

2ej. 10



**Universidad Nacional Autónoma
de México**

FACULTAD DE INGENIERIA

**PROCEDIMIENTOS DE CONSTRUCCION PARA
LOS TUNELES DEL INTERCEPTOR ORIENTE DEL
DRENAJE PROFUNDO DE LA CIUDAD
DE MEXICO**

Tesis Profesional

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO CIVIL

P R E S E N T A

DAVID AMOS DEL ARCO Y TORRES

MEXICO, D. F.

1981



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 esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

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

I N D I C E

CAPITULO	PAG.
I INTRODUCCION 5
II DESCRIPCION DEL PROYECTO, PLANEACION Y PROGRAMACION DE LA OBRA 14
III ESTRATIGRAFIA Y PROPIEDADES DEL SUBSUELO 28
IV CONSTRUCCION DE TUNELES MEDIANTE ESCUDO CORTADOR CON FRENTE ESTABILIZADO CON FLUI DOS A PRESION 41
V PRESUPUESTO 94
 107
 109

INTRODUCCION

En ese lugar nacerá y germinará el corazón de Cópil y vos, Tenuché; vos iréis a observar y a tener cuidado cuando brote allí un Tenuchtli... Y acecharás el momento preciso que en la cima de este nopal se pose de pie un águila que esté sujetando entre sus patas, apretadamente, una serpiente medio erguida a la que estará aporreando... Y cuando esto aparezca, Tenuché, porque vos sois el Tenuch, el nopal de tuna dura colorada, y el águila que veréis, Tenoché, esa águila será yo, yo mismo... Se realizará entonces el agüero que significa que nadie en el mundo podrá destruir jamás, ni borrar la gloria, la honra, la fama de México-Tenochtitlan.

Con esta profecía y mandato, que el dios Huitzilopochtli dio a uno de los sacerdotes llamados Cuauhtlequetzqui-Tenoch, los Mexicas fundaron la Ciudad de México-Tenochtitlan en el año de 1325. Y desde este momento se iniciaron los problemas para abastecer de agua potable, la necesidad creciente de sus habitantes, así como realizar obras de protección contra las inundaciones.

La Ciudad de México se encuentra enclavada en la región sureste de la cuenca del Valle de México, situada en el extremo sur del altiplano Mexicano, está limitada al norte por las sierras del Tepotzotlán, Tezontlalpan y Pachuca, al este por los llanos de Apan y la Sierra Nevada, al sur por las Sierras del Chichinautzin y del Ajusco, al oeste por las Sierras de las Cruces, Monte Alto y Monte Bajo.

Antes de la erupción de los volcanes que forman la Sierra de Chichinutzin, era un valle que drenaba libremente sus aguas hacia Cuernavaca por el sur.

Al represarse las aguas merced a la sierra, se formó el lago, en el cual la única salida del agua fue por evaporación; a través del tiempo dicho lago fue secándose y formando lagunas separadas, de las cuales a la fecha sólo subsiste parte de la de Texcoco y los canales de la zona Xochimilco - Chalco.

Por la morfología así constituida, no es raro que las inundaciones hayan acaecido continuamente en el Valle de México desde que los primeros pobladores se establecieron en él; testigos mudos de las preocupaciones que despertaron estos fenómenos, son las obras de defensa y de desagüe que se han construido en distintas épocas, en puntos estratégicos de la cuenca, algunas de las cuales existen todavía.

La primera obra de importancia que construyeron los Tenochcas, fue el acueducto para llevar agua de Chapultepec a Tenochtitlan; es tacaron con carrizos y otros materiales para formar un caño que ter minaron en poco tiempo, pero al correr el agua fue tan fuerte el golpe, que la obra se derrumbó por muchos lados.

Entre los años 1440 a 1450 hubo una estación extremadamente húmeda de lluvias, granizo y hielo, creció el lago de Texcoco y la Ciudad de Tenochtitlan se inundó, no quedando seca ninguna de sus calles. Moctecuhzoma Ilhuicamina recurrió a Netzahualcōyotl. Este gobernante, a quien tantas cualidades se le han atribuido, y que también entendía de cuestiones de Ingeniería; fue él, quien organizó y dirigió la construcción de un dique para contener las aguas salobres del lago de Texcoco.

El albarradón se extendía desde el cerro de la Estrella en Ix-

tapalapa por el sur, hasta Atzacolco en el norte, pasando por el cerro del Peñón, con 16 Km. de longitud. La obra consistía en un muro formado por piedra y arcilla, revestido en ambos lados con una hilera de espalizada. El dique dividió desde entonces el lago de Texcoco y a la parte occidental se le dio el nombre de laguna de México.

Por el año de 1466, comenzó a funcionar el acueducto de Chapultepec, según el trazo anterior y siguiendo por la calzada de Tlacopan, hasta llegar a la orilla de la Ciudad Tenochca, desde este lugar su construcción fue bajo tierra e iba a terminar dentro del recinto del Templo Mayor.

La obra consistía en dos caños hechos de tierra muy pisada tan fuerte como la piedra, el agua corría por uno de los tubos y cuando llegaba a estar sucio, cambiaban el agua al otro, pudiendo así mantenerlos siempre limpios. Fue Netzahualcōyotl nuevamente quien proyectó y dirigió la construcción.

Los intentos de rodear a Tenochtitlan de agua dulce, se intensificaron a partir de la construcción del gran dique; para regular las aguas de las corrientes del sur, se construyeron la calzada de Mexicaltzingo y la calzada dique de Tláhuac, que servía para controlar la masa de agua del lago de Chalco, que en la estación lluviosa tendía a desbordarse sobre la laguna de Xochimilco y ésta, a su vez, sobre la de México. Y aunque esto en cierto modo era benéfico porque vertían sobre ella agua dulce, pero sin un control adecuado provocaría el anegamiento de Tenochtitlan.

En la época virreinal se construyó el dique de San Cristóbal, que cerró la garganta por la cual derramaban sus aguas las lagunas de Zumpango, Xaltocan y San Cristóbal al lago de Texcoco.

En el año de 1555, se mandó construir el albarradón de San Lázaro.

zaro en sustitución del dique de Netzahualcóyotl que fue destruido durante la conquista. Consistiendo en un muro de piedra en forma de semicírculo que abrazaba la Ciudad por el rumbo de San Lázaro.

Como las inundaciones continuaban y viendo que los diques y al barradas eran una solución pasajera, que no resolvía el problema. Y a raíz de las grandes inundaciones de los años 1604 y 1607 motivadas principalmente por los abundantes escurrimientos del río Cuautitlán, impulsaron la búsqueda de una solución drástica para evitarlas, consistente en abrir la cuenca natural cerrada del Valle de México para dar salida a las aguas excedentes.

El cosmógrafo alemán Enrico Martínez fue el autor del primer túnel en Nochistongo al noroeste de la cuenca, por el cual fueron desviadas las aguas del río Cuautitlán, dejando por primera vez de ser cuenca cerrada en el año de 1608.

A los pocos meses de funcionar el túnel, hubo derrumbes que lo inutilizaron y no fue sino hasta el año de 1789, en que la obra convertida en un tajo, a través de 160 años de trabajos se terminó y dio salida permanente a las aguas del río Cuautitlán.

En 1856, ante los continuos problemas de inundaciones, se buscó dar una salida a las aguas que hacían peligrar a la entonces floreciente Ciudad de México, al subir los niveles del lago de Texcoco. Fue así como se inició la construcción del Gran Canal del Desagüe y el túnel de Tequisquiac, terminándose en marzo de 1900, constituyendo una segunda salida de las aguas de la cuenca.

Entre 1940 y 1946 se construyó un nuevo túnel en Tequisquiac, con lo cual la cuenca cerrada del Valle de México se comunica por tres vías a partir de 1954 con la cuenca del río Moctozuma, afluente del río Pánuco que desagua en el Golfo de México a la altura del puerto de Tampico.

Todas las obras de desagüe construidas en aquellas épocas, incluyendo el Gran Canal y los túneles de Tequisquiac, se proyectaron para trabajar por gravedad y así lo hicieron originalmente.

El Valle de México cuya cuenca se encuentra ocupando parte de los Estados de: México (50%), Hidalgo (26%), Tlaxcala (9%) y Puebla (1%), así como el Distrito Federal (14%). Tiene 9,600 Km² de superficie de la cual sólo el 30% es plana y situada a una altura media de 2240 m.

El Distrito Federal ocupa 1,480 Km² y en él se encuentra la Ciudad de México, con un área urbanizada mayor de 300 Km² y un número de habitantes en crecimiento constante que sobrepasa los 8 millones.

El explosivo crecimiento de la actual Capital de la República en el presente siglo, motivó que las fuentes de agua potable que la abastecían fueran agotándose y en su lugar se incorporaron nuevas fuentes de abastecimiento entre las cuales la más inmediata fue bombear los acuíferos profundos del subsuelo de la Ciudad. Pero como las cenizas producto de erupciones volcánicas, depositadas en el seno del lago fueron sedimentándose lentamente en forma floculenta, constituyendo al través del tiempo un suelo arcilloso sumamente comprensible al cual ahora se le ha dado el nombre genérico de arcilla del Valle de México.

Al causarse desequilibrios en las presiones de agua del subsuelo debido al bombeo, el material arcilloso comprensible inició un proceso de consolidación que se tradujo en acelerar el hundimiento general del valle, merced a la consolidación de las arcillas comprensibles en algunos puntos de la Ciudad como en Paseo de la Reforma y Avenida Juárez, dicho hundimiento ha llegado a ser mayor de 8 metros. Con tales hundimientos era inminente el dislocamiento de la red de alcantarillado, provocándose columpios y contrapendientes en

los colectores que desaguan al Gran Canal y también en este último.

Esta situación de la red provocó serias inundaciones en la Ciudad que obligaron a las autoridades a operarla mediante estaciones de bombeo, con notable incremento de los costos de operación y de mantenimiento del sistema.

El hundimiento de la Ciudad de México, ha colocado a ésta en condiciones tales que su zona central se encuentra ahora en el punto más bajo de la cuenca, situación que antiguamente pertenecía al lago de Texcoco.

Una falla del Gran Canal, por incapacidad, desbordamiento o falla del sistema de bombeo, produciría una inundación en el centro de la Ciudad de México, que abarcaría una superficie de 24 millones de metros cuadrados, llegando las aguas hasta 2 metros de altura. - Esto ocasionaría pérdidas materiales estimadas en 6,000 millones de pesos y traería aparejadas grandes repercusiones políticas y sociales, sin mencionar los graves problemas sanitarios que se presentarían.

Por todo esto, es inobjetable la inversión para la realización de las obras que solucionarán este problema, además que económicamente el actual sistema es inoperante por el alto costo de funcionamiento.

Antes de llegar a la solución definitiva, se estudiaron varias alternativas:

Alternativa 1

Instalar una planta de bombeo en el norte de la ciudad para 80 m³/seg. y construir un canal para el mismo gasto, que descargue las

aguas en el Gran Canal del Desagüe, a la altura de San Cristóbal - Ecatepec, y entubar el primer tramo de este último canal, dentro de la zona urbana.

Principales ventajas:

Menor costo inicial, eliminación de problema sanitario.

Principales desventajas:

Alto costo de operación del sistema de bombeo.

Grave amenaza de una posible falla en su funcionamiento.

Alternativa 2

Esta alternativa es interesante consignarla, pues es la solución lógica que se ocurre de primera intención.

Excavar un canal más profundo, paralelo al Gran Canal del Desagüe, sacando las aguas de la cuenca del Valle de México por un túnel más profundo en Tequisquiac.

Principales ventajas:

Menor costo inicial que la solución definitiva.

Menos tiempo de ejecución de la obra.

Principales desventajas:

Esta solución es temporal, pues la profundidad de excavación de un canal, es limitada y al cabo del tiempo volvería a hundirse la ciudad y esta estructura quedaría otra vez a un nivel superior, siendo imposible descargar por gravedad las aportaciones de los colectores.

Solución definitiva para el drenaje profundo:

La solución definitiva al problema, consistirá básicamente de las siguientes partes:

- 1) Interceptor del Poniente (que ya fue construido).
- 2) Interceptor Central.
- 3) Interceptor Oriente.
- 4) Emisor Central.

Principales ventajas:

Saldo económico positivo, a largo plazo, porque:

Podrán eliminarse todas las estructuras provisionales actualmente en funcionamiento.

Se evitará el tener que bombear, se eliminará el riesgo de una falla en los primeros 20 Kms. del Gran Canal y sobre todo, no será afectado en su funcionamiento, por el hundimiento general del valle.

Además, como están diseñados los interceptores de sur a norte, seccionan convenientemente la red de colectores de la ciudad.

Principales desventajas:

El alto costo inicial y el hecho de que deben estar alojados -
bajo calles anchas los interceptores.

C A P I T U L O I I

DESCRIPCION DEL PROYECTO, PLANEACION Y PROGRAMACION DE LA OBRA

DESCRIPCION DEL PROYECTO

Después de estudiar cada alternativa, considerando las ventajas técnicas y económicas, se elaboró el proyecto definitivo del "Sistema de Drenaje Profundo" para la Ciudad de México, el cual trabajará completamente por gravedad. El conjunto total de las obras estará integrado por el emisor y los interceptores descritos a continuación:

Emisor Central.- Su recorrido se inicia en la lumbrera cero (L-0) en el pueblo de Tenayuca, atraviesa la sierra de Guadalupe, el Cerro de Tenayo, el Valle de Cuautitlán, el Valle y la Sierra de Tepetzotlán, la Sierra Sinconque y el Valle Requena, en el Estado de Hidalgo. Se diseñó con sección de herradura modificada, terminándose con el recubrimiento de concreto en forma circular.

Sus características principales se citan a continuación:

Longitud	-----	50 Km.
Diámetro	-----	6.5 m.
Area transversal	-----	33.2 m ²
Pendiente Geométrica	-----	0.00195
Gasto máximo	-----	200 m ³ /seg.
Velocidad máxima	-----	6 m/seg.
Profundidad media	-----	120 m.
Profundidad máxima	-----	220 m.

Interceptor Poniente.- Con la construcción de este interceptor, se pudo recibir y desalojar los escurrimientos de la parte alta del poniente de la cuenca.

Se inicia en la Barranca de la Magdalena con dirección Norte, hasta descargar en el Río Hondo, que llega al vaso del Cristo, en el Estado de México.

Como el agua que conduce, en su mayor proporción es de origen pluvial, se le da uso agrícola a partir del río Cuauhtitlán.

Sus características son las siguientes:

Longitud	-----	14 Km. en túnel. 3 Km. en canal a cielo abierto.
Diámetro	-----	4 m.
Pendiente media	-----	0.0005
Gasto máximo	-----	25 m ³ /seg.
Velocidad máxima	-----	4.6 m/seg.

Se estudia actualmente las ventajas que presentaría duplicar su capacidad.

Interceptor Centro Poniente.- Parte de Copilco en la Ciudad Universitaria, con un recorrido paralelo a la Av. Miguel Angel de Quevedo, continuando por debajo de la Av. Revolución para luego seguir por la Av. Cap. Pedro Antonio de los Santos, atravesando por Chapultepec, sigue su recorrido bajo la Av. Gral. Mariano Escobedo, siguiendo por la Av. Cuitláhuac avanza por la Av. de las Granjas, hasta llegar a la lumbrera uno (L-1) del Emisor Central.

Sus características son:

Longitud	-----	30 Km.
Diámetro	-----	4 m.
Pendiente	-----	0.0005 a 0.0007
Gasto máximo	-----	25 m ³ /seg.
Profundidad media	-----	30 m.
Velocidad máxima	-----	4.6 m/seg.

Actualmente se encuentra en proceso de construcción a partir - de la Lumbreira siete (L-7).

Interceptor Central.- Se inicia en la Lumbreira uno (L-1) en la Av. Miguel Angel de Quevedo esquina con la calle de Tres Cruces en Coyoacán, luego pasa bajo de la Av. Centenario hasta alcanzar la Av. Cuauhtémoc, y de aquí continuará por la Av. Universidad para luego, seguir bajo la Av. Vértiz y al llegar a la calle de Dr. Velasco por ésta regresará a la Av. Cuauhtémoc, para luego continuar por la Av. Bucareli hasta la Lumbreira nueve (L-9), situada al norte de la Glorieta de la Raza en la calle de Strauss.

De la Lumbreira nueve (L-9) en adelante se encuentra el túnel - construido y en pleno funcionamiento, de ahí se extiende hacia el - norte cortando la planicie de la Ciudad hasta llegar al pueblo de - Tenayuca, para unirse con la Lumbreira cero (L-0), al Emisor Central.

El Túnel es un conducto circular de concreto con las siguientes características:

Longitud	-----	25 Km.
Diámetros	-----	4 m. en los primeros 12 Km. y 5 m. en los restantes.
Pendiente geométrica	-----	0.0005
Gasto máximo	-----	90 m ³ /seg. (para 5 m. de ϕ)

Profundidad media de la		
plantilla	-----	30 m.
Area drenada	-----	11 217 Hs.

Interpector Oriente.- Se iniciará en el subsuelo de la Delegación Iztapalapa, en la intersección de la Av. Cinco y Río Churubusco y Av. Francisco del Paso y Troncoso.

Su recorrido debajo de la Av. Francisco del Paso y Troncoso lo lleva a continuar por la Av. Azúcar, pero al llegar al Viaducto Piedad toma nuevamente por la Av. Francisco del Paso y Troncoso, para luego avanzar bajo la Calzada Ignacio Zaragoza, recorriendo un tramo de esta Calzada llega a la Av. Eduardo Molina, lugar en donde continuará paralelo al Gran Canal hasta llegar a la Lumbrera ocho (L-8).

De la Lumbrera 8 (L-8) en adelante, se encuentra construido y en funcionamiento; al igual que la Obra de Toma, construida en el Km. 6+985 del Gran Canal, que da la oportunidad de derivar 100 m³/seg., que también se une en la Lumbrera ocho (L-8).

De aquí se extiende hasta la Sierra de Guadalupe, atravesándola hasta llegar a la Lumbrera cero (L-0), del Emisor Central, lugar de su descarga.

Es de sección circular y sus características principales son:

Longitud	-----	26.75 Km.
Diámetros	-----	4 m. en los primeros 11 Km. y 5 m. en los restantes.
Pendiente Geométrica	-----	0.0007 a 0.0005
Gasto máximo	-----	110 m ³ /seg. (Para 5 m. de diámetro).

Velocidad máxima	----- 5.6 m/seg. (para 5 m. de \emptyset).
Area total drenada	----- 20 346 Hectáreas.
Profundidad media de la plantilla	----- 30 m.

Interceptor Centro Centro.- Que unirá a los Interceptores Central y Oriente, se construirá bajo la Av. Chavacano y Peón Contreras, se unirá en el cruce de Dr. Vértiz y Peón Contreras al Interceptor Central y en Av. Morelos y Francisco del Paso y Troncoso se unirá al Interceptor Oriente, su excavación se realizará en la denominada Zona de Lago.

Interceptor Oriente Sur.- Se iniciará en el Canal de San Juan, entre las Colonias Agrícola Oriental y Tepalcates, continuando bajo de la Calzada Ignacio Zaragoza, hasta llegar a Francisco del Paso y Troncoso, en donde se unirá al Interceptor Oriente.

Estos dos últimos Interceptores descritos se encuentran en proceso de diseño.

En el plano de la figura 1 se muestra el trazo de los Interceptores Profundos y del Emisor Central, así como el de las Lumbreras de acceso.

Se planeó la construcción total del Sistema de Drenaje Profundo para su ejecución, en tres etapas distribuidas de la siguiente manera:

ETAPA No. 1	
Emisor Central	----- 50.0 Km.
Interceptor Central	----- 7.8 Km.
Interceptor Oriente	----- <u>10.2 Km.</u>
SUB-TOTAL	----- 68.0 Km.

ETAPA No. 2

Interceptor Central	-----	14.0 Km.
Interceptor Centro Poniente	-----	21.2 Km.
Interceptor Oriente	-----	<u>15.6 Km.</u>
SUB-TOTAL	-----	50.8 Km.

ETAPA No. 3

Interceptor Oriente Sur	-----	14.0 Km.
Interceptor Centro Centro	-----	<u>4.0 Km.</u>
SUB-TOTAL	-----	18.0 Km.

Contará al final con 136.8 Km. de túneles, que servirán para -
desalojar por gravedad las aguas negras y pluviales del Valle de Mé-
xico, resolviendo en forma definitiva el peligro constante de inun-
daciones en el centro de la Ciudad.

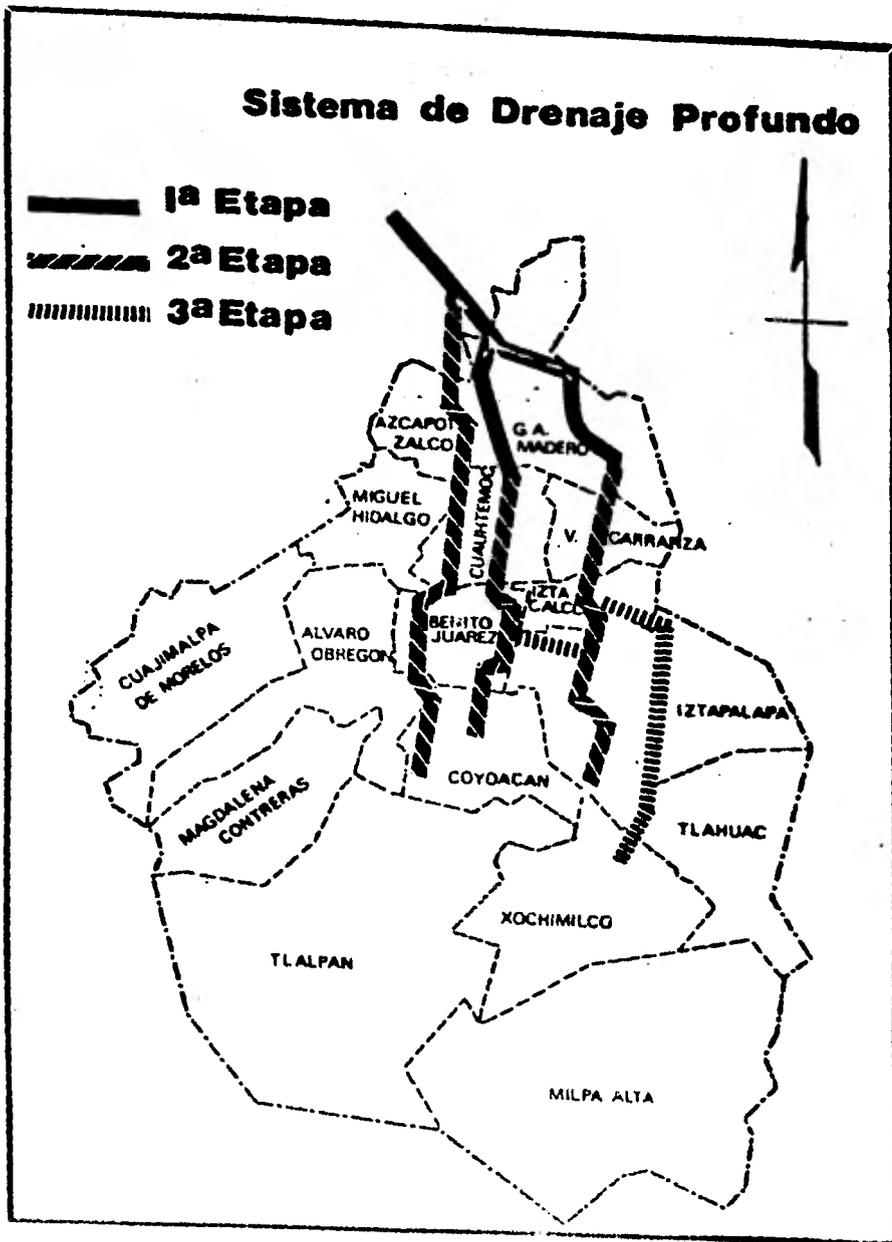
En la figura 2 se presentan las etapas constructivas planeadas.

