

97 201



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

CONSTRUCCION DE TUNELES PARA EL METRO EN LA CIUDAD DE MEXICO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE;

INGENIERO CIVIL

P R E S E N T A ;

MARTHA IMELDA MENDEZ VARGAS

DIRECTOR DE TESIS,
ING. MARIO OLGUIN AZPEITIA

MEXICO, D. F.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

1990



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

I N D I C E

I.	INTRODUCCION	1
1.1	Antecedentes	4
1.2	Diferentes alternativas	8
1.3	Criterios de selección	16
II.	ESTUDIOS PRELIMINARES	18
2.1	Estratigrafía	19
2.2	Sondeos	25
III.	DIFERENTES TIPOS DE TUNEL	27
3.1	Aspectos generales de una estación	28
3.2	Túneles de estación	30
3.2.1	Estaciones sin columna al centro	30
3.2.2	Estaciones con columna al centro	30
3.3	Túneles entre estaciones	33
3.4	Túneles secundarios	34
3.4.1	Túneles de acceso	34
3.4.2	Túneles de conexión	35
3.4.3	Túneles de distribución	35
3.4.4	Túneles para subestación	35
IV.	PROCEDIMIENTOS CONSTRUCTIVOS	37
4.1	Construcción de la lumbrera	38
4.2	Excavación de túneles	41
4.2.1	Método austríaco	41
4.2.2	Túneles con escudo	52
4.2.2.1	Escudo de frente abierto de 9.14m Ø ...	53
-	Ciclo de operación	58
-	Revestimiento del túnel	60
-	Inyecciones	66
4.2.2.2	Escudo de frente abierto de 9.513m Ø ..	69
-	Arranque y operación del escudo	82
-	Excavación con escudo en suelos tobáceos	85
-	Excavación con escudo en suelos granulares sin cementación	85

V.	ALGUNOS PROBLEMAS DURANTE LA CONSTRUCCION	87
5.1	Problemas de estabilidad en el tramo comprendido entre la estación camarones y la estación refinaria de la línea 7 del metro	88
5.2	Desviación topográfica en la línea 9 del metro entre los cadenamientos 18+401.989 y 18+459.307 de 0.60 m	94
VI.	INSTRUMENTACION	100
6.1	Instrumentación en el interior del túnel durante la excavación	103
6.2	Instrumentación en soportes temporales y en revestimientos provisionales y definitivos	110
6.3	Periodicidad de las mediciones	115
6.4	Frecuencia de lecturas para la instrumentación en el interior del túnel durante la excavación	115
6.5	Frecuencia de lecturas para la instrumentación en los soportes temporales y en los revestimientos provisional y definitivo	116
VII.	CONCLUSIONES	119
	BIBLIOGRAFIA	121

CAPITULO I

INTRODUCCION

INTRODUCCION

La ciudad de México es en la actualidad una metrópoli gigantesca - que requiere de modernos sistemas de transporte colectivo, como el Metro, para comunicar las distintas zonas de la urbe. Es tal la cantidad de habitantes que requiere desplazarse diariamente, que tan solo este medio de transporte se estima que generará en el año 2010 casi tres millones de -- viajes en la hora de máxima demanda.

Para realizar un sistema de tal magnitud, se deben reunir todos los esfuerzos tendientes a lograr una mejora en las técnicas de construcción y optimizar las altas inversiones que se originan.

Por lo que se ha planteado como principal objetivo optimizar los recursos destinados a la construcción del metro, conservando y aún incrementando las características básicas de seguridad, rapidez y eficacia, - tarea encomendada a profesionistas y técnicos mexicanos.

Este trabajo pretende dejar testimonio de los métodos que se han - utilizado en la construcción de túneles, para satisfacer las necesidades de las obras del metro.

La primera ocasión que se construyeron túneles para metro fué en el año de 1968, para la línea 1, utilizando un escudo de frente abierto y - excavación manual. En 1981 durante la construcción de las líneas 3 y 7 - se utilizó el escudo de frente abierto y en algunos tramos hubo la nece-

idad de usar el método convencional, explosivos y máquinas rozadoras - para la excavación.

En 1986 al ordenarse la ampliación de la línea 7 hacia el norte de la ciudad, con el objeto de abatir costos y tiempo los técnicos mexicanos investigaron y diseñaron el primer escudo de fabricación nacional - de frente abierto y totalmente mecanizado. Su descripción, utilización y experiencias son parte de este trabajo.

ANTECEDENTES

La Ciudad de México considerada entre las cinco metrópolis con mayor densidad de población, ha registrado en los últimos veinte años un crecimiento geométrico tanto en el número de habitantes como en la mancha urbana. No ha sucedido lo mismo con la infraestructura urbana, escasa desde sus inicios y, por lo tanto, cada vez es más señalada la insuficiencia de servicios para satisfacer las necesidades de la población.

Según el pronóstico demográfico de la Ciudad de México (Covitur, 1984), esta ciudad llegará cerca de los 40.8 millones de habitantes para el año 2010, lo que implicaría la construcción de otra ciudad del tamaño de la actual, que requeriría de transporte, vivienda, equipamiento y servicios, para cubrir los requerimientos básicos.

Como consecuencia de lo anterior las necesidades de movilidad se incrementarán notablemente. El número de viajes persona-día estimado para el año 2010, es del orden de 41 millones. Esto exigirá una definición concreta de las estrategias que afronten y resuelvan de forma conjunta las demandas futuras de transportación.

Por ello el Gobierno de la Ciudad ha implementado una serie de programas que prevean la solución a la demanda de los servicios y dentro de ellos se encuentra el Programa Maestro del Metro.

En este Programa se establece que el metro es la columna vertebral del sistema de transporte. Sin embargo, a pesar de su alta eficiencia y capacidad, el metro por sí solo no es capaz de resolver todos los problemas de movilidad, por ello es necesario coordinarlo con otros medios.

Bajo estas condiciones, el Programa Maestro del Metro es el instrumento rector de carácter dinámico para la ampliación sistemática de la

red, misma que prevé revisiones para mantenerlo actualizado y que se adapte a las condiciones que se vayan presentando en la ciudad, guardando congruencia con el Plan Nacional de Desarrollo, con los objetivos y políticas del Programa de Desarrollo de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México y de la Región Centro así como del Programa de Desarrollo Urbano del Distrito Federal y con los lineamientos establecidos en el Programa Integral de Transporte y Vialidad.

Los objetivos generales del Plan Maestro del Metro son:

- a) Proporcionar un servicio de transporte colectivo eficiente y satisfactorio donde la demanda lo justifique, de acuerdo con los lineamientos del Programa Integral de Transporte y Vialidad.
- b) Obtener el máximo beneficio social en la asignación de inversiones, realizándolas en la forma, lugar y momento que las necesidades de la población indiquen.
- c) Apoyar las acciones de reordenamiento de la estructura urbana definida en los programas correspondientes.
- d) Ofrecer un servicio de transporte colectivo que reduzca el uso intenso del automóvil.
- e) Coadyuvar a los programas de mejoramiento ecológico.
- f) Incorporar la opinión de la población en el proceso de planeación del Metro.

- g) Conformar la red de Metro como elemento estructurador del Sistema de Transporte Metropolitano y su conexión con los sistemas interurbanos.
- h) Lograr el equilibrio del Sistema Metro para evitar la congestión o subutilización de las líneas.
- i) Incrementar las opciones de traslado hacia los centros de trabajo, servicio y recreación.
- j) Facilitar la sustitución de medios de transporte en los corredores cuya demanda futura requiera una línea del Metro.
- k) Generar normas y especificaciones que propicien el desarrollo de la tecnología y la industria nacional, así como la sustitución de importaciones y la generación de empleos.

Para alcanzar estos objetivos se diseñó una metodología apropiada que aprovecha las experiencias acumuladas y garantiza un proceso de trabajo sistemático en el que se considera fundamental la retroalimentación para el proceso de planeación.

Para el diseño de la metodología, se obtuvo información para cuantificar la oferta y la demanda de transporte y definir las posibilidades y restricciones que la estructura urbana de la ciudad ofrece para las ampliaciones futuras de la red.

La necesidad de conocer a fondo las características de movilidad -

de la Ciudad de México, determinó la realización de la encuesta origen-destino, que permitió determinar el origen y destino de los viajes diarios, los medios de transporte utilizados, los motivos de los viajes, - el nivel socio-económico de los viajeros, su edad e incluso precisar la demanda de estacionamientos.

Consecuentemente un aspecto que perfila el programa es la definición de una red del metro equilibrada, es decir que la oferta de servicios de todas las líneas corresponda con la Hora de Máxima Demanda a fin de evitar saturación o subutilización de equipos e instalaciones. - Con apoyo en modelos de simulación procesados en computadora fue posible determinar el horizonte de planeación para el año 2010, fecha en que la red deberá alcanzar 315.349 Kilómetros, con un total de 15 líneas, 274 estaciones y 838 trenes que atenderán una demanda de 13.23 millones de pasajeros diarios y en la Hora Máxima de Demanda 2.99 millones de viajes.

Definido este horizonte se determinan las etapas de ampliación hasta 1994, tratar de determinar las etapas posteriores sería poco preciso debido a que en este momento no se cuenta con la información necesaria para retroalimentar los modelos de simulación.

Adicionalmente se analiza la factibilidad técnica de cada una de las etapas, la posibilidad de realizar trabajos en función de las características físicas, de ubicación y del entorno en donde se localiza. - Así mismo se estudia el tipo de línea más conveniente: elevada, superficial, cajón subterráneo o túnel.

DIFERENTES ALTERNATIVAS

SOLUCION ELEVADA

La existencia de instalaciones municipales de considerables dimensiones a lo largo del trazo de algunas líneas hizo necesaria la implementación de una solución elevada que eliminara la necesidad de realizar desvíos de instalaciones, y que permitiera el libre paso de las vialidades transversales y longitudinales así como de las vías de ferrocarril.

Esta solución está constituida por zapatas macizas de concreto reforzado, apoyadas en pilotes de fricción; una sola hilera de columnas en sentido transversal al eje de la línea y vigas de concreto postensado en sección cajón con un claro entre apoyos desde 35 m a 45 m aproximadamente. La unión entre vigas y columnas se logra mediante apoyos de neopreno reforzado con placas de acero. fig. (I.1).

SOLUCION SUPERFICIAL

Esta es una solución estructural constituida por una losa de concreto reforzado de 8.0 m de ancho y dos muretes laterales de contención. La losa es desplantada sobre terreno previamente mejorado y a una profundidad aproximada de 1.30 m para lograr de esta manera, una adecuada compensación de cargas.

Es posible utilizar una solución de tipo superficial si existen avenidas con una sección transversal con las medidas suficientes para alojar tanto al Sistema Metro como a las vialidades adyacentes, cuidando sustancialmente el paisaje urbano.

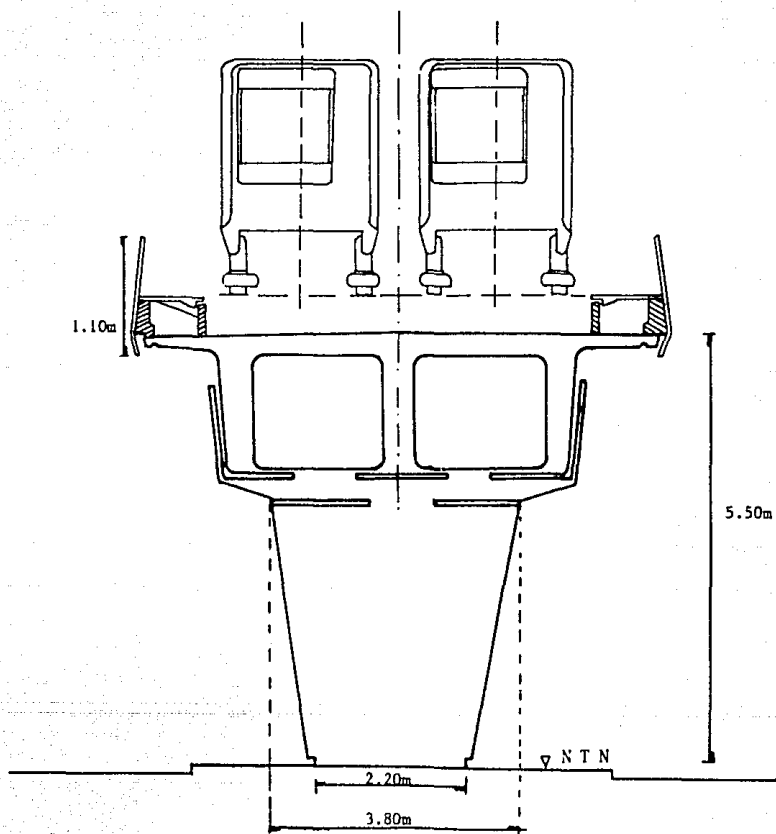


FIG. 1.1 SOLUCION ELEVADA

Es necesario realizar simultáneamente estudios para las obras inducidas que se generan y que establecen una barrera que impide la comunicación vial y peatonal entre uno y otro lado de la línea, así como un análisis respecto al mantenimiento de las instalaciones férreas y electromecánicas del metro que estarán expuestas permanentemente a la intemperie. fig. (1.2).

SOLUCION SUBTERRANEA EN CAJON

La estructura tradicional destinada a la circulación de trenes de un sistema metro para la ciudad de México es la conocida como cajón subterráneo. Esta es una estructura de concreto armado de sección rectangular, construida a cielo abierto y desplantada a la menor profundidad posible. El cajón debe cumplir con los requisitos de estabilidad, compensación, flexibilidad e impermeabilidad, que se requieren para suelos con características tan particulares como las del Valle de México.

Las dimensiones horizontales y verticales del cajón se determinan al elegirse un proyecto de operación del sistema puesto que en él se consiguen las necesidades como: número de vías, localización de los aparatos de comunicación y de enlace; fosas de visita, depósitos de trenes, talleres, espuelas de comunicación, cola de maniobras, etc. fig. (1.3)

SOLUCION EN TUNEL

La posibilidad de construir el metro en túnel surgió de la necesidad de ubicar algunas de las líneas sobre avenidas importantes con alta densidad vehicular cuya circulación no puede interrumpirse o alte --

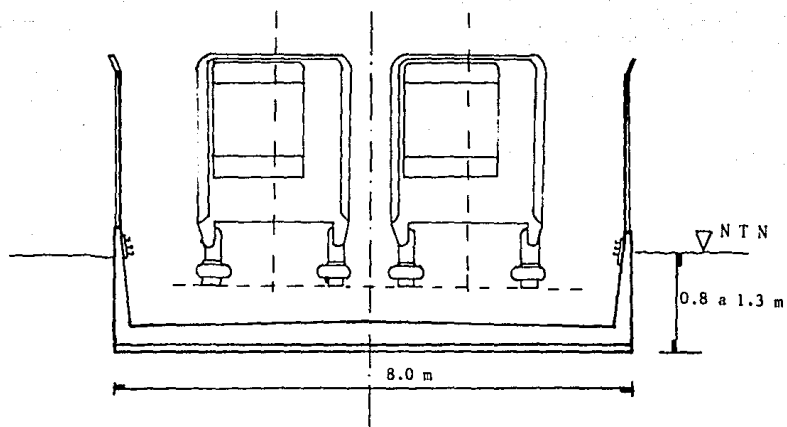


FIG. 1.2 SOLUCION SUPERFICIAL

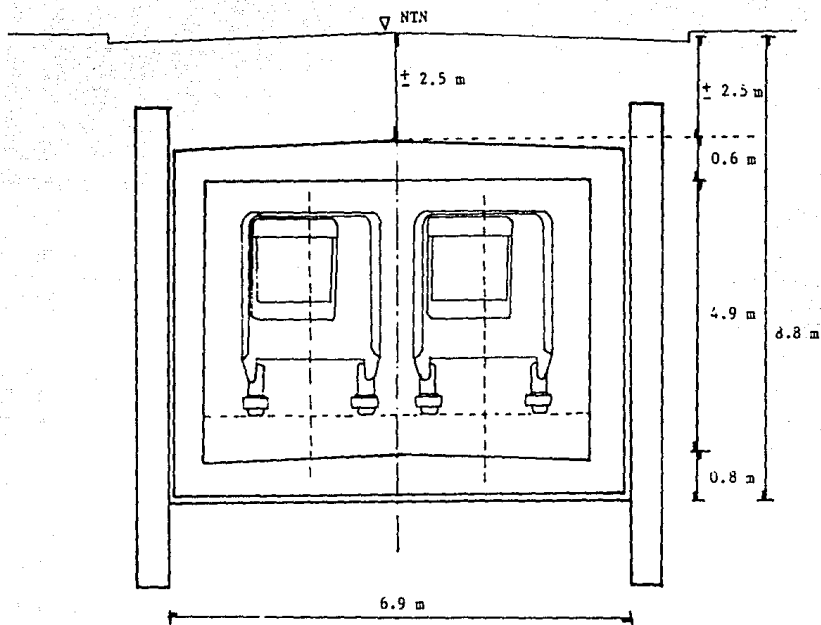


FIG. 1.3 SOLUCION SUBTERRANEA EN CAJON

rarse sin que esto traiga consigo grandes prejuicios de diferente índole.

La profundidad de los túneles es definida por dos conceptos fundamentales de gran interrelación: el techo (distancia que existe entre el nivel de la superficie y la clave del túnel), mínimo para llevar a cabo un procedimiento constructivo seguro, según el tipo de suelo y la ubicación adecuada de los accesos a las estaciones, de tal manera que los usuarios no recorran grandes profundidades. fig (I.4 y I.5)

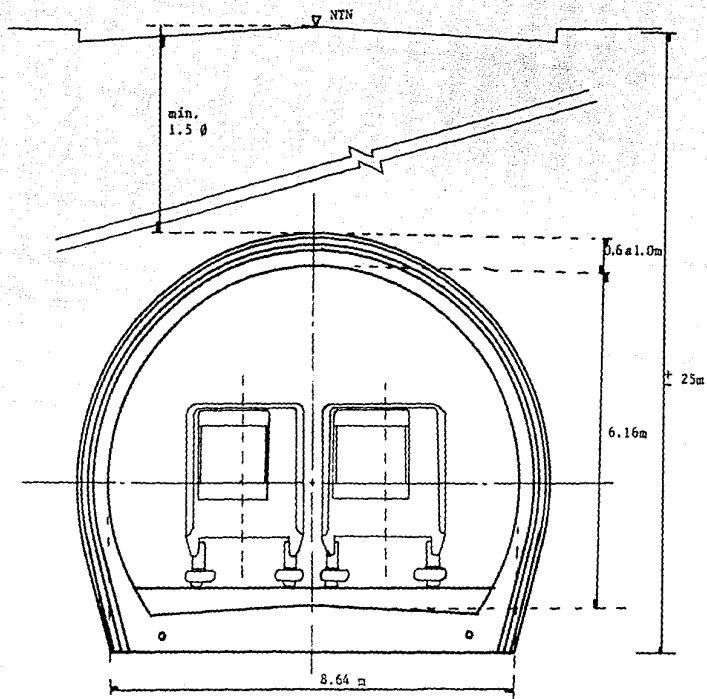


FIG. 1.4 SOLUCION EN TUNEL (CONVENCIONAL)

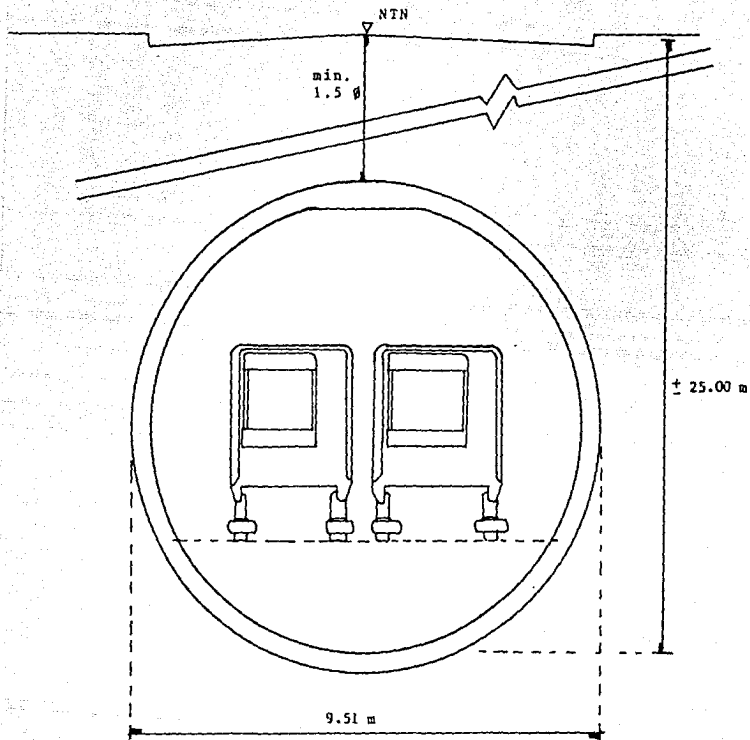


FIG. 1.5 SOLUCION EN TUNEL (ESCUDO)

COMPARACION DE LAS DIFERENTES ALTERNATIVAS DE CONSTRUCCION DEL METRO

TIPO DE LINEA	COSTO OBRA CIVIL POR KM	TIEMPO DE EJECUCION	OBSTRUCCION DE LA VIA - PUBLICA DURANTE LA CONSTRUCCION	INTERFERENCIAS CON LOS SERVICIOS MUNICIPALES.	CONSERVACION DE LAS OBRAS Y EQUIPOS	MANTENIMIENTO DE LA VIA.	PAISAJE: URBANO ASPECTO ESTETICO O BARRERA FISICA.	LIBRAMIENTOS Y FUTURA DISPONIBILIDAD VIAL.	COSTO TOTAL KM	EVALUACION FINAL
SOLUCION SUPERFICIAL.	1	2	3	2	4	4	4	4	1	3
SOLUCION ELEVADA	2	4	2	3	4	4	3	3	2	4
CAJON SUBTERRANEO	3	3	4	4	1	1	1	1	3	2
TUNEL	4	1	1	1	1	1	1	1	4	1

- 1- más favorable
- 2- favorable
- 3- adecuada
- 4- menos adecuada

CRITERIOS DE SELECCION

Ya se indicó que la estructura del metro puede ser superficial, elevada, cajón subterráneo o túnel. Los principales factores que determinan la selección de cualquiera de las soluciones anteriores se muestran en la siguiente tabla:

CAPITULO II

ESTUDIOS PRELIMINARES

ESTUDIOS PRELIMINARES

Un túnel es una obra de ingeniería con un elevado porcentaje de imprevisibilidad durante su construcción, se podría afirmar que no existe obra civil que necesite tanto de la geología, la geotecnia, capacidad y experiencia del ingeniero, como un túnel.

