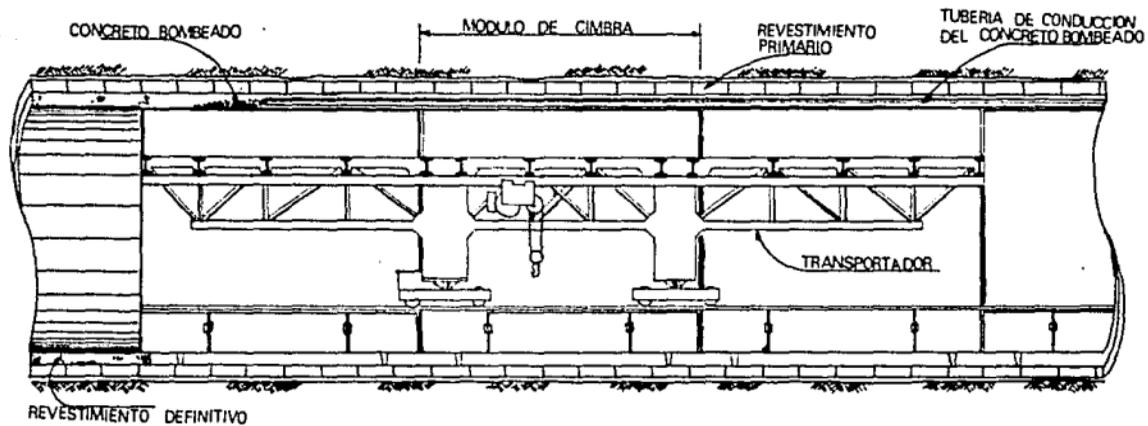
Cimbra Telescópica.

Sus tramos se diseñan para abatirse de tal forma que puedan ser transportados pasando a través de otros ya colocados y listos para recibir el concreto (Fig. 4.40). Se utilizan para colados continuos y permiten la máxima producción por turno. No requieren de mamparas a menos que se suspenda el colado (fines de semana, etc). Se debe disponer de un número suficiente de tramos de cimbra para obtener rendimientos altos y para dar tiempo a que frague el concreto antes del desmolde y así poder transportarlos desde el extremo final hasta el frente de la operación.

Por su costo, este tipo de cimbra resulta más económica en túneles largos, aunque también puede ser utilizada en túneles cortos y medianos, en donde puede minimizar el tiempo del colado del revestimiento definitivo. A continuación se encuentran las principales actividades relacionadas con el colado con cimbras telescópicas:

Antes del revestimiento:

- Retiro de instalaciones.
- Rectificación de vías.
- Limpieza del tramo por colar.
- Colocación del armado.
- Colocación de boquillas para la inyección.
- Picado de juntas (cuando se suspende el colado).



COLADO CON CIMBRA TELESCOPICA

FIG. 4.40

Durante el revestimiento:

- Colocación de cimbra.
- Verificación de espesores.
- Fabricación del concreto.
- Bajada del concreto.
- Transporte al frente del concreto.
- Colocación del concreto.
- Vibrado (pared y de inmersión).

Después del revestimiento:

- Descimbrado.
- Curado.
- Arreglo de defectos (resanes).
- Instalación de alumbrado y líneas para agua, aire e inyección.
- Inyección de contacto.
- Retiro de instalaciones.
- Limpieza general.

Manejo del concreto.

Las elaboración del concreto se puede llevar a cabo en superficie con el auxilio de una planta instalada cerca de la lumbrera; para el caso de túneles en zonas urbanas (como es el caso de las obras del drenaje profundo) en que las distancias así lo permiten, se utiliza concreto premezclado.