La primera etapa fue concluida en su totalidad y actualmente -
se ejecutan las obras de los Interceptores, Central y Centro Ponien-
te.

Es propósito de este trabajo, presentar el método constructivo
con el cual será posible efectuar la excavación del túnel para el -
Interceptor Oriente.

Sistema de Drenaje Profundo

-  1ª Etapa
-  2ª Etapa
-  3ª Etapa



PLANEACION Y PROGRAMACION

Para llevar a cabo la planeación y la programación de las obras relacionadas con la construcción del túnel del Interceptor Oriente, se necesita conocer los métodos posibles de realización de acuerdo a los recursos y las condiciones ambientales.

Dividir el proceso en actividades que permitan analizar el orden en que deben ejecutarse, para ello es recomendable preparar una tabla de secuencias. En el caso de túneles, las actividades son de terminadas y periódicas y si la obra es muy extensa, el número de repeticiones de estas actividades es muy grande; por lo tanto, es muy conveniente analizar hasta donde sea posible los tiempos de ejecución, con el objeto de precisar la duración de la obra.

Citaremos los principales componentes que intervienen en la construcción de un túnel.

Para la ejecución de la obra:

1.- Excavación que contempla:

- a) Selección del equipo para la construcción de lumbreras.
- b) Selección del equipo para la construcción del túnel.
- c) Instalaciones en el túnel.

2.- Revestimiento.

- a) Selección de equipo para revestimiento de lumbreras (cimbras, plantas de suministro de concreto, etc.).
- b) Selección de equipo para revestimiento de túneles (cimbras, bancos de agregados pétreos, equipos para acurros en superficie y dentro del túnel).

3.- Inyección de contacto.

- a) Selección de equipo para la inyección de contacto.
- b) Tratamientos de impermeabilización y consolidación.

4.- Instalaciones en superficie.

Oficinas, compresores para aire, almacenes, talleres, agua, electricidad, comedores, servicio médico, comunicaciones.

5.- Instalaciones en lumbreras.

Tuberías para agua, aire, agregados, bombeos, elevadores de personal, etc.

6.- Instalaciones en el túnel.

Vías, drenes, galerías de bombeo, electricidad, alumbrado, teléfono, ventilación, tuberías para agua, aire, etc.

Una planeación ordenada nos da la oportunidad de conocer las actividades de primer orden que constituyen la base del proceso, mientras que las de orden inferior representan una mayor complejidad.

Una vez concluida esta etapa, es necesario preparar la tabla de secuencias de actividades.

La programación en estos términos no podrá hacerse si no se de terminan las duraciones posibles de cada actividad.

Esta determinación de tiempo permite elaborar, de una manera sencilla, el diagrama de longitud-tiempo correspondiente al programa.

El método constructivo que describiremos para efectuar las --

obras del Interceptor Oriente, necesita un mínimo de dos lumbreras para un frente de ataque, una lumbrera de inicio de las obras y otra de llegada, para poder introducir y extraer la maquinaria y el equipo de trabajo. Sin embargo, podremos considerar el uso de dos frentes de ataque para reducir con ello el tiempo de ejecución, tomando en cuenta el considerable aumento en el costo de la maquinaria.

Actualmente construir lumbreras no representa un problema, ya que se cuenta con métodos desarrollados y experimentados en la construcción de la primera etapa del Drenaje Profundo, así como en la prolongación de las obras correspondientes a los Interceptores en proceso de ejecución.

Por lo que se pueden construir lumbreras intermedias a cada 1,500 mts., para revisión y mantenimiento de la maquinaria, facilitarían la ventilación y acortarían las distancias de acarreo de los materiales suministrados o extraídos del túnel.

En este programa solamente se representan las actividades generales, excavación, revestimiento primario (ademado) e inyección de contacto.

Podemos en estos términos, analizar los rendimientos probables de excavación:

Longitud de excavación	-----	15.6 Km.
Revestimiento primario (ademado)	-----	15.6 Km.
Inyección de contacto e impermeabilización	-----	15.6 Km.

El túnel se excavará con sección circular de 6.2 m. de diámetro, el acabado definitivo se hará de concreto en sección circular, con 5.00 m. de diámetro.

A la base de la programación en la excavación de un túnel se le llama ciclo y consiste en una serie de operaciones elementales sucesivas o traslapadas, en algunos casos simultáneas que se realizan para obtener un determinado avance, estas operaciones elementales tienen una duración teórica fija, en el caso de escudos con recubrimiento primario o ademe circular formado con segmentos precolados de concreto reforzado, las operaciones se traslapan dando origen a una excavación prácticamente continua, por lo que, el avance que proporciona un ciclo se presenta al concluir la colocación de los segmentos precolados de un anillo. Luego, conocida la longitud del anillo que al multiplicarse por el número de ciclos efectuados durante el día, nos dará fácilmente el rendimiento diario.

Para el sistema de tuneleo con escudo cortador estabilizado con fluidos a presión tendremos que referirnos a las estadísticas proporcionadas por la Cfa. Tekken Co. Ltd. de Japón presentadas en la tabla (1), que contiene datos obtenidos durante la excavación de variados túneles construídos o en proceso de construcción en aquel País.

De estas experiencias, se obtiene el ciclo de excavación para anillos de sovelas con longitud de 0.75 m.:

C o n c e p t o	Tiempo (min.)
Excavación túnel con sección 6.2 m. con empuje de gatos y escudo cortador	--- 37.00
Cerrar válvulas de suministro y descarga de lodos	--- 3.00
Colocación de dovelas para formar el anillo de revestimiento	--- 45.00
Tiempos perdidos	--- 5.00
SUMA	... <u>90.00</u> min.

El rendimiento será:

Para un turno de 8.00 hrs.

$$\frac{0.75}{90} \times 480 = 4 \text{ m/t.}$$

Pero durante el día se trabajan tres turnos de 8 horas cada uno.

Se tendrá un rendimiento diario de:

$$4 \text{ m/T} \times 3 = 12 \text{ m/día.}$$

Ahora bien, para obtener el rendimiento mensual, debemos tomar en cuenta que generalmente se trabajan 25 días hábiles cada mes, el avance mensual será:

$$12 \text{ m/día} \times 25 \text{ días} = 300 \text{ m/mes.}$$

Con el rendimiento obtenido se puede saber el tiempo de ejecución de la excavación para el túnel del Interceptor Oriente con un solo frente de ataque:

Longitud de excavación 15,600 mts., rendimiento mensual obtenido:

$$\frac{15,600}{300} = 52 \text{ meses}$$

Para dos frentes de ataque, con un rendimiento promedio 300 m/mes, para cada uno de los escudos, se tendrá un avance de 600 m/mes, por lo que se tardará en concluir la excavación:

$$\frac{15,600}{600} = 26 \text{ meses}$$

Se considera que durante el avance se debe realizar simultánea

mente la inyección de contacto, el apuntalamiento de la clave, etc., que no interfiere con las operaciones básicas del ciclo de excavación.

En la gráfica de la figura (3), se presenta el programa para un frente de ataque con duración de 52 meses.

En la gráfica de la figura (4), se presenta el programa para dos frentes de ataque con duración de 26 meses.

El revestimiento definitivo a base de concreto, podrá efectuarse con los métodos de colado continuo que tan buenos resultados dieron en la construcción de los túneles del Emisor y de los Interceptores, construídos y en proceso de construcción.

CONSTRUCCION DEL TUNEL DEL INTERCEPTOR ORIENTE CON UN ESCUDO.

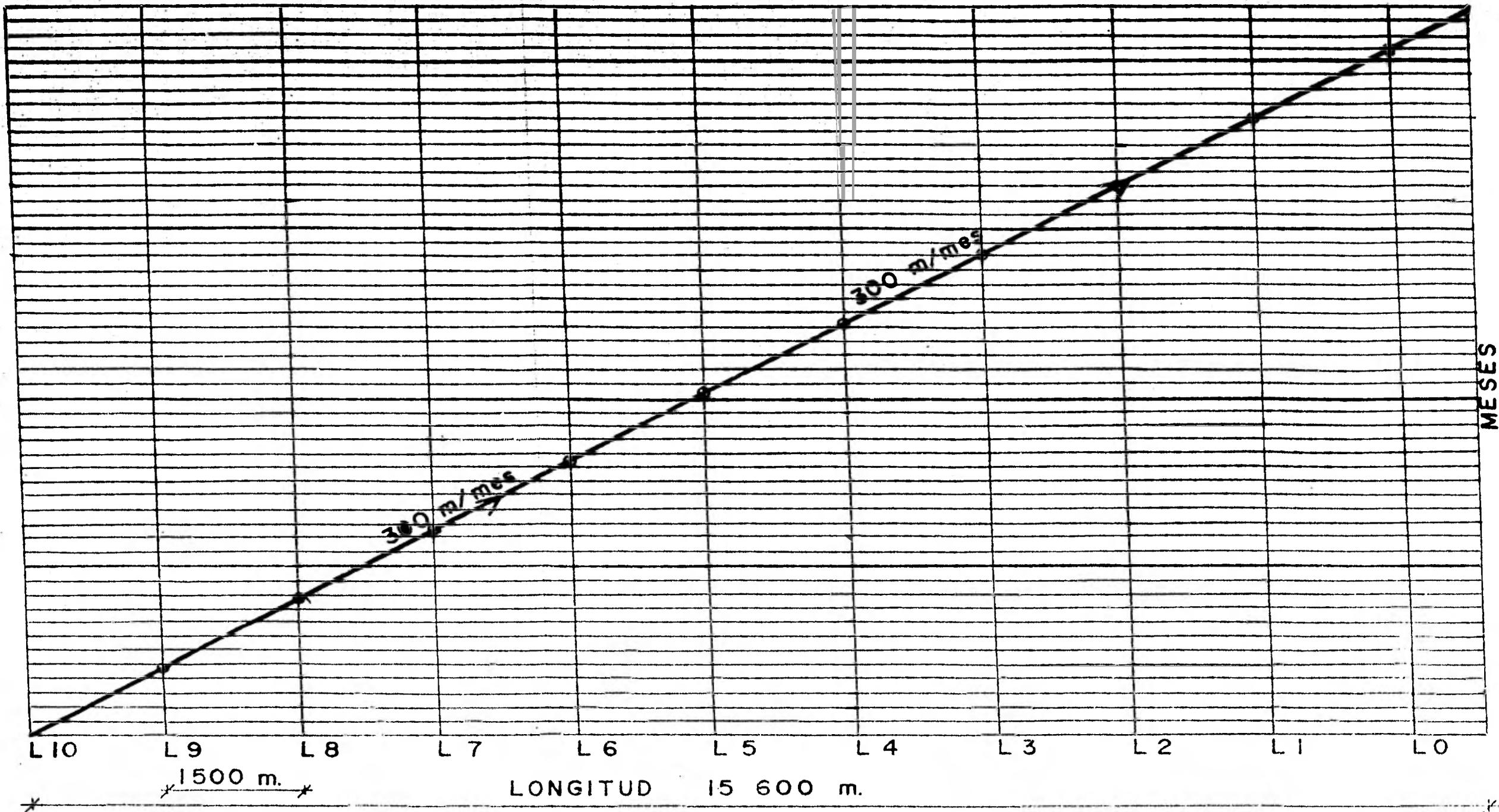


FIGURA 3

CONSTRUCCION DEL TUNEL DEL INTERCEPTOR ORIENTE CON DOS ESCUDOS.

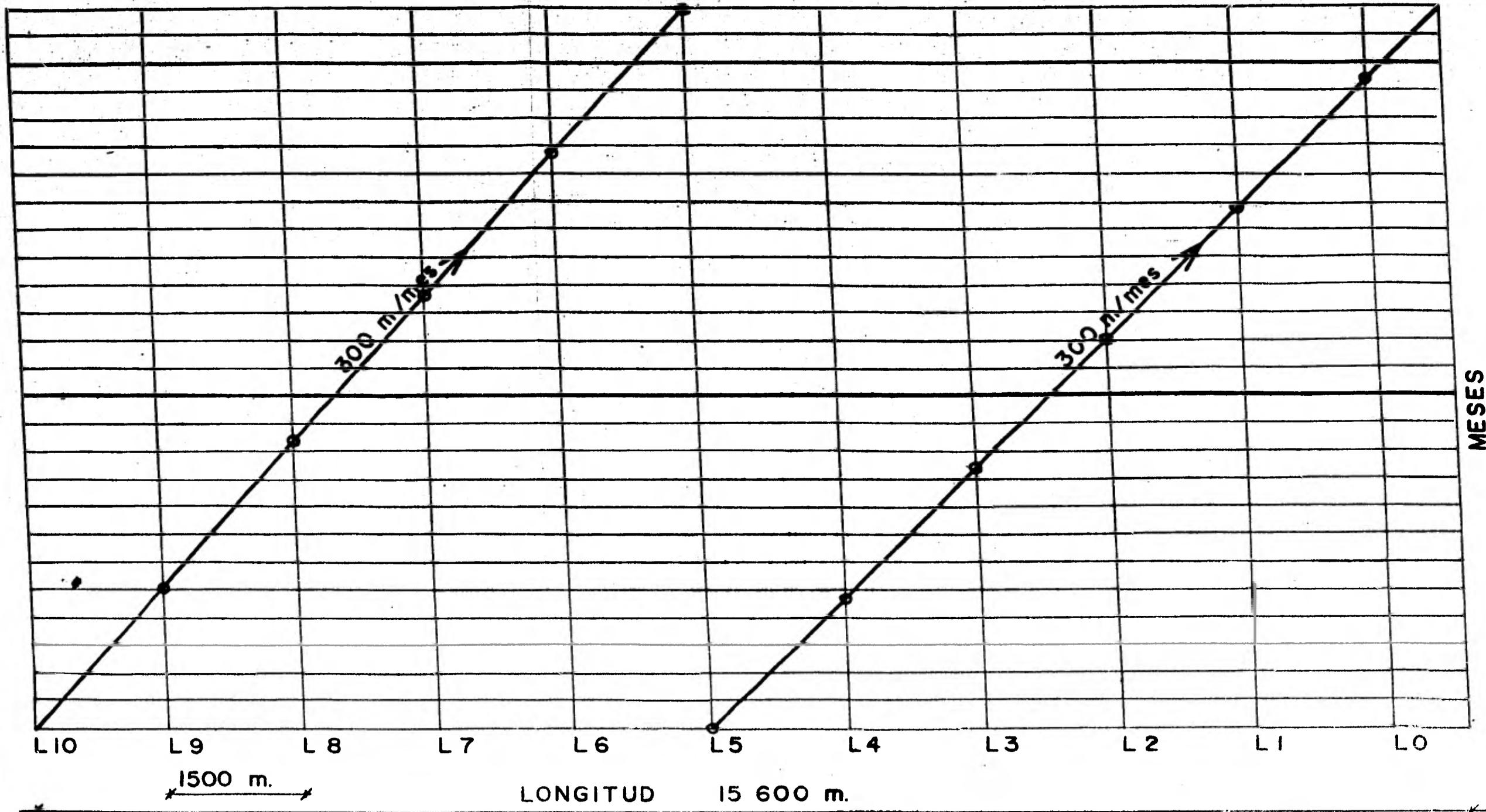


FIGURA 4.

CAPITULO III

ESTRATIGRAFIA Y PROPIEDADES DEL SUBSUELO

Desde 1949 a la fecha, se han ejecutado en la Ciudad de México un gran número de sondeos exploratorios con obtención de muestras inalteradas, las cuales se han estudiado con el fin de conocer las propiedades del subsuelo y en función de ellas, llega a soluciones adecuadas para la cimentación de edificios.

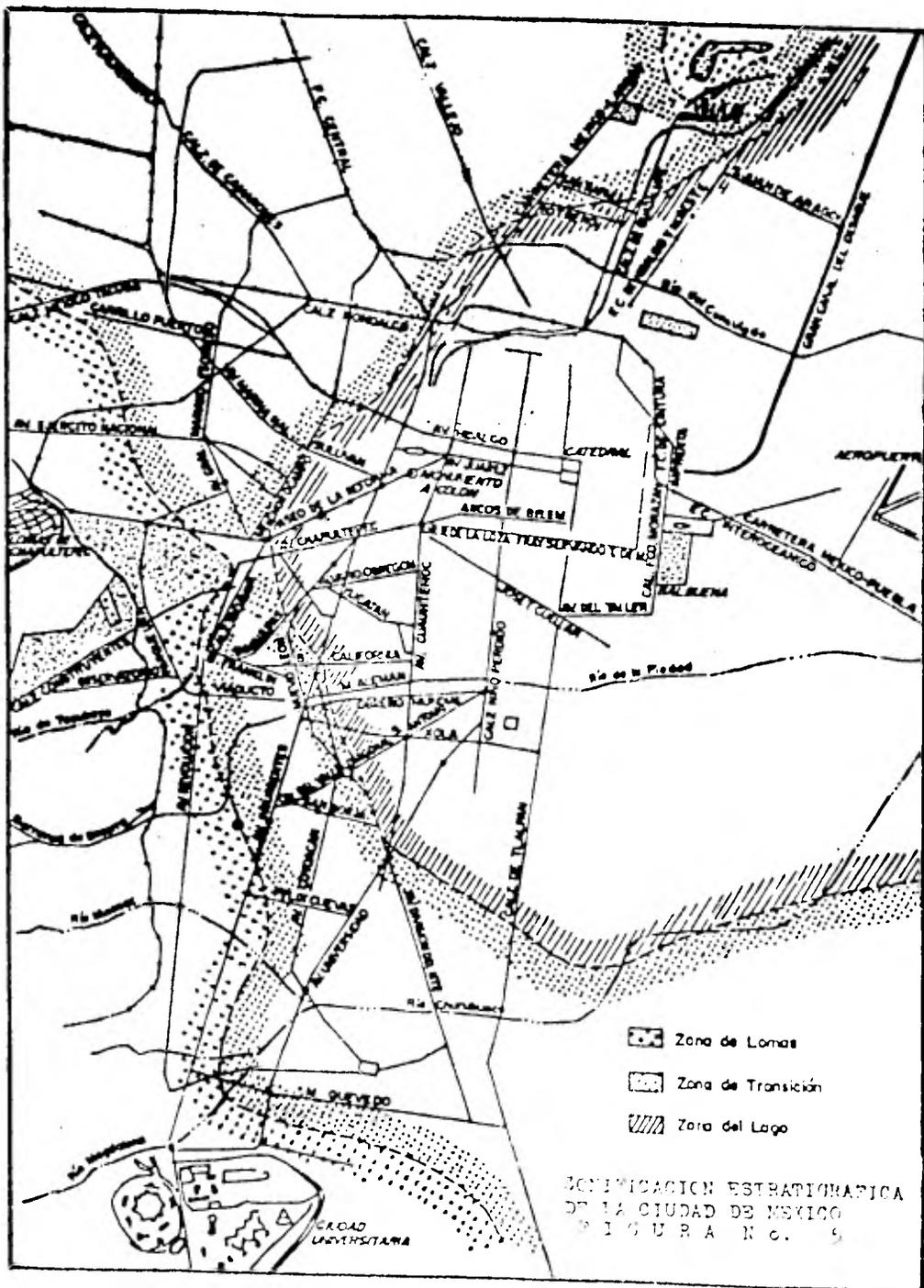
La información y experiencia adquiridas se aprovecharon para zonificar la Ciudad desde el punto de vista estratigráfico y de las propiedades del subsuelo; éstas fueron analizadas estadísticamente y correlacionadas con el contenido natural de agua.

Actualmente, es posible conocer cualitativamente las características más importantes de los materiales que forman el subsuelo en un punto dado, con solo determinar su estratigrafía y algunas de sus propiedades índice.

La ruta seguida por el Interceptor Oriente se encuentra asentada sobre las tres zonas en que tradicionalmente se ha dividido el subsuelo de la Ciudad, denominadas como:

Zona de lomas, zona de transición y zona de lago.

ZONA DE LOMAS.- Comprende las faldas de serranías y lomeríos del oeste y suroeste de la cuenca, tales como: La Sierra de Guadalupe, la Serranía de Las Cruces, las partes altas de los Cerros del Peñón de los Baños, Peñón del Marqués y el Cerro de la Estrella y el derrame basáltico del Pedregal. El subsuelo de esta zona está



	Project Name	Owner	Work Site	Geological Profile	Overburden	O.D. of Shield
1.	Harikiri Main Sewer No. 4 Work	Tokyo Metropolitan Government, Sewerage Bureau	Katsushika-ku, Tokyo	Fine sand, silty sand and clay N value=0 to 5	7 meters	5,080 mm.
2.	Ayazagawa Main Sewer No. 2 Work	Tokyo Metropolitan Government, Sewerage Bureau	Katsushika-ku, Tokyo	Fine sand, silty sand and clay N value=0 to 5	8 meters	5,080 mm.
3.	Suginami Water Supply Main Line Work	Tokyo Metropolitan Government Water Supply Bureau	Suginami-ku, Tokyo	Sand & gravel, silty silt and clay and fine sand N value=40 to 80	25 meters	3,580 mm.
4.	Kazunigaura Sewer No. 362 Work	Ibaragi Prefectural Government, Sewerage Bureau	Utsunomiya, Ibaragi Pref.	Fine sand, silty sand and clay mixed with N value=5 to 10	7 meters	2,550 mm.
5.	Akita Sewer Work	Akita City	Akita City, Akita Pref.	Sandy silt N value=0 to 10	4.5 meters	1,124 mm.
6.	Akita Sewer Work	Akita City	Akita City, Akita Pref.	Fine sand and silt mixed with N value=0 to 5	4.5 meters	2,292 mm.
7.	Yotsugi Sewer Branch Line Work	Tokyo Metropolitan Government, Sewerage Bureau	Katsushika-ku, Tokyo	Fine sand N value=15 Silty clay N value=0 to 5	7 meters	2,390 mm.
8.	Kishibe Sewer Work	Japanese National Railways	Kishibe Station Yard, Osaka	Sand & gravel and sandy, silty clay N value=30 to 50	7.5 meters	3,300 mm.
9.	Matsumoto Main Sewer No. 1 Work	Tokyo Metropolitan Government, Sewerage Bureau	Edogawa-ku, Tokyo	Sandy silt and clay N value=0 to 10	4.5 meters	2,515 mm. (1st shield machine)
10.	Matsumoto Main Sewer No. 1 Work	Tokyo Metropolitan Government, Sewerage Bureau	Edogawa-ku, Tokyo	Sandy silt and clay N value=0 to 10	3.8 meters	2,060 mm. (2nd shield machine)
11.	Sakura Water Supply Work	Sakura City and Keisei Railway Company	Sakura City, Chiba Pref.	Fine sand N value=5 to 15	4.0 meters	1,210 mm.
12.	Shikaoji Wakina Main Sewer Work	Kesennuma City, Sewerage Bureau	Kesennuma City, Miyagi Pref.	Sandy silt N value=3 to 8	7.5 meters	2,135 mm.
13.	Toyama Sewer Work	Toyama City, Sewerage Bureau	Toyama City, Toyama Pref.	Silty sand and silty clay N value=15 to 30	6.5 meters	2,135 mm.