Se deben de realizar estudios e investigaciones geológicas y geotécnicas minuciosas para un mejor conocimiento del subsuelo, aspectos importantes y fundamentales para el anteproyecto, proyecto, construcción e incluso para el funcionamiento de la obra. Lo anterior reviste especial importancia en los túneles para metro dado que para el óptimo funcionamiento de este servicio se tienen limitaciones importantes en cuanto al trazo y perfil de los túneles.

Las propiedades mecánicas de los suelos, particularmente en la zona del lago y transición, evolucionan constantemente a consecuencia de:

- a) el bombeo profundo para el abastecimiento de agua potable,
- b) el efecto de sobrecarga de antiguos rellenos superficiales,
- c) el peso de las estructuras y,
- d) el abatimiento del nivel freático por bombeo superficial para la construcción de cimentaciones y mantenimiento de sótanos.

Lo anterior obliga a la necesidad de mantener permanentemente actualizados los conocimientos del subsuelo mediante estudios geotécnicos.

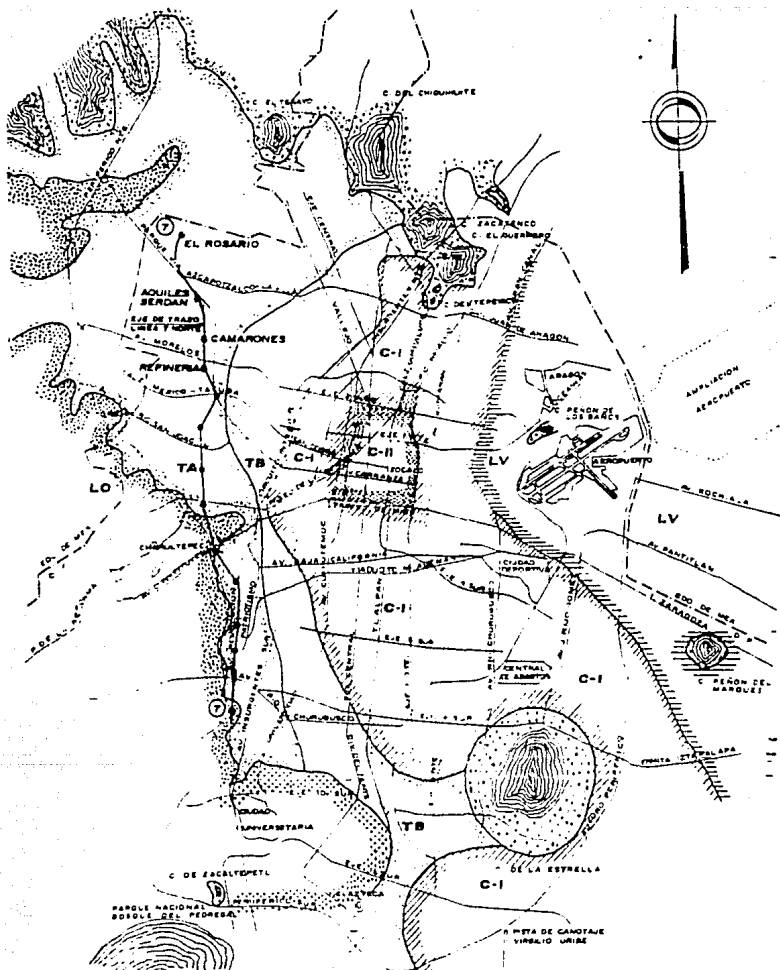
ESTRATIGRAFIA

La información estratigráfica del subsuelo de la Ciudad de México - se ha podido precisar gracias a diferentes estudios geotécnicos, derivados de los sondeos, de las experiencias en construcciones y del cono -- eléctrico como herramienta de exploración eficiente y económica.

Se realizó una zonificación geotécnica basada tanto en las características físicas como en las propiedades índice y mecánicas de los estratos del subsuelo.

La zonificación es la delimitación de las áreas donde los materiales presentan propiedades semejantes de compresibilidad y resistencia. Esta zonificación contempla 4 zonas básicas; zona del lago, zona de transición, zona de lomas y zona pétreo. fig.(III.1)

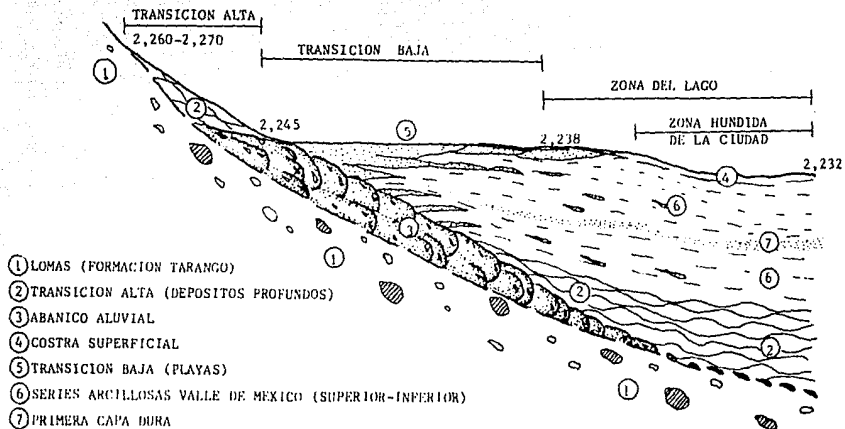
- a) Zona del Lago.- Corresponde a los terrenos ocupados por el vaso - del ex-lago de Texcoco; se definen las subzonas lago centro I, - lago centro II y lago virgen. Las subzonas centro I y II se caracterizan por las diferentes cargas y consolidaciones que han -- experimentado. Presenta gran espesor de material arcilloso com - presible, con capas duras intercaladas.
- b) Zona de Transición.- Abarca lo que fueron las márgenes del lago, - subzonas alta y baja. La subzona alta se define por la cercanía a la zona de lomas o de pequeñas montañas y la subzona baja por - la cercanía a la zona del lago. Es característico de la zona de transición el menor espesor de los estratos compresibles, así co - mo la intercalación frecuente de materiales aluviales en las ar - cillas. fig. (III.2).



SIMBOLOGIA

FIG. III.1 ZONIFICACION GEOTECNICA DE LA CIUDAD DE MEXICO

ZONA DE LOMAS



NOTAS: ESQUEMA SIN ESCALA
ELEVACIONES EN m. s. n. m.

FIG. III.2 ESQUEMA DE LA ZONA DE TRANSICION

c) Zona de Lomas.- Coincide con las partes periféricas de la ciudad, en donde no se presentan estratos compresibles. Se caracteriza por acumulación de potentes depósitos de erupciones volcánicas explosivas y la erosión subsecuente de estos depósitos forman profundas barrancas.

d) Zona Petrea.- Incluye afloramientos de roca, montañas y derrames de basalto.

El subsuelo por el que atraviesan los túneles de las líneas del metro pertenecen a la zona de transición, la cual se ha subdividido en:

Zona de Transición Baja

Zona de Transición Alta

Figs. (III.2, III.3 y III.4).

Zona de Transición Baja.- Comprende las cotas 2,238 a la 2,245 m.s.n.m. coincidente, en general, con la línea más alta de la costa del ex lago de México. Como los depósitos de transición enlazan medios ambientes geológicos contrastantes, en este caso, un medio ambiente tefgeno se traslapa con un medio ambiente lacustre, que se constituiría por la zona de flujo y reflujó del litoral, que a su vez presentan estratificación cruzada y huellas de oleaje; son arenas limpias, gruesas y medianas, interstratificadas y transicionales con los sedimentos arcillosos.

Zona de Transición Alta.- Quedaría comprendida entre la cota 2,245 m.s.n.m. y el vértice de los abanicos aluviales cotas 2,260 y 2,270 m.s.n.m.

Subyace estratigráficamente a la zona de transición baja y la zona petrea; consistente en depósitos fluviales acumulados en llanuras de inundación, formando una serie de estratos arenosos alternados con capas de --
tobas, arena pumítica y estratos lenticulares de grava y cantos rodados, ²²

18+600

18+500

18+400

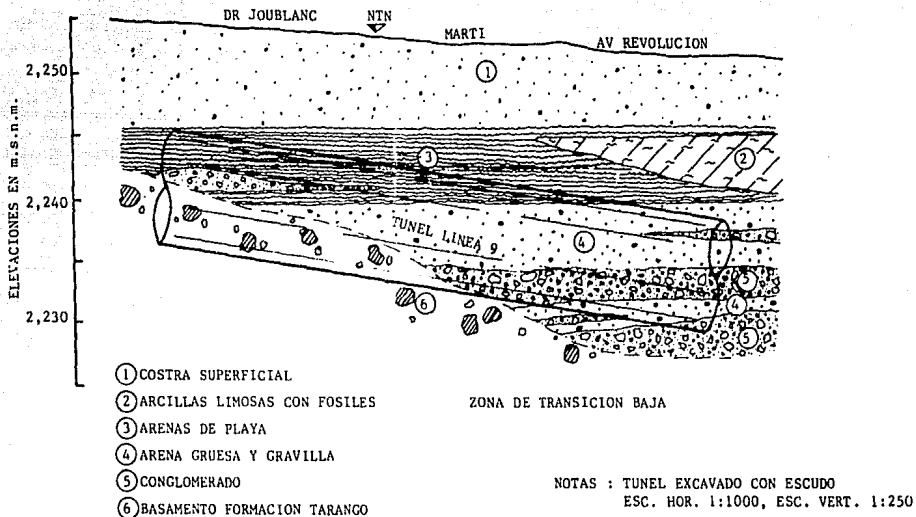


FIG. III.3 TUNEL DE LA LINEA 9 QUE CRUZA LA ZONA DE TRANSICION BAJA

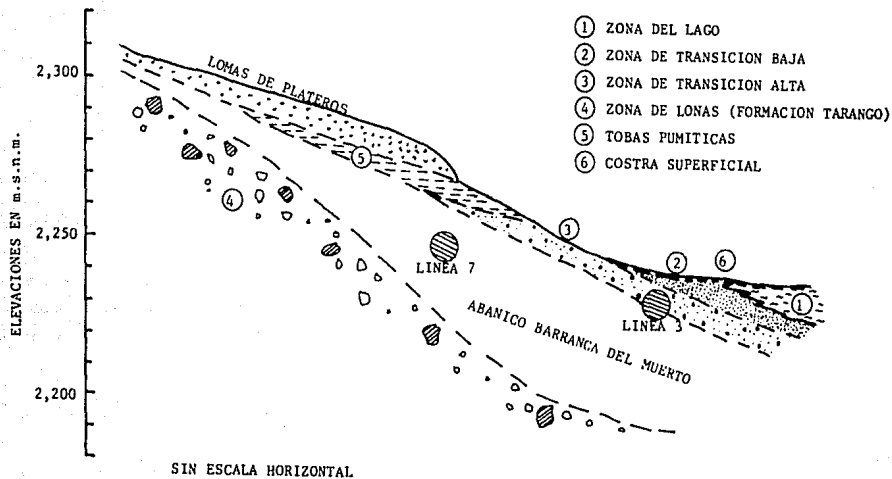


FIG. III.4 LOCALIZACION DE LA LINEA 7 Y LINEA 3, CERCANAS A LA ZONA DE TRANSICION

SONDEOS

Su objetivo es determinar con precisión la estratigrafía a lo largo del proyecto de la línea del metro, conocer las condiciones de presión del agua, las propiedades mecánicas, así como las propiedades índice y posición del nivel freático, acuíferos y mantos colgados.

Lo más adecuado para los sondeos es la combinación del cono eléctrico de 5 ton de capacidad y del cono mecánico, con la prueba de penetración estándar y muestreo inalterado continuo utilizando tubo Shelby, Shelby dentado y el barril Denison.

El número y profundidad de los sondeos se define con ayuda de la siguiente tabla.

TABLA III.1 NÚMERO Y PROFUNDIDAD DE LOS SONDEOS DE EXPLORACION		
Caso	Número mínimo de sondeos	Profundidad
-A lo largo de la línea	Un sondeo principal a cada 400 m; donde se justifique se harán sondeos intermedios de verificación.	Sondeos principales-Tres veces el ancho del túnel**, sondeos intermedios, dos veces el ancho del túnel.**
-Estación	1 a 3	Hasta donde la estructura del metro modifique significativamente el estado de esfuerzos en el suelo.
-Cruce con otras Líneas.	1	
-Próximo a estructuras importantes.*	1	
<p>* Edificios, drenajes y líneas de alta tensión.</p> <p>** O hasta encontrar depósitos compactos con espesor mayor a 10m, si esta profundidad es menor.</p>		

CAPITULO III

DIFERENTES TIPOS DE TUNEL

DIFERENTES TIPOS DE TUNEL

Un aspecto muy importante para el proyecto y construcción de un túnel es su geometría, debiendo existir coordinación entre todas las especialidades que intervienen, con el fin de conjuntar las restricciones de cada una de ellas.

Para el diseño de un túnel es necesario tomar en cuenta factores tales como: uso del túnel, aspectos geológicos y geotécnicos, gálibo estático de los trenes, gálibo dinámico (movimientos transversales debidos al balanceo de la suspensión), banquetas, efectos de curvas, visibilidad, señalización, instalaciones especiales, condiciones de operación, existencia de estructuras superficiales o subsuperficiales, etc.

De acuerdo con el propósito para el cuál están destinados los túneles del Sistema Metro, estos se pueden clasificar en:

Túneles para estación

Túneles entre estaciones

Túneles secundarios

ASPECTOS GENERALES DE UNA ESTACION

Una estación del metro está constituida por 3 zonas importantes que son:

- 1.- Zona de andenes; donde el público aborda o desciende de los trenes.
- 2.- Zona de acceso: sus diversas áreas dependen del tipo de estación, y comprende:
 - Vestíbulo, escaleras y circulaciones
 - Controles de entrada y salida de pasajeros
 - Cambio de andén
- 3.- Zona de servicio; contiene los elementos que requieren la operación de la estación y son:
 - Subestaciones eléctricas para alumbrado
 - Cuarto de operación
 - Sala de Telecomunicaciones
 - Cárcamo y cuarto de bombeo
 - Etc.

Cuando las estaciones son subterráneas y se construyen por medio de túneles se dividirán en:

- Luzbrera
- Túneles de estación (andenes)
- Túneles secundarios: de acceso, conexión, distribución y para subestaciones.

Ver figura (III.5).

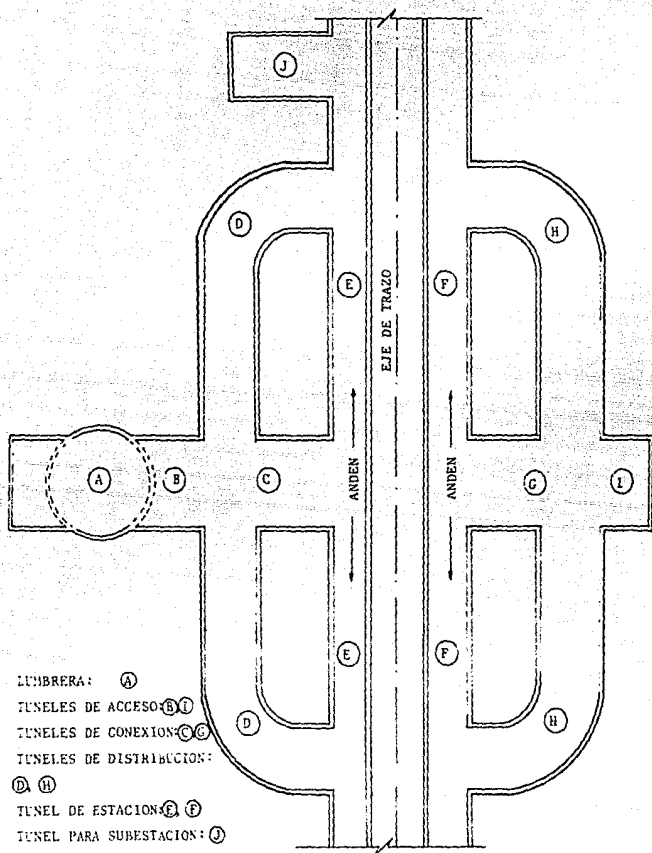


FIG. III.5 TUNELES QUE CONSTITUYEN LAS ESTACIONES DEL METRO

TUNELES DE ESTACION

Llamaremos túnel de estación al que aloja la zona de andenes y la de vías, puede construirse con un sólo túnel de sección mayor a los túneles inter-estaciones y lo nombraremos estación sin columna al centro.

También puede construirse con dos túneles gemelos que serán las estaciones con columna central. fig. (III.6).

ESTACIONES SIN COLUMNA AL CENTRO

Como se mencionó en el párrafo anterior están compuestas por un solo túnel de gran diámetro que aloja los dos andenes y la zona de vías. Solo se pueden realizar en el caso de suelos competentes, donde el soporte temporal a base de concreto lanzado proporciona suficiente capacidad de soporte por un lapso suficiente para colocar el revestimiento definitivo.

Un ejemplo de lo anterior lo constituyó la estación Camarones de la línea 7 que se excavó en un solo túnel para así dar paso directo a todo el tren del equipo del nuevo escudo (se describirá en el siguiente capítulo).

ESTACIONES CON COLUMNA AL CENTRO

Son estaciones formadas por dos túneles gemelos, paralelos, divididos por un eje de columnas centrales que delimitan la zona de vías y andenes.