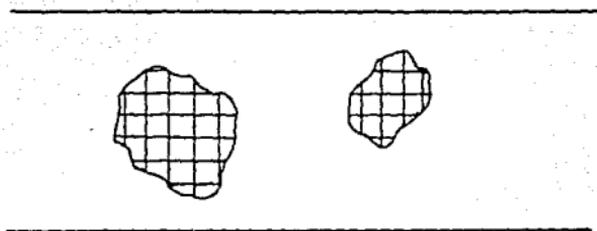
En cualquier caso, el concreto baja por una tubería instalada en la lumbrera, hasta el túnel, en donde es recibido por un tanque amortiguador cuyas funciones principales son disipar la energía de caída y controlar la segregación. Del tanque se pasa el concreto a un tolva y de ahí a carros agitadores que son llevados al frente de trabajo, donde son descargados a una bomba que a su vez inyecta el concreto depositándolo por la parte superior de la cimbra. De esta forma la cimbra se va llenando de abajo hacia arriba, al tiempo que el concreto es vibrado, tanto con vibradores de inmersión como de pared (Fig. 4.40).

Problemas más comunes:

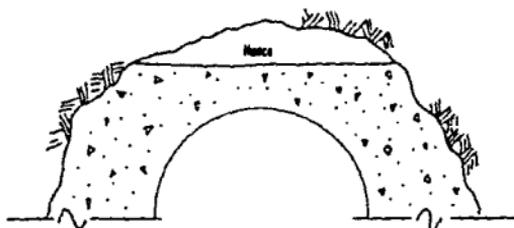
- a) Falso Fraguado. En ocasiones el cemento se utiliza en la elaboración del concreto sin haberse enfriado totalmente, lo cual puede producir un falso fraguado que llega a taponar las tuberías de colado.
- b) Zonas sin colar. Por defectos en el vibrado de concreto, por algún fraguado falso, por bajo revenimiento en el concreto, etc., al descimbrar pueden aparecer zonas sin concreto que necesariamente hay que reparar, siendo este tipo de reparación muy lenta y costosa (Fig.4.41A)
- c) Exposición del acero de refuerzo, que se presenta al no haber hecho correctamente el armado, incluidos los separadores.
- d) Falta de espesor en la clave. Problemas como los descritos en los incisos a y b, aunados a una deficiente operación en la inyección del concreto, pueden ocasionar que la clave no quede totalmente llena

por este, lo que conducirá a tener que rellenar el hueco posteriormente, casi siempre con inyecciones de lechada de cemento (Fig. 4.41B)

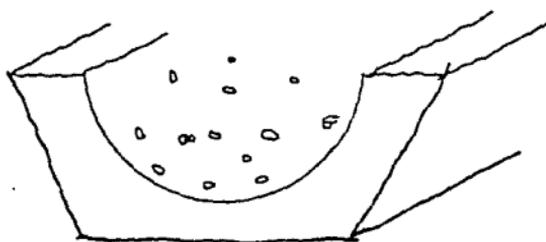
- e) Burbujas en la cubeta del túnel, que se presentan al tener un exceso de vibrado y que también habrá que resanar (Fig. 4.41C)



A ZONAS SIN COLAR



B FALTA DE ESPESOR EN LA CLAVE



C BURBUJAS EN LA CUBETA

FIGURA 4.41

5. CONCLUSIONES.

Después de exponer los problemas que presenta el drenaje de la Ciudad de México, que vienen desde su fundación a una altura de 2240 m. sobre el nivel del mar dentro de una cuenca cerrada, aunado a la gran explosión demográfica que se ha tenido y al grave problema del hundimiento por la extracción de agua del suelo, han aumentado la dificultad de su salida, lo cual representa un problema de ingeniería, costoso en su construcción.

Sin embargo, después de varios estudios se optó por un sistema que drenará por gravedad y con la profundidad necesaria para evitar que el hundimiento de la ciudad lo dañará y que formará una red suficiente para abarcar toda la ciudad y así poder solucionar el problema de drenaje pluvial.

Por todo lo anterior se puede concluir que la solución presentada por el Sistema de Drenaje Profundo, la cual consiste en la excavación de túneles a una profundidad promedio (en el área urbana) de 30 m (dado que a esta profundidad el terreno sufre asentamientos mínimos), es la solución más adecuada para satisfacer las necesidades de drenaje de esta ciudad.