Length of Tunnel	O.D. of Liner	Finished I.D.	Excavation Period	Daily Advance Speed	Monthly Advance Speed	Number of Shift
675 meters	4,800 mm.	4,000 mm.	Feb., to May, 1973	6.8 meters	178.0 meters	1.
1,057.2 meters	4,800 mm.	4,000 mm.	March, to July, 1974	6.7 meters	210.0 meters	1.
785.0 meters	3,400 mm.	2,440 mm.	Feb., to Aug., 1975	5.8 meters	147.2 meters	1.
622.0 meters	2,400 mm.	1,800 mm.	Mar., to May, 1975	10.7 meters	304.0 meters	2.
71.0 meters	1,080 mm. (O.D. of Precast Concrete Pipe)	900 mm. (Precast Concrete Pipe)	April 14 to 30, 1975	4.5 meters		2.
236.0 meters		1,580 mm.	May, to June, 1975	7.3 meters		2.
627.0 meters	2,250 mm.	1,680 mm.	1st section (132.3m) Jul., to Sept., 1975 2nd section (136.8m) Sept., to Oct., 1975 3rd section (50.4m) Dec. 8 to 19, 1975 4th section (498.0m) Jan., to Apr., 1976	2.8 meters 4.1 meters 4.1 meters 6.0 meters		5.
511.0 meters	3,150 mm.	2,500 mm.	A line Sept., 1975 to Feb., 1976 B line Mar., to June, 1976	4.6 meters 4.6 meters	51.0 meters 63.0 meters	2.
434.45 meters	2,500 mm. (O.D. of Precast Concrete Pipe)	2,030 mm.	1st section (44.25m) Jan., to Feb., 1976 2nd section (75.0m) Feb., to Mar., 1976 3rd section (75.1m) Mar. 19 to 31, 1976 4th section (84.6m) Apr. 9 to 24, 1976 5th section (48.0m) May 5 to 12, 1976 6th section (98.5m) June 3 to 16, 1976	2.95 meters 5.0 meters 6.3 meters 6.3 meters 6.3 meters 6.4 meters		9.
315.5 meters	2,054 mm. (O.D. of Precast Concrete Pipe)	1,680 mm.	7th section (142m) July 6 to 22, 1976 8th section (74.5m) Aug. 12 to 22, 1976 9th section (89.0m) Sept. 2 to 12, 1976	8.8 meters 5.8 meters 9.9 meters		
146 meters	1,200 mm. (O.D. of Precast Concrete Pipe)	1,000 mm. (Precast Concrete Pipe)	March, to June, 1977	4.8 meters		2.
97.45 meters	2,120 mm. (O.D. of Precast Concrete Pipe)	1,800 mm. (Precast Concrete Pipe)	Jan., to Feb., 1977	3.5 meters		2.
440.0 meters	2,120 mm. (O.D. of Precast Concrete Pipe)	1,800 mm. (Precast Concrete Pipe)	1st section (150m) Dec. 6 to 24, 1976 2nd section (183m)	7.9 meters 5.9 meters		2.

TABLA I (a)

Project No.	Project Name	Owner	Work Site	Geological Profile	Overburden	O.D. of Shield
16.	Furukawa Main Sewer No. 5 Work	Tokyo Metropolitan Government, Sewerage Bureau	Shibuya-ku, Tokyo	Sand and gravel N value=80	8.5 meters	3,700 mm.
15.	Kita-ku, Utility Tunnel Work	Tokyo Metropolitan Government, Water Supply Bureau	Kita-ku, Tokyo	Fine sand and gravel N value=80	8.5 meters	7,170 mm.
16.	Takanodai Water Supply Main Line Work	Tokyo Metropolitan Government, Water Supply Bureau	Nerima-ku, Tokyo	Sand & gravel mixed with clay N value=40 to 80	Upper 12 meters Lower 28 meters	3,550 mm.
17.	Nishi Kawaguchi Water Supply Work	Saitama Prefecture, Water Supply Bureau	Kawaguchi City, Saitama Pref.	Sandy silt and silty sand N value=0 to 5	7.5 meters	2,180 mm.
18.	Kanigawa Cable Pipe Line Work	Tokyo Electric Power Company, Chiba Branch Office	Chiba City, Chiba Pref.	Sand N value=3 to 80	8 to 18 meters	2,380 mm.
19.	Kita Chiba Water Supply Work	Chiba Prefecture, Water Supply Bureau	Nagareyama City, Chiba Pref.	Sand and clay N value=30 to 80	18.5 meters	3,550 mm.
20.	Kodo Sewer Work	Tokyo Metropolitan Government, Sewerage Bureau	Adachi-ku, Tokyo	Sand N value=3 to 10	8.5 meters	2,300 mm. (1) 2,900 mm. (2)
Note: Project No. 20 will have two different size tunnels from one shaft.						
21.	Kanazawa Main Sewer Work	Yokohama City, Sewerage Bureau	Yokohama City, Kanagawa Pref.	Fine sand and silty sand mixed face N value=15	10.7 meters	4,880 mm.
22.	Aohori Sewer Work	Kimitu, Futtu Sewerage Association	Futtu City, Chiba Pref.	Silty sand, gravel and coarse sand mixed face N value=15 to 40	15 to 38 meters	2,515 mm.
23.	Water Supply Tunnel Under Nagoya Harbor	Aichi Prefecture, Water Supply Bureau	Tookai City, Aichi Pref.	Gravel and clay mixed face N value=0 to 20	11 to 35 meters	3,850 mm.
24.	Hon-cho Sewer Work	Funabashi City, Sewerage Bureau	Funabashi City, Chiba Pref.	Shell and medium sand mixed face N value=10 to 30	3 meters	1,450 mm.
25.	Okonomiya-cho Sewer Branch Line Work	Edogawa-ku	Edogawa-ku, Tokyo	Silty sand N value=0 to 5	7 to 8 meters	1,520 mm. 1,800 mm.
26.	Understructure of No. 652 Section & Ayasagawa Main Sewer No. 4 Work	Taito Rapid Transit Authority	Katsushika-ku, Tokyo	Clayey silt N value=0	8 meters	4,950 mm.
27.	52-South No. 401 Water Supply Work (Main 6-3-1 Section)	Saitama Prefecture	Kawaguchi City, Saitama Pref.	Sandy silt N value=0	4.5 meters	1,965 mm.
28.	East of Sewers Station Sewer Work	Sewers City	Sewers City, Chiba Pref.	Fine sand N value=0	4.5 meters	1,500 mm.
29.	Teganuma Sewer Line Work	Chiba Prefecture	Abiko City, Chiba Pref.	Clay & fine sand N value=0 to 30	12 meters	4,150 mm.

Length of Tunnel	O.D. of Liner	Finished I.D.	Excavation Period	Daily Advance Speed	Monthly Advance Speed	Number of Shaft
788.0 meters	3,880 mm.	2,800 mm.	Jan., to Feb., 1977 3rd section (137m) Mar. 2 to 30, 1977 Apr., 1977 to Nov., 1978	5.3 meters		2.
888.0 meters	7,000 mm.	6,000 mm.	Sep., 1977 to Aug., 1978			1.
1,041.0 meters (Two upper and lower levels)	3,400 mm.	2,400 mm.	Oct., 1977 to Jul., 1978			2.
782.0 meters	2,080 mm.	900 mm.	Mar., to June, 1977	9.7 meters	230 meters	1.
240.0 meters	2,280 mm.	2,000 mm. (Primary lining only)	Dec., 1977 to Mar., 1978			2.
1,180 meters	3,400 mm.	2,400 mm.	Oct., 1977 to Oct., 1978			1.
348.0 meters(1) 388.0 meters(2)	2,180 mm. (1) 2,780 mm. (2)	1,800 mm(1) 2,000 mm(2)	Aug., 1977 to Sept., 1978			1.
288.0 meters	4,880 mm.	3,750 mm.	Oct., 1977 to Sept., 1978			
22.0 meters	2,500 mm. (O.D. of Precast Concrete Pipe)	2,000 mm. (Precast Concrete Pipe)	Nov., 1976 to Feb., 1977			1.
2,108 meters	3,700 mm.	2,500 mm.	July 1977 to Mar., 1978			1.
788.0 meters	1,430 mm. (O.D. of Precast Concrete Pipe)	1,200 mm. (Precast Concrete Pipe)	Jun., 1977 to Dec., 1977			6.
230.0 meters	1,600 mm. (O.D. of Precast Concrete Pipe)	1,360 mm. (Precast Concrete Pipe)	Jul., 1977 to Mar., 1978			4.
230.0 meters	1,780 mm. (O.D. of Precast Concrete Pipe)	1,500 mm. (Precast Concrete Pipe)				
482 meters	4,800 mm.	4,000 mm.	Under Preparation			2.
785 meters	1,950 mm. (O.D. of Precast Concrete Pipe)	1,650 mm.	Nov., 1977 to Mar., 1978			4.
136 meters	1,800 mm. (O.D. of Precast Concrete Pipe)	1,360 mm.	Dec., 1977 to Jul., 1978			2.
909 meters	4,000 mm.	3,200 mm.	Under Preparation			1.

TABLE I (b)

	Project Name	Owner	Work Site	Geological Profile	Overburden	O.D. of Shield
30.	Nambu Water Supply No. 1 Work	Siga Prefecture	Yasu Mori, Siga Pref.	Clay and silt N value=0 to 25	7 meters	3,580 mm.
31.	Kanagawa Main Sewer No. 3 Work	Yokohama City Sewerage Bureau	Yokohama City, Kanagawa Pref.	Silt N value=0 to 25	10 meters	4,600 mm.
32.	Main Sewer Line No. 1 Section No. 3 Work	Ogaki City	Ogaki City, Gifu Pref.	Silt N value=10	6.5 meters	1,878 mm.
33.	Funabashi Honcho Sewer Extension Work	Funabashi City	Funabashi City, Chiba Pref.	Sand N value=25	4 meters	1,445 mm.
34.	Funabashi Daizingu Sewer Line Work (passing under railway)	Keisei Railway Company	Funabashi City, Chiba Pref.	Sandy silt N value=5 to 15	3.5 meters	1,445 mm.
35.	Tanetsu Main Sewer Line Work	Kobe City	Kobe City, Hyogo Pref.	Sand & gravel N value=10 to 30	5.5 to 6 meters	2,470 mm.
36.	Marunouchi Main Sewer No.3 Work	Tsu City	Tsu City, Mie Pref.	Sandy silt and gravel N value=10	6.0 to 6.5 meters	1,985 mm.

MEMO

Length of Tunnel	O.D. of Liner	Finished I.D.	Excavation Period	Daily Advance Speed	Monthly Advance Speed	Number of
196 meters	3,400 mm.	3,100 mm.	Nov., 1977 to Dec., 1977			1.
544 meters	4,550 mm.	4,150 mm.	Mar., 1978 to Sept., 1978			1.
388 meters	1,900 mm. (O.D. of Precast Concrete Pipe)	1,650 mm. (Precast Concrete Pipe)	Feb., 1978 to Sept., 1978			4.
788 meters	1,430 mm. (O.D. of Precast Concrete Pipe)	1,200 mm. (Precast Concrete Pipe)	Jun., 1977 to Mar., 1978			8.
18 meters	1,430 mm. (O.D. of Precast Concrete Pipe)	1,200 mm. (Precast Concrete Pipe)	Feb., 1978 to Nov., 1978			1.
888 meters	2,380 mm. (O.D. of Precast Concrete Pipe)	1,650 mm. (Precast Concrete Pipe)	Under Preparation			1.
176.8 meters	1,900 mm. (O.D. of Precast Concrete Pipe)	1,650 mm. (Precast Concrete Pipe)	Dec., 1977 to July, 1978			2.

MEMO

TABLA I (c)

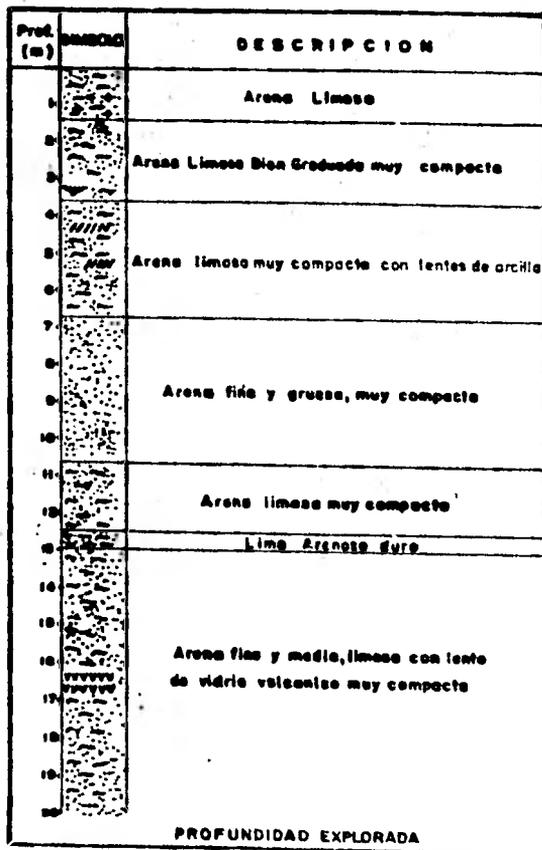
formado por terrenos compactos, arenolimosos con alto contenido de grava unas veces, y otras, por tobas pumíticas bien cementadas, también cuenta con depósitos eólicos de arena fina y uniforme. Sus materiales se caracterizan por presentar una gran resistencia al corte y baja deformabilidad; sin embargo, la existencia de galerías y cavernas formadas por la explotación de minas de arena y grava, -- obliga a una exploración minuciosa cuando se desea cimentar estructuras.

En la figura (6) se muestra un perfil típico de la Zona de Lomas.

ZONA DE TRANSICION.- Se localiza entre las serranías del Poniente y el fondo del Lago de Texcoco. Esta zona es la más interesante, ya que ocurren los cambios más notables en la estratigrafía y por lo tanto, en propiedades mecánicas. Estratigráficamente en su superficie cuenta con depósitos arcillosos o limosos orgánicos de la Formación Becerra, continúan estratos de arcilla volcánica muy compresibles y de espesores variables. Intercalados con capas de arena limosa compacta o arena limpia, éstos a su vez descansan sobre potentes mantos cuyos materiales predominantes son gravas y arenas.

En la figura (7) se muestra el perfil estratigráfico correspondiente a la Zona de Transición. Sus propiedades índice se presentan en la tabla (II).

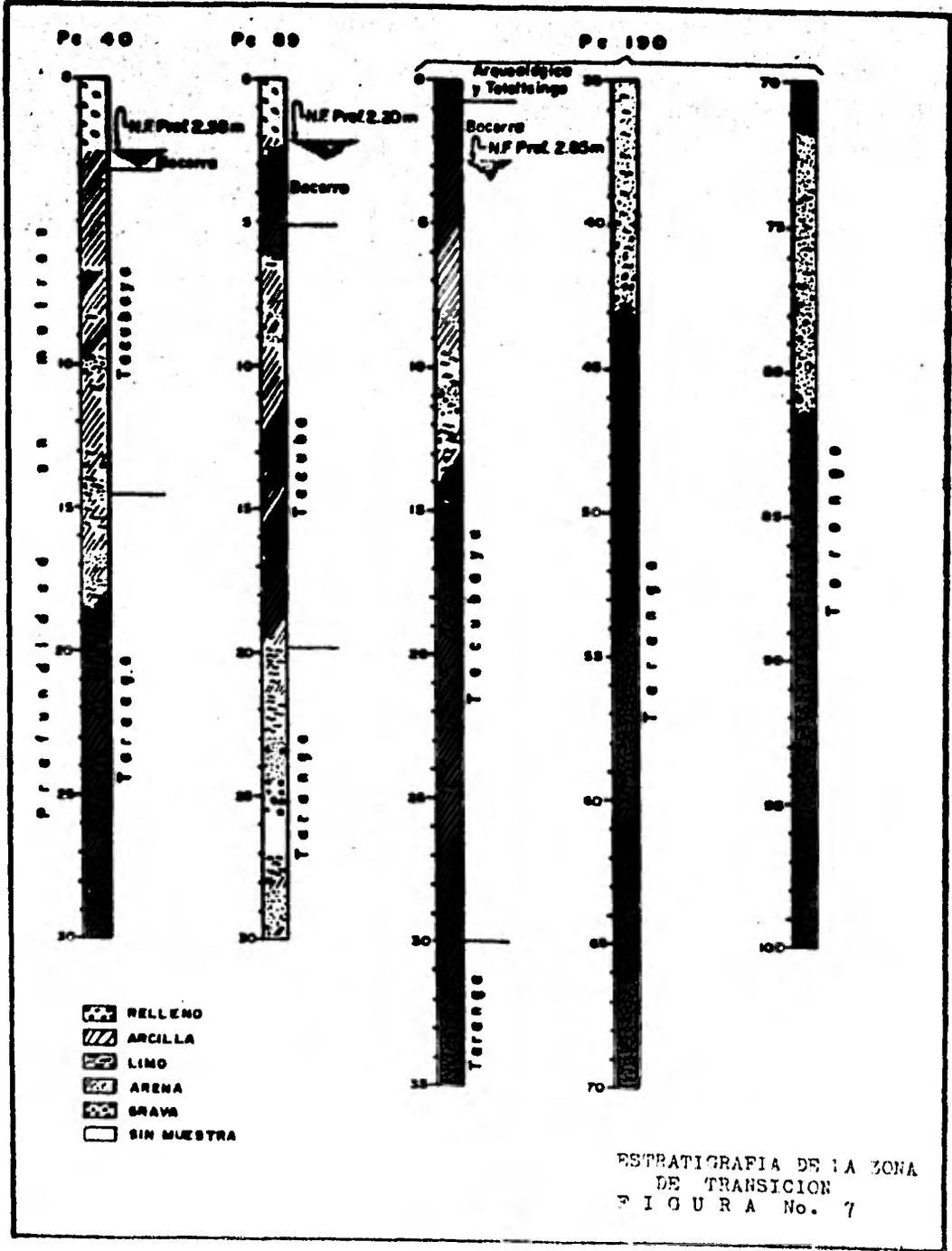
ZONA DE LAGO.- Se le da este nombre a la formación típica de la parte Centro y Oriente de la Ciudad de México construida sobre el fondo del Lago de Texcoco. Se caracteriza por tener un subsuelo con grandes espesores de arcillas lacustres de origen volcánico muy compresibles, de baja resistencia al corte y alto contenido de agua. Su estratigrafía en general, es regular, aunque cada estrato suele ser de espesor variable. La integran los cinco estratos principa-



SÍMBOLOS
 ARCILLA
 LIMOS
 ARENA
 VIDRIO VOLCÁNICO

ESTRATIGRAFIA DE LA ZONA DE LOMAS

FIGURA No. 1



TAPTA II
GRUPO 4

	Wi	Ss	ei	LL	LP	Ip	a_{vm}	a_{vp}		q_u	Md
	%	-	-	%	%	%					
Manto Superficial	74	2.5	2.1	87.3	43	38.4	-	-	-	0.84	52.1
Formación arcillosa superior	225	24	5.6	243	78.1	164	0.52	1.1	1.57	0.91	37.2
Capa Duro	67	25	1.8	69	44.7	23.9	-	-	-	1.22	55.2
Formación arcillosa inferior	No. existe ó bien está incluido en la capa superior										
Depositos profundos	70	2.5	2.2	104	50.5	53.5	-	-	-	1.48	72.1

EN LA TABLA

Wi Contenido natural de agua inicial

Ss Densidad de sólidos

ei Relación de vacías

LL Limite liquido.

a_{vm} Coeficiente de compresibilidad
maximo

q_u Resistencia a la compresión no
confinada.

LP Limite plástico

Ip Indice de plasticidad.

a_{vm} Coeficiente de compresibilidad
en recompresion.

a_{vp} Coeficiente de compresibilidad
en el intervalo de preconsolidación

Md Módulo de deformación

les siguientes, descritos a partir de la superficie del terreno.

Manto Superficial: Compuesto por rellenos artificiales heterógenos y arcillolimosos, o bien, por depósitos arenoarcillosos o limosos con abundancia de restos arqueológicos.

Esta zona corresponde a las formaciones geológicas Barrilaco y Totoltzingo; generalmente ocupa los primeros 5 mts. y en algunos puntos de la Ciudad llegan hasta 10 metros de profundidad.

Formación Arcillosa Superior: Estrato formado por depósitos lacustres de arcillas volcánicas de alta compresibilidad, de variados colores y de consistencia blanda a media, intercaladas con pequeños lentes de arena. Su espesor varía entre 15 y 32 metros. Estos suelos corresponden a la formación Tacubaya.

Primera Capa Dura: Compuesta de suelos limoarenosos o rígidos, cementados con carbonato de calcio. De unos tres metros de espesor, se localiza aproximadamente a 33 metros de profundidad. Presenta un contenido de agua variable entre el 20 y 100%, considerándose un contenido de agua promedio del 50%.

Formación Arcillosa Inferior: Constituida de lentes compactos de arcilla volcánica y de suelos limosos interestratificados con la arcilla. Sus características son semejantes a las de la Formación Superior, aunque más comprimidas y resistentes. El espesor de este estrato oscila entre 4 y 14 metros.

Depósitos Profundos: Se encuentran aproximadamente a 50 metros de profundidad, están constituidos por suelos arenosos finos, gravas arenosas, limos arcillosos y arenas limosas en estado compacto.

Los tres últimos estratos corresponden a la formación Tarango.

En la figura (8) se presenta un corte estratigráfico de la Zona del Lago.

Las propiedades índice de esta zona se presentan en las tablas (III), (IV) y (V).

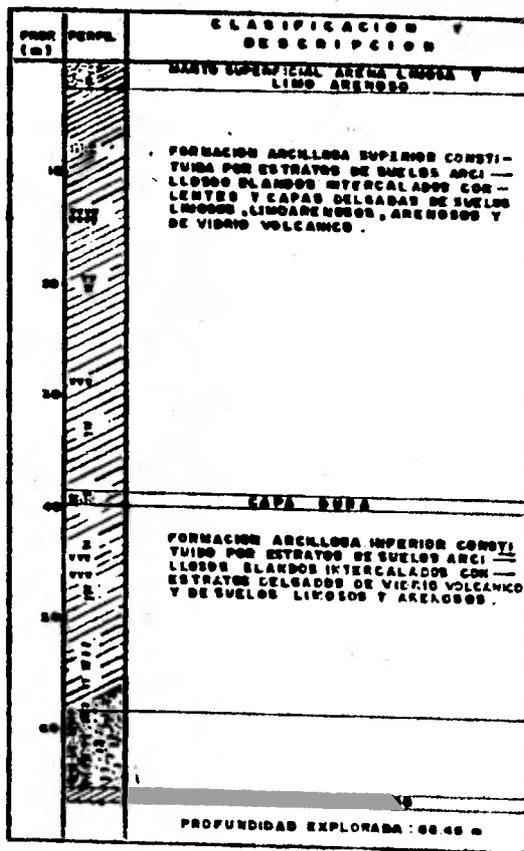
En su primera etapa constructiva, el Interceptor Oriente se alojó en los depósitos lacustres entre el Gran Canal y la Lumbraera 8 C. De este punto a la lumbraera 12, la excavación se realizó en depósitos de lavas, brechas y tobas del complejo volcánico estratificado compuesto por los Cerros de Guerrero y Santa Isabel. En el tramo comprendido entre las lumbraeras 8 B y 11 se cruzó una falla importante, la cual produjo problemas de caídos durante la excavación.

Entre las lumbraeras 12 y 13, el interceptor volvió a cruzar los estratos del Complejo Santa Isabel, además las lavas sanas del Cerro del Chiquihuite. Entre la lumbraera 13 y la lumbraera 0, el túnel cortó sin mayores dificultades la secuencia limoarenosa poco permeable del Valle de Cuautitlán.

En la figura (9) se muestra el perfil geológico atravesado por el Interceptor Oriente en su primera etapa.

En su segunda etapa constructiva, la excavación se tendrá que realizar en la zona del Lago, en la que por las propiedades del subsuelo los procedimientos de excavación convencionales y mecánicos, utilizados en la primera etapa, no son convenientes.

El perfil estratigráfico de la 2a. etapa se muestra en la figura (10).



SIMBOLOS

-  ARCILLA
-  LIMO
-  ARENA
-  FORRES
-  VIDRIO VOLCANICO

ESTRATIGRAFIA DE LA ZONA DEL LAGO QUE NO HA ESTADO SUJETA A CONSTRUCCIONES

FIGURA No. 8

TABLA III
GRUPO 1

	Wi	Ss	ei	LL	LP	Ip	α_{vm}	α_{vp}	α_{vmax}	q_u	Md
	%	-	-	%	%	%	cm ² /kg	cm ² /kg	cm ² /kg	kg/cm ²	kg/cm ²
Manto Superficial	113.2	2.5	3.0	131	591	72.3	-	-	-	1.14	127
Formación arcillosa superior	344.8	2.4	8.4	327	902	236	1.10	2.39	3.12	0.48	23
Capa Oura	57.9	2.6	1.4	58	452	13.4	-	-	-	2.43	100
Formación arcillosa inferior	228	2.5	5.9	219	693	144	0.37	0.77	1.11	0.91	45
Depósitos profundos	67.7	2.5	1.9	92	485	45	-	-	-	2.25	143

EN LA TABLA

- | | |
|---|---|
| Wi Contenido natural de agua inicial | LP Limite plástico |
| Ss Densidad de sólidos | Ip Indice de plasticidad. |
| ei Relación de vacíos | α_{vm} Coeficiente de compresibilidad en recompresion. |
| LL Limite liquido. | α_{vp} Coeficiente de compresibilidad en el intervalo de preconsolidación. |
| α_{vmax} Coeficiente de compresibilidad máximo | Md Módulo de deformación |
| q_u Resistencia a la compresión no confinada. | |

GRUPO 1.- Pertenece a terrenos de la zona del lago no sometidos a sobrecarga en la superficie, ni a pérdidas de presión importantes en los acuíferos del subsuelo.