La excavación y terminado de estas estaciones se realiza en ocho, etapas fig. (III.7).

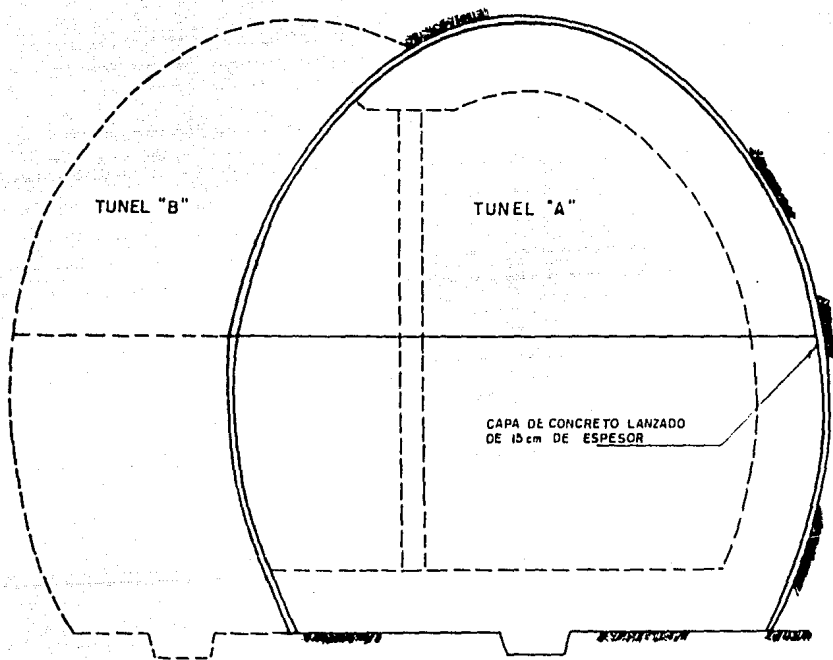


FIG. 111.6 SECCION DE TUNEL EN ESTACION

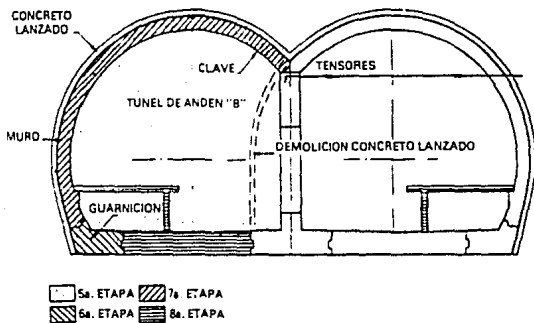
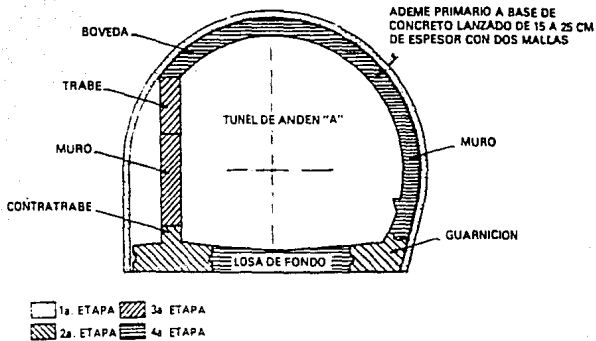


FIG. 111.7 PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO EN OCHO ETAPAS PARA LA ESTACION CON COLUMNA AL CENTRO

A los túneles gemelos los llamaremos: túnel del andén "A" y el túnel del andén "B", su sección es asimétrica y tienen una parte común cuyo objeto es alojar la trabe y contratrabe que forman parte de la columna central.

Se pudo observar que los túneles en estación solo incluyen la zona de andenes; las zonas de acceso y servicio forman parte de los túneles secundarios que se describirán posteriormente.

TUNELES ENTRE ESTACIONES

Como su nombre lo dice, son túneles construidos entre estación y estación; su sección puede ser semicircular o en herradura diseñada para alojar dos vías. En los tramos rectos tiene un gálibo horizontal interior de 8.64 m con una área promedio de 68.00 m².

A lo largo de su trayectoria tienen un sistema de drenaje longitudinal y transversal, con un cárcamo para captar las aguas filtradas al interior del túnel y posteriormente bombearlas hacia las instalaciones municipales.

TUNELES SECUNDARIOS

Se les nombra así a los túneles de acceso, a los de conexión y distribución de usuarios, de correspondencia y a los que alojan subestaciones eléctricas.

TUNELES DE ACCESO

Son importantes porque constituyen los accesos a las estaciones para cuya construcción actualmente se tiene dos opciones: la primera consiste en conectar el andén con los vestíbulos mediante un túnel inclinado con una pendiente promedio de 30° , una sección combinada semicircular y en herradura, con gálibo horizontal de 8.64 m y vertical de 8.30 m en una longitud promedio de 25 m. Se construyen por facilidad de abajo hacia arriba teniendo la particularidad de que conforme se va emergiendo, aumenta el problema de estabilidad al ir disminuyendo el techo del material existente entre el túnel y la superficie.

La segunda opción consiste en lumbreras de 22 m de diámetro, los problemas que se han presentado han surgido por la presencia de capas superficiales de suelo orgánico (turba) altamente compresible, así como presencia del manto freático que en parte está constituido por un estrato arenoso, acuífero de una considerable aportación que llega a fluir dentro de la excavación.

TUNELES DE CONEXION

Son los que libran los accesos alojando la pasarela que permite el paso del usuario de un andén a otro. La sección geométrica es semicircular de gálibo horizontal interior de 8.64 m y gálibo vertical entre 6.70 m y 11.20 m dependiendo de si la pasarela es por debajo de las vías o elevada.

TUNELES DE DISTRIBUCION

Se denominan así a los túneles que permiten a los usuarios circular y distribuirse para evitar el congestionamiento de los andenes al abordar o descender del convoy. Se construyen paralelos a los andenes y al túnel de conexión unidos por secciones curvas de 90°, su sección geométrica es semicircular con gálibo horizontal de 6 m y vertical de 4.5 m. Por lo general se construyen dos túneles de distribución a cada lado del andén.

TUNELES PARA SUBESTACION

Se utilizan para alojar el equipo de una subestación eléctrica, complementándose con trincheras para colocar cables de energía eléctrica, ductos para sistemas de ventilación, sistemas de tierras y una gran variedad de instalaciones electromecánicas. La sección es semicircular con gálibo horizontal de 6 m y gálibo vertical de 4.80 m, la longitud varía entre 8 y 12 m, se construyen dos por estación uno a cada lado de la vía, su acceso es por la zona de andenes.

CAPITULO IV

PROCEDIMIENTOS CONSTRUCTIVOS

PROCEDIMIENTOS CONSTRUCTIVOS

Muchos y variados han sido los problemas a los que la ingeniería de túneles ha tenido que enfrentarse antes de lograr desarrollar los actuales sistemas y procedimientos para la construcción de este tipo de obras.

El reto siempre lo ha constituido ese afán de vencer lo desconocido mediante el ingenio basado inicialmente en los conocimientos empíricos que sobre el caso se tenían y, más adelante, por la necesidad apremiante de construir túneles en zonas y terrenos considerados problemáticos por las características poco conocidas del suelo, ante lo cual se fueron ampliando los conocimientos y perfeccionando las técnicas y teorías que han permitido con el paso de los años, contar cada vez con mejores técnicas en el diseño y construcción de túneles.

Una vez que se tienen conocidas la estratigrafía, trazo y perfil definitivo del túnel, se puede iniciar el estudio para definir los procedimientos constructivos; hacer una buena selección del procedimiento de excavación y del sistema de ademe, de tal forma que guarden compatibilidad con las características del terreno; el objetivo básico en la selección definitiva es obtener seguridad, economía, eficiencia y un adecuado ritmo de trabajo.

El término: procedimiento de excavación se refiere a la forma en que se va a atacar el frente y la manera en que se extraerá el material producido de la excavación.

Los procedimientos constructivos que se han utilizado en la construcción de túneles para el sistema de transporte colectivo, metro, se han

basado en el Método Austriaco y la utilización de escudos.

CONSTRUCCION DE LA LUMBRERA

Cualquiera que sea el procedimiento constructivo a utilizar, se iniciará con la construcción de una lumbrera que es un acceso vertical para la introducción de equipo, materiales y que servirá también para la extracción del material producto de la excavación. Estas lumbreras son de sección circular con diámetro interior promedio de 10.20 m y profundidades variables según el perfil del túnel.

La construcción de la lumbrera se inicia con la fabricación de una estructura de concreto armado llamada brocal; para la excavación del núcleo se utilizan martillos neumáticos y un traxcavo con la ayuda de un equipo de almeja libre para extraer la rezaga. El avance es por etapas de 1.0 a 1.20 m colocando un soporte temporal a base de concreto lanzado con espesor de 15 cm, una malla electrosoldada de 6" X 6" X 1/4" y otra capa de concreto lanzado; se colocan drenes de tubo para aliviar la presión del agua del nivel freático fig. (IV.1A y IV.1B)

El revestimiento definitivo se hace a base de concreto reforzado, colocado mediante la utilización de una cimbra deslizante; el espesor de este recubrimiento es de 30 cm.

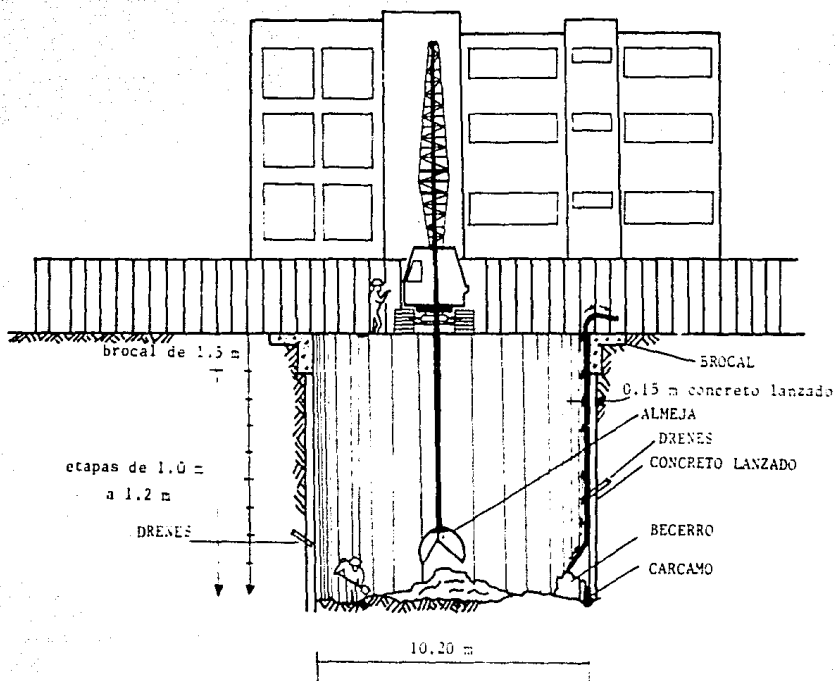


FIG. IV.1A CONSTRUCCION DE LA LUMBRERA

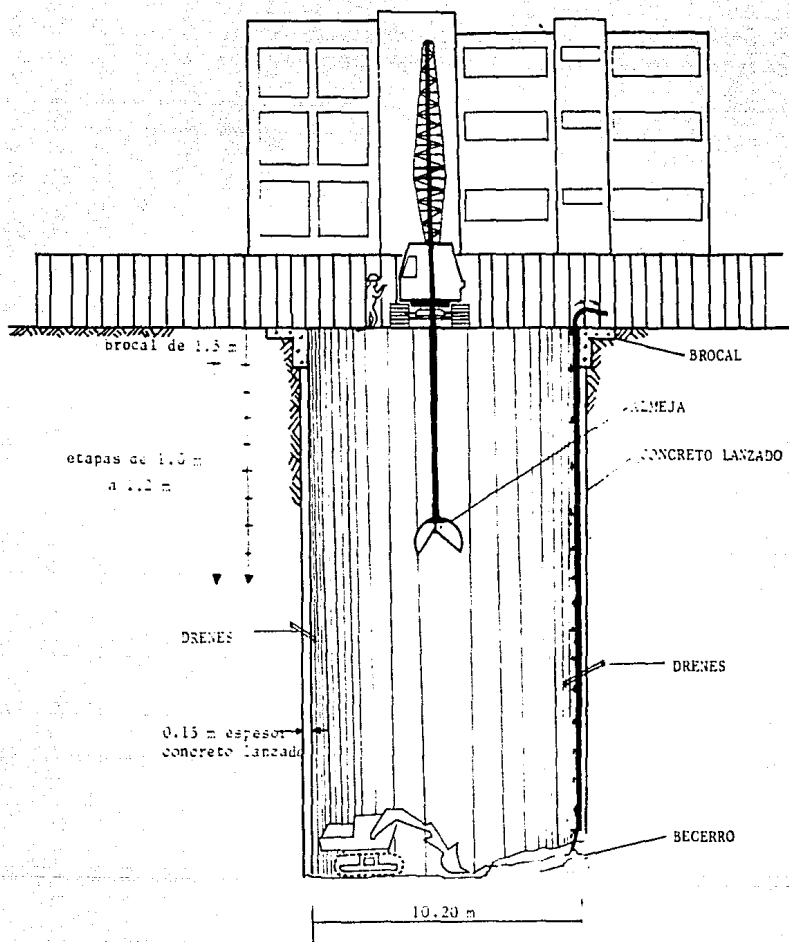


FIG. IV.1B CONSTRUCCION DE LA LUMBRERA UTILIZANDO TRAXCAVO

EXCAVACION DE TUNEL

METODO AUSTRIACO

En este método la excavación se inicia con banqueo empezando por la sección media superior en etapas de 1.20 m de longitud hasta tener un banco de 4.80 m repartiéndose en forma iterativa; normalmente se utilizan -- martillos neumáticos y en ocasiones máquinas rozadoras, además se emplea un traxcavo para ayudar a excavar y cargar la rezaga en camiones para -- transportarla a la lumbrera de donde es extraída la superficie en botes -- elevados mediante grúas o malacates. En cuanto se termina una etapa de -- excavación en la parte superior, clave, se coloca una capa de 5 cm de --- concreto lanzado para apoyar la primera malla de 6" X 6" X 1/4" e inmedia tamente se lanza la siguiente capa de concreto con espesor de 15 cm.

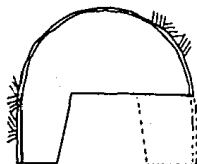
figs. (IV.2A, IV.2B y IV.3).

El banqueo de la sección media inferior va defasado en por lo menos dos etapas, repitiéndose la secuencia de la sección media superior: En esta sección media inferior el concreto lanzado termina en el piso con una zapata de apoyo. Una vez terminada la excavación y colocado el concreto hidráulico convencional, se cuelan las guarniciones, después las paredes y clave con una cimbra metálica modular y se termina con la losa de piso. En el procedimiento descrito en los párrafos anteriores se utilizó el ademe de concreto lanzado y malla electrosoldada.

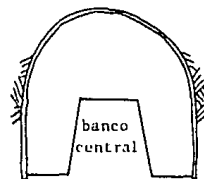
Otra posibilidad para construir el tunel es utilizando marcos de ace ro y concreto lanzado como ademe figs. (IV.4 y IV.5), el procedi- miento se indica a continuación: Terminada la etapa de excavación de la sección media superior se coloca una capa de concreto lanzado con espesor de 5 cm que recibirá la primera malla, después se coloca una rastra metáli-