Para la construcción del Sistema de Drenaje Profundo, fue necesario atravesar diversas formaciones de suelo. En su primera etapa (1970-1975) las excavación atravesó

predominantemente suelos duros (tepetates) y rocas; en esta etapa se utilizaron con éxito por primera vez en la Ciudad de México los escudos de frente abierto entre las lumbreras No. 0 a No. 10 del Interceptor Central, y No. 13 a No. 0 del Interceptor Oriente. De la lumbrera L-10 hacia adelante (L-5 del Interceptor Central), la excavación no podía ser posible sin que se modificara el equipo excavador dada la resistencia tan baja de las arcillas, por lo cual se utilizó un escudo con aire comprimido, llegando a dar presiones hasta de 1.3 kg/cm^2 en el frente de trabajo. El uso del aire comprimido fue utilizado en la excavación del Interceptor Central en el tramo comprendido entre la lumbrera 10 y lumbrera 5.

Los estudios de mecánica de suelos, reportaron que la construcción del Interceptor Oriente, así como del Centro, y los Colectores Semiprofundos (Iztapalapa, Obrero Mundial, etc.) donde se tenían arcillas con resistencias más bajas, las presiones requeridas eran mayores a 1.3 kg/cm^2 , lo cual además de presentar problemas de tipo físico para el personal, disminuía los rendimientos de excavación, debido a que los tiempos de descompresión que se requerían para el personal eran muy largos y las jornadas de trabajo resultaban mínimas.

Ante esta problemática y después de analizar algunas alternativas, como podrían ser, el escudo con aire comprimido, inyecciones de consolidación y congelamiento del

suelo, se optó por la solución que se considera óptima y con un avance tecnológico de vanguardia a nivel mundial, que es la excavación con escudo de frente presurizado.

Dentro de las ventajas que tiene este procedimiento, respecto a los anteriormente mencionados, son el menor costo, el mayor avance de excavación promedio y las condiciones de seguridad en que se encuentra tanto el personal como la excavación y las estructuras de superficie. Es importante mencionar la seguridad de las estructuras en superficie (edificios, instalaciones, metro, viaducto, etc...), dado que el drenaje profundo se está excavando en zonas densamente pobladas y con una infraestructura urbana importante, por lo que el costo material y social que representa el afectarlas, sería enorme. Este problema ha sido resuelto con la excavación con escudo cerrado de frente presurizado.

Por último, quiero concluir que todos los esfuerzos que se hacen para el funcionamiento adecuado de la ciudad de México como son el desalojo de aguas pluviales y residuales, abastecimiento de agua potable, transporte, controles de contaminación, electrificación y todos los servicios públicos en general, serán cada vez más costosos e insuficientes, si no se logra llevar a cabo un programa eficiente de descentralización.

BIBLIOGRAFIA.

1. Memoria de las Obras del Sistema de Drenaje Profundo del Distrito Federal, Tomo III, Departamento del Distrito Federal, Talleres Gráficos de la Nación, México, 1975.
2. The Art of Tunnelling, Károly Széchy, Second Edition, Akadémiai Kiadó, Budapest, 1973.
3. Túneles y Excavaciones Subterráneas (1) (2), Curso Victor Hardy 85, México, 1985.
4. Túneles y Excavaciones Subterráneas (2), Curso Victor Hardy 87, México, 1987.
5. Memoria Técnica de las Obras del Drenaje Profundo del Distrito Federal, Tunel S.A. de C.V. México, D.F., 1976.
6. Design of Tunnel Liners and Support Systems. Final Report, Deere, Peck, Monsees, Schmidt. Department of Civil Engineering University of Illinois Urbana, Illinois 61801, February, 1969.

7. Curso: Excavación de Túneles de Drenaje Profundo con Escudos Cortadores de Frente Presurizado a base de Lodos de 6.24 m de diámetro,
D.D.F., D.G.C.O.H.

8. El Sistema de Drenaje Profundo de la Ciudad de México.
La Compañía S.A., D.D.F., D.G.C.O.H.
Noviembre, 1988.

9. Formullas for Stress and Strain,
Raymond J. Roark,
International Student Edition, Mc Graw Hill, Kogakusha.

10. Experiencias Recientes en Cuatro Túneles Hidráulicos del Valle de México,
Ing. Roberto Flores,
México, D.F., 27 de Mayo de 1988.