GRUPO 2.- Terrenos en la zona del lago sobre los que existen construcciones ligeras y son importantes las pérdidas de presión en los acuíferos del subsuelo (bombeo).

GRUPO 3.- Ubicados en la zona del lago, afectados por construcciones pesadas y por un bombeo intenso y prolongado.

TABLA IV
GRUPO 2

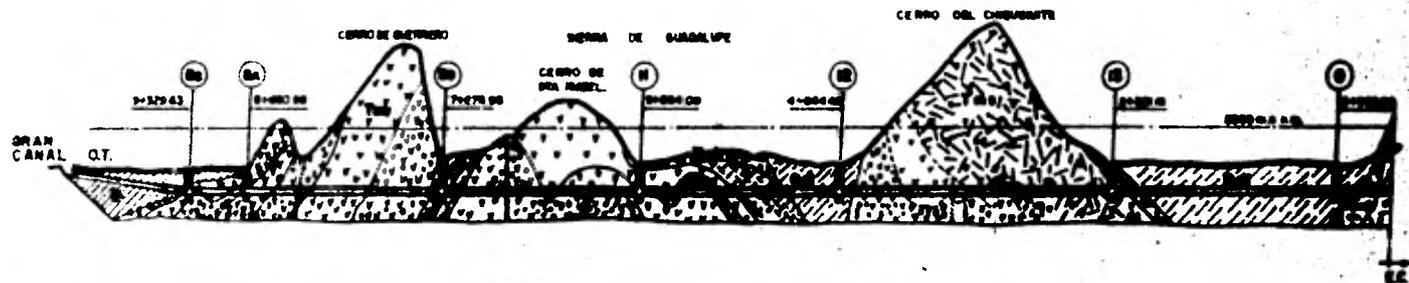
	Wi	Ss	e _i	LL	LP	Ip	a _{vm}	a _{vp}	a _{v máx}	q _u	Md
	%	-	-	%	%	%	cm ² /kg	cm ² /kg	cm ² /kg	kg/cm ²	kg/cm ²
Monte Superficial	109	2.5	3.1	104	54	51	-	-	-	0.77	41.6
Formación arcillosa superior	292	2.4	7.1	298	86	213	0.79	1.76	2.55	0.81	23.6
Capa dura	80	2.3	2.1	96	49	46	-	-	-	1.09	46.6
Formación arcillosa inferior	190	2.4	4.5	209	68	141	0.29	0.61	0.84	1.49	61.6
Depositos profundos	55	2.5	2.1	117	50	64	-	-	-	2.60	26.5

TABLA V
GRUPO 3

	Wi	Ss	e _i	LL	LP	Ip	a _{vm}	a _{vp}	a _{v máx}	q _u	Md
	%	-	-	%	%	%	cm ² /kg	cm ² /kg	cm ² /kg	kg/cm ²	kg/cm ²
Monte Superficial	95	2.5	2.8	103	54	50	-	-	-	0.91	49.1
Formación arcillosa superior	263	2.4	6.4	283	86	197	0.58	1.25	1.84	0.90	40.2
Capa Dura	48	2.5	1.4	51	38	15	-	-	-	1.65	104.4
Formación arcillosa inferior	177	2.4	4.4	214	70	144	0.19	0.39	0.57	1.94	84.6
Depositos profundos	52	2.5	1.3	71	42	32	-	-	-	2.72	57.8

EN LAS TABLAS ANTERIORES

- Wi Contenido natural de agua inicial .
 Ss Densidad de sólidos .
 e_i Relación de vacíos .
 LL Limite líquido .
 a_{v máx} Coeficiente de compresibilidad máximo .
 q_u Resistencia a la compresión no confinada .
- LP Limite plástico .
 Ip Indice de plasticidad .
 a_{vm} Coeficiente de compresibilidad en recompresion .
 a_{vp} Coeficiente de compresibilidad en el intervalo de preconsolidación .
 Md Módulo de deformación .



PERFIL GEOLOGICO DEL INTERCEPTOR DEL ORIENTE - 12 STADA

S I M B O L O G I A

- | | | | |
|--|--|--|--|
| | | | |
| | | | |

FIG. 9

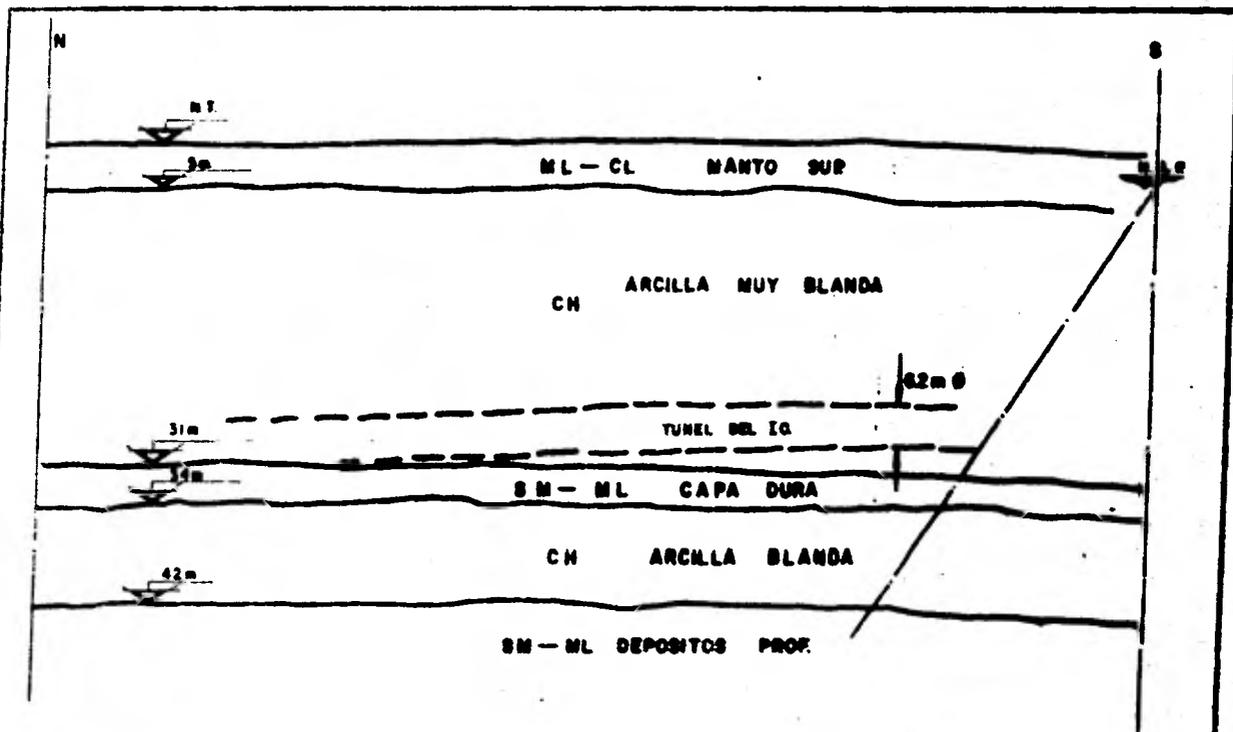


Fig. 10 ESTACIONARIA ESQUEMATICA DEL INTERCEPTOR ORIENTE.
 2ª ETAPA

CAPITULO IV

CONSTRUCCION DE TUNELES MEDIANTE ESCUDO CORTADOR CON FRENTE ESTABILIZADO CON FLUIDOS A PRESION

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En el subsuelo del Valle de México, se han construido o están en proceso de construcción varios túneles que se desarrollan tanto en la formación arcillosa blanda típica de la zona, como en formaciones periféricas de tipo arenoso o de abanico aluvial.

Cuando los túneles se construyen en campo abierto, las pérdidas del material en el interior de la galería, así como los asentamientos en la superficie del suelo causados por la excavación, tienen poca importancia; salvo que afecten la estabilidad de los ademes. Pero cuando estos túneles son construidos en áreas urbanas muy pobladas, los movimientos superficiales afectan construcciones vecinas.

La excavación de un túnel produce en el suelo, movimientos horizontales y verticales a su alrededor, ocasionando con esto un asentamiento en la superficie del terreno.

Actualmente podemos suponer que el volumen del asentamiento en la superficie del terreno, es igual al volumen de material que se retira en exceso, del volumen de excavación de la propia galería.

El tamaño de los asentamientos estará ligado a la naturaleza del suelo y podrá reducirse con un buen trabajo de ademado.

Las pérdidas de suelo dependen también del método constructivo, de la influencia del suelo y de las condiciones del agua subterránea.

En los suelos granulares sin cohesión, es normal que exista flujo de arena al interior del túnel, sobre todo en suelos sueltos que pueden provocar asentamientos importantes, éstos pueden controlarse dándoles cohesión por inyectado o bien ademando por completo en el techo, las paredes y el frente de excavación. En túneles bajo el N.A.F., lo más conveniente es abatir éste y drenar los suelos hasta crearles la cohesión aparente.

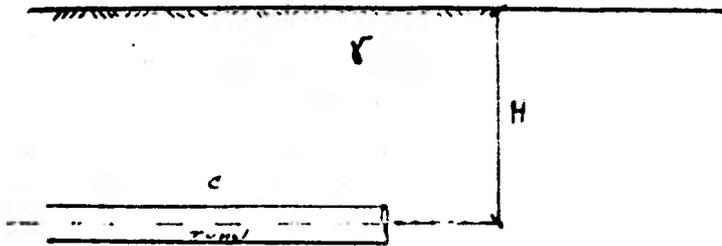
En los suelos con cohesión y fricción, podemos incluir varios tipos de suelos como son: arenas arcillosas, arcillas arenosas, limos plásticos, algunos de los suelos residuales, los loes y muchas arcillas calcáreas. Las pérdidas de suelo y los asentamientos de estos materiales suelen ser pequeños y se pueden reducir acufando el ademe contra el suelo.

Para las arcillas firmes no expansivas, se pueden tener comportamientos muy favorables, en cuanto a pérdida de suelo, pero pueden presentar fisuración muy desarrollada y como no son muy sensibles al flujo de agua, las pérdidas de suelo que tienen lugar se producen por medio de flujo plástico hacia el interior del túnel, a través del ademe provisional que es a base de marcos separados y retaque de madera.

En las arcillas blandas saturadas, al excavar un túnel se produce una alteración estructural en el suelo que lo rodea que puede extenderse varios diámetros, esta alteración hace que las pérdidas de suelo tiendan a ser de gran magnitud a causa de un flujo plástico poco perceptible pero continuo hacia el centro de la galería, lo que ocasiona una depresión en la superficie del terreno.

Un efecto importante en estos túneles es que los asentamientos usuales debidos a pérdidas de suelo, pueden ir seguidos por otros causados por la consolidación de la zona de remoldeo en torno a la galería, bajo el peso del suelo.

El concepto de carga sobre el techo, está basado en que una cierta altura de material debe ser soportada por el ademe, que puede valuarse como la presión al eje del túnel.



γ = Peso volumétrico del material.

H = Profundidad al eje del túnel.

C = Cohesión del suelo en prueba no drenada.

La presión vertical total a la profundidad media del túnel es
= γH

En las arcillas, las condiciones de estabilidad del frente de ataque dependen de la resistencia no drenada de las mismas; la resistencia a largo plazo, en términos de esfuerzo efectivo, solamente tendrá importancia si el frente se deja expuesto y sin soporte durante mucho tiempo.

Es posible analizar las condiciones de estabilidad a corto plazo del frente de excavación de un túnel en arcilla, en la práctica pueden influir muchos factores que la teoría no toma en cuenta.

Broms y Bennermark analizaron el equilibrio de una masa de arcilla en torno a una ranura estrecha y horizontal, practicada en una pared que la sostenga. Basaron sus estudios en una superficie cilíndrica de falla como la que se muestra en la figura (11), la falla de la arcilla ocurre cuando la presión vertical total correspondiente al centro de la ranura horizontal (que representa el frente de excavación de un túnel), llega a exceder 6.28 veces el valor de la cohesión C (resistencia en prueba no drenada de las arcillas).

$$PH = YH > 6.28C$$

Si la ranura se transformara en un orificio circular, la relación anterior se elevaría a 7.5. Si el ancho de la ranura fuera grande en comparación a la profundidad a la que está situada, la estabilidad puede ser analizada conforme a la figura (12), en este caso el valor crítico de la relación $\frac{YH}{C}$, se determina con la siguiente ecuación:

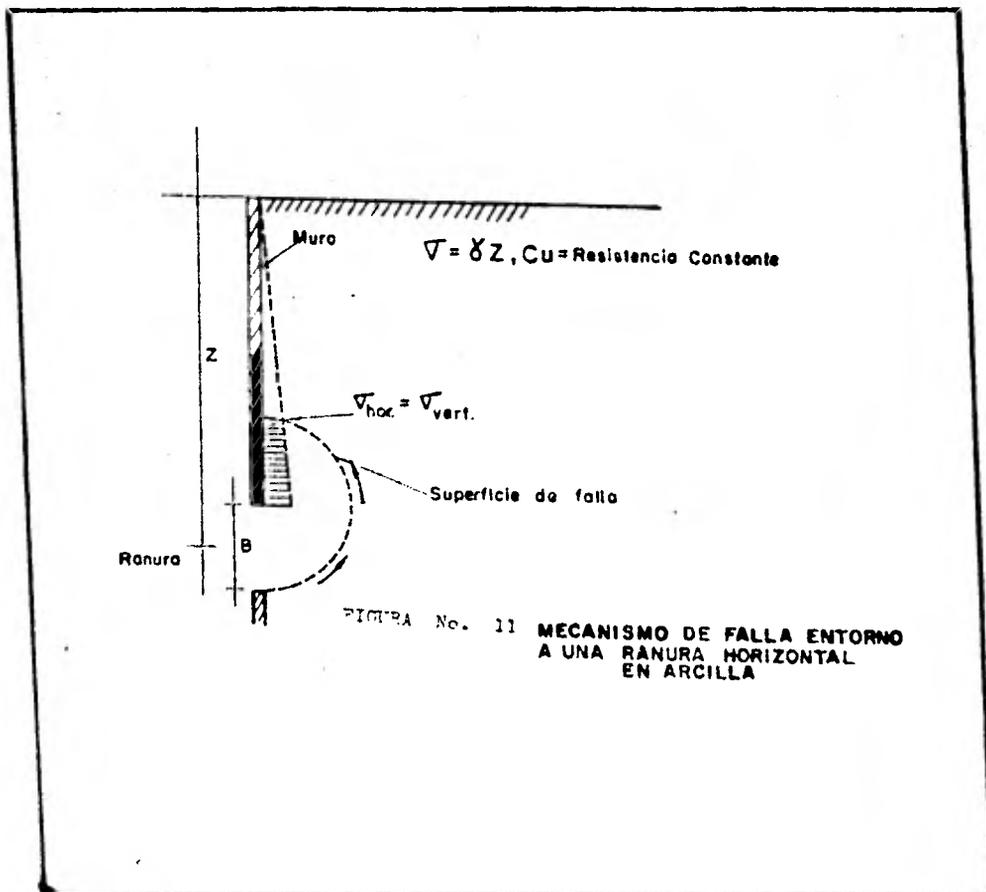
$$\left(\frac{YH}{C}\right)_{\text{crit}} = \frac{2 \frac{H}{D} + \pi - 1}{1 + \frac{D}{6H}}$$

A la relación de $\frac{YH}{C}$ se le conoce como factor o relación de sobrecarga.

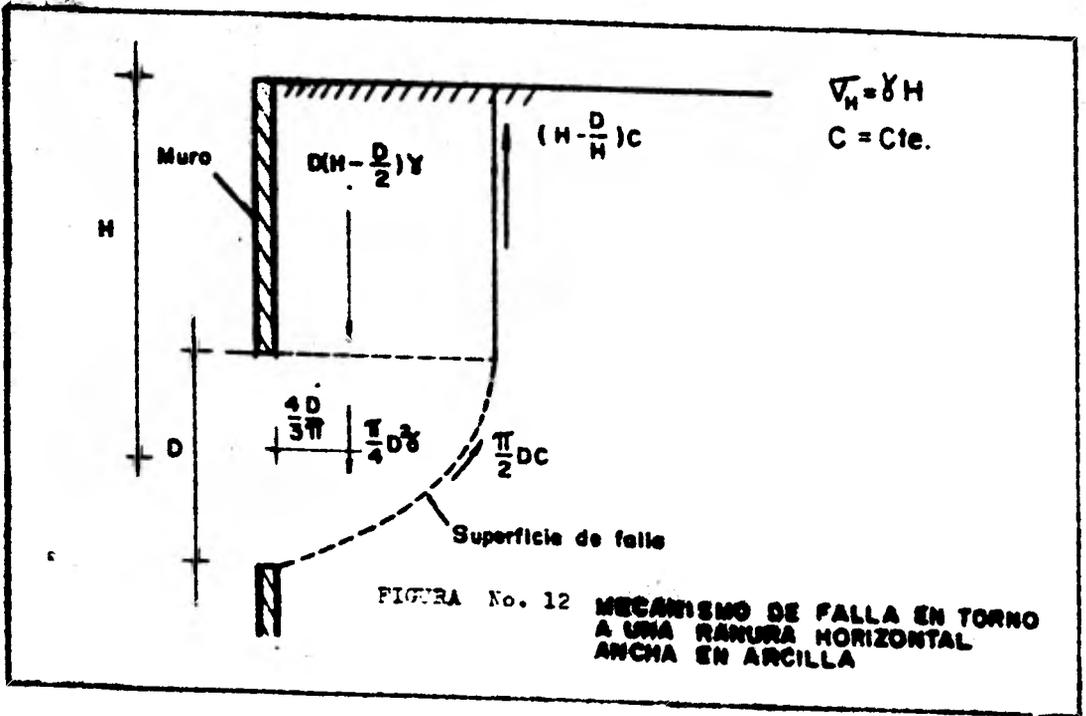
Con los experimentos realizados, Broms y Bennermark, demostraron que el valor crítico de $\frac{YH}{C}$ es sin duda, del orden de 6.

Si la resistencia de la arcilla aumenta con la profundidad, la falla en el túnel ocurre cuando $YH > 6C$ para H/D 4 a 5 y las deformaciones suelen ser de naturaleza plástica.

Las arcillas duras y fisuradas pueden resultar muy sensibles a los procesos de deformación que acompañan a la redistribución de esfuerzos, por lo que pueden presentar signos de inestabilidad en el



$$\left(\frac{V_H}{C}\right)_{crit.} = \frac{2\frac{H}{D} + \pi - 1}{1 + \frac{1}{2}\frac{D}{H}}$$



frente para valores de $\frac{Y H}{C} \leq 6$

Cuando $\frac{Y H}{C}$ 2 a 3 los movimientos suelen ser pequeños y de naturaleza más bien elástica.

Para valores más allá de ese límite comienzan las grandes deformaciones plásticas.

Ahora bien, si las arcillas fluyen hacia la excavación en el frente de ataque de un túnel; cuanto lo hagan, dependerá del procedimiento de construcción, de la velocidad de avance, de la rigidez de las arcillas y de la relación $\frac{Y H}{C}$

El escudo es el método normal de excavación de túneles en arcillas blandas y se han desarrollado sistemas que tienden a producir la mínima alteración del material en torno a la galería.

Cuando se excava con escudo, se transmiten al terreno esfuerzos cortantes muy grandes que modifican los estados de esfuerzo y la resistencia, por lo que, la extensión de la zona plástica que se forma alrededor del túnel, si es grande los desplazamientos también lo serán, en tanto que si es pequeño, tenderán a ser despreciables.

Podemos considerar que el factor de sobrecarga crítico para el frente de ataque, puede ser válido para las paredes de los túneles en arcilla, porque los desplazamientos en las paredes se ven muy influenciados por la estabilidad del frente, la experiencia indica que esta influencia del frente se deja sentir a una distancia de él, del orden de uno a dos diámetros del túnel.

Broms y Bennermark recomiendan para excavaciones dos túneles en suelos blandos, usar la relación $\frac{Y H}{C} \leq 4 \text{ ó } 5$, para trabajar en el rango elástico.

En la tabla (VI), se presentan algunos túneles construidos en las arcillas del Valle de México.

Tomando en cuenta la información anterior, durante la excavación de la primera etapa del Interceptor Central, a su paso por los suelos de la zona de transición, se aplicó el procedimiento de excavación con escudo de frente abierto.

Tal procedimiento impidió que se provocara plastificación y falla de las paredes como consecuencia de la baja resistencia del suelo.

El principal elemento de la estructura del escudo es el forro o camisa que está construido de placas de acero, de acuerdo a la sección del túnel y ligeramente mayor que él.

La camisa puede dividirse en tres partes:

En el extremo delantero o cuchilla cortadora donde se efectúa la excavación, es sumamente reforzada. Su propósito principal es facilitar el avance del escudo hacia el frente.

La segunda tarea es dar protección adecuada a los trabajadores ocupados en la excavación del frente.

La parte central o tronco está destinada para alojar los gatos hidráulicos, mangueras, válvulas, tableros de control y plataformas deslizantes de ataque.

La parte trasera o faldón, está diseñada para soportar el terreno mientras se realiza el montaje de los segmentos del revestimiento.

El diámetro de la cara de corte debe ser ligeramente mayor que

COMPORTAMIENTO DE TUNELES CONSTRUIDOS EN ARCILLA DEL VALLE DE MEXICO

Nombre	Profundidad al eje del túnel	Diámetro del Túnel	Cohesión qu/2 Promedio	Presión total por peso propio del terreno	Presión de Aire	$\frac{YH-Pa}{C}$	Comentarios
	H, (m)	D, (m)	C, (ton/m ²)	YH, (ton/m ²)	Pa, (ton/m ²)	---	
Sifón 2 de Abril	11.5	3	4.5 (z lago)	15.3	0	3.4	Sin dificultad
Sifones Manuel González	11.7	3	3.6 (z lago)	15.5	0	4.3	Sin dificultad
Sifón Obrero Mundial	12.7	3	4.0 (z lago)	18.8	0	4.7	Pequeños problemas
Captación Consulado	10.0	4	3.1 (z lago)	12.9	0	4.2	Pequeños problemas
Captación Cuitláhuac	9.5	3	2.9*(z trans)	12.4	0	4.3	Sin dificultad
Sifón La Raza I	11.9	4	4.9**(z lago)	16.1	0	3.3	Sin dificultad
Sifón La Raza II	11.9	3.2	5.1**(z lago)	16.1	0	3.2	Sin dificultad (escudo con rejilla al fte.)
Colector Central	13.	4.1	2.8 (z lago)	17.3	0	6.2	Pequeños problemas (escudo con rejilla al fte.)
C. Oriente	24.5	6	2.5 (z lago)	33.1	?	13.2	Graves problemas que culminaron con la falla del túnel (escudo con cámara a presión al fte)

* Determinada c/torcómetro

** Determinada c/penetrómetro

TABLA VI

el diámetro del escudo, con objeto de disminuir la presión del terreno sobre el escudo. El movimiento del escudo es efectuado por medio de gatos hidráulicos, los cuales accionan contra el revestimiento del túnel.

El revestimiento primario o ademe de los túneles excavados en suelos blandos con escudos, puede efectuarse a base de dovelas o segmentos que forman anillo los cuales pueden ser de concreto, de fierro fundido, de acero o de una combinación de marcos metálicos con madera, en la figura (13) se muestra un escudo de frente abierto.