ETAPA 1



ETAPA 2



ETAPA 3

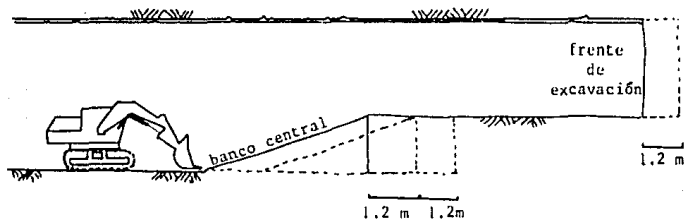


FIG. IV.2A ETAPAS DE EXCAVACION

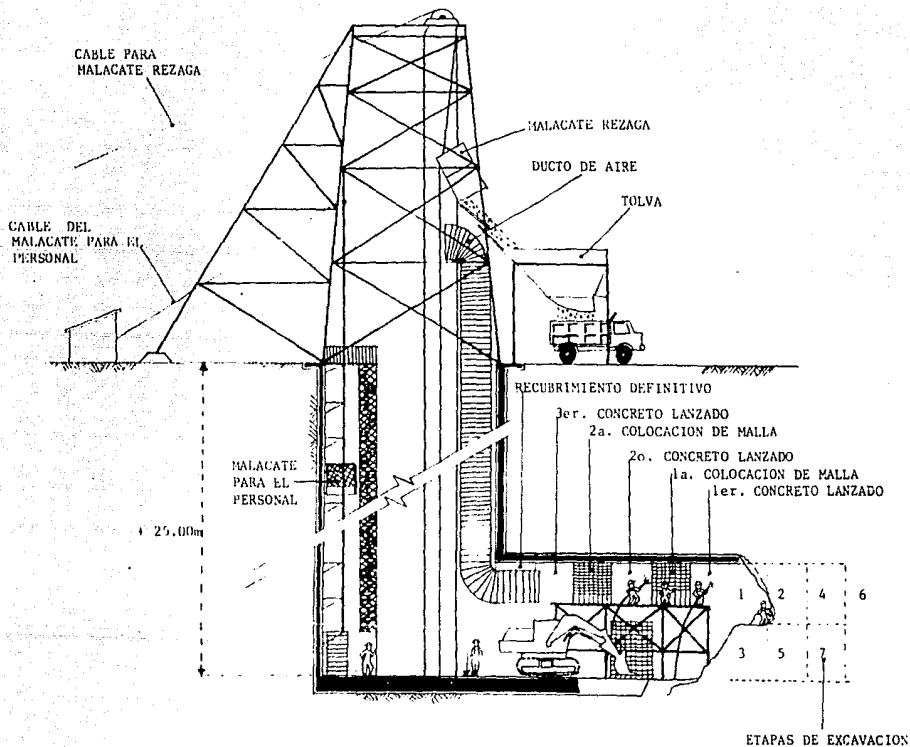


FIG. IV.2.B ARREGLO GENERAL, METODO CONVENCIONAL ADEME CON CONCRETO LANZADO

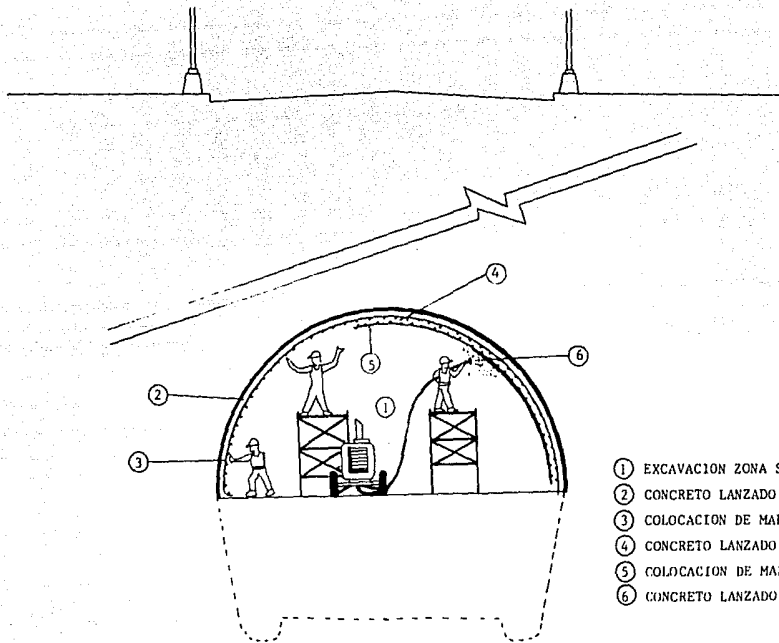


FIG. IV.3 METODO CONVENCIONAL. AVANCE SECCION MEDIA SUPERIOR

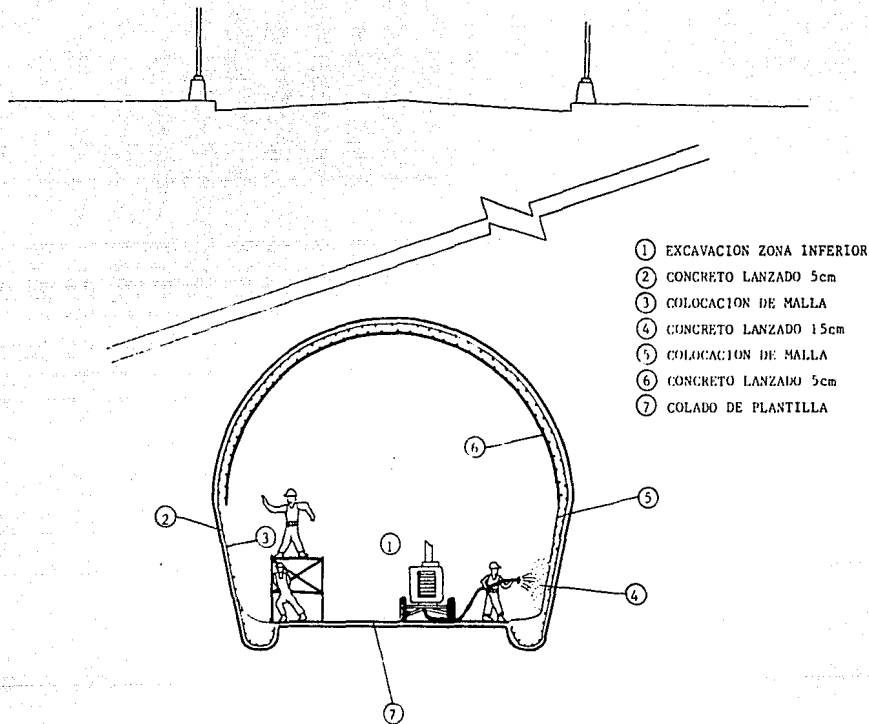


FIG. IV.4 METODO CONVENCIONAL. BANQUEO SECCION MEDIA INFERIOR

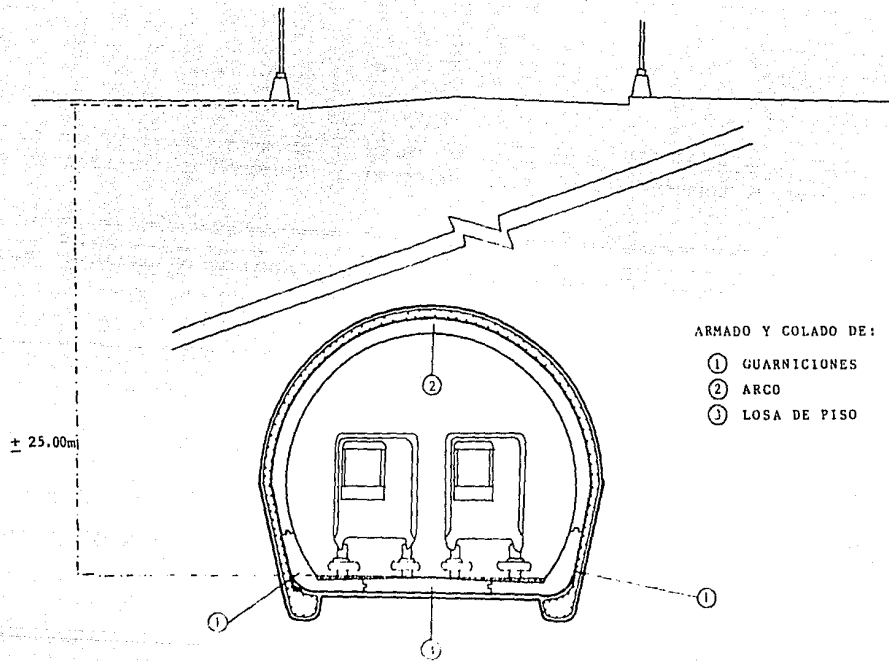


FIG. IV.5 METODO CONVENCIONAL. TUNEL TERMINADO, REVESTIMIENTO DEFINITIVO CON CONCRETO CONVENCIONAL

ca en el piso para apoyar las secciones curvas de los marcos que soportarán al terreno retacando dichos marcos con madera, en seguida se lanza la segunda capa de concreto con espesor de 10 cm fig. (IV.6 y IV.7).

Posteriormente se procede a excavar el banco inferior prolongando el concreto lanzado y la malla hasta la plantilla, esta termina en una zapata donde se apoyarán las piezas curvas de los marcos mediante largueros; a continuación se recubren las zonas entre marcos con una capa de concreto de 10 cm. Por último se coloca concreto hidráulico mediante el mismo procedimiento utilizado para las lumbresas. fig. (IV.8 y IV. 9).

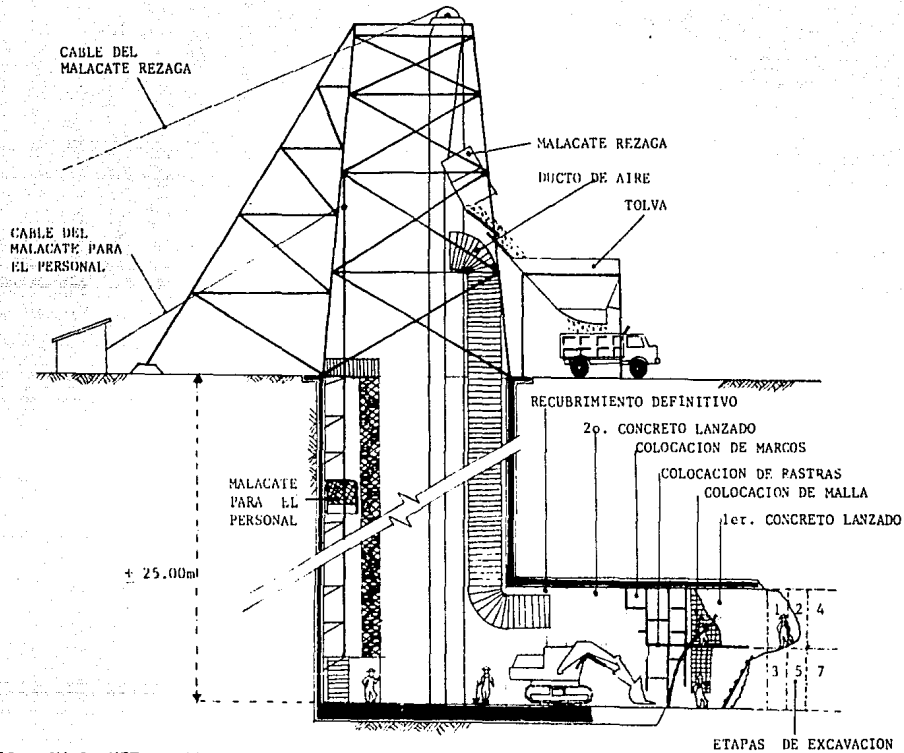


FIG. IV.6 METODO CONVENCIONAL. SOPORTE TEMPORAL CON MARCOS DE ACERO Y CONCRETO LANZADO

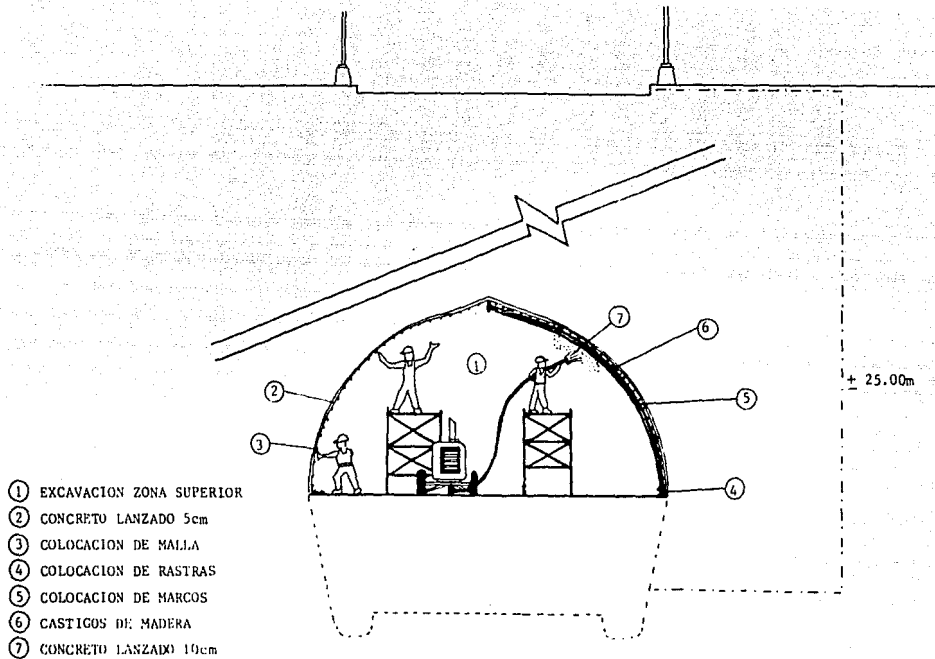


FIG. IV.7 METODO CONVENCIONAL. COLOCACION DE MARCOS DE ACERO SECCION MEDIA SUPERIOR

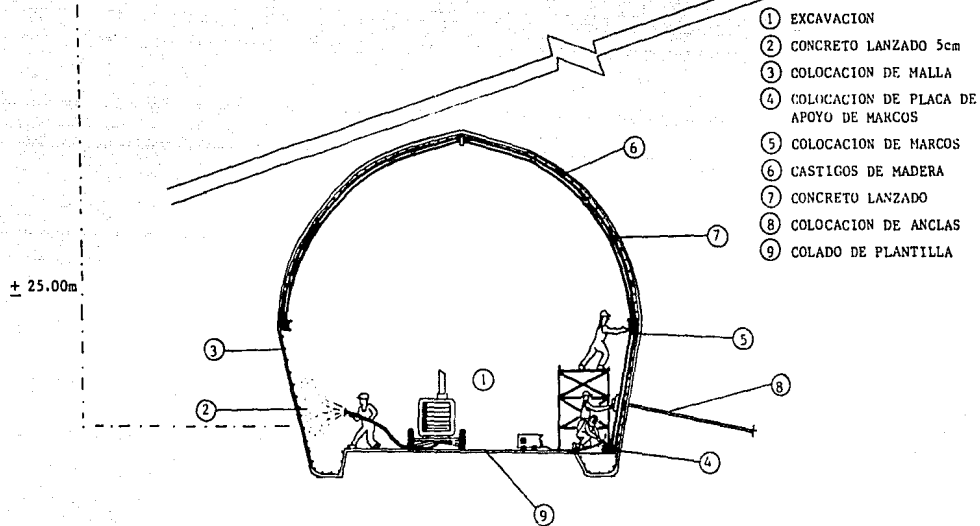


FIG. IV.8 METODO CONVENCIONAL. COLOCACION DE MARCOS DE ACERO SECCION MEDIA INFERIOR

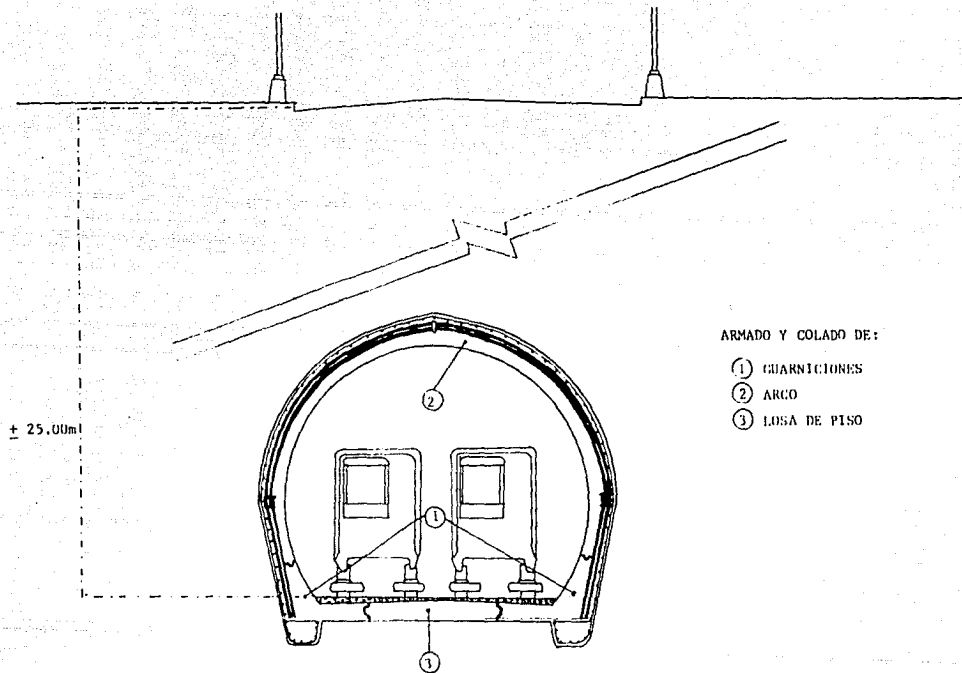


FIG. IV.9 METODO CONVENCIONAL. TUNEL TERMINADO CON REVESTIMIENTO DEFINITIVO CON CONCRETO CONVENCIONAL

TUNELES CON ESCUDO

La idea fundamental de un escudo es dividir el proceso de excavación y revestimiento en etapas lo más pequeñas posibles, a fin de que estas operaciones sean concurrentes y simultáneas.

El escudo consiste de un cilindro de metal rígido que cubre la sección frontal del túnel, sirve para resistir las presiones del terreno proporcionando un soporte continuo en las paredes del túnel y permite la colocación del ademe de una manera casi simultánea con el proceso de excavación.

El tuneo con escudo presenta las siguientes ventajas.

El avance en el túnel es a toda la sección.

Ofrece un soporte constante al terreno, en todas sus direcciones.

Facilita el trabajo de construcción.

Evita deformaciones excesivas del terreno y por lo tanto reduce los asentamientos en la superficie.

Para escoger el tipo de escudo más conveniente y sustituir el empleo del método Austriaco (convencional), el Departamento del Distrito Federal, por conducto de la Comisión de Vialidad y Transporte Urbano (COVITUR), realizó estudios de factibilidad en la Ciudad de México, encontrando que para la zona de transición donde encontramos suelos bastante estables se recomienda el uso de escudos de frente abierto, que son los que se han utilizado.

ESCUDO DE FRENTE ABIERTO

Para la construcción de parte de las líneas 7 y 9 del metro se utilizó un escudo de frente abierto.

El escudo de frente abierto es un cilindro de acero rígido abierto en ambos extremos, provee facilidades en su frente para la excavación del terreno y en su parte posterior para la colocación del revestimiento prefabricado (dovelas).

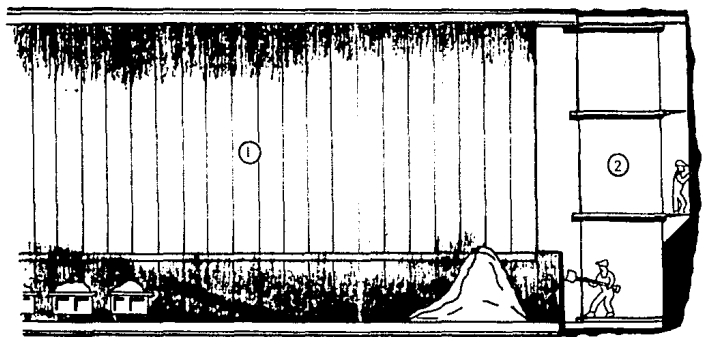
El escudo es impulsado hacia adelante por pasos manteniendo armonía entre el avance de la excavación y el trabajo del ademe primario, de manera que el área excavada está siempre bien soportada hasta que se cuele el revestimiento final. fig. (IV.10A)

La parte principal de la estructura es la camisa formada de placas de acero roladas según la geometría de la sección del túnel; las dimensiones del escudo son 9.14 m. de diámetro exterior y 4.70 m de largo. - - fig. (IV.10B)

El extremo delantero de la camisa es sumamente reforzado con piezas fundidas que forman la cara de corte y su rigidez aumenta con anillos atiesados, que es la parte con la que se efectúa la excavación.

El diámetro de la cara de corte es ligeramente mayor que el del escudo con objeto de disminuir la presión de la tierra sobre el escudo.

La parte intermedia o tronco, está destinada para el alojamiento de maquinaria de empuje como gatos hidráulicos, tablero de operaciones, etc., además de algunos elementos suplementarios importantes, la mayoría combinados con elementos rigidizadores, tales como plataformas de trabajo, mon



- ① DOVELAS
- ② ESCUDO

FIG. IV.10a EXCAVACION CON ESCUDO DE FRENTE ABIERTO

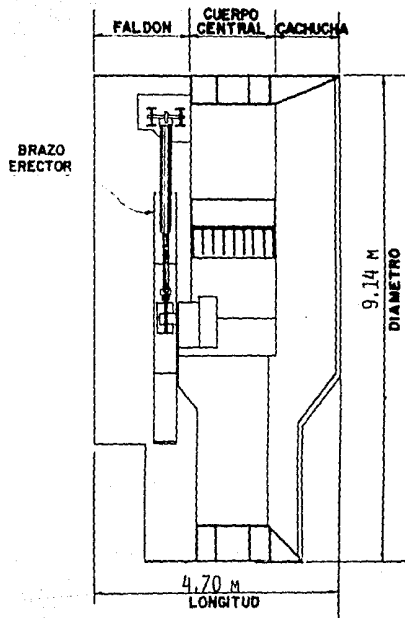
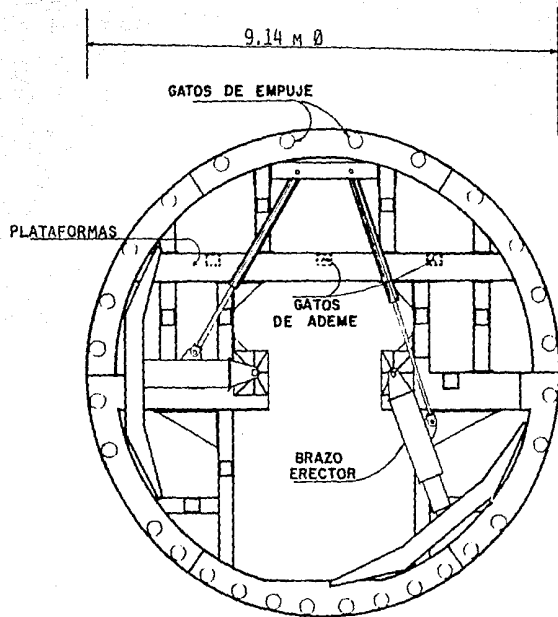


FIG. IV.10B ESQUEMA DEL ESCUDO ABIERTO

tadas sobre atiesadores horizontales, verticales y vigas, así como gatos para soportar el ademe del frente montados sobre las paredes divisorias de las plataformas de trabajo. También es posible alojar unas gufas que son el elemento auxiliar para dirigir el escudo, mediante el sistema topográfico de rayo laser, lo que permite garantizar un correcto desplazamiento del escudo de acuerdo al trazo proyectado.

La parte trasera ó faldón del escudo, está diseñada para soportar el túnel mientras se realiza el montaje de los segmentos del revestimiento (dovelas), mediante un brazo erector instalado en esta parte del escudo. Estos segmentos pueden ser de concreto precolado ó metálicos.

El escudo se debe de complementar con maquinaria especial para la excavación, rezaga y transporte del material, montaje e inyección y todo lo indispensable en el tuneleo con escudos de tal suerte que todas las etapas constructivas (precorte, excavación, ademe, inyección) tengan una continuidad tal que permita un ritmo de trabajo constante.