Cuando la excavación del Interceptor Central alcanzó las arcillas muy blandas de las zonas del lago, el valor de la cohesión disminuyó, trayendo como consecuencia que la relación $\frac{\gamma H}{C} < 5$ no se cumpliera, existiendo el peligro de que se presentara la extrusión. Este fenómeno se presenta haciendo que el material pierda de pronto su resistencia, volviéndose una masa semi-líquida que fluye en forma incontrolada, recorriendo grandes distancias dentro del túnel hasta llenar por completo su oquedad.

La extrusión ocurre cuando el peso propio del terreno a nivel del centro del túnel, es mayor que 6 veces la cohesión de la arcilla o sea cuando $\gamma H > 6 C$. En tales condiciones, se requiere la aplicación de una contra-presión.

Una manera de evitar la extrusión es aplicando una contra-presión a base de aire comprimido, de tal forma que actúe tanto en las paredes como en el frente de trabajo, en la figura (14) se presenta este procedimiento.

En la segunda etapa de la construcción del Interceptor Central se efectúa por medio de la combinación de escudo de frente abierto, aire comprimido y abatimiento del nivel freático, realizando así -

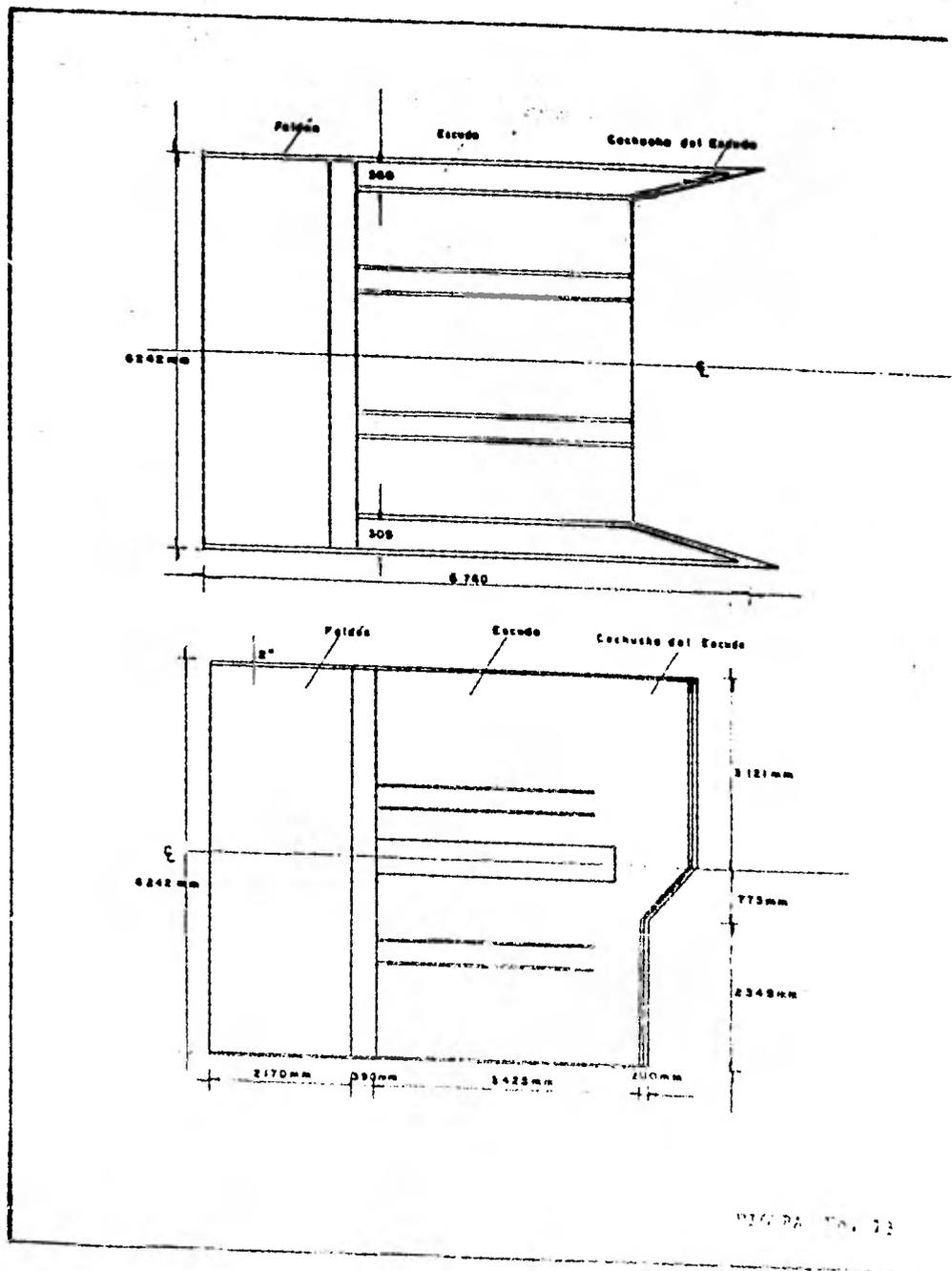
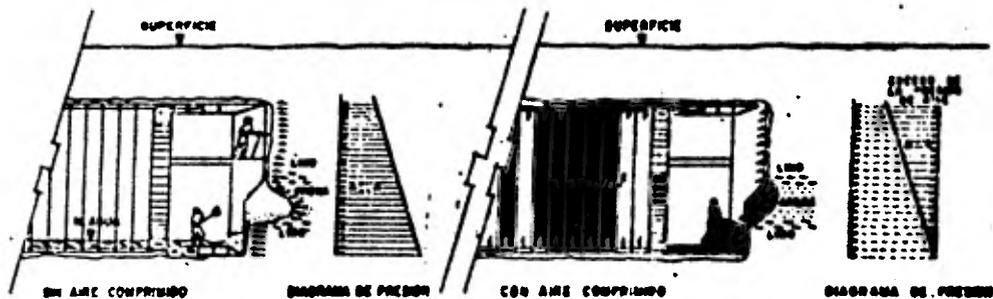


FIG. PA. No. 22



EN LA SUPERFICIE DE AIRE COMPRIMIDO, PUEDEN PRESENTARSE PROBLEMAS DE RESISTENCIA DE MATERIALES PORQUE EN CADA UNO COMO UNO OPTATIVA O DISTINGUEN DE DIFERENCIALES CLASICO, QUE SUPLEN LA COMPLEJIDAD DEL PROBLEMA

EL USO DE AIRE COMPRIMIDO EN LOS INTERIORES DEL FRONTE DE AVANCE, OTRO EN FLUJO DE LOS GASES Y DEJADA LAS CONDICIONES DE ESTABILIDAD

TUNEL CON AIRE COMPRIMIDO PARA EL SISTEMA DE BARRAJE PROFUNDO DE LA CIUDAD DE MEXICO - INTERSECCION CENTRAL.

EL SISTEMA DE BARRAJE, CONSTRUCTIVO Y DEBIDA, DEL GUBERNO DE MEXICO Y PLANTILLA DEBIDA DE LA CIUDAD, ESTA CONSTITUIDO POR LOS INTERSECCIONES CENTRAL Y DEL GUBERNO Y EL GUBERNO CENTRAL, CON UNA LONGITUD TOTAL DE 90 KM.

EN UN TRAMO DEL INTERSECCION CENTRAL (CON UN LONGITUD DE 10 KM), SE TRABAJA PARA LAS DIFERENTES PLANTAS DE LA DEMONSTRACION "DORA DEL LAGO" EN UNAS DE MEXICO. LA CONSTRUCCION DEL TUNEL EN ESTAS DIFERENTES PLANTAS, ENTRE OTROS, EL PROBLEMA DE ESTABILIDAD DEL FRONTE DE AVANCE, ESTA RESUELTO MEDIANTE DE TÉCNICAS ESPECIALES, PARA MEDIANTE EL PROBLEMA DE AVANCE, SE OBTIENE UTILIZAR, EN FORMA COMPLETA, UN ESTUDIO DE FRONTE AVANCE Y AIRE COMPRIMIDO A BAJA PRESION, 0.7 Kg/cm² (DORA DEL LAGO, D. G.).

EL USO DEL AIRE COMPRIMIDO, A LA ALTURA DE LA CUBIERTA DE GUNDO, IMPLICA UNA DEPENDENCIA DE LA COMPLETAMENTE PLANO DEL ELEMENTO AVANCE, QUE SE TRABAJA EN UNA FORMA DEBIDA DEL PERSONAL.

DATOS GENERALES DEL TRAMO CON AIRE COMPRIMIDO

EL TUNEL SERA UN CONCRETO ENTUBADO DE CONCRETO CON LAS DIMENSIONES SIGUIENTES:

LONGITUD DEL TRAMO _____ 10000 m.
 DIAMETRO PUAL DEL TUNEL _____ 8000 m.
 FUNDENTE MEXICANA _____ 20000 m.
 COSTO MANTEN _____ 5000000 m.
 VELOCIDAD MANTEN _____ 40000 m.
 SUPERFICIE MANTEN DE LA PLANTILLA _____ 2000 m.

una excavación prácticamente seca. Figura (15)

La presión de aire en la cámara de trabajo para lograr condiciones de estabilidad en el frente, se determina con la ecuación siguiente:

$$P_a = \gamma H - 4 C$$

Cabe aclarar que se toma el factor 4 C y no el 6 u 8, para trabajar en el rango elástico.

Para el tramo L9 - L8 del Interceptor Central que se encuentra en ejecución, se tomaron los siguientes datos:

$$\gamma = 1.3 \text{ ton/m}^3 \quad H = 26.5 \quad C = 6.5 \text{ ton/m}^2$$

Como podemos observar: $\gamma H > 6C$; $30 > 24$ (hay extrusión)

Por lo que era necesario adicionar una contra-presión para evitar la falla.

La presión de aire requerida se obtiene como:

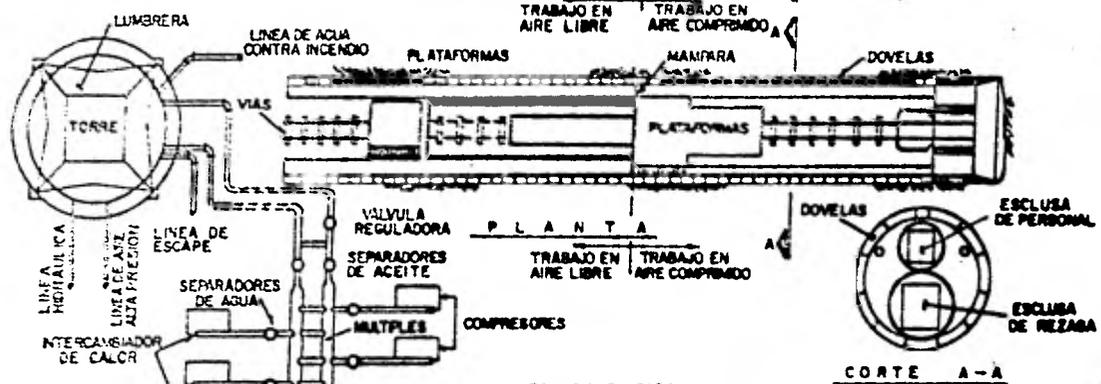
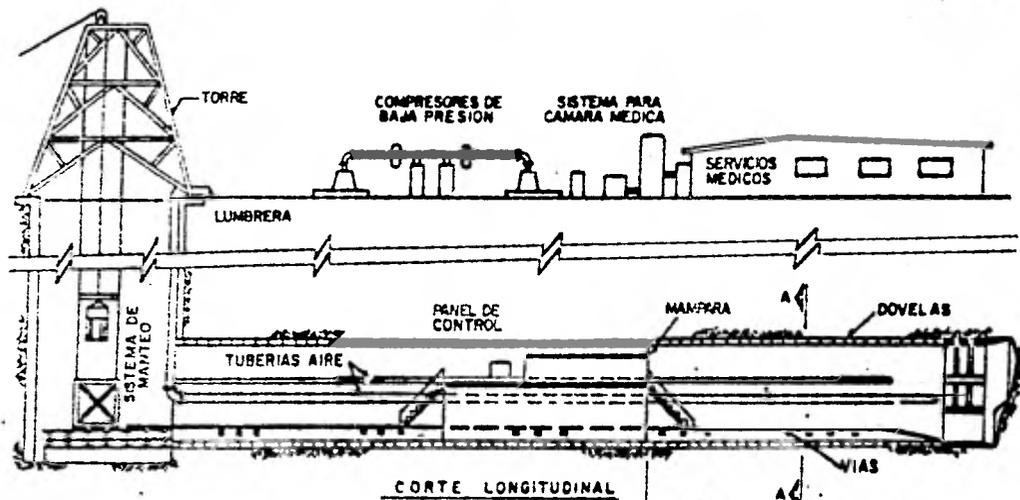
$$P_a = 1.3 \times 26.5 - 4 \times 6.5 = 34.45 - 26 = 8.45$$

$$P_a = 8.45 \text{ ton/m}^2$$

La presión de aire que se utiliza actualmente es de:

$$0.9 \text{ kg/cm}^2$$

Aun cuando las propiedades del suelo por excavar no cambian, se puede variar la presión de acuerdo a los problemas ocasionados por el flujo de agua.



INSTALACIONES PARA AIRE COMPRIMIDO

FIGURA No. 15

54

Las condiciones en que labora el personal en ambiente hiperbárico, son similares a las existentes en donde se desarrolla el trabajo de los buzos en el mar.

Por lo tanto, dicho personal debe estar sujeto a ciertos tiempos de descompresión, que están en función de la presión y el tiempo que laboren en el ambiente hiperbárico.

Estos tiempos de descompresión están diseñados de tal manera, que permitan que el aire disuelto en los tejidos del personal, sea expulsado sin la formación de burbujas de nitrógeno, las cuales dan origen a las enfermedades por descompresión.

Las tablas de descompresión que actualmente se usan en los trabajos de construcción del Interceptor Central, se obtuvieron a partir de las tablas de la Ciudad de Washington, D.C. de 1971, formuladas por el Departamento del Trabajo de los Estados Unidos, a éstas hubo necesidad de modificarlas, ya que sólo contemplan la ejecución de trabajos al nivel del mar y no al de la Ciudad de México, que se encuentran a 2,246 m. s. n. m.

La modificación se llevó a cabo con la siguiente fórmula:

$$P_c = \frac{P. n. m.}{P_B} P_t$$

En donde:

- P_c = Presión corregida por altitud.
- P.n.m. = Presión barométrica al nivel del mar.
- P_B = Presión barométrica del lugar de trabajo.
- P_t = Presión de trabajo.

Teóricamente hacer estas correcciones no tendría ningún problema, pero a pesar de ello, se llevaron a cabo una serie de pruebas -

en cámara médica tendientes a corroborar dicha teoría o en su defecto, modificar las tablas.

Como resultado se obtuvieron las tablas (7) de descompresión - que se requieren para distintas presiones de trabajo, tomando en cuenta la altura de la Ciudad de México.

En el programa de pruebas médicas se llevó un estricto control de las condiciones de los trabajadores, antes, durante y después de las mismas.

El control médico del personal en el aspecto más importante en este tipo de obras, en las tablas (8) se presentan las pruebas de compresión en cámara médica.

La aplicación de este sistema tiene sus limitaciones, ya que en la zona lacustre al Oriente de la Ciudad, en donde se excavará la segunda etapa del Interceptor Oriente, se obtuvieron los siguientes datos:

$$\begin{array}{rcl} Y & H & \text{30 ton/m}^2 \\ C & & \text{2 ton/m}^2 \end{array}$$

$$\frac{Y H}{C} = 15$$

Para llevar esta relación a su condición estable de 5, se requerirá aplicar una presión de aire:

$$Pa = YH - 4 C \therefore Pa = 30 - 8 = 22 \text{ ton/m}^2$$

Bajo esta presión de 2.2 Kg/cm², si se usara el procedimiento de aire comprimido, para un turno normal de 8 horas de trabajo, el tiempo de descompresión necesario para este caso sería, según la tabla, de 272 minutos.

TABLA DE TIEMPOS DE DESCOMPRESION

México, D.F., 1978.

PRESION DE TRABAJO kg/cm ² .	PERIODO DE LABOR (HORAS)										MAS DE 8	
	1/2	1	1 1/2	2	3	4	5	6	7	8		
0.6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
0.7	6	6	6	6	6	6	6	6	12	12	12	24
0.8	7	7	7	7	7	7	13	21	35	35	35	51
0.9	8	8	8	8	9	12	33	48	56	61	61	73
1.0	8	8	10	12	13	28	56	68	77	88	88	112
1.1	8	8	12	19	24	53	76	86	96	116	116	125
1.2	11	11	19	25	43	76	102	111	120	133	133	140
1.3	12	14	25	29	58	96	121	128	134	140	140	156
1.4	14	17	30	36	76	111	132	145	147	150	150	171
1.5	16	24	33	45	101	132	149	159	160	172	172	188
1.6	18	29	39	65	109	147	169	172	184	192	192	208
1.7	20	36	44	86	123	167	182	197	207	218	218	231
1.8	22	40	59	99	152	181	197	220	226	236	236	254
1.9	24	44	64	113	172	200	224	236	244	256	256	277
2.0	28	49	73	128	180	207	227	241	256	266	266	281
2.1	32	50	83	142	185	215	235	249	261	272	272	293
2.2	36	55	99	147	191	218	245	260	265	272	272	297
2.3	43	63	115	154	200	232	255	268	271	273	273	297
2.4	44	70	130	164	207	240	262	269	280	285	285	310
2.5	48	80	146	183	224	256	280	292	---	---	---	---
2.6	55	89	160	201	244	274	303	319	---	---	---	---

(Tiempo de descompresión en minutos)

TARIFA VII

PRUEBAS DE COMPRESION EN CAMARA MEDICA

México, D.F., 1978.

P	Pe	T	N	E	I
1	0.8	8	22	0	0
2	0.9	8	20	0	0
3	1.0	4	11	0	0
4	1.0	8	20	0	0
5	1.0	8	21	0	0
6	1.1	3	12	0	0
7	1.1	8	20	0	0
8	1.1	4	10	0	0
9	1.2	4	29	0	0
10	1.3	4	10	0	0
11	1.3	6	22	0	0
12	1.4	4	11	0	0
13	1.4	6	22	0	0
14	1.5	4	11	0	0
15	1.5	5	46	0	0
16	1.5	6	30	1	1
17	1.6	4	9	0	0
18	1.6	6	22	0	0
19	1.7	4	5	0	0
20	1.7	6	32	1	3
21	1.8	4	10	0	0
22	1.8	5	21	1	1
23	1.8	6	35	3	3
24	1.9	3	5	0	0
25	1.9	6	22	0	1
26	2.0	3	5	0	3
27	2.0	4	39	1	2
28	2.0	5	20	4	2
29	2.0	6	26	1	3*

donde:

- P : Prueba
- Pe : Presión en kg/cm².
- T : Exposición en Horas.
- N : Número de Personas.
- E : Número de casos de enfermedades por causa presión.
- I : Número de casos de intolerancia al aire comprimido.
- * : Se usó máscara de oxígeno.

TABLA VIII

Además, como se citó anteriormente, el porcentaje de enfermedades por descompresión y la intolerancia al aire comprimido se incrementarían; esto lo podemos observar en la tabla (9).

Lo cual hace impráctico el sistema de aire comprimido para ser usado en la excavación del Interceptor Oriente, porque habría la necesidad de establecer turnos de trabajo cortos para tiempos de descompresión muy prolongados, lo cual haría este sistema anti-económico.

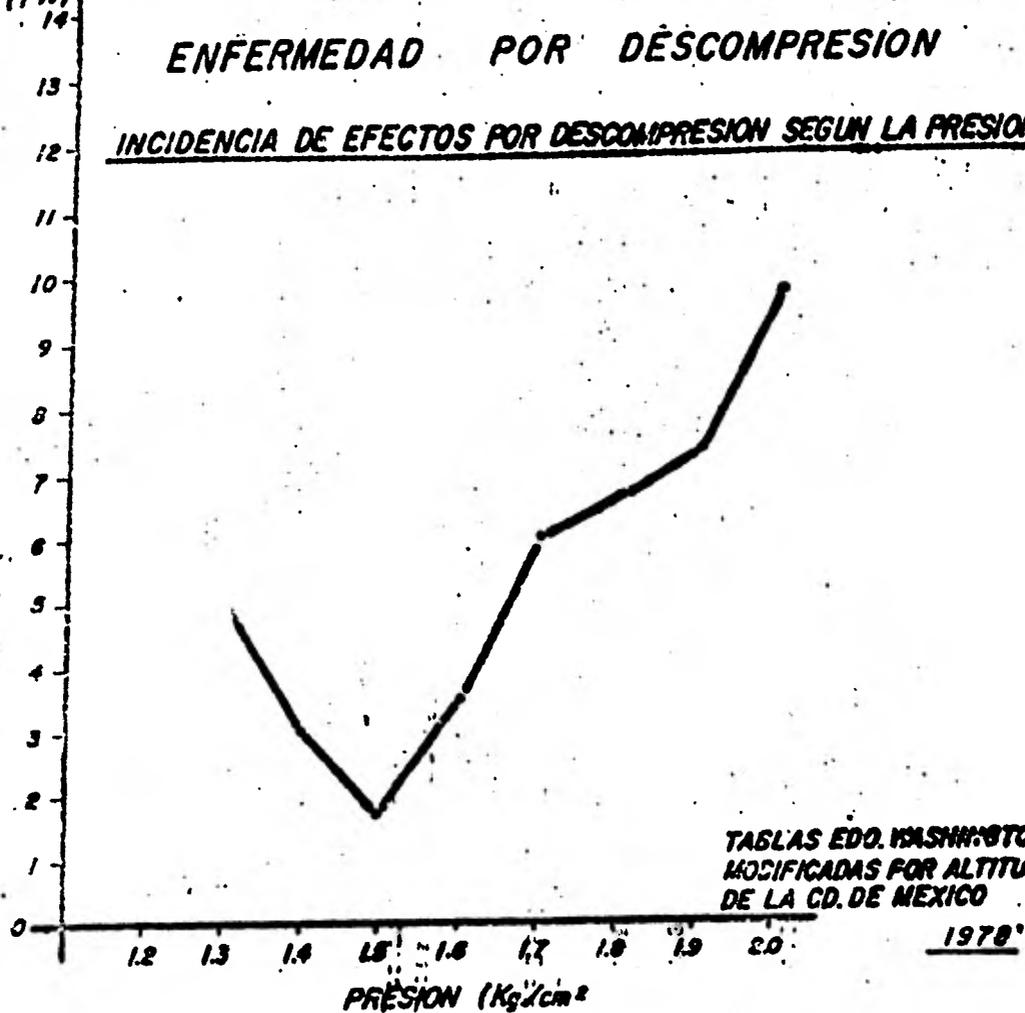
METODO DE EXCAVACION PROPUESTO

El empleo del escudo cortador estabilizado con fluidos a presión, es una tecnología relativamente nueva, comparada con el método de escudo convencional o con aditamento de aire comprimido, fue estudiado y desarrollado en varios Países que encontraron problemas graves al excavar túneles en suelos blandos con grandes contenidos de agua.

En Inglaterra, Bortlett en colaboración con el London Transport, Edmund Nuttall L.T.D., contratistas especializados y Robert L. Frieztley, L.T.D., idearon la técnica que fue desarrollada y patentada en el año de 1964. Se basa primordialmente en el uso de bentonita como fluido a presión.

La bentonita es materia arcillosa que al mezclarse con agua se convierte en una gelatina tixotrópica, capaz de fluir fácilmente al agitarse y de volver a adquirir una consistencia firme al dejarse en reposo.

Bentonite Shield Machine es el procedimiento manufacturado en el año de 1971 y se usó en Londres para construir un túnel de 4.1 m. de diámetro y 140 m. de longitud.

PORCENTAJE
(1%)**ENFERMEDAD POR DESCOMPRESION****INCIDENCIA DE EFECTOS POR DESCOMPRESION SEGUN LA PRESION****TABLAS EDO. WASHINGTON.
MODIFICADAS POR ALTITUD
DE LA CD. DE MEXICO****1978'****PRESION (Kg/cm²)**

Posteriormente se construyó otro túnel con el mismo procedimiento con 2.44 m. de diámetro y 1 km. de longitud.

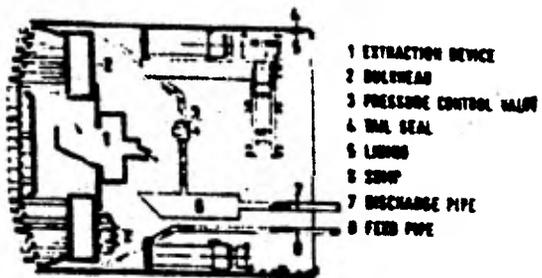
En la figura (16), se presenta un corte esquemático de la máquina, con las mejoras efectuadas al sistema, en la actualidad se esperan resultados muy satisfactorios en su aplicación.

El método Alemán Slurry Face Hydroschild, fue desarrollado en el año de 1973. Un sistema basado en el efecto de almohadilla de aire, para mantener una presión constante en un fluido usado como soporte del frente de ataque del escudo.

La cámara de trabajo desde la mampara hasta el frente de ataque, se encuentra dividida en dos compartimientos por medio de un diafragma, el compartimiento que da al frente se encuentra completamente lleno con un fluido que sirve de soporte, arriba del eje del escudo el segundo compartimiento se encuentra libre el fluido, pero mantiene la presión a base de aire comprimido. En la figura (17), se muestra la máquina usada en Hamburgo en el año de 1974 por Wayss y Freytag.

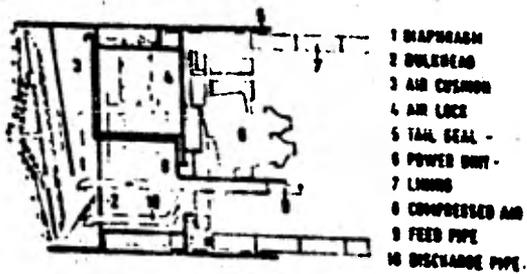
Los mayores logros en cuanto al método de escudo cortador estabilizado con fluidos a presión, fue alcanzado en Japón, debido a que algunas Compañías constructoras como: La Tekken, Okumura, Gumi, Hishimatsu, desde el año de 1963 se empeñaron en investigar y desarrollar sus propios sofisticados sistemas de tuneleo usando fluidos a presión, que ya para el año de 1965 se efectuaban los trabajos experimentales que culminaron en la actualidad con la aplicación de sistemas ingeniosos que permiten controlar en las zonas urbanas los asentamientos del terreno.

Actualmente, se encuentran construidos y en proceso de construcción en aquel país, túneles para diversas funciones, como son: Para suministro de agua potable, de alcantarillado, túneles carrete



**Bentonite shield machine
by Edmund Nuttall Ltd, England**

FIGURA No. 16



Slurry face Hydroshield by Wags & Freytag,
 Frankfurt am Main, West Germany

FIGURA No. 17

ros y diversos pasajes subterráneos. En la tabla (I) se presentan estas experiencias.

Para la construcción del túnel del Interceptor Oriente, se usará esta nueva técnica de tuneleo que promete dar buenos resultados, controlando las arcillas más malas del Oriente de la Ciudad.

La exposición del método se basará en los mayores adelantos logrados por los técnicos japoneses.

El método consiste básicamente en un fluido a presión (en este caso lodo estabilizador), Escudo cortador y excavador mecánico.

Se usa lodo estabilizador como dispositivo de contra-presión, para lograr la estabilidad del subsuelo en el frente de ataque, evitando así la pérdida de suelo y agua.

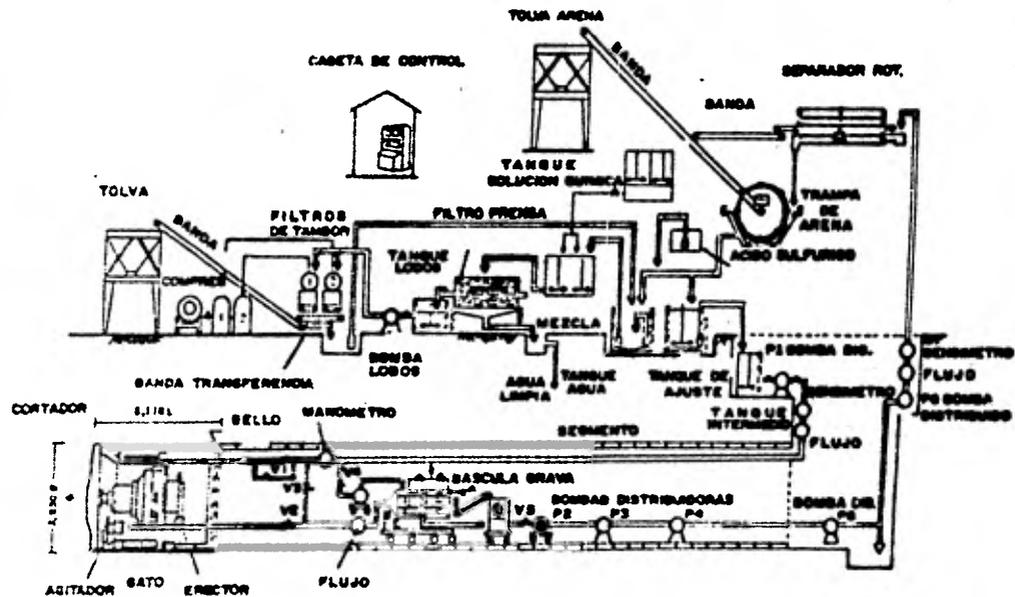
El Escudo Cortador.- Se usará como parte de la herramienta de excavación, puede resistir las presiones que ejerce el terreno, ayuda con la cámara de presión a la estabilidad del frente, sirve además como recinto protector para el personal que trabaja en la colocación del ademe y el manejo de la maquinaria.

El excavador mecánico es un disco cortador rotatorio que se encuentra dentro de la cámara de presión, se usa para cortar el terreno mientras el escudo avanza.

El procedimiento constructivo se complementa con los siguientes sistemas:

El sistema de agitación que mezcla el material cortado con el lodo estabilizador dentro de la cámara de presión.

El sistema de bombeo que alimenta lodo estabilizador a la cámara



ELEMENTOS QUE INTEGRAN
LA MAQUINARIA
FIGURA 18
(TUSA)

ra de presión y extrae de ésta, la mezcla suelo excavado lodo estabilizador, enviándolo a la superficie para su tratamiento.

La planta de tratamiento instalada en la superficie, se encarga de procesar la mezcla procedente del frente, dejando el lodo estabilizador en condiciones de ser usado nuevamente.

El sistema de control tiene como finalidad suministrar información procedente del frente de trabajo que al ser procesada en una computadora, sirve para coordinar todas las operaciones del procedimiento en forma automática o semiautomática, según se requiera.

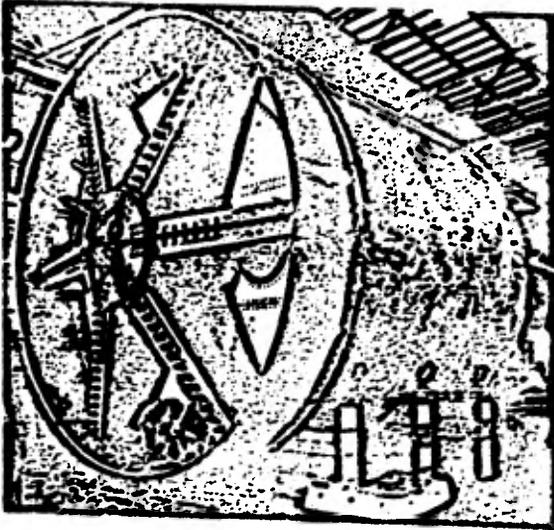
En la figura (18), se presentan los elementos que integran la maquinaria de los sistemas del método.

A continuación, se hará una descripción breve de cada uno de los componentes de los sistemas:

ESCUDO CORTADOR

Es un cilindro metálico abierto en sus extremos pero dividido en dos cámaras por medio de una mampara, la primera de ellas directamente en el frente de ataque formando la cámara de presión, en la parte trasera del escudo se encuentra la segunda cámara de trabajo, en donde se efectúa la colocación del revestimiento primario.

La camisa o forro del escudo construido con placas de acero, tiene como función la de soportar las presiones de las paredes del túnel durante la excavación y mientras se instala el anillo de dove las.



Máquina del Escudo con Frente de Lodo

Incluye el escudo, el cortador y el sistema de agitación.

DISCO CORTADOR

Dentro de la cámara de presión actúa el disco cortador que puede ser plano o achatado, cuenta con uno o varios ejes diametrales - perpendiculares entre sí, en donde van alojadas 12 cuchillas cortadoras que pueden ser reemplazables. El disco tiene capacidad estructural para soportar el empuje del terreno, por lo que puede proveer soporte continuo en el frente de ataque, impulsa su movimiento de rotación por medio de motores eléctricos o hidráulicos a 360° en dos direcciones y la velocidad de rotación varía de 1 a 3 revoluciones por minuto, y puede desplazarse longitudinalmente 30 cm. dentro de la cámara, permitiendo la excavación del terreno en el frente, - mientras el escudo permanece fijo.

En la cara del cortador se encuentran unas compuertas que permiten regular la entrada de material cortado a la cámara de presión, logrando controlar el flujo de rezaga de acuerdo a la velocidad de avance en la excavación. Esta particularidad evita la posibilidad de ocasionar un colapso del frente.

El disco cortador está conectado a una flecha o eje central, - es accionada por medio de un sistema de engranes reductores de velocidad impulsado por cuatro motores de 150 H.P., el sistema permite que el cortador se deslice al mismo tiempo que gira.

El cortador cuenta también con equipo de empuje que está formado por cuatro gatos hidráulicos con capacidad de 1000 toneladas, que le permiten avanzar independientemente del escudo

El escudo cuenta también con una esclusa de personal para la - revisión y mantenimiento de las navajas cortadoras y los agitadores en el frente de ataque, en ella se puede someter al personal encargado de estas tareas al tratamiento de compresión y descompresión - al entrar a la cámara de presión, en donde el lodo estabilizador es

sustituido por aire comprimido al efectuar estas labores. La esclusa se encuentra colocada en la parte superior del eje del escudo, formando parte de la mampara.

En la parte posterior del escudo, se encuentra el anillo erector, diseñado para facilitar el montaje del revestimiento formado por los anillos de dovelas de concreto reforzado.

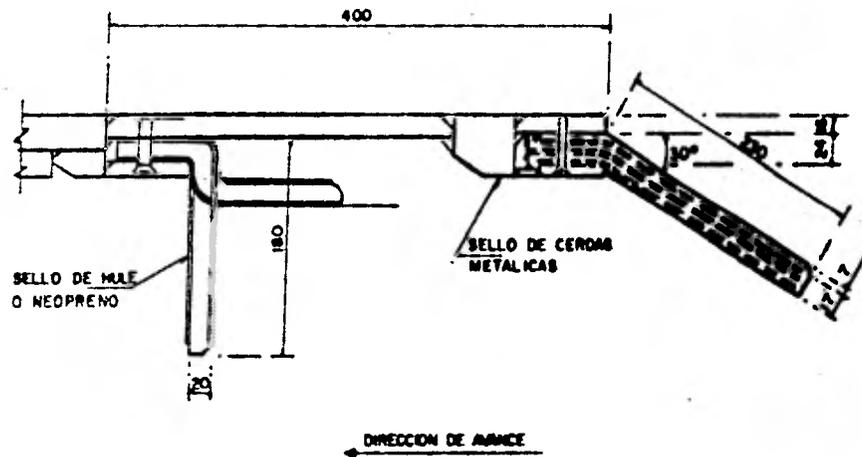
Tiene posibilidad de deslizarse longitudinalmente, girar, acoplarse a las dovelas y ponerlas en su posición final.

Como el faldón posterior del escudo da cabida a los segmentos circulares, es necesario dedicarle atención especial a esta zona de trabajo ya que entre el escudo, el terreno natural y los segmentos circulares, queda un pequeño boquete producto de la excavación en el cual se producen flujos de material que escapan del frente que deben controlarse, evitando que lleguen al lugar de colocación de las dovelas y perturben las maniobras de montaje. Esto se consigue por medio de paquetes o sellos de hule o neopreno muy resistentes, con ellos se sella la cavidad.

Recientemente se han adoptado unos cepillos de cerdas de alambre compacto que se insertan en el angosto boquete, impidiendo las posibles fugas de agua y suelo, desplazadas a lo largo del escudo, en la figura (19) se muestra el tipo de sello posterior del faldón.

El movimiento de avance del escudo se consigue por medio de 22 gatos hidráulicos con capacidad de 1,300 toneladas que se encuentran alojados en la parte central del escudo, sirviendo de refuerzo a la mampara y para su expansión se apoyan en el último segmento circular instalado.

Los gatos están diseñados para vencer la resistencia a:



SELLOS DEL ESCUDO
CON PRESION AL FRENTE
FIGURA 18
(TUSA)

La fricción del terreno sobre la superficie exterior de la camisa del escudo.

La fricción de los anillos de dovelas en el faldón del escudo.

SISTEMA DE LODOS

El sistema de lodos cuyo principio es similar al empleado en la perforación de pozos petroleros, cubre el doble propósito de soportar el frente de la excavación al mismo tiempo que remueve el material cortado.

El sistema está formado por: La cámara de presión constituida por el frente cortador del escudo y la mampara, ésta se llena de lodo estabilizador a presión para estabilizar el frente de la excavación.

El sistema de agitación se encuentra dentro de la cámara de presión, está formado por las paletas de mezclado y los agitadores, éstos se encargan de licuar el material excavado mezclándolo con el lodo estabilizador para poder ser así bombeado a la superficie para su tratamiento.

Este sistema se encuentra cerca de la toma de succión de las bombas distribuidoras, evitando el taponamiento en los conductos para el lodo.

Las bombas para el lodo estabilizador utilizadas en el sistema son similares a las usadas por las dragas marinas, generalmente son cinco bombas las encargadas de hacer llegar la mezcla de material excavado lodo estabilizador a la superficie y llenar de lodo estabilizador a la cámara de presión, se usan cuatro bombas de velocidad variable y una de velocidad constante, la maquinaria del escudo y -

el sistema de lodos se muestra en la figura (20).

PLANTA DE TRATAMIENTO

En las zonas urbanas es necesario instalar la planta de tratamiento para separar la mezcla de material excavado-lodo estabilizador. Como este proceso de separación es la actividad más difícil en el método de escudo cortador estabilizado con fluidos a presión, ya que requiere equipo e instalaciones diversas para separar los distintos materiales que forman el suelo excavado.

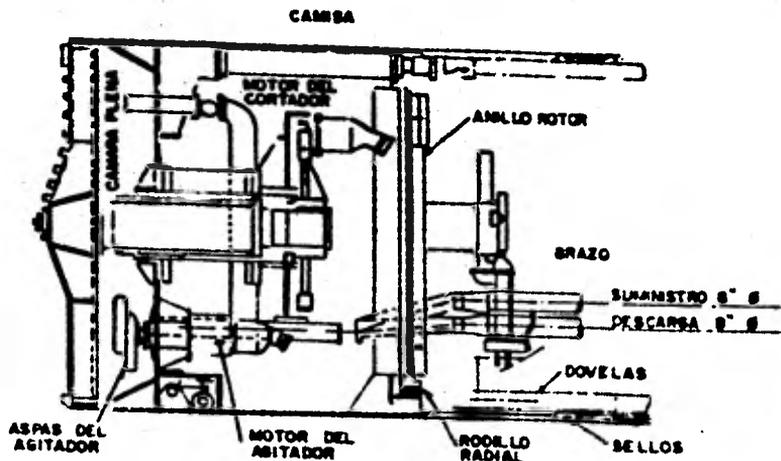
En general, la planta se compone de:

- Malla vibratoria primaria.
- Malla vibratoria secundaria.
- Ciclón.
- Filtros prensa y de tambor.
- Bandas transportadoras.
- Tanque de floculación.
- Tanque separador de líquidos.
- Tanques mezcladores.
- Tanques de control de lodos.
- Tanque neutralizador.
- Tanque de agua limpia.
- Bombas para inyección de lodo.
- Válvulas reguladoras.
- Tolvas de sólidos.

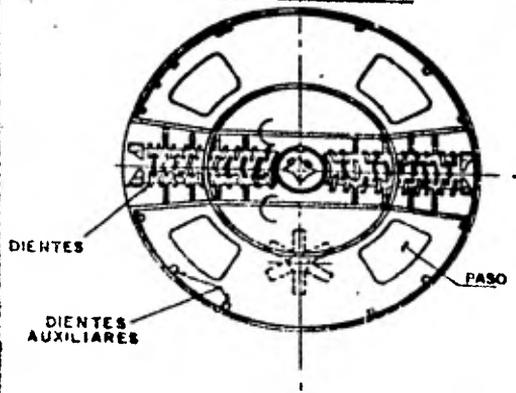
SISTEMA DE CONTROL

Está constituido por un tablero visual instalado en la superficie, en él se presentan los componentes más importantes del conjun-

MÁQUINA DEL ESCUDO CON PRESIÓN AL FRENTE



FRENTE CORTADOR



UNIDAD DE ACCIONAMIENTO DE AGITADORAS

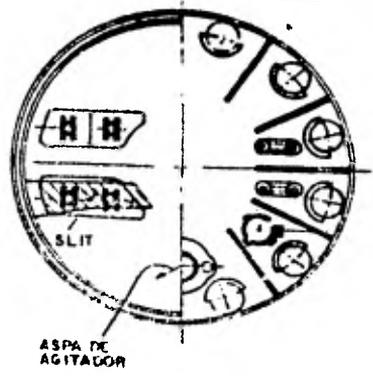


FIGURA 20

to, a través de una réplica, para que con una simple observación se pueda conocer el estado de funcionamiento del equipo. Este sistema nos da información confiable, mediante la cual se confirme que el volumen excavado coincide con el volumen teórico avanzado por la máquina cortadora y con ayuda de una computadora coordina todas las operaciones del sistema en forma automática o semiautomática, según se requiera.

Los instrumentos que constituyen este sistema son:

- Medidor de presión de lodo estabilizador.
- Medidor de flujo de la mezcla material excavado lodo estabilizador.
- Medidor de la densidad de lodo estabilizador.
- Equipo para controlar el cortador.
- Medidor de la velocidad del cortador.
- Medidores para el control de las bombas del lodo.
- Control de válvulas de llegada y salida del lodo estabilizador de la cámara de presión.

EQUIPO AUXILIAR

En el equipo auxiliar podemos considerar todos los equipos y herramientas necesarias para completar la actividad del sistema de tuneleo, como son:

- Motores hidráulicos y eléctricos.
- Sistemas de ventilación.
- Sistemas de aire a presión.
- Transformadores de energía eléctrica.
- Sistemas de comunicación.
- Maquinaria para inyección e impermeabilización.
- Indicadores de los sistemas de control.

Dovelas para el revestimiento.
Equipo hidráulico de emergencia.
Tuberías de conducción.
Dispositivos de seguridad.

Todos los equipos y herramientas para estas funciones se encuentran alojados en el llamado tren de equipo, que tiene una longitud de 50 m. aproximadamente, construido con marcos y plataformas metálicas.

Se desplaza sobre rieles jalado por el empuje de los gatos hidráulicos del escudo, ya que se encuentra unido a éste por medio de tensores.

FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA

Después de haber bajado a través de la lumbrera e instalado la maquinaria del escudo en el frente de ataque del túnel con ayuda de aire comprimido en la cámara de presión, se efectúa la demolición del muro de la lumbrera para colocar el anillo de apoyo.

A continuación, se inyecta lodo estabilizador en la cámara de presión, de esta manera queda soportado el terreno natural en el frente de excavación.

En el momento en que el disco cortador se pone en movimiento cortando el terreno, éste fluye a través de las ranuras de la cara del cortador, las virutas de arcilla se desmenuzan dentro de la cámara de presión por medio de las paletas y agitadores mezclándose con el lodo estabilizador, al mismo tiempo se establece el bombeo que succiona esta mezcla, por medio de una tubería de 8" de diámetro, enviándola a la superficie para su tratamiento, simultáneamente por el conducto de alimentación del lodo estabilizador se repone

el fluido extraído, de esta manera se mantendrá en todo momento de la excavación, la cámara llena a la presión de diseño.

Como todas las actividades del trabajo de tuneleo en estas condiciones, se efectúan simultáneamente conforme va cortando y avanzando el disco cortador, los gatos hidráulicos del escudo que están apoyados en el segmento circular de apoyo, se van abriendo, empujando a toda la estructura del escudo hacia adelante, con lo cual al encajarse el frente cortador en el terreno, facilitan el corte de las navajas o cuchillas de la cara del cortador.

Cuando el escudo al avanzar hace que todos los sistemas que se encuentran adosados a él avancen también en la misma proporción y los gatos de empuje se abren totalmente, el cortador suspende de inmediato su movimiento, al mismo tiempo se cierran las válvulas que controlan en los conductos el suministro de carga y descarga de lodo estabilizador dentro de la cámara de presión.

Es aquí, en donde para colocar los segmentos del recubrimiento primario se necesitan retraer los gatos de empuje, al mismo tiempo que el anillo erector va colocando las dovelas para formar el segmento circular, al quedar bien apretados los tornillos que sujetan las dovelas entre sí, podemos decir que se cierra una secuencia de actividades que en adelante será reiterativa.

Estas secuencias reiterativas en todo sistema de tuneleo se conoce como ciclo de excavación.

El propósito de establecer este ciclo de excavación midiendo el tiempo que se tarda en cada una de sus actividades, nos sirve para comparar el proyecto con el avance en la construcción, pudiendo de esta manera corregir en cualquier momento las deficiencias en los rendimientos, calculando los costos de ejecución.

El ciclo de excavación queda definido con las siguientes etapas de trabajo:

Excavación.

Mezclado.

Extracción y suministro de lodos.

Empuje del escudo.

Colocación de segmentos.

Apretar tornillos entre segmentos.

El avance en cada ciclo, se establece al quedar totalmente extendidos los gatos hidráulicos de empuje y quedar colocado el segmento circular, por lo que éste es del orden de 0.75 m. o sea, el largo de un anillo de dovelas.

En la figura (21) se presenta el anillo erector.

Otras actividades que se desarrollan independientemente del ciclo de excavación son:

Colocación de dispositivos para mantener la geometría de los anillos.

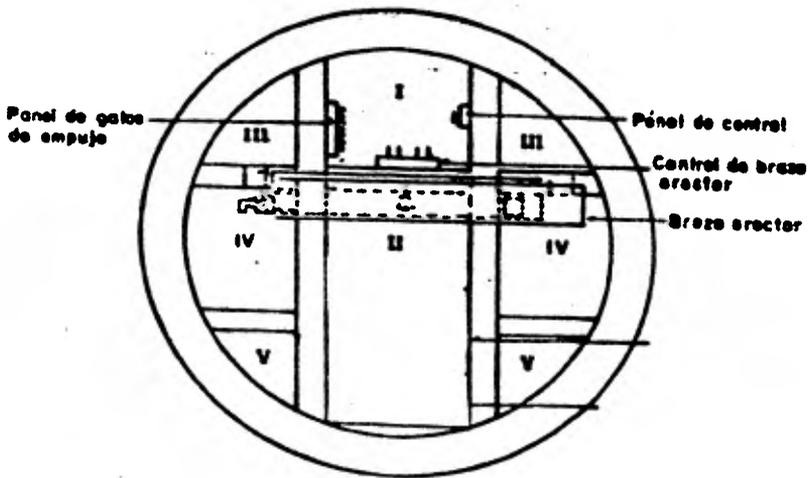
Inyección de los materiales para soportar las paredes del túnel e impermeabilizarlas.

Colocación de tuberías para la conducción de suministro y descarga de lodos, aire comprimido, agua y ventilación del túnel.