El equipo con que cuenta el escudo para ayudarse y facilitar su trabajo es:

- 1.- Gatos de Empuje.- Forman el sistema de autopropulsión del escudo y se encuentran colocados en la estructura, reaccionando contra los anillos del revestimiento del túnel previamente colocados y controlando la dirección de la excavación.

La distribución de estos gatos es mayor en la mitad inferior del escudo, a fin de contrarrestar la tendencia del escudo a clavarse.

- 2.- Gatos Frontales.- El mejor método para soportar el frente mien

tras el escudo avanza es mediante gatos frontales, mismos que ejercen una presión constante y uniforme. Los gatos frontales deben de llegar más allá de la cara de corte y su carrera debe ser mayor o igual al ancho de una dovela.

- 3.- Plataformas Deslizantes.- Estos elementos proveén de áreas de trabajo para atacar el frente de excavación con personal dispuesto en la zona.

Estas plataformas ayudan a lograr la estabilización del frente de ataque en suelos granulares en función del ángulo de reposo del material evitando derrumbes o caídos.

- 4.- Brazo erector.- Este dispositivo es usado para la colocación de las dovelas y es accionado hidráulicamente, pudiendo girar en ambas direcciones alrededor del eje del escudo y desplazarse en la dirección del mismo eje. En su extremo el brazo cuenta con un mecanismo para sujetar las dovelas y colocarlas en su posición correcta.

CICLO DE OPERACION

El propósito de establecer el ciclo de operación es poder realizar una comparación de costos dentro de una fase de un proyecto y del proyecto completo.

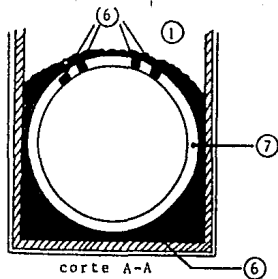
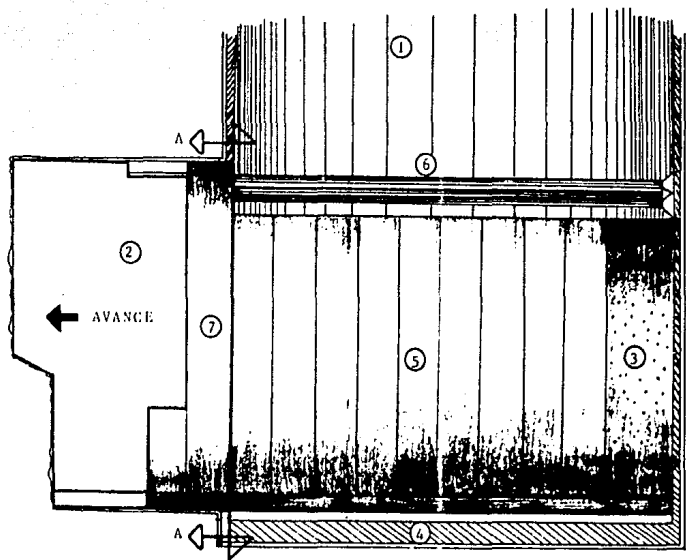
Los registros del ciclo de operación permiten también conocer cada día si la productividad de trabajo está funcionando como se estimó, y señalan las fases de trabajo que requieren mayor atención a fin de cumplir con los avances diarios programados, en caso de que existan desviaciones.

El ciclo de operación se compone principalmente de 3 etapas de trabajo que son:

- Excavación y soporte temporal del frente con desalojo del material de rezaga.
- Avance del escudo
- Colocación de los anillos del revestimiento

Para iniciar la excavación del túnel, el escudo se apoyará en nueve semianillos de dovelas especiales formador por las dovelas "A" y "B" colocadas en forma invertida, las cuales a su vez se apoyarán sobre viguetas de acero empotradas en el muro de la lumbrera donde se dará inicio a la excavación del túnel. fig. (IV.11)

Al estar el frente del escudo en contacto con el muro de la lumbrera se procederá a demoler éste y al mismo tiempo se comenzará a poner el primer anillo completo dentro de la camisa del escudo con ayuda de los brazos erectores, terminado de armar el primer anillo se colocarán 4 troqueles que se apoyarán en uno de sus extremos sobre la parte superior del primer anillo y el otro extremo contra el muro de la lumbrera.



- ① LUMBRERA
- ② ESCUDO
- ③ ATRAQUE
- ④ CUBETA
- ⑤ SEMIANILLOS DE DOVELAS
- ⑥ TROQUELES
- ⑦ DOVELA COMPLETA

FIG. IV.11 INICIO DE LA EXCAVACION DEL TUNEL

Antes de iniciar el avance del escudo se efectúa un precorte del material en todo el frente, éste tendrá un espesor de 20 cm y se hará hacia el interior del núcleo central (biselado) fig. (IV.12A,IV.12B) posteriormente se dará al escudo un avance de 80 cm los cuales se miden en la carrera del vástago de los gatos.

Al terminar el empuje del escudo y mientras se colocan los segmentos que forman el último anillo se continuará la excavación del frente con herramienta neumática. Después se limpia la plantilla dentro del faldón del escudo para realizar el montaje de las dovelas, iniciándose un nuevo ciclo de avance del escudo, teniendo especial atención en respetar el alineamiento y pendiente de proyecto.

REVESTIMIENTO DEL TUNEL

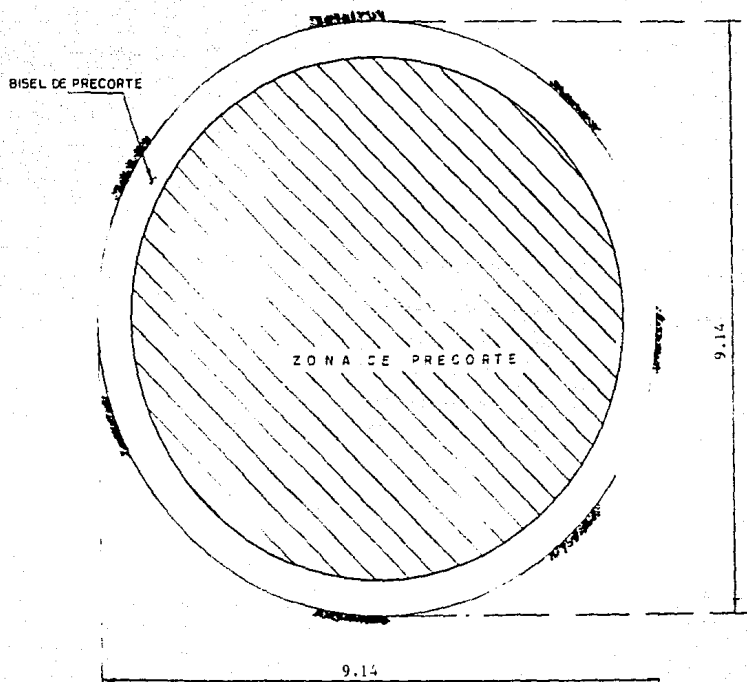
Para los túneles que se trabajan con escudo abierto, el revestimiento se hará a base de elementos prefabricados llamados dovelas, formando anillos que se unen entre sí.

Las dovelas son elementos prefabricados de concreto reforzado con un ancho de 0.80 m y espesor de 0.25 m. Estas dovelas pueden ser de tres tipos: "A", "B" y "C"; cada anillo se forma con la unión de tres dovelas, una de cada tipo; las dovelas "A" y "B" forman los costados del túnel y la tipo "C" la clave del mismo. fig. (IV.13A)

En los tramos del túnel donde se presenten unas horizontales o verticales se utilizan lanas metálicas o dovelas denominadas correctivas, elementos que permiten seguir fielmente el alineamiento del escudo en los cambios de dirección.

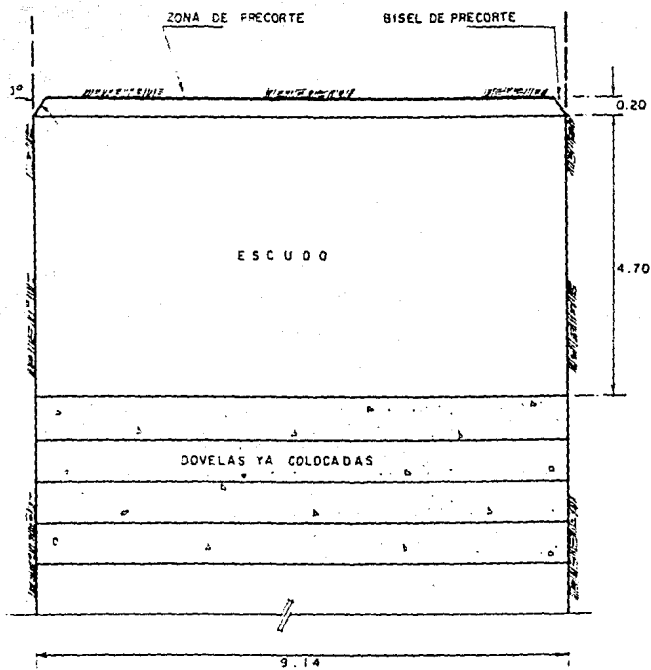
Las dovelas deben cumplir las siguientes características:

- 1.- Suficiente capacidad de carga para soportar la presión total (suelo más agua) sin que existan deformaciones o filtraciones.
- 2.- Resistencia a los esfuerzos de impacto debido a posibles manejos bruscos durante su transporte y colocación.



ACOTACIONES EN m

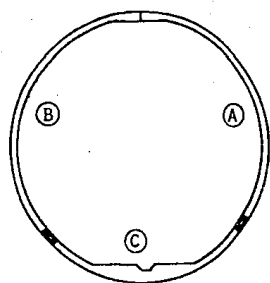
FIG. IV.12a ZONA DE PRECORTE EN LA EXCAVACION DE TUNELES



ACOTACIONES, EN m

P L A N T A

FIG. IV.12B EXCAVACION DEL TUNEL CON ESCUDO ABIERTO



TIPOS DE DOVELAS A B C

DOVELA EN ISOMETRICO

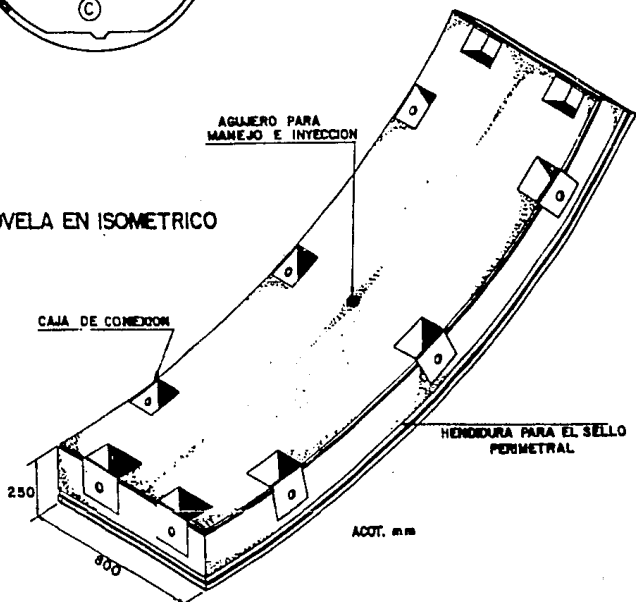


FIG. IV.13a REVESTIMIENTO DEL TUNEL (DOVELAS)

- 3.- Resistencia a altos esfuerzos axiales producidos por los gatos de empuje durante el avance del escudo.
- 4.- Resistencia a la humedad y a los efectos del agua del terreno sobre el segmento así como resistencia a la corrosión.
- 5.- Economía en su construcción y el mantenimiento.

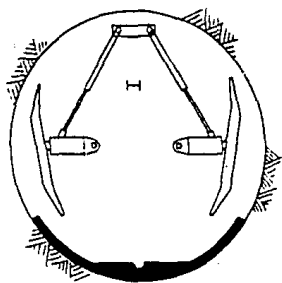
COLOCACION DE DOVELAS.- Las dovelas "A" y "B" se transportarán - mediante vagonetas hasta la parte posterior del escudo donde se ensamblarán en el balancín del brazo erector y se levantarán hasta su posición dentro de la camisa del escudo, estas dovelas deben de ser atornilladas y unidas mediante una placa ensamblando después un troquel en los insertos de estas dovelas. fig. (IV.13B).

A continuación se lleva la dovela "C" hasta la parte posterior del escudo donde se recibe por dos diferenciales colgados del troquel, mediante los cuales la colocan en la parte inferior para formar el anillo. fig. (IV.13B)

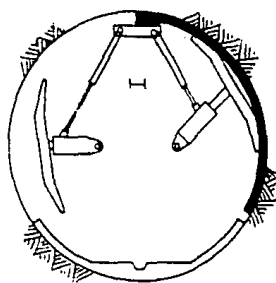
Una vez que el anillo ha salido de la camisa del escudo se deberá colocar un puntal de acero cédula 40, de 25.4 cm de diámetro en forma vertical, por medio de un gato hidráulico, para ayudar a los gatos de expansión a levantar la clave. Ya colocado el puntal vertical se procederá a aplicarle la precarga correspondiente y a expandir el anillo por medio de los gatos de expansión que se colocarán en los extremos de las dovelas "A-C" y "B-C".

Terminada la expansión se colocarán tramos de tubos que se soldarán a las varillas expuestas en los extremos de las dovelas y se retiran los gatos de expansión.

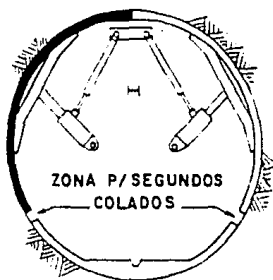
Concluido lo anterior se procederá a colocar concreto en el hueco - ocupado por los gatos y se podrá retirar el puntal vertical.



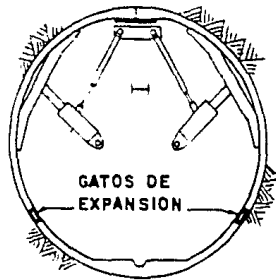
① DOVELA DE PISO "C"



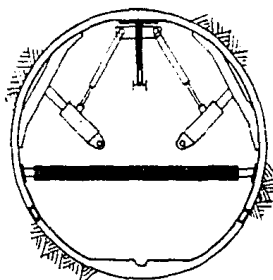
② DOVELA DE CLAVE "A"



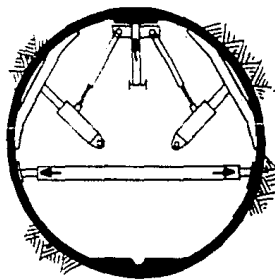
③ DOVELA DE CLAVE "B"



④ PREPARACION DE PLACA Y GATOS



⑤ COLOCACION DE PUNTA Y TROQUEL



⑥ EXPANSION Y SEGUNDOS COLADOS

FIG. IV.13B SECUENCIA DE COLOCACION DE DOVELAS PARA TUNEL EXCAVADO CON ESCUDO ABIERTO

INYECCIONES

Con el objeto de reducir los asentamientos superficiales que puedan presentarse durante la excavación del túnel, así como las posibles filtraciones de agua freática hacia el interior del mismo, deberá efectuarse en cada anillo el proceso de inyección que consiste de varias fases, introduciendo inicialmente un relleno primario de gravilla, ésta deberá contar con partículas de un diámetro de 3/8" como máximo, dicha gravilla se inyecta en todo el perímetro de la sección excavada a través de las perforaciones implementadas para tal efecto en las dovelas (insertos para maniobra), la inyección se realiza una vez que los insertos de la última dovela salen del faldón del escudo después de efectuar el empuje correspondiente.

El proceso de inyección complementaria se aplica en dos fases, la primera se realiza en todos los anillos y las inyecciones de segunda fase se efectúan en anillos alternados. fig. (IV.14).

INYECCION DE PRIMERA FASE

Esta inyección se realiza a través de las perforaciones con que cuentan las dovelas, su ejecución se llevará a cabo una vez que el anillo por inyectar se encuentre a una distancia equivalente a dos anillos del faldón del escudo. fig. (IV.14).

El volumen a inyectar por insertos será de 0.50 m^3 y la presión de inyección será de 1.0 Kg/cm^2 , suspendiéndose cuando se alcance el volumen máximo indicado.

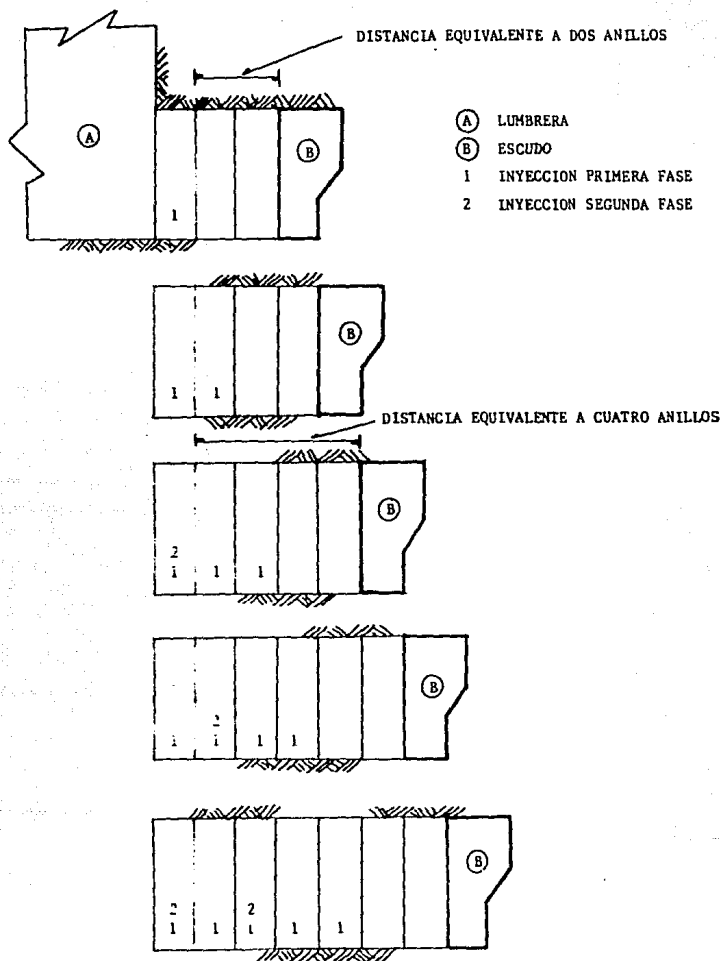


FIG. IV. 14 PROCESO DE INYECCION SEGUN EL AVANCE DEL ESCUDO

INYECCION DE SEGUNDA FASE

Para la realización de la inyección de segunda fase, el anillo por inyectar deberá contar con la inyección de primera fase y tener entre este y el faldón del escudo una distancia igual a cuatro anillos, es decir, el quinto anillo localizado atrás del faldón es el que se inyecta en segunda fase. fig. (IV.14).

El volúmen máximo a inyectar por insertos durante esta fase es de $0,50 \text{ m}^3$, la presión de inyección será de 1.5 Kg/cm^2 suspendiéndose cuando se alcance dicha presión.

ESCUDO DE FRENTE ABIERTO DE $\phi = 9.513 \text{ m}$

Las experiencias adquiridas durante la excavación de túneles para metro con escudo de frente abierto, así como la excavación de túneles para sistemas de drenaje, generó el interés y la inquietud en diversos organismos del gobierno de la ciudad de México y grupos de ingenieros, en el sentido de reducir las condiciones de costo y tiempo e incrementar la seguridad de la excavación de túneles en las zonas de suelos firmes de esta ciudad.

Por lo anterior, la Comisión de Vialidad y Transporte Urbano, COVITUR, se abocó a la realización del estudio de factibilidad de construcción de este escudo y asignó personal especializado para la definición de las características de un escudo prototipo que se adaptara a las condiciones que se encuentran en los suelos firmes de la ciudad de México, este escudo debería disponer de los últimos adelantos existentes a nivel internacional, con la característica particular que debería ser un escudo de frente abierto, con el ataque del frente y retiro del material de excavación totalmente mecanizados y satisfacer los siguientes objetivos:

- Tener capacidad para avanzar 20m/día, conservando en todo momento la estabilidad del frente y paredes.
- Sistema excavador conforme a las necesidades del proyecto, con rendimiento probado en suelos similares a los que se presentarían a lo largo del túnel.
- Simplificación de las operaciones de ensamble del equipo y -

- sistemas auxiliares, así como de las operaciones mismas de tunelamiento.

- Aprovechamiento de la capacidad de diseño y fabricación ya existentes en el país.

El diseño del escudo se basó en la geometría del proyecto, mismo que se rige por los requerimientos del convoy tales como gálibos estáticos y dinámico, andadores, visibilidad, señalización, etc.

Tras años de experiencia y estudio se llegó a la conclusión de que el diámetro exterior óptimo del escudo sería de 9.513 m, con una longitud en su parte inferior de 6.4 m y en la superior de 7.60 m. La construcción de este escudo se encomendó a la empresa mexicana COMPACTO, S.A.

Para su funcionamiento el escudo cuenta con los siguientes sistemas:

- a) Estructura del escudo.
- b) Sistema excavador.
- c) Sistema de extracción de rezaga.
- d) Sistema de empuje.
- e) Sistema de ademe frontal.
- f) Sistema de anillo erector.
- g) Sistema de respaldo.

A continuación se hace una breve descripción de las características principales de los sistemas antes mencionados:

- a) Estructura del escudo.

La "camisa" del escudo está integrada por tres secciones principales-

denominadas cachucha, cuerpo central y faldón; están formadas por placas metálicas con un espesor de 2 pulg., 1 pulg. y 3 pulg., respectivamente.

fig. (IV.15)

El cuerpo del escudo está formado por once módulos que se fabricaron para atornillarse entre sí, de tal manera que se forme un cilindro con un perímetro de 29.88 m, que se rigidiza mediante atiesadores y costillas a través de postes y plataformas cuyo diseño involucra la resistencia a los esfuerzos debidos a su peso propio, las presiones del subsuelo, así como los esfuerzos inducidos por el sistema excavador y de empuje.

La "cachucha" tiene una longitud de 2.40 m y sobresale 1.20 m con respecto a la parte inferior. En esta sección del escudo se encuentran el sistema de soporte frontal, los brazos recolectores y la retroexcavadora.

El cuerpo central tiene una longitud de 2.80 m, espacio suficiente para alojar la cabina del operador, motores y cabezal del equipo cortador y los gatos de empuje.

La longitud del faldón es la necesaria para alojar dentro del mismo uno y medio anillos de 1.20 m de longitud; en esta parte del escudo se tienen colocados en la parte media inferior, una serie de barras guía que tienen como función mantener centrado el anillo formado por dovelas, además de controlar la línea de acción de los gatos de empuje durante su carrera, con el fin de que ésta coincida con el centro de la cara de apoyo de las dovelas. En la parte final del faldón y en forma interna y perimetral al mismo se encuentran instalados un cepillo de alambre y un sello de neopreno, de vi ---

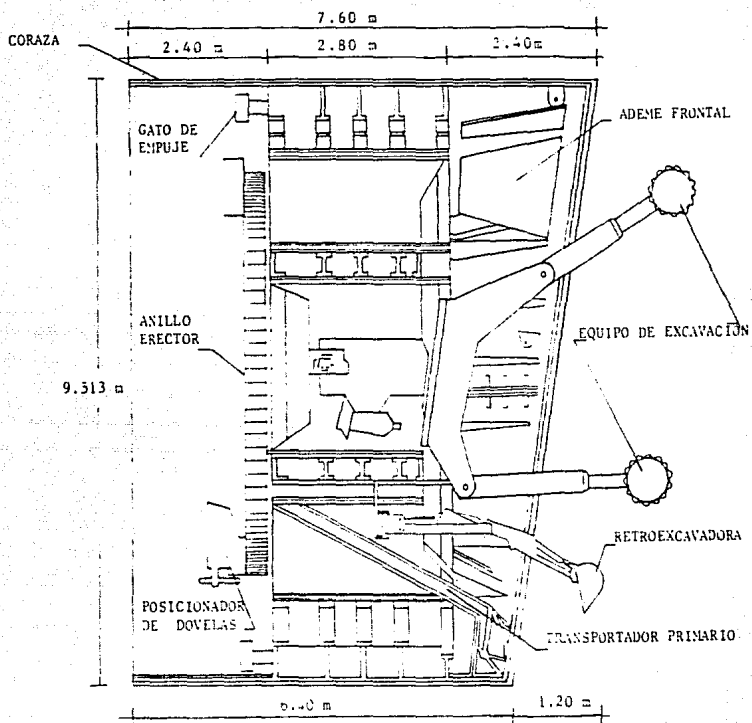


FIG. IV.15 VISTA LATERAL DEL ESCUDO

tal importancia puesto que éstos aditamentos impiden que la mezcla de la inyección de contacto que se coloca entre el terreno y el anillo que sale del faldón se fugue hacia el interior del escudo.

Las dimensiones generales del escudo y ubicación del equipo antes citado se indican en las figuras IV.15, IV.16 y IV.17

b) Sistema excavador.

Con la finalidad de acelerar el proceso de excavación se ha integrado al escudo un mecanismo excavador de alto rendimiento, el cual está compuesto por dos brazos con cabezas rozadoras modelo Alpine Miner AM 50, que operan mediante tres motores eléctricos de 110 kw conectados a una línea de 440 volts, teniendo en sus articulaciones cilindros hidráulicos que permiten efectuar movimientos radiales en torno al frente de ataque. La capacidad teórica del sistema es de 70 m³/hora.

Este equipo se encuentra montado en una base rotatoria sobre el cabezal, permitiendo realizar simultáneamente, con los dos brazos, el corte del terreno en toda la sección, uno atacando la sección exterior y el otro la interior.

La base rotatoria tiene instalados tres motores eléctricos de 15 Kw controlados mediante un modulador de frecuencia único para los tres motores, el cual permite variar la velocidad hasta 1.5 R.P.M. En cuanto al movimiento longitudinal del cabezal, se consigue mediante tres cilindros hidráulicos que transmiten una fuerza de 400 KN cada uno, permitiendo desplazar el equipo hasta 1.0 m.

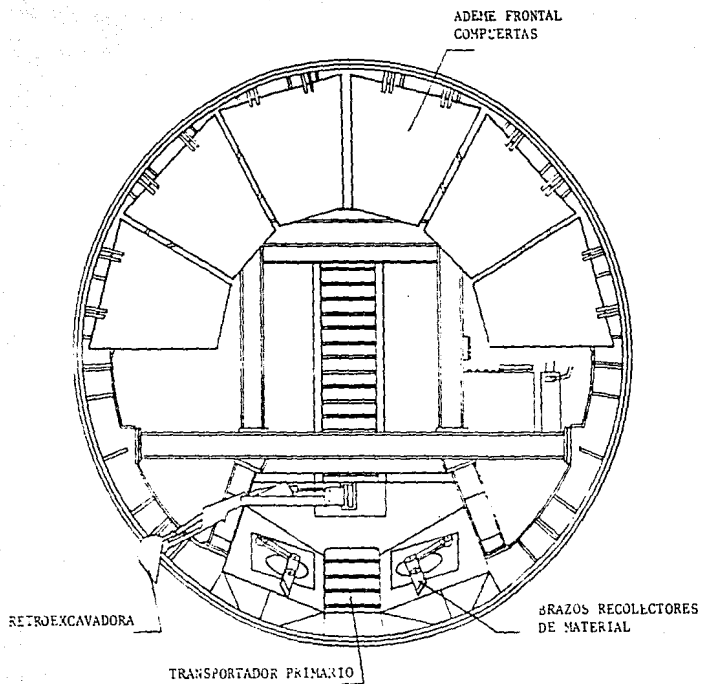


FIG. IV.16 VISTA FRONTAL DEL ESCUDO

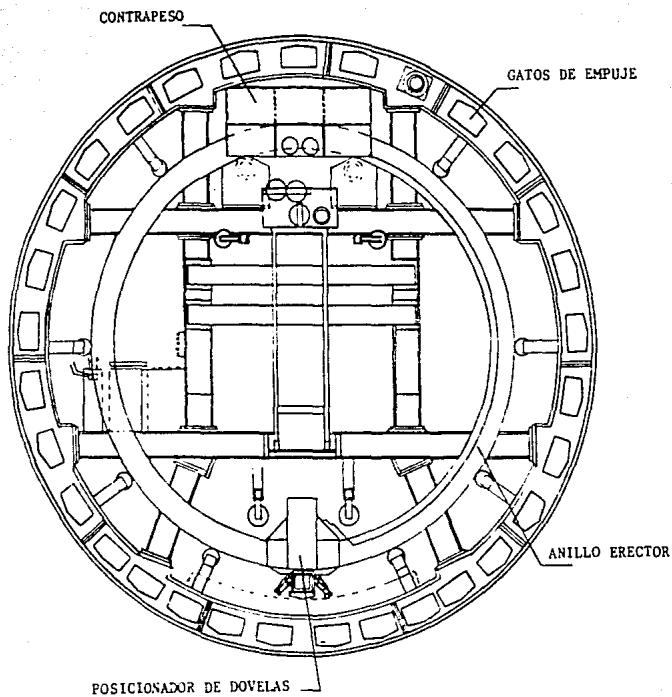


FIG. IV.17 VISTA POSTERIOR DEL ESCUDO

c) Sistema de extracción de rezaga.

Para la extracción eficiente del material producto del corte del frente de ataque, se ha implementado en el cuerpo central del escudo una retroexcavadora que alimenta a dos brazos recolectores que encauzan el material a una tolva que comunica a la banda transportadora, la cual se encuentra instalada con una inclinación de 27° , lo que le permite pasar por la parte central del anillo erector.

Esta banda fue diseñada para transportar material con un peso volu métrico de 1.80 ton/m^3 y con ángulo de reposo de 30° . La longitud de la banda es de 17 m y su ancho de 90 cm.

La banda transportadora es accionada por dos motores eléctricos de 34.5 Kw cada uno a una velocidad de 1.14 m/seg, lo que genera una capacidad nominal de 400 ton/h.

Una vez que el material producto de la excavación ha transitado por la banda transportadora inclinada (transportador primario), pasa a otra instalada en posición horizontal (transportador secundario), la cual está apoyada en la parte superior de los pórticos, en una longitud de 40 m, con una capacidad nominal de 460 ton/hora y una velocidad de 1.524 m/seg, que lo deposita en las tolvas receptoras para finalmente ser transportado hasta la lumbrera y de ahí a la superficie.

d) Sistema de empuje.

Para realizar el avance del escudo se utilizan 31 gatos hidráulicos

con una carrera de 1.35 m distribuidos perimetralmente en el interior del escudo, los cuales proporcionan una fuerza de empuje de 5,487 ton. a una presión de 350 Kg/cm^2 . El espacio creado con el empuje es el necesario para instalar un anillo del revestimiento del túnel. La potencia hidráulica de cada gato es de 7 H.P.

La distribución de los gatos se moduló de forma tal que las zapatas de los mismos no coincidieran con las juntas entre dovelas. Al mismo tiempo se buscó una mayor concentración de gatos en la parte inferior del escudo para compensar el efecto de arado, evitando de ésta forma que el escudo presente una tendencia a "clavarse" hacia abajo.

e) Sistema de ademe frontal.

Como medida de seguridad, el escudo cuenta en su parte frontal con seis compuertas abatibles de operación hidráulica independiente para cada una, cuya área acumulada cubre aproximadamente el tercio superior del frente de ataque. Cada una de estas compuertas tiene una área de 3.5 m^2 , - ejerciendo una presión de 2.07 Kg/cm^2 sobre el terreno. La importancia principal de este sistema estriba en el confinamiento inmediato del material de la clave, cuando se presentan condiciones de inestabilidad en el frente.

f) Sistema de anillo erector.

El anillo erector se encuentra alojado en la parte final del faldón y tiene un diámetro exterior de 6.90 m, con un peso de 8.577 ton. A este anillo viene integrado un manipulador hidráulico que tiene movimiento radial, longitudinal y tangencial y cuya función principal es la de ---

desplazar y colocar en su posición definitiva las dovelas de concreto precoladas para su ensamble y que servirán como ademe para revestir la sección excavada. Con objeto de equilibrar el peso de la dovela, el anillo erector cuenta con un contrapeso en el extremo opuesto al manipulador, que pesa 3.78 ton.

Para accionar el anillo erector se tienen dos motores hidráulicos - con una potencia de 120 H.P., lo que permite girar el anillo en dos sentidos (derecha - izquierda) ya que se encuentran acoplados entre sí a través de un engrane de dientes rectos con un ángulo de 12° , soldado en el diámetro interior del propio anillo.

En la parte trasera al escudo se localizan dos polipastos eléctricos con una capacidad nominal de 4.30 ton. que se deslizan sobre vigas - carril para transportar las dovelas al pie del anillo erector.

g) Sistema de respaldo.

Con la finalidad de dar una mayor versatilidad al escudo excavador - manteniendo la seguridad, se diseñó un sistema de respaldo donde se encuentran instalados los equipos hidráulico y eléctrico necesarios para suministrar al escudo la energía correspondiente para la operación eficiente de los diferentes sistemas instalados dentro de la estructura del escudo. Asimismo, este sistema cuenta con las plataformas necesarias para el acceso de las vagonetas que proveerán las dovelas desde la lumbrera hasta el frente y que a su vez transportan el material de excavación para su extracción a la superficie.

El sistema de respaldo tiene un peso aproximado de 200 ton. y una -

longitud de 120 m, suficiente para alojar dos carriles de locomotoras has ta con diez vagonetas; además, el sistema de respaldo fue diseñado considerando los cambios de dirección que se han requerido en las líneas del Sistema de Transporte Colectivo Metro, de tal manera que las uniones de las plataformas permiten tomar curvas horizontales de hasta 200 m de radio y curvas verticales de 1,000 m de radio.

El sistema de respaldo a su vez se subdivide en tres tramos los cuales son:

- 1.- Plataformas con pórticos.
- 2.- Plataformas sin pórticos.
- 3.- Secciones de rampa.

- 1.- Plataformas con pórticos.

La zona de plataformas con pórticos se encuentra unida al escudo en su parte posterior mediante dos viguetas por donde circulan los polipastos eléctricos que transportan principalmente las dovelas que conforman los anillos del revestimiento definitivo del túnel.

Se tienen cinco plataformas con pórticos, cada una con una longitud de 9.0 m; en la primera plataforma se reciben las dovelas y rieles que se instalan para el deslizamiento del sistema de apoyo y el tránsito de locomotoras y vagonetas, en la segunda plataforma se encuentra ubicado el equipo hidráulico, en la tercera el equipo eléctrico, en la cuarta se dejan las preparaciones para instalar el equipo de inyección y en la quinta se instala la tolva que recibe el material producto de la excavación.

Sobre los pórticos se encuentra instalado el transportador secundario de rezaga que deposita el material producto de la excavación en las tolvas receptoras, las cuales descargan dicho material en vagonetas, para ser transportado hasta la lumbrera y de ahí a superficie.

2.- Plataformas sin pórticos.

Inmediatamente atrás de las plataformas con pórticos, se localizan cinco plataformas sin pórticos con una longitud de 9.0 m cada una, cuya función específica es la de permitir el acceso a estacionamiento de las vagonetas que se utilizan para el transporte del material producto de la excavación.

A lo largo de las plataformas se ubica una doble vía con una separación eje a eje de 2.0 m, que confluye en la última plataforma sin pórtico para desembocar a la zona de rampa, que cuenta con una sola vía.

3.- Sección de rampa.

La rampa está conformada por tres secciones con una longitud total de 18.0 m y una inclinación de 3°. La función principal de ésta es de dar acceso y salida de la zona de pórticos a las vagonetas para el transporte de la rezaga hasta la lumbrera.

La distribución del equipo y tren de arrastre comentados, se muestra en la figura IV.18

Como se ha mencionado, otro equipo que cobra gran importancia para la eficiencia de operación del escudo es el equipo de arrastre, el cual ---

está conformado por una locomotora diesel y vagonetas de arrastre.

El número de vagonetas empleado está planeado de tal forma de establecer un ciclo entre el retiro del material de rezaga y la velocidad de excavación.

Este equipo se emplea de igual forma para el suministro de dovelas - las cuales son transportadas mediante un carro especial denominado "truck", acoplado a la última vagoneta; asimismo, aunque en forma alternada, este equipo arrastra al carro de inyección para suministrar los volúmenes necesarios para el relleno del espacio anular que se crea entre el perímetro - de la excavación y la instalación del revestimiento del túnel.

Con la finalidad de evitar interrupción en el ciclo de rezaga o suministro al frente, se hace imprescindible contar en el intertramo y excavado y revestido, con un sistema de doble vía (cambio California) cuya longitud sea la necesaria para permitir el tránsito de dos equipos de arrastre en sentidos de circulación contrarios.

Previamente al armado del escudo en la lumbrera y con la finalidad de contar con el sistema eléctrico e hidráulico que alimenta al escudo, es necesario construir las plataformas para instalar dichos sistemas, que posteriormente se alojaran en el túnel.

ARRANQUE Y OPERACION DEL ESCUDO

Concluida la instalación de los sistemas mencionados, se procede a instalar el atraque que sirve como apoyo para el empuje inicial del escudo, constituido por un semianillo de concreto hidráulico apoyado en la pared de la lumbrera y semianillos formados por dovelas de concreto com-

plementadas con dovelas metálicas.

Una vez instalado el tercer semianillo de atraque dentro del faldón del escudo, se da un primer empuje apoyando las zapatas de los gatos sobre los semianillos ya instalados, de tal forma de crear el espacio necesario para la instalación de otro semianillo.

Después de instalado el quinto semianillo en la forma anteriormente descrita, se inicia la demolición del revestimiento primario de la lumbre en la sección de ataque del escudo para proceder a la excavación del túnel en tramos con longitud de 1.35 m.

El proceso de excavación se efectúa a sección completa utilizando el equipo mecánico "alpine", en avances variables entre 0.30 y 1.35 m dependiendo de la estratigrafía que se presente en el frente; para tal efecto, el sistema de ademe frontal (constituido por las compuertas) se encuentra retraído con la finalidad de evitar interferencias con el equipo excavador, utilizándose exclusivamente en sitios particulares donde el frente presenta signos de inestabilidad.

Para reducir lo más posible las vibraciones que se ocasionan por la fuerza de fricción entre el escudo y el suelo, se recomienda colocar periódicamente en el perímetro del escudo una mezcla de lodo bentonítico con aceite soluble al 5%, obteniendo con esto resultados satisfactorios.

El material producto de la excavación es removido mediante la retroexcavadora hacia los brazos recolectores que lo encauzarán hacia los transportadores primario y secundario, para ser depositado en las tolvas recep

toras y posteriormente ser transportado mediante vagonetas a la alcancía de la lumbrera. Una vez efectuado el corte y retiro del material del frente, se tienen las condiciones para dar un empuje parcial o total (1.35 m) del escudo, apoyando las zapatas de los gatos en los anillos ya colocados hasta crear el espacio para la instalación de un nuevo anillo y así sucesivamente. Realizado el empuje del escudo se retraen los gatos para proceder a la instalación de las ocho dovelas que conforman un anillo. Para el caso del túnel de la Línea 7 norte, los anillos se formaran mediante la unión de ocho dovelas.

Las dovelas son transportadas hasta el primer pórtico de donde, mediante un polipasto eléctrico, son puestas en la parte inferior del anillo erector para insertarlas al posicionador e instalarlas en su ubicación definitiva reensamblándolas unas con otras y para una vez completado el anillo, unir éste al anterior mediante tornillos.

Una vez que el anillo sale del faldón del escudo, se aplica una primera fase de inyección para rellenar el espacio que se forma entre el revestimiento y el terreno natural; la función principal de esta inyección es la de reducir las deformaciones que se pudieran presentar en la superficie después del paso del escudo.

La inyección de primera fase está constituida inicialmente por grava; posteriormente, con la finalidad de acelerar dicha inyección, se sustituye por un mortero compuesto por agua cemento -bentonita -arena y acelerante de fraguado.

Cuando el anillo tratado en primera fase se encuentra cinco anillos atrás del faldón del escudo, se aplica una segunda fase de inyección con una lechada a base de agua-cemento-bentonita-arena y acelerante de fra-

guado, para rellenar las posibles oquedades que no se trataron por cualquier causa con la primera inyección, además de las grietas ocasionadas por la contracción de la mezcla inyectada en la primera fase.

EXCAVACION CON EL ESCUDO EN SUELOS TOBACEOS.

El proyecto y diseño del sistema excavador con que está equipado el escudo fué concebido para obtener altos rendimientos en los materiales - tobáceos característicamente predominantes en la zona de transición.

Debido a la capacidad de soporte que presentan los materiales tobáceos, es posible mantener retraído el sistema de ademe frontal para efectuar el corte del material en toda la sección por excavar haciendo uso de los dos brazos cortadores con que cuenta el escudo, extendiendo en ocasiones el cabezal para el corte hasta 1.40 m adelante de la "cachucha" del escudo, cuidando que el terreno no muestre signos de inestabilidad.

Efectuado el corte y retiro del material del frente, se procede a realzar el empuje del escudo, creando de esta forma el espacio necesario para instalar un nuevo anillo y completando así un ciclo del proceso constructivo.

EXCAVACION CON EL ESCUDO EN SUELOS GRANULARES SIN CEMENTACION

Los problemas generados por la presencia de suelos granulares con poca o nada de cementación provocan problemas de estabilidad debido a su baja capacidad de autoapoye que, aunada a las vibraciones transmitidas por el equipo de excavación y las debidas al avance del escudo, oca-

sionaron problemas de estabilidad en el frente.

Al excavar es necesario el uso de las compuertas del ademe frontal ya que se pueden presentar pequeños caídos obligando a reducir la longitud de avance. Bajo tales condiciones, el proceso de excavación llega a sufrir modificaciones que consisten en atacar el área de suelo cubierta por el ademe frontal mediante rompedoras neumáticas, retrayendo una a una las compuertas hasta completar el corte del material.

CAPITULO V

ALGUNOS PROBLEMAS DURANTE LA CONSTRUCCION

PROBLEMAS DE ESTABILIDAD EN EL TRAMO COMPRENDIDO ENTRE LA ESTACION CAMARONES Y LA ESTACION REFINERIA DE LA LINEA 7 DEL METRO

Prácticamente desde el inicio de la excavación del tramo comprendido entre la Estación Camarones y la Estación Refinería, se presentaron problemas a causa de algunos caídos, entre los que destacaron dos por su magnitud. Estos caídos obedecieron a la estratigrafía errática que se tuvo en la que predominó la presencia de estratos arenosos sueltos en la sección media superior en aproximadamente 50% de la sección del túnel. Debido a lo anterior fué necesario modificar el procedimiento constructivo, suprimiendo el uso de uno de los brazos excavadores, usar las plataformas de ademe para soportar la parte superior de la sección excavada y realizar parcialmente el ataque del frente, es decir, el empuje del escudo para avanzar un anillo completo de 1.20 m se hizo por etapas.

Se inyectó una mezcla de bentonita con aceite soluble entre el escudo y el terreno natural para permitir el avance suave del escudo y la inyección de contacto atrás del escudo se realizó con rapidez con el objeto de reducir los movimientos superficiales a lo largo del trazo.

El primer caído fué aproximadamente en el cadenamamiento 6+545. En los anillos 261 y 262 durante su excavación se presentaron caídos en la clave y en la parte central del banco que provocaron sobre excavaciones en la clave de 0.3 a 0.5 m de altura. Al iniciar el primer empuje de 0.30 m para colocar el anillo 263 se presentó un desprendimiento del banco y sobre excavación en la clave, alcanzando el material la altura de la base de la retroexcavadora.

Se extrajo dicho material y se inició la excavación de la parte inferior del frente para formar la ranura y realizar un nuevo avance de 0.30 m del escudo, pero al avanzar los primeros 0.05 m se presentó el

primer caído importante, cuyo volumen fué de 43 m^3 aproximadamente en estado suelto.

Inmediatamente se intentó rezagar el material a fin de empujar el escudo y lograr que las plataformas de ademe sostuvieran totalmente el frente y evitar un caído mayor.

Se trató de determinar la magnitud del caído por medio de una de las compuertas presentándose en ese momento desprendimientos del material que llegó a fluir por abajo de las compuertas hasta llenar el espacio entre el escudo y el frente de excavación, cubriendo la retroexcavadora y el brazo. fig. (V.1).

El material que fluía era arcilla negra, arena y partes remoldeadas con pequeños escurrimientos de agua, motivo por el cual se suspendieron totalmente las actividades.

Se tomaron las siguientes medidas de seguridad considerando que el trazo del túnel se encuentra abajo de la avenida Ferrocarriles Nacionales, en la cual pasa un tren de carga que transmite vibraciones al terreno:

- Apuntalar perfectamente las compuertas de ademe con tubería de 6" de diámetro.
- Ademar todos los huecos entre compuertas
- Inyectar bentonita y aceite soluble entre el terreno y el escudo e inyección de contacto entre terreno y dovelas, para asegurar que las posibles cavernas se llenaran totalmente.

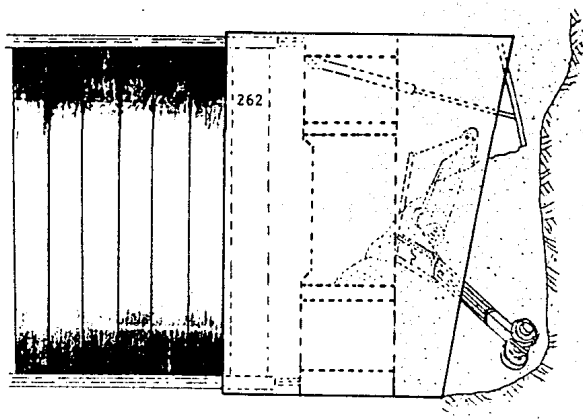


FIG. V.1 ESQUEMA DEL TRAMO DESPUES DEL CAIDO

- Verificar el estado de las líneas de drenaje y agua potable sobre el eje del túnel, para ver si presentaban fugas.
- Inspeccionar en superficie la zona donde se localizaba el escudo, - para detectar visualmente las fallas en el terreno.

Para poder reiniciar la excavación del túnel se recomendó, además de lo anterior, que se repitiera la 2a. fase de inyección en los últimos 30 anillos colocados con una longitud de perforación de 2.50 m.

Se efectuó una aureola de inyección por el interior del túnel tratando de inyectar cuando menos una longitud de 10.00 m adelante del escudo.

fig. (V.2).

De ninguna manera se podía reiniciar la excavación sin realizar inyecciones para consolidación del subsuelo desde la superficie y efectuar nivelaciones cada 4 horas hasta que se estabilizaran las deformaciones.

También se detalló la estratigrafía del subsuelo en la zona del caído efectuando 4 sondeos separados a cada 15.00 m partiendo de 5.00 m desde la cachucha del escudo.

Los resultados de la inyección no fueron los deseados porque persistieron problemas de estabilidad y solo penetró en pequeñas vetas en los estratos más débiles.

El segundo caído se registró en el cadenamiento 6 + 661, aunque menores proporciones, se suspendió la excavación y aumentó la incertidumbre, por lo que se tomó la decisión de emplear un procedimiento de

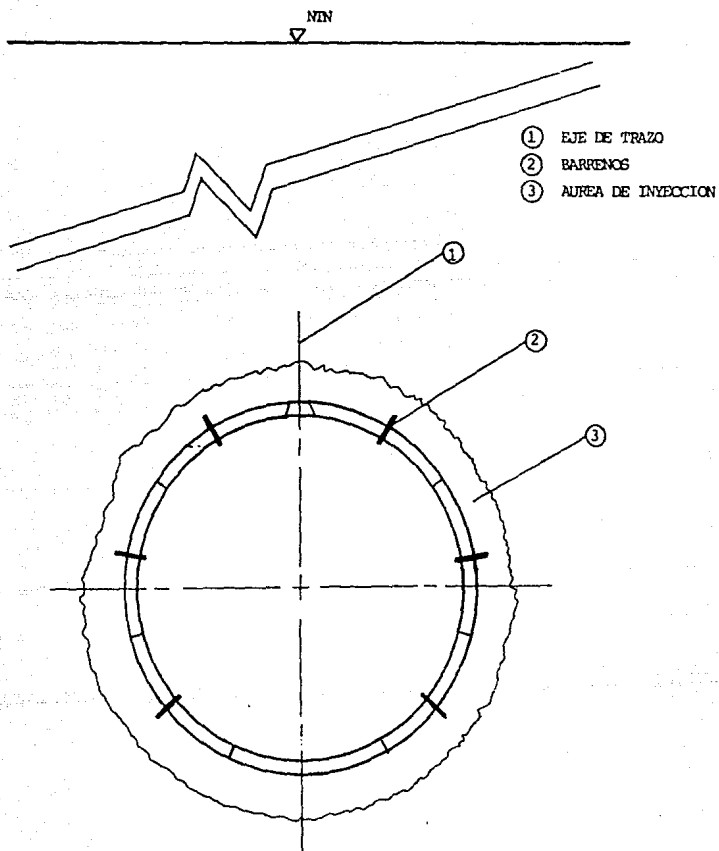


FIG. V.2 AUREOLA DE INYECCION PARA CONSOLIDACION DEL SUBSUELO

consolidación costoso a base de productos químicos que dieron resultados altamente satisfactorios. Como resultado de los caídos se estableció - incrementar el número de sondeos de exploración para obtener información más detallada de los estratos y que la consolidación se realizara en todo el tramo faltante de excavar.

La mezcla de productos químicos estaba compuesta por los siguientes elementos:

Silicato de sodio	50	litros
Agua	50	litros
Acetato de etilo	5	litros
Estabilizador (LYDET)	1.5	litros

Se inyectó un volumen de 1.8 m^3 por progresión en un espesor de 7.00 m comprendido entre los 15.00 y 22 m de profundidad, penetrando y rellenando - vacios para formar estratos consistentes. Los trabajos se efectuaban cuando menos 12 horas antes de que el frente de excavación pasara por la zona - tratada.

DESVIACION TOPOGRAFICA EN LA LINEA 9 DEL METRO ENTRE LOS CADENAMIENTOS
18+401.989 Y 18+459.307 DE 0.60 M.

Al realizar una orientación giroscópica* en el interior del túnel para ubicar el rumbo real del trazo y compararlo con el de proyecto, se observó que el túnel tenía una desviación gradual a la derecha del eje de proyecto de 0.60 m ocasionada por una mojonera que se construyó con un empotramiento de solo 0.30 m debiendo ser de 1.00 m como mínimo, para evitar que se muevan con el paso de los equipos. El personal de topografía no se percató de que la mojonera se había movido y la utilizaron como punto de apoyo para el control topográfico del túnel.

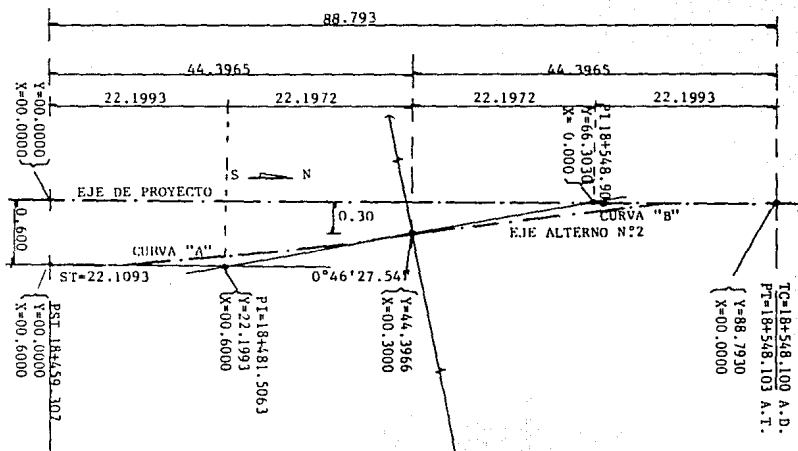
La solución que se planteó para incorporar el trazo real al de proyecto, considerando que el proyecto de implantación de vías tiene limitaciones en cuanto al radio de curvatura de trazo, que está directamente relacionado con la velocidad de desplazamiento de los convoyes del metro, consistió en desarrollar en una longitud de 88.793 metros dos curvas simétricas y de sentido contrario fig. (V. 3).

La curva "A" de sentido izquierdo con un radio de curvatura de 3,285.23 metros, una Δ de $0^{\circ}46'27.54''$ y una ST =22.1993. Esta curva corrigió - - 0.30 m del error en el alineamiento, en 44.3965 m a partir del cadenasamiento 18+459.309.

(*) La orientación giroscópica se realiza con un giroscopio, que es un equipo aplicado en el campo de la Ingeniería para orientaciones astronómicas - - diversas.

En túneles se utiliza para certificación de los azimutes de las líneas de proyecto.

FIG. V.3 INCORPORACION CORRECTIVA AL TRAZO DE PROYECTO
UTILIZANDO UNA BAYONETA CON RADIO DE 3 285,23M



$C=44.39751358$
 $TAN^{-1} / 2 = 0.3/44.3965 = 0^{\circ}23'13.77''$
 $= 0^{\circ}46'27.54''$
 $R = C / SEN (/ 2) = 3\ 285.2302\ m$
 $ST = 22.19926708\ m$
 $LC = 44.39783383\ m$ $Gc = 0.348808308^{\circ}$

La curva "B" de sentido derecho con un radio de curvatura de 3,285.23 metros, una de $0^{\circ}46'27.54''$ y una $ST=22.1993$, con la cual se corrigieron los otros 0.30 m terminando dicha curva en el cad 18+548.100.

El cambio de sentido de las curvas ocurrió en el cad. 18+503.7048. De lo anterior resultó que la velocidad de operación en las curvas es de más de 100 Km/h. con lo que se evitaron problemas a la implantación de vías de rodamiento del metro.

Se elaboró una tabla de desplazamientos teóricos para controlar en campo la incorporación al trazo de proyecto en cada empuje del escudo, la cual se cumplió al pie de la letra, recuperando la desviación ocasionada

Dicha tabla se muestra en las siguientes hojas.

TABLA DE DESPLAZAMIENTOS TEORICOS

DESPLAZAMIENTOS

ESTACION	RESP. EJE PROYECTO	
	Y	X
18+459.307	0.000	0.600
18+460	0.693	0.600
461	1.693	0.600
462	2.693	0.599
463	3.693	0.598
464	4.693	0.597
18+465	5.693	0.595
466	6.693	0.593
467	7.693	0.591
468	8.693	0.588
469	9.693	0.586
18+470	10.693	0.583
471	11.693	0.579
472	12.693	0.575
473	13.693	0.571
474	14.693	0.567
18+475	15.693	0.563
476	16.693	0.558
477	17.693	0.552
478	18.693	0.547
479	19.693	0.541
18+480	20.693	0.535
481	21.693	0.528
482	22.693	0.522
483	23.693	0.515
484	24.693	0.507
18+485	25.693	0.500
486	26.693	0.492
487	27.693	0.483
18+488	28.693	0.475
489	29.693	0.466
18+490	30.693	0.457
491	31.693	0.447
492	32.693	0.437
493	33.693	0.427
494	34.693	0.417
18+495	35.693	0.406
496	36.693	0.395
497	37.693	0.384
498	38.693	0.372
499	39.693	0.360
18+500	40.693	0.348
501	41.693	0.335
502	42.693	0.323
503	43.693	0.309
18+504	44.100	0.296

TABLA DE DESPLAZAMIENTOS TEORICOS

DESPLAZAMIENTOS

ESTACION	RESP. EJE PROYECTO	
	Y	X
505	43.100	0.283
506	42.100	0.270
507	41.100	0.257
508	40.100	0.245
509	39.100	0.233
18+510	38.100	0.221
511	37.100	0.209
512	36.100	0.198
513	35.100	0.188
514	34.100	0.177
18+515	33.100	0.167
516	32.100	0.157
18+517	31.100	0.147
518	30.100	0.138
519	29.100	0.129
18+520	28.100	0.120
521	27.100	0.112
522	26.100	0.104
523	25.100	0.096
524	24.100	0.088
18+525	23.100	0.081
526	22.100	0.074
527	21.100	0.068
528	20.100	0.061
529	19.100	0.056
18+530	18.100	0.050
531	17.100	0.045
532	16.100	0.039

TC=18+548.10 0.000

DISTANCIAS DEL EJE DEL ESCUDO RESPECTO DEL EJE DE TRAZO DE PROYECTO PARA CONFORMAR LA GEOMETRIA PROPUESTA EN LA ALTERNATIVA DE INCORPORACION.

CAPITULO VI

INSTRUMENTACION

I N S T R U M E N T A C I O N

Con ayuda de la instrumentación el ingeniero puede observar como se comportan los túneles y si el comportamiento se apega a las predicciones consideradas.

Las mediciones en el interior del túnel indicarán si las medidas adoptadas son suficientes o no y podrá irse modificando el diseño teórico original en busca de una solución óptima.

Los propósitos generales de las mediciones son:

- Antes de la construcción: recabar la información necesaria para el diseño de las excavaciones. Esta información incluye los módulos de deformación de la roca, sus parámetros de resistencia y el estado inicial de los esfuerzos.
- Durante la construcción: confirmar el diseño y proporcionar las bases necesarias para su adecuación; por otra parte, el control de los desplazamientos tiene un papel importante en la información que se necesita para garantizar la seguridad de las obras subterráneas.

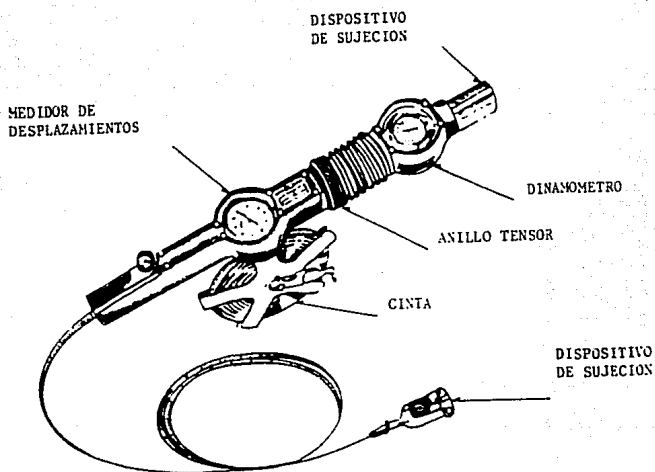
Después de la construcción: vigilar el comportamiento general de la excavación durante la operación de los túneles.

I N S T R U M E N T A C I O N Y A P A R A T O S

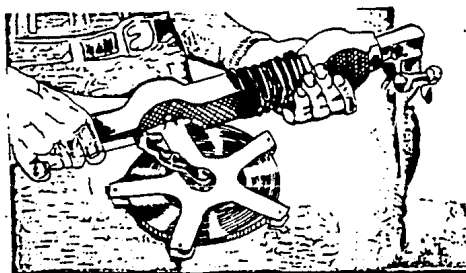
Los instrumentos y aparatos que sirven para determinar la magnitud y variaciones de los movimientos horizontales y verticales que se provocarán en el subsuelo antes, durante y después de realizar la excavación-

y en las áreas adyacentes, así como las presiones en los marcos de acero estructural que funcionarán como sistema de soporte provisional en la excavación del túnel, y los esfuerzos y cargas que actúan en el revestimiento provisional y definitivo de los túneles del Metro, son los siguientes:

- a) Extensómetros: Instrumentos que miden los desplazamientos del subsuelo que se producen entre la superficie del terreno y la clave del túnel. fig. (VI.1A)
- b) Inclínómetros: Instrumentos que miden los movimientos horizontales en la zona inmediata a la excavación del túnel.
- c) Secciones de Convergencia: Miden las deformaciones interiores durante la excavación de la sección.
- d) Bancos de nivel: Elementos, ya sea de concreto o tubos metálicos, que se colocan desde la superficie del terreno hasta el fondo de la excavación con objeto de medir las expansiones y/o asentamientos del subsuelo que ocurran antes, durante y después de la excavación del túnel; los bancos de nivel pueden ser profundos o superficiales.
- e) Piezómetros: Son aparatos que miden la carga de presión del agua en el punto en el que quedan instalados.
- f) Deformímetros eléctricos: Aparatos que estarán embebidos en el concreto y se emplearán para medir la deformación unitaria tanto



COMPONENTES DEL EXTENSOMETRO DE CINTA



COLOCACION DEL EXTENSOMETRO EN LA REFERENCIA FIJA

FIG. VI.1a EXTENSOMETRO DE CINTA

del concreto lanzado como del concreto armado de los revestimientos provisional y definitivo del túnel.

g) Celdas de presión: Aparatos que miden la presión que se ejerce entre el revestimiento provisional y el definitivo.

h) Puntos de referencia:

1. Tipo ancla. Se emplearán para determinar los movimientos de las paredes del túnel hacia su interior con mediciones realizadas dentro de esa zona.
2. Extensómetros de cinta Invar. Se emplearán para medir los asentamientos en las áreas superficiales adyacentes a las excavaciones.

INSTRUMENTACION EN EL INTERIOR DE TUNEL DURANTE LA EXCAVACION

- Movimientos convergentes en la excavación del túnel. Para conocerlos se instalarán tres extensómetros: uno vertical sobre el eje de la vía del túnel y los otros dos, uno a cada lado, inclinados entre 30° y 45° fig. (VI.1B) cuando se trate de un solo túnel. En el caso de túnel en estación, los extensómetros verticales serán dos colocando cada uno de ellos sobre el eje de cada -- túnel fig. (VI.2).

Los extensómetros empleados deberán tener una sensibilidad de 0.01 mm con un intervalo de medición no menor de 25 mm o reajutable de 15 mm, su grado de confiabilidad, determinado por la desviación estándar no sera mayor de ± 0.03 mm.

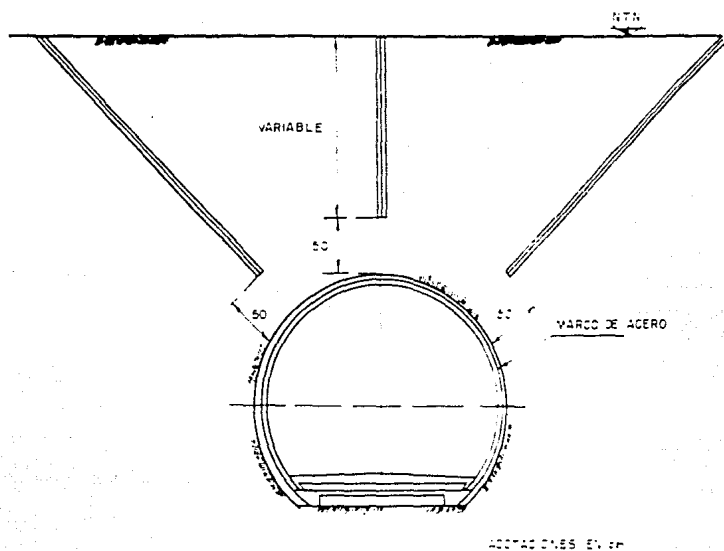


FIG. VI.1b POSICION DE EXTENSOMETROS

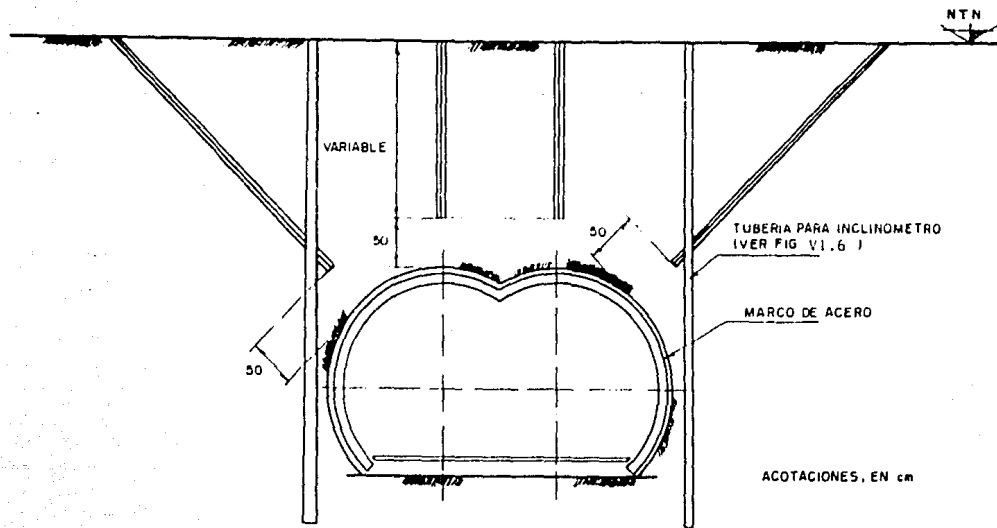


FIG. V1.2 POSICION DE EXTENSOMETROS PARA INSTRUMENTACION DE TUNEL DE DOBLE SECCION O DE ESTACION

- Medición de convergencias. - Se deberán utilizar instrumentos con graduación de 0.01 mm en todo el intervalo de medición, que no será menor de 150 mm y con un grado de aproximación efectivo (desviación estándar) de ± 0.02 a ± 0.03 mm, para distancias menores de 10 m.

La distribución de trayectos de medición se deberá hacer de acuerdo al comportamiento esperado de la excavación y al procedimiento constructivo figs. (VI.3) y (VI.4).

Las secciones de medición de las convergencias se localizarán lo más cerca posible del frente de excavación y el espaciamiento entre secciones no deberá ser menor de 20 m ni mayor de 200 m.

Los puntos de referencia para la medición de convergencias serán del tipo ancla (pernos, argollas u otros) los cuales deberán estar anclados perfectamente al suelo, o en su caso al concreto lanzado o marco metálico, la longitud de penetración no será mayor de 50 cm.

- Desplazamiento del subsuelo. La medición se llevará a lo largo de perforaciones las cuales serán ejecutadas desde el interior del túnel, empleando extensómetros con una sensibilidad de 0.01 mm en todo su intervalo de medición, que será de por lo menos 25 mm y reacondicionable.

La distribución de los extensómetros en la sección del túnel dependerá de los problemas particulares: aflojamiento de la clave, expansividad de los suelos, espesor de la zona descomprimida, deformabilidad del suelo, etc. De acuerdo con lo anterior la distribución podrá ser conforme a la fig. (VI.5).

Las secciones de convergencia deberán coincidir con los extensómetros, siempre que sea posible.

Los diámetros, orientación, cercanía al frente y profundidad de los barrenos será de acuerdo a las condiciones particulares de la ex-

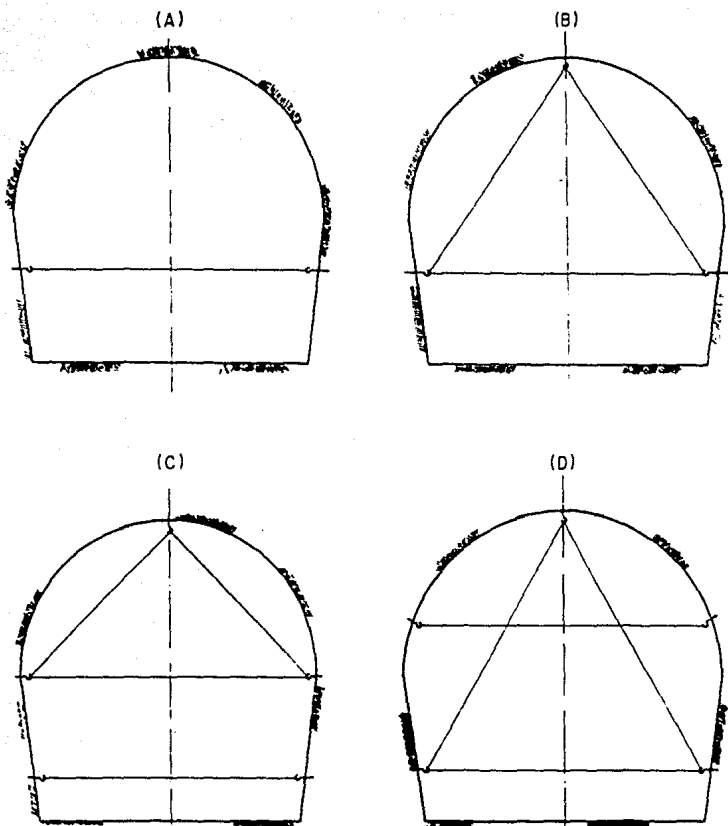
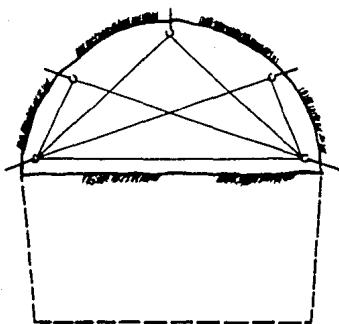


FIG. VI.3 DIRECCIONES DE MEDICION EN SECCIONES DE CONVERGENCIA

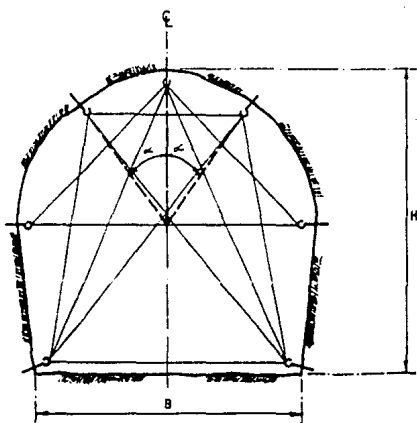


EXCAVACIONES A MEDIA SECCION CON BANQUEO.

PUNTOS EN LA MEDIA SECCION SUPERIOR

(E)

$\alpha = 45^\circ \approx 50^\circ$



EXCAVACIONES A SECCION COMPLETA

FIG. VI.4 DIRECCIONES DE MEDICION EN SECCIONES DE CONVERGENCIA

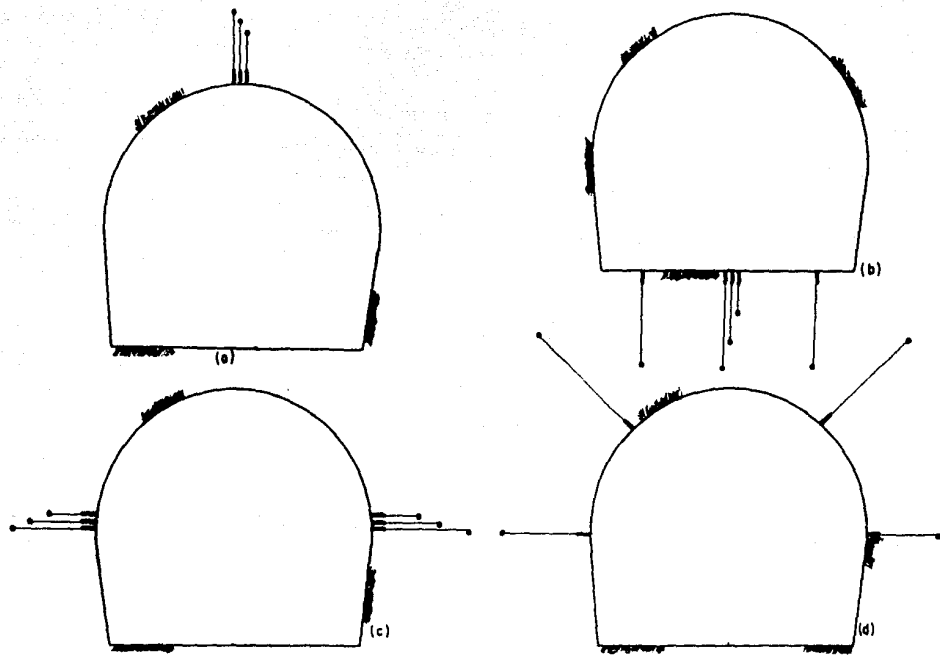


FIG. VI.5 DISTRIBUCION DE EXTENSOMETROS EN LA SECCION DEL TUNEL

cavación.

- Movimientos horizontales.- Las mediciones en la zona inmediata a la excavación del túnel se harán con inclinómetros del tipo eléctrico con una sensibilidad de una parte en 3000, que se deslizarán en tuberías de ademe especiales que se colocarán a 50 cm de la pared lateral del túnel y a la profundidad que indique el proyecto.

Para introducir la tubería del inclinómetro se deberá realizar una perforación de 15.24 cm de diámetro, los tramos de tubería deberán tener una longitud de 75 cm, unidos con coples de 30 cm de largo traslapados sobre la tubería del inclinómetro en una longitud de 7.5 cm a cada lado del cople. fig. (VI.6).

INSTRUMENTACION EN SOPORTES TEMPORALES Y EN REVESTIMIENTOS PROVISIONALES Y DEFINITIVOS.

- Presiones en los marcos de acero estructural.- Para medir las presiones verticales y horizontales que actúan en los marcos de acero colocados en el interior del túnel (sistema de soporte provisional) se instalarán celdas de carga capaces de registrar las cargas máximas de diseño en los marcos. fig. (VI.7).

- Instrumentación en el revestimiento primario y definitivo. Las secciones de instrumentación del revestimiento provisional de concreto lanzado y el definitivo de concreto reforzado, se seleccionan a lo largo de las líneas del Metro para que sean representativas de las diferentes estratigrafías por las que atraviesan los túneles.

Se utilizarán deformímetros eléctricos, celdas de presión embebidas en concreto. Todos los instrumentos de medición embebidos en el concreto lanzado, deberán penetrar hasta el terreno natural o deberá asegu-

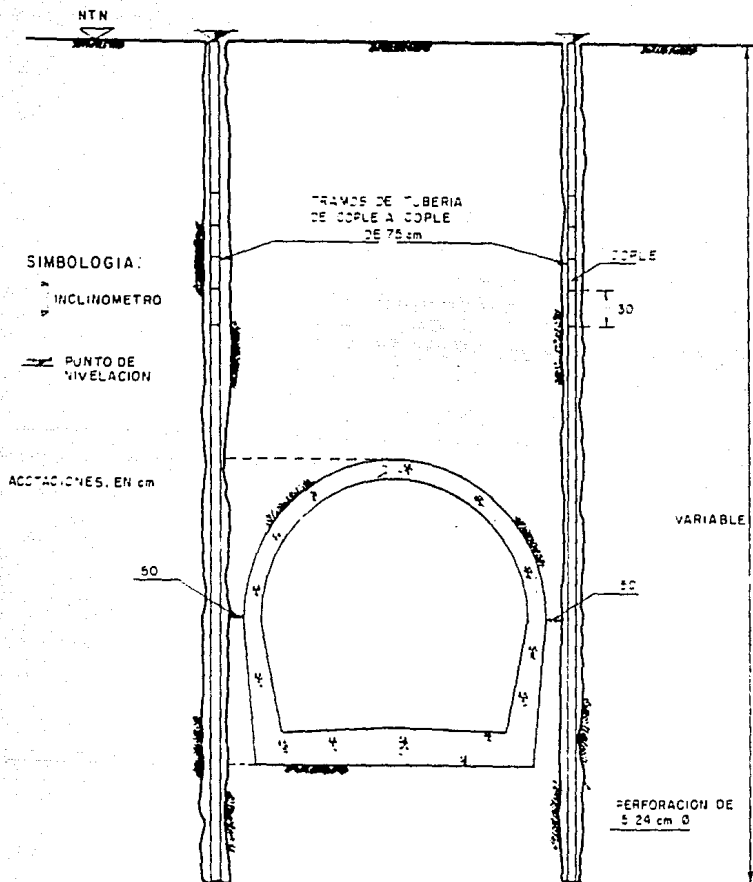
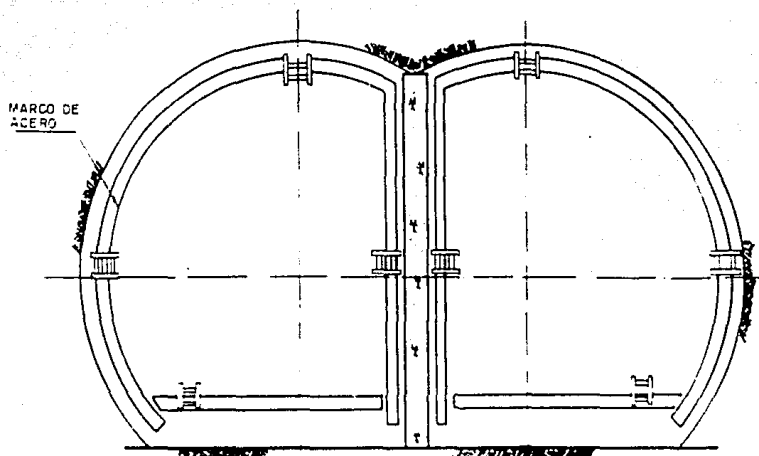
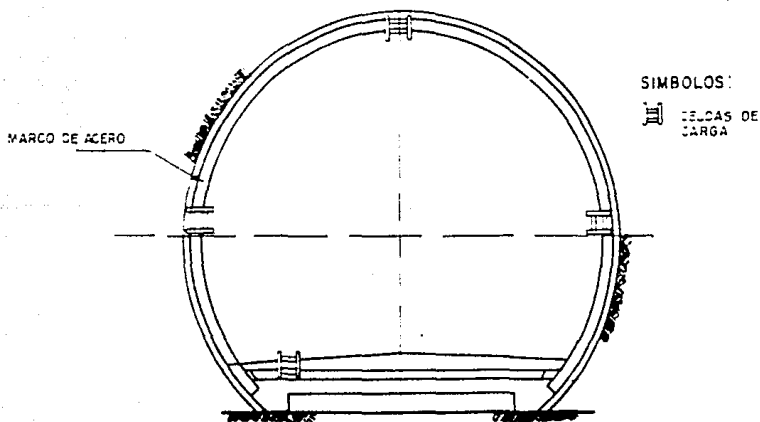


FIG. VI.6 COLOCACION DE INCLINOMETROS PARA MEDICION DE MOVIMIENTOS HORIZONTALES (VER FIG. VI.2)



SECCION DE INSTRUMENTACION CON DOS TUNELES



SECCION DE INSTRUMENTACION CON UN TUNEL

FIG. VI.7 INSTALACION DE CELDAS DE CARGA

rarse que el concreto lanzado esté firmemente acherido al mismo. fig.(IV.8)

-Medición de convergencias.- Se instalarán secciones de mediciones de convergencias en los sistemas de soporte temporal del túnel y el revestimiento definitivo, solamente en aquellos tramos en que las mediciones previas hayan indicado deformaciones importantes y una lenta estabilización. La ubicación de las secciones de convergencia en soportes de finitivos y en el revestimiento, se harán de acuerdo con lo siguiente:

- a) Una sección de medición de convergencia por cada 200 elementos estructurales para soporte definitivo de la excavación.
- b) Una sección por cada 150 m de excavación soportada con concreto lanzado con refuerzo y anclaje.
- c) Una sección cada 500 m de revestimiento definitivo de concreto colado con cimbra.

Se utilizarán los mismos instrumentos y lineamientos que los establecidos para el interior del túnel durante la excavación.

- Deformaciones del intradós.- Para realizar las mediciones de las deformaciones unitarias y de los cambios de curvatura del intradós en el soporte definitivo o en el revestimiento de concreto colado contra cimbra, se utilizarán instrumentos de sensibilidad igual a 0.001 m. Las mediciones solo se realizarán en elementos estructurales de geometría bien definida como son: marcos metálicos, elementos prefabricados de concreto o revestimientos de concreto colado contra cimbra en el lugar.

PERIODICIDAD DE LAS MEDICIONES

Las nivelaciones topográficas sobre los extensómetros, inclinómetros