Instalaciones de alumbrado, electricidad y comunicaciones.

Instalación de los sistemas de control.

El recubrimiento primario se encuentra formado por doce piezas de concreto reforzado de 75 cm. de largo y de 600 Kgs. de peso, una de ellas es de menor tamaño, pesa 150 Kgs. y es la que cierra el anillo, todas las piezas necesarias son transportadas en el tren de servicios.



SECCION DE CONTROL

FIGURA No. 21

Los anillos ya montados tienden a adoptar una forma oval y no circular como lo pide el proyecto, por lo que se hace necesario colocar un par de puntales dotados con gatos mecánicos para su ajuste. Este apuntalamiento mantiene la geometría de los segmentos circulares y se conserva hasta después del inyectado. La forma de colocar los puntales se muestra en la figura (22).

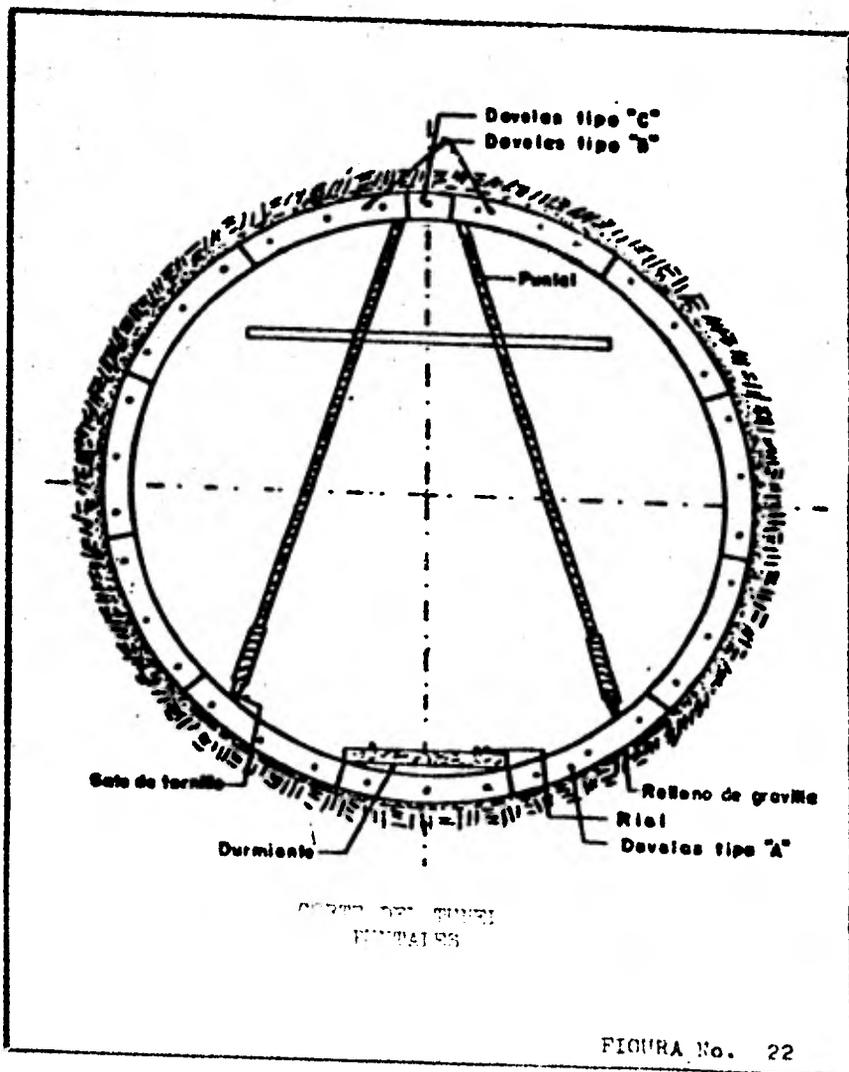
Al ir avanzando el escudo entre el ademe primario y el terreno natural, va quedando un espacio vacío ocasionado por el espesor del faldón, con la finalidad de reducir los asentamientos superficiales y para sellar las filtraciones hacia el túnel se requiere que la oquedad sea llenada con materiales graduados. Estos son inyectados a presión mediante el uso de una lanzadora neumática que se conecta a una manguera, la cual se introduce en perforaciones estratégicamente colocadas en las dovelas. En la figura (23) se presenta la boquilla en la perforación de la dovela.

Es una práctica común en túneles construidos con escudos, el llenar con gravilla el espacio anular, las ventajas que presenta el usar esta gravilla cuyo tamaño debe ser uniforme de 4 6 6 m.m., por que puede mantenerse hasta el faldón del escudo, se puede ir colocando simultáneamente con el avance del escudo, es más barata que una inyección de cemento y forma un relleno efectivo.

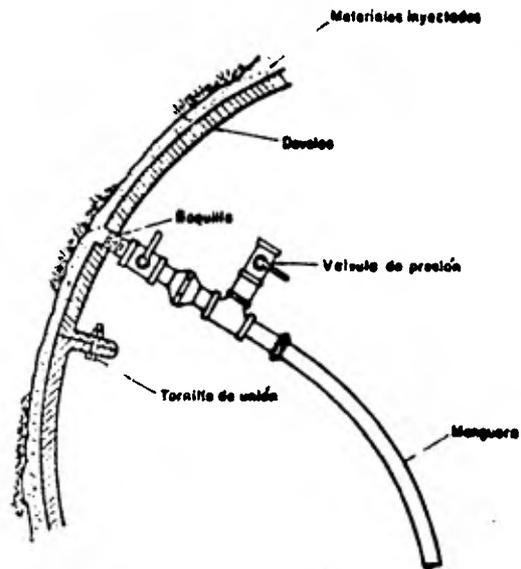
Posteriormente, se inicia la inyección de lechada de acuerdo a la siguiente secuencia:

Primera etapa.- Es una inyección que se realiza en los últimos anillos del tramo a tratar, que tiene como finalidad evitar que la lechada de las etapas siguientes se prolonguen a la zona del escudo. Esta mezcla consiste en un mortero de fraguado rápido.

Segunda etapa.- Se aplica una inyección menos densa que la anterior, sigue siendo un mortero pero más fluido y sin acelerante, su



Fig



REPARACIÓN DE TUBERÍAS

función principal es rellenar los huecos que han quedado entre dovelas, terreno y gravilla.

Tercera etapa.- Esta inyección es más fluida y está formada con agua, cemento y Bentonita, su función principal es la de sellar e impermeabilizar. Antes de iniciar el proceso de inyección, se deben tener calafateadas las uniones entre dovelas, para evitar fugas de la mezcla e introducción de lodo a la galería, en la figura (24) se presenta la forma en que se realiza el inyectado, iniciándolo con el orificio 1, al sellarse éste se sigue con los orificios 5, continuando con los orificios 2.

Después de llenar el volumen correspondiente a los orificios 4, se concluye el proceso de inyección en los orificios 3, o sea el de la galería, por cada una de las etapas.

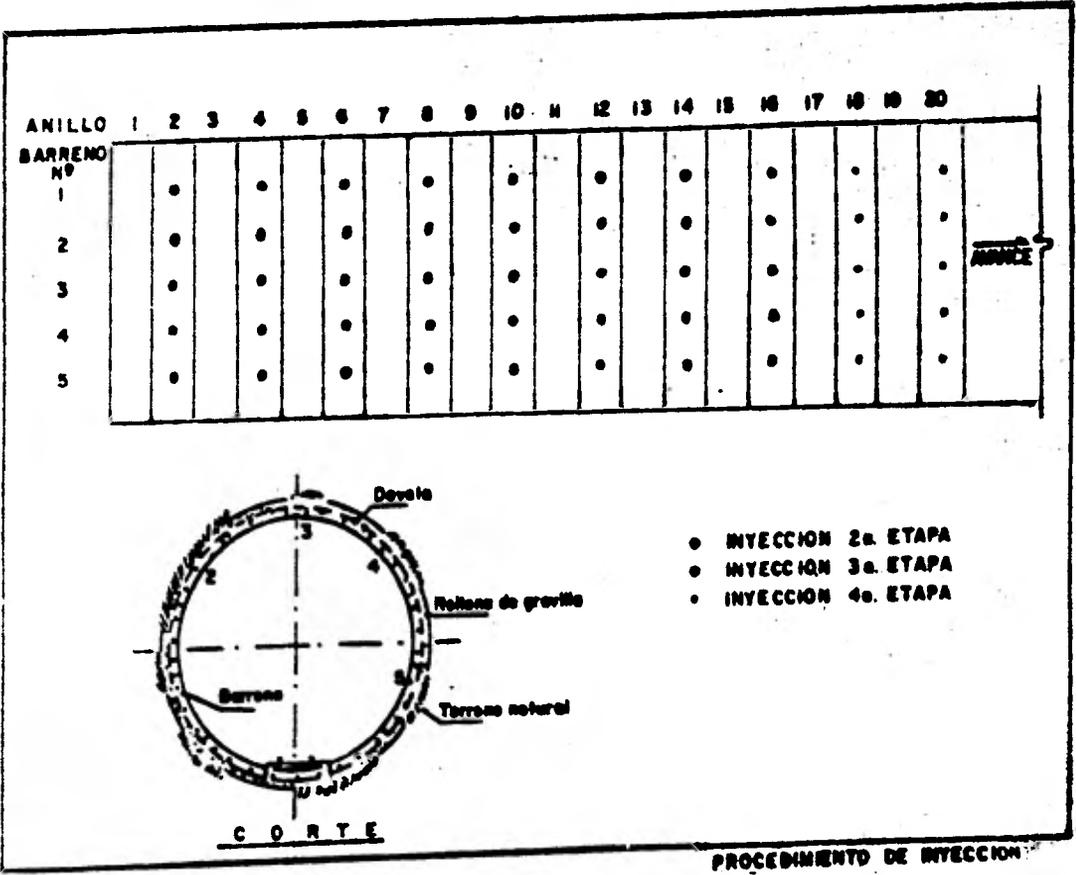
SOPORTE DE LA CARA DE CORTE CON LODO ESTABILIZADOR

La estabilidad de la cara del túnel debe ser discutida en los dos puntos principales, que son la presión del lodo y la densidad. Para lograr la estabilidad del frente, mientras el cortador actúa, la presión del lodo estabilizador deberá cumplir con las siguientes relaciones:

- 1.- Presión del lodo estabilizador $>$ presión del terreno en el frente de excavación + presión del agua que contiene el suelo.

Esta relación es válida para aquellos casos en que la cara del túnel no se puede autosoportar.

- 2.- Presión del lodo estabilizador $>$ presión del agua que contiene el suelo.



PROCEDIMIENTO DE INYECCION

FIGURA No. 24

Relación válida para aquellos casos donde la cara del túnel se puede soportar:

Presión del lodo estabilizador (H - 4C)

Relación determinada para el caso particular de excavaciones de túneles en la zona del lago de la Ciudad de México.

Se puede determinar la presión del lodo estabilizador en base a la teoría del profesor Murayama de la Universidad de Kyoto, Japón, para el manejo de túneles.

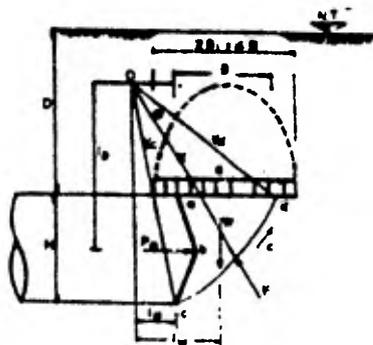
$$P_0 = \frac{1}{1p} \left[(W \cdot lw) + (q \cdot B) \left(la + \frac{B}{2} \right) - \frac{C}{2 \cdot \text{Tan} \delta} (\gamma_c^2 - \gamma_c^1) \right]$$

$$\Sigma P = P_0 \cdot H$$

donde:

- P_0 = Presión del suelo aplicada al escudo.
- W = Peso del terreno.
- q = Presión del suelo en el escudo.
- B = Longitud superior del arco de falla.
- C = Cohesión del suelo.
- δ = Angulo de fricción interna del suelo.
- H = Diámetro del escudo.

TEORIA MURAYAMA



lp, lw, la, c, d = Distancia desde el punto O a P_0, w, a, c y d .

Como se observa en la figura anterior, la presión del lodo estabilizador juega un papel importante para el soporte del frente.

Otra propiedad importante que debe cuidarse es la densidad del lodo estabilizador que varía con las propiedades del subsuelo. Los técnicos japoneses después de muchos experimentos de laboratorio, recomiendan que los valores de la densidad deben ser 1.2 a 1.3

Los trabajos de soporte del frente son, relativamente fáciles en las capas de arcilla y limo con coeficiente de permeabilidad K inferior a 10^{-4} cm/seg.

En suelos que tienen un K aproximado de 10^{-3} cm/seg., se requiere incrementar la presión del lodo estabilizador para lograr soportar la excavación.

Cuando el suelo tiene un K mayor de 10^{-2} cm/seg., puede haber filtraciones de lodo estabilizador en el sitio, si esto ocurre, el disco cortador es usado para presionar el frente ayudando en el soporte, con lo cual se evitan posibles desprendimientos del terreno. Por esto, para prevenir dificultades semejantes, es necesario que la densidad del lodo estabilizador sea alta y que se cuente con técnicas de control muy perfeccionadas.

FUNCIONAMIENTO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO

Dentro de la cámara de presión, el suelo excavado se mezcla con el lodo estabilizador para poderlo transportar con el sistema de bombeo hidráulico a la superficie del terreno, en donde el lodo estabilizador es separado del suelo excavado.

Este proceso es el más difícil del método y aunque parece demasiado antieconómico, tiene sus ventajas.

La fábrica necesita ocupar un terreno grande cerca de la lumbrera, para acomodar los variados equipos e instalaciones que se requieren para separar los distintos materiales del suelo contenidos en la mezcla.

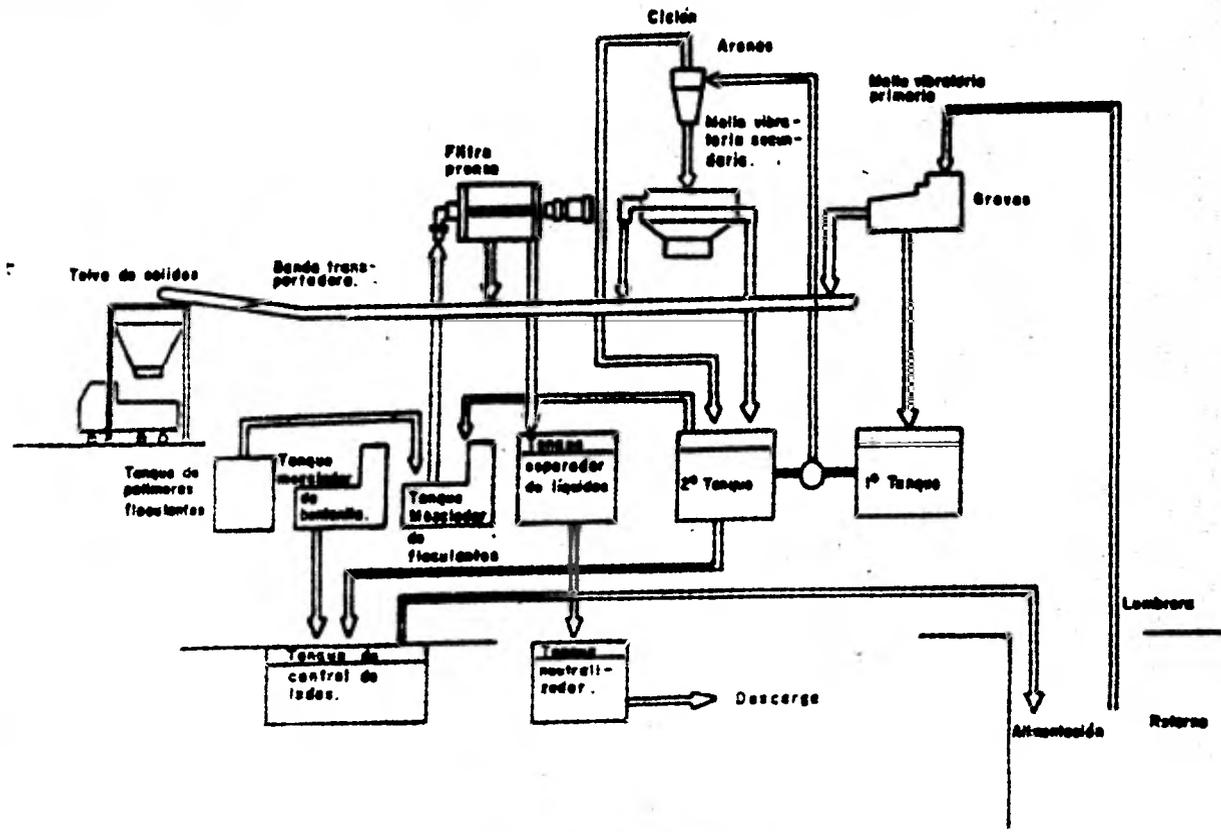
El proceso de tratamiento en general está compuesto de tres etapas ingeniosas: la separación de gravas, la separación de las partículas finas en suspensión y el cribado de arenas.

Como la grava sedimenta rápidamente, la mezcla de lodos se pasa por una malla vibratoria primaria, aquí se separan las gravas y pequeños boleos, enviándose por medio de bandas transportadoras a la tolva de sólidos. La mezcla restante es un lodo fluido que se deposita en un tanque, de aquí se bombea a un clasificador rotatorio o ciclón, el cual con la ayuda de la malla vibratoria secundaria, separa las arenas para mandarlas por medio de la banda transportadora a la tolva de sólidos.

El lodo fluido de partículas finas sobrante, es conducido a un segundo tanque, en el que se separa el lodo estabilizador de las partículas finas en suspensión, de la mezcla. De aquí se envía el lodo estabilizador al tanque de control de lodos, en donde se deja en condiciones óptimas para volverlo a la circulación hacia el frente; el lodo de partículas finas al tener lenta velocidad de asentamiento, es enviada al tanque mezclador de aditivos coagulantes para acelerar el asentamiento, de aquí puede ser sometido a un proceso de desague mediante la utilización de máquinas como: filtros-prensas, centrifugas, filtros de tambor, cinturón de presión, etc. Resultando un material formado de terrones con un contenido de humedad de 30 a 40%.

El líquido es conducido al tanque separador de líquidos en donde, si se requiere, se puede separar el agua de las sustancias químicas que se agregan a la mezcla cuando pasa por el tanque de floculación, el funcionamiento de la planta está representado por la figura (25).

87



PLANTA DE TRATAMIENTO

PROCESO DE CONTROL

Como la superficie de corte de la perforadora de túneles en terreno suave está protegida por la mampara, es imposible visualizar si la excavación es llevada a cabo con propiedad, por esta razón la excavación era altamente dependiente de la experiencia y destreza del trabajador y el control de posición de la excavación era un serio problema. Para remediar esta situación y continuar la excavación bajo un criterio lógico, ha sido necesario investigar y desarrollar el sistema automático de control, con él todos los datos que conciernen a la operación, con seguridad son detectados por instrumentos de medición e indicados digitalmente en todo momento, estos datos son alimentados continuamente a una computadora, en donde los cálculos son llevados a cabo, alcanzando así una excavación estable y segura.

SISTEMA DE CONTROL

Los datos que muestran las condiciones de la excavación son usados para generar señales desde el panel de control central para gobernar la excavadora y de una simple observación se puede conocer el estado de funcionamiento del equipo y además, coordina todas las operaciones del sistema en forma automática o semi-automática según se requiera, de esta manera un colapso en la cara del túnel debido a la saturación o a la emanación de agua, puede ser prevenido.

CONTROL DE VOLUMEN DE EXCAVACION

Es necesario observar constantemente los indicadores correspondientes a los controles del volumen y peso de los flujos de carga y descarga de los lodos, para que el soporte de la superficie de corte sea apropiado.

Esto se logra mediante la medición de volumen y peso, tanto del lodo de descarga como del lodo de alimentación.

En general, el contador de fluido electromagnético y el contador de densidad de rayos γ (gama) son combinados, por lo que el peso de excavación es computado por sustracción de la entrada y salida.

Cuando el volumen de excavación se excede de un valor designado, se asume que el colapso en el frente puede ocurrir, por lo que el volumen excavado debe ser igual al volumen teórico avanzado por la máquina.

CONTROL DE CALIDAD DEL LODO ESTABILIZADOR

El material seleccionado para usarse como lodo estabilizador, debe cumplir las especificaciones del laboratorio teniendo facilidad de tratamiento, los suelos cohesivos disponibles y evaluados en el sitio de construcción, pueden ser apropiados para usarlos como material estabilizador.

Deben hacerse los ajustes necesarios para incrementar la densidad de suelos cohesivos y bajarla para los suelos arenosos, en suelos con poca plasticidad, tipo kaolín, se debe agregar aditivos has ta alcanzar la calidad requerida.

CONTROL DE PRESION DEL LODO ESTABILIZADOR

La presión del lodo estabilizador es muy importante para soportar el frente de trabajo, por lo que debe determinar con mucho cuidado para cada trabajo en particular.

Para controlar la presión del lodo, se usan las válvulas de control de la presión del agua, por medio de la velocidad variable de las bombas que manejan el lodo estabilizador y el regulador automático de la velocidad de rotación de las bombas.

Es importante que cuando las operaciones de excavación sean de tenidas ya sea por el fin de semana o en días festivos, se mantenga la superficie cortadora protegida de colapso, continuando el control de la presión del lodo estabilizador desde la superficie, esto se consigue dejando la cámara de presión presurizada, en la misma forma en que se deja cuando se montan los segmentos circulares.

CONTROL DE DIRECCION

El movimiento de dirección y pendiente, se maneja con el empuje de los gatos hidráulicos del escudo, el fluido a presión dentro de la cámara del frente funciona como un cojinete que ayuda a que el escudo se desplace con facilidad; sin embargo, puede ser alterado este movimiento cuando el flujo de alimentación y descarga no se efectúan correctamente. Como estas actividades se realizan en forma automática, debe verificarse si la maquinaria sigue la dirección y pendiente establecidas.

Esto se logra por medio del uso de sistemas laser, que en la construcción de túneles sirve no sólo para reducir costos, sino para mejorar la exactitud, reducir pérdidas y proporcionar mayor seguridad.

Una multitud de lasers y montajes se consiguen comercialmente, pero la combinación más conveniente proyecta la luz laser a través del sistema óptico de un teodolito, de manera que ángulos horizontales y verticales puedan girarse convenientemente con precisión.

La combinación laser-teodolito, se monta en un soporte especialmente diseñado, fijo al revestimiento primario. El soporte se diseña de manera que el laser-teodolito se coloque en tres dimensiones y la luz laser precisamente orientada en azimuth (dirección) y de flexión (pendiente). La posición del laser-teodolito y la orientación de la luz laser, se calculan con equipo de procesamiento electrónico de datos y es registrado en una computadora.

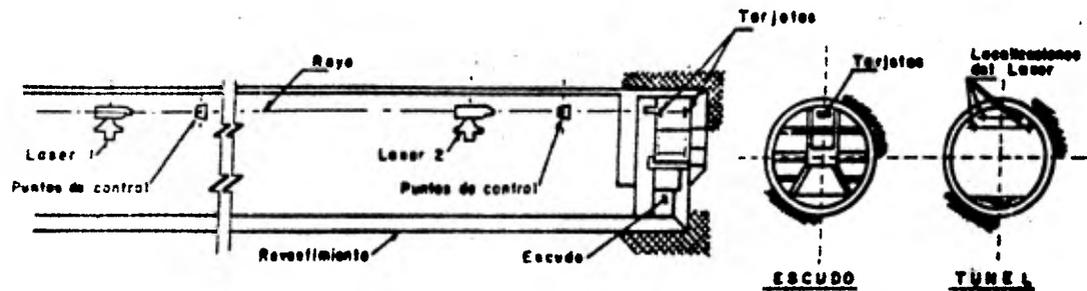
La luz laser se dirige continuamente a dos tarjetas fijas en el escudo. En las intersecciones de la luz con las tarjetas aparecen puntos rojos brillantes. Conforme el escudo se mueve, los puntos rojos trazan trayectorias en las tarjetas.

La posición relativa de la trayectoria marcada por el punto, comparada con la trayectoria calculada, indica la desviación del escudo de la posición deseada. En la figura (26), se presenta la localización del laser y las tarjetas dentro del túnel.

En una sección del túnel en tangente o en línea recta, la trayectoria calculada es una línea recta inclinada. En una sección de túnel en curva, la trayectoria calculada se aproxima a una hipérbola. A lo largo de la trayectoria graficada, se marcan estaciones a ciertos intervalos para referencia.

En el techo del compartimiento del operador del escudo, se montan dos tarjetas. Se usan dos tarjetas en lugar de una, por la misma razón que un rifle tiene mira trasera y delantera.

Las tarjetas se colocan en soportes con pasadores, y pueden girar hacia arriba o hacia abajo, según estén en uso o no. Los soportes también pueden moverse lateralmente alrededor del centro del escudo para compensar el giro del escudo. Para un rápido chequeo del giro y pendiente del escudo, el operador puede usar una plomada y una placa graduada en grados de giro y porcentaje de pendiente.



SISTEMA DE DIRECCION DEL ESCUDO

Si por alguna razón el laser se mueve, debido a movimientos del revestimiento o por accidente, la luz no pasa a través de los puntos de control y el operador no verá el punto rojo. Un punto de control es una placa perforada que se coloca entre el laser y el escudo; la luz del rayo debe pasar en todo momento a través del orificio y se colocan normalmente tres puntos de control.

ELIMINADOR DE GRAVAS

En todos los lugares en donde se construyen túneles, pueden encontrarse estratos confinados conteniendo gravas, guijarros o pedruscos, con tamaños que van de 50 m.m. a 250 m.m.; estos materiales al tratar de pasar por la toma de succión de la tubería de descarga, producen atascamientos, por lo que es necesario removerlos.

Una manera de conseguir esto, es usando una trituradora hermética, la que recoge estos materiales para triturarlos y después regresarlos a los ductos de transportación de la mezcla de lodos, de esta forma son descargados a la superficie del terreno.

El proceso del disco cortador, es el que presenta mayor seguridad, porque la superficie cortadora va cortando el terreno y triturando el material grueso, para luego pasarlo a la cámara de presión y de aquí mezclado con los lodos, sacarlo por el sistema de bombeo a la superficie.

Otro procedimiento es por un eliminador hermético que atrapa las gravas, guijarros y pedruscos, pasándolos hacia afuera de la cámara de presión a través de la mampara, por medio de las dobles puertas en forma de esclusa.

CAPITULO V

PRESUPUESTO

En base a estudios realizados por el Departamento de Transpor-
tación US. Washington, DC 20591, sobre la factibilidad técnica y
económica de Sistemas de Túneles en suelos blandos, se determinó el
presupuesto correspondiente a la construcción del túnel del Inter-
ceptor Oriente, para el año de 1980.

En estos estudios se consideraron cinco diferentes métodos de
túneles compatibles entre sí, los cuales son:

Método 1.- Escudo con disco cortador que permite la estabilización
del frente con aire comprimido o con lodo a presión. El
revestimiento primario de concreto, es colado en obra y
se transporta la maquinaria en el interior del túnel, -
por medio de rieles.

Método 2.- Escudo con disco cortador, también se puede usar aire -
comprimido o lodo a presión en el frente. El revesti-
miento primario es por medio de segmentos circulares a -
base de dovelas pre-fabricadas de concreto reforzado, la
maquina dentro del túnel se transporta por medio de rie-
les.

Método 3.- Escudo con excavador de cabeza cortadora, y extracción -
de terreno excavado por medio de sistema hidráulico, lo-
do estabilizador de presión en el frente, revestimiento
de concreto colado en obra.

Estos métodos operan en terrenos de tipo 1-10 sueltos. Las condiciones de trabajo en el túnel. En terreno suelto el movimiento es igual que un líquido viscoso; se presenta la extrusión, pudiendo invadir el túnel no solamente por entre la bóveda y los costados, sino también a través del piso. Es necesario rellenar el terreno alrededor del túnel para contener el flujo.

Los tipos de suelos representativos son, terrenos bajo el N.A.F. que tengan la mayoría de sus granos de un tamaño cercano a 0.005 m.m.

Método 4.- Es un sistema limitado para usarse solamente en suelos firmes. Utiliza un escudo con disco cortador. El revestimiento primario de concreto es colado en obra.

Método 5.- Es un sistema semejante al anterior, pero el revestimiento primario y el definitivo es a base de segmentos circulares prefabricados.

Los métodos constructivos 4 y 5 operan en terrenos de tipo 1-6 firmes. Las condiciones de trabajo en el túnel, semejantes a suelos compactos, el movimiento en el túnel es lento; sin embargo, es asociado con incrementos considerables de volumen en el terreno que rodea la galería.

Los suelos representativos son: arcillas precomprimidas pesadas, con índice de plasticidad mayor o cercano a 30, formaciones sedimentarias, los dibujos esquemáticos de estos cinco métodos se presentan en las figuras (27) y (28).

El costo total de estos sistemas fue obtenido mediante un programa de computación, de acuerdo con las siguientes fórmulas:

$$1.- \text{Costo fijo neto} = E_i + M_i + C_1$$

$$2.- \text{ Costo de labor neto} = \left(\frac{WR_1 + C_2}{L_{Roa}} \right)$$

$$3.- \text{ Costo total del sistema} = C_3 \text{ (Costo fijo neto + costo de labor neto)}$$

Donde:

E_1 = Costo por equipo para i componentes (dólares por pie lineal).

M_1 = Costo de materiales para i componentes (dólares por pie lineal).

C_1 = Costo neto de la constante común a todos los sistemas (dólares por pie lineal).

WR_1 = Coeficiente del suelo de labor para la componente número i (dólares por 24 hrs.).

C_2 = Constante del coeficiente del suelo de labor común para todos los sistemas (dólares por 24 hrs.).

L_{Roa} = Mínimo coeficiente de avance entre componentes de los sistemas (pie lineal por 24 hrs.).

C_3 = 1.3, constante que considera un coeficiente por gastos generales del 30%.

Los datos de alimentación para el programa de la computadora, fueron derivados de una variedad de fuentes. Para muchos componentes de los sistemas, los costos y rendimientos fueron obtenidos de publicaciones de datos, publicaciones de manufacturas y reportes de obras de túneles en suelos blandos. En otros casos, fue necesario generar la estimación, basándose en experiencias y fallas ingenieriles.

Los análisis de costos y rendimientos fueron considerados para el período comprendido de 1970 a 1985. Los resultados fueron generados para 1975, 1980 y 1985 y se resumen en la tabla (X).

Todos los costos fueron expresados en dólares con las constan-

tes para 1970, los analistas de organismos especializados, pronosticaron un crecimiento inflacionario anual normal, que con la crisis económica ocasionada con la escasez de materias y energéticos, hicieron que los índices inflacionarios se elevaran considerablemente, y ya para el año de 1975 sobrepasaran todos los cálculos previstos, por lo que es necesario considerar incrementos del orden del 250% al 350%, para la década de 1975 a 1985.

Para la estimación de costos de este trabajo, se tomó el promedio de estos valores o sea 300%.

OBTENCION DEL PRECIO UNITARIO

De la gráfica (29) para un avance de 40 ft. por día aproximadamente 12 mts. por 24 hrs., se obtiene un costo por pie (ft) de \$950 dólares, lo que equivale a 3,116 dólares por metro lineal. Si a este costo le aplicamos el factor inflacionario para el período de 10 años (1970-1980), calculado como 300%, se tendrá un costo actualizado de 9,348 dólares por metro lineal y considerando el cambio de dólares a pesos mexicanos de \$ 23.40, se tendrá 218,743.20 pesos, considerando aproximadamente 220,000 pesos por metro lineal.

El presupuesto obtenido para la construcción del túnel del Interceptor Oriente en base a la figura (31), se detalla en la forma siguiente:

El costo total por metro lineal de túnel terminado mediante el sistema combinado Escudo Cortador con Frente Estabilizado con fluidos a presión, es de 220,000 pesos (determinado para el año 1980) - aproximadamente, por lo que para excavar 15,600 mts. de túnel se requerirá intervenir 3,432 millones de pesos, de la siguiente manera:

PRESUPUESTO PARA LA EXCAVACION DEL INTERCEPTOR ORIENTE.

DATOS DEL TUNEL:

Longitud de excavación = 15.6 Km.

Diámetro de excavación = 6.2 m.

Profundidad media = 30.0 m.

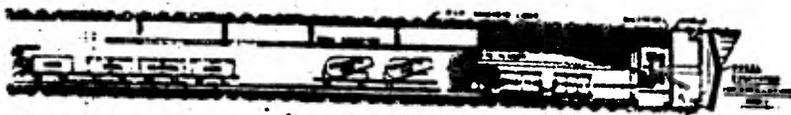
	UNIDAD	CANTIDAD. (m)	P.U. (\$)	IMPORTE (\$ x 10 ⁶)
Excavación con Escudo y Disco excavador de túnel de 6.2 m. de ϕ , a una profundidad media de 30 m. y en suelos pertenecientes a la "Zona -- del Lago"	m.l.	15 600	15 400	240.24
Estabilidad frontal de túnel de - - ϕ = 6.2 m., con el sistema de lodo a presión.	m.l.	15 600	35 200	549.12
Rezaga de material producto de excavación de túnel. Material muy blando con 20% de sólidos por unidad de volumen. Sistema hidráulico de rezaga. Incluye transporte a 20 Km. - de distancia de la lumbrera al tiradero.	m.l.	15 600	52 800	823.68
Revestimiento temporal y final del túnel a base de segmentos de concreto reforzado con espesor e = 60 cm.	m.l.	15 600	94 600	1 475.76
Inyección de materiales para rellenar el hueco dejado por el escudo - al realizarse su avance.	m.l.	15 600	8 800	137.28
Instalaciones necesarias requeridas para poder realizar los trabajos de tuneleo (eléctricas, hidráulicas, - tendidos de vía, etc.)	m.l.	15 600	6 600	102.96
Otras actividades que se realizan - para complementar los trabajos.	m.l.	15 600	6 600	102.96
T O T A L	m.l.	15 600	220 000	3 432.00

Mano de obra	-----	\$ 995.28 millones.
Materiales	-----	" 1,115.40 "
Equipos	-----	" 1,321.32 "
Costo total ..		<u>\$ 3,432.00 millones</u>

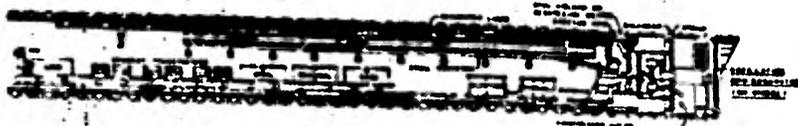
En la figura (30) se presentan los factores de costos determinados por el estudio de la referencia 15, para los conceptos:

Mano de obra, materiales y equipo en trabajos de túneles en suelos blandos.

En la figura (31) se muestran los factores de costos para cada una de las actividades que se realizan en el tuneleo con el método anteriormente mencionado.



"UNLIMITED" SYSTEM NO. 1



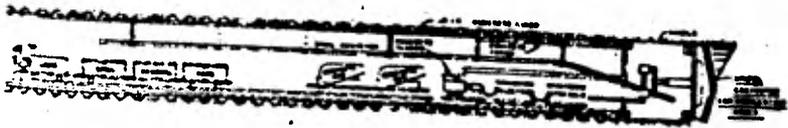
"UNLIMITED" SYSTEM NO. 2



"UNLIMITED" SYSTEM NO. 3

FINAL "UNLIMITED" SYSTEMS SELECTION

FIGURA No. 27



"LIMITED" SYSTEM NO. 4



"LIMITED" SYSTEM NO. 5

FINAL "LIMITED" SYSTEMS SELECTION

FIGURE No. 28

T A B L A X

CONCEPTOS DE LOS SISTEMAS (TIPO DEL SUELO 1-10)			
NÚMERO DE SISTEMA DESIGNACION Y DESCRIPCIÓN DE LA COMPUTACION.	No.1	No.2	No.3
	Disco Excavador y Escudo, Transporte de rieles, aire comprimido o lodo a presión estabilizando el frente. Revestimiento de concreto colado en obra.	Disco Excavador y Escudo, Transporte de rieles, aire comprimido o lodo a presión estabilizando el frente. Revestimiento a base de dovelas de concreto reforzado.	Excavador de fresa y Escudo rezaga hidráulica, transporte de rieles, lodo a presión estabilizando el frente. Revestimiento de concreto colado en obra.
C O S T O (\$/PIE LINEAL) ^a			
1975	PROMEDIO RANGO	800 685 - 1 070	780 685 - 1 010
1980	PROMEDIO RANGO	580 530 - 635	600 560 - 645
1985	PROMEDIO RANGO	515 500 - 550	575 520 - 565
			900 775 - 1 180 650 600 - 710 575 560 - 610
T I E M P O D E A V A N C E (Pies/24 Hrs.)			
1975	PROMEDIO RANGO	40 25 - 50	45 30 - 60
1980	PROMEDIO RANGO	90 70 - 115	95 75 - 115
1985	PROMEDIO RANGO	200 145 - 225	210 145 - 225
			40 25 - 50 90 70 - 115 200 145 - 225
I N V E S T I G A C I O N Y D E S A R R O L L O (\$ x 10 ⁶) ^{a, b}			
1975	PROMEDIO RANGO	2.6 1.7 - 4.2	1.8 1.1 - 3.0
1980	PROMEDIO RANGO	12.3 9.0 - 43.6	11.1 8.0 - 35.9
1985	PROMEDIO RANGO	4.3 2.9 - 10.0	3.8 2.6 - 10.2
			5.6 3.3 - 7.7 16.7 13.5 - 52.8 5.8 4.1 - 10.0

a = Costos en dólares basados en la constante para 1970.

b = R&D Costos para el desarrollo de componentes de los sistemas.

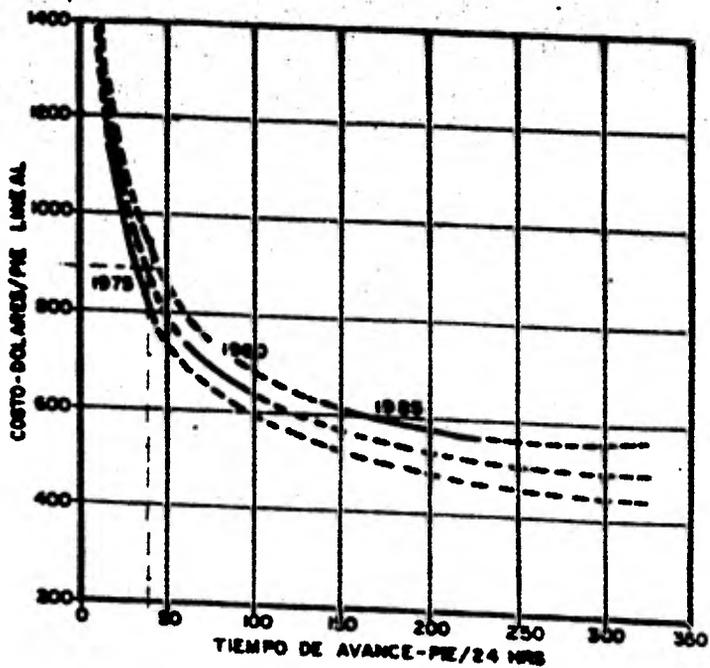


FIGURA COSTOS Y TIEMPOS DE AVANCE ESTIMADOS
29 PARA EL SISTEMA Nº 3

FIGURA No. 29

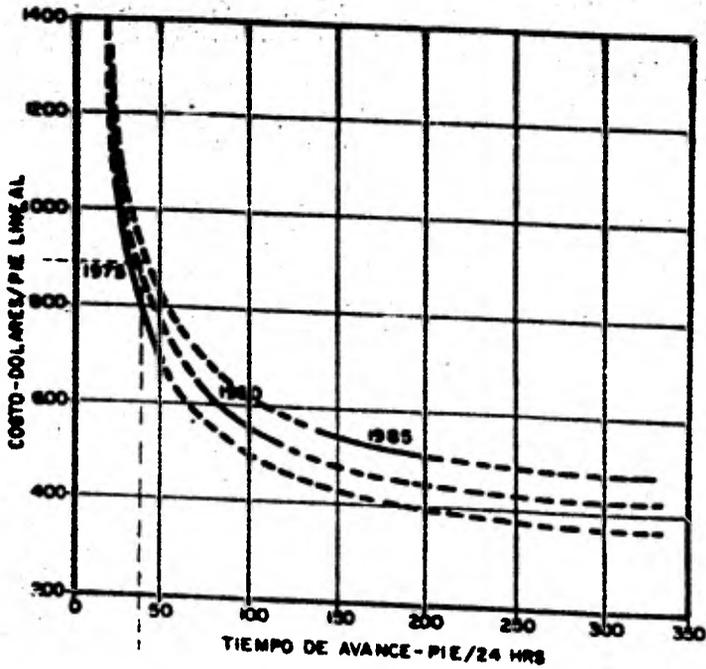
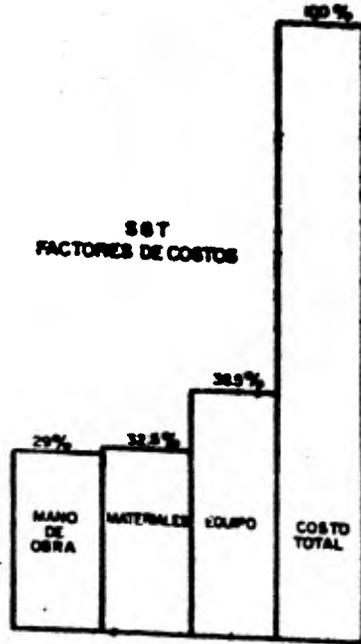


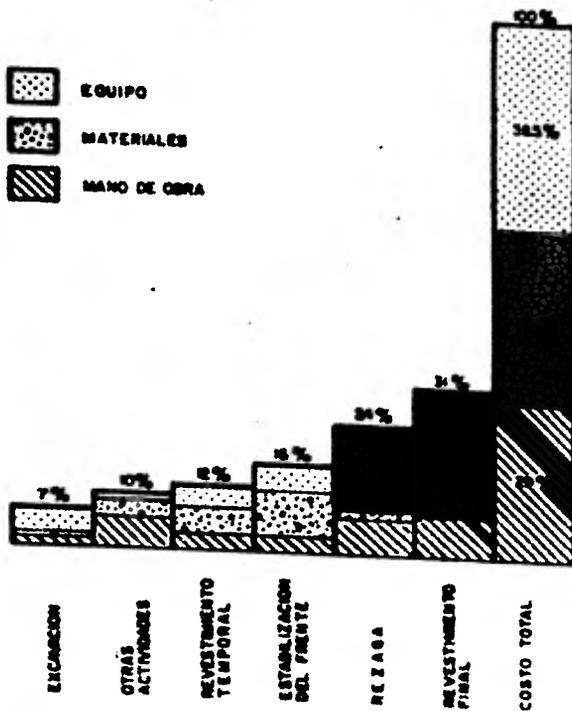
FIGURA 20 COSTOS Y TIEMPOS DE AVANCE ESTIMADOS PARA EL SISTEMA N° 1

FIGURA No. 20

**SST
FACTORES DE COSTOS**



FACTORES DE COSTO PARA EL METODO
DE TUNELEO EN SUELOS BLANDOS CON
ESCUDO, DISCO EXCAVADOR Y LOCO ESTA-
BILIZADOR EN EL FRENTE .



FACTORES DE COSTO DE LAS ACTIVIDADES QUE SE REALIZAN EN EL METODO DEL ESCUDO CON LODO AL FRENTE.

CONCLUSIONES

- 1.- La construcción de la segunda etapa del Interceptor Oriente, - atravesará la denominada Zona del Lago, las propiedades mecánicas de los suelos existentes en esta parte de la Ciudad de México, está formada por suelos muy blandos; cuyos componentes básicos son 8 partes de agua por una de sólidos en volumen, para la profundidad de proyecto, de ± 30 mts., condición obligada para el funcionamiento hidráulico por gravedad del Sistema de Drenaje Profundo.
- 2.- El método de excavación con escudo de frente abierto y aire comprimido, no podrá ser utilizado para la excavación del túnel, ya que se necesitan presiones de aire mayores de 20 ton./m², con turnos de trabajos cortos, comparados con los tiempos de descompresión. Esto origina problemas de carácter médico y económico.
- 3.- Para atacar estos suelos se requiere utilizar procedimientos de excavación que puedan mantener un estricto control de las pérdidas de suelos y los asentamientos, de tal manera que el volumen teórico avanzado sea igual al volumen excavado. El método de Escudo Cortador con frente estabilizado con fluidos a presión, efectúa estos controles en forma automática, por medio de computadoras.
- 4.- De las experiencias de los escudos con frente estabilizado con fluido a presión, las cuales se han obtenido en los trabajos efectuados en Japón y otros países, se muestra que los suelos atravesados son formaciones de gravas y arenas, siendo escasas las experiencias en arcillas. Por la necesidad de mantener la

resistencia original del suelo arcilloso, es indispensable hacer una revisión detallada del sistema, a fin de no remodelar el suelo durante el proceso constructivo.

- 5.- El uso de Bentonita en el lodo estabilizador no es recomendable para trabajos en zona urbana, por el alto costo que implica su tratamiento, además de que necesita alojar las instalaciones de la planta en terrenos de áreas grandes. Los técnicos japoneses recomiendan usar los suelos arcillosos existentes en los lugares de construcción y una posible solución sería que el material excavado sea transportado por medio de camiones pipas, diseñados especialmente para este trabajo, este producto de excavación puede ser tirado en sitios escogidos previamente.

- 6.- Finalmente, podemos definir que el método de excavación con Escudo Cortador con Frente Estabilizado con fluidos a presión, es la herramienta que ayudará a la construcción de servicios necesarios, alojados en el subsuelo del antiguo lago, hoy densamente poblada.

REFERENCIAS

- 1.- Relaciones Originales.- Chinalpafn.
- 2.- Memorias de las Obras del Sistema de Drenaje Profundo del Distrito Federal.- D.D.F. Tomos 1, 2, 3.
- 3.- Interceptores Profundos y El Emisor Central.- D.D.F. Dirección General de Obras Hidráulicas. México, 1969.
- 4.- El Subsuelo de la Ciudad de México.- Marsal, R.J. y Mazarí, M. Universidad Nacional Autónoma de México.
- 5.- Información reciente sobre las características del subsuelo y la práctica de la Ingeniería de Cimentaciones en la Ciudad de México. U.N.A.M. 1970.
- 6.- Design of Tunnel Liners and Support Systems.- Apendix IV University of Illinois, U.S.A.
- 7.- Memorias Técnicas.- Túnel, S.A. de C.V.
- 8.- The art of Tunneling.- Szechy, K. Budapest, 1966.
- 9.- Curso: Construcción de Túneles. Apuntes.- Centro de Educación Continua-División de Estudios de Posgrado. Facultad de Ingeniería, U.N.A.M.
- 10.- Slurry Shield Method in Japan.- Proceeding ASCE-AIME Rapid Excavation and Tunneling. Hisashi Takahasi and Hironabu Yamazaki.- Conference Junio 1976.

- 11.- The Principle and Field Experience of a Slurry Mole Method for Tunneling in the Soft Ground.- Gosaburo Miki, Takao Saito, Hirou nabu Yamazaki. 1975.
- 12.- The Tekken Slurry Shield Tunneling.- Tekken Construction Co. - L.T.D. 1978.
- 13.- Construction Record of the Tekken Slurry Shield Tunneling.- Tekken Construction Co. L.T.D. 1978.
- 14.- Aire Comprimido en Túneles. IX Congreso Nacional de Ingeniería Civil.- Farjeat E.P.; Schmitter J.J. México, 1973.
- 15.- A System Study of Soft Ground Tunneling.- Fenix & Scisson, Inc. Arthur D. Little, Inc. 1970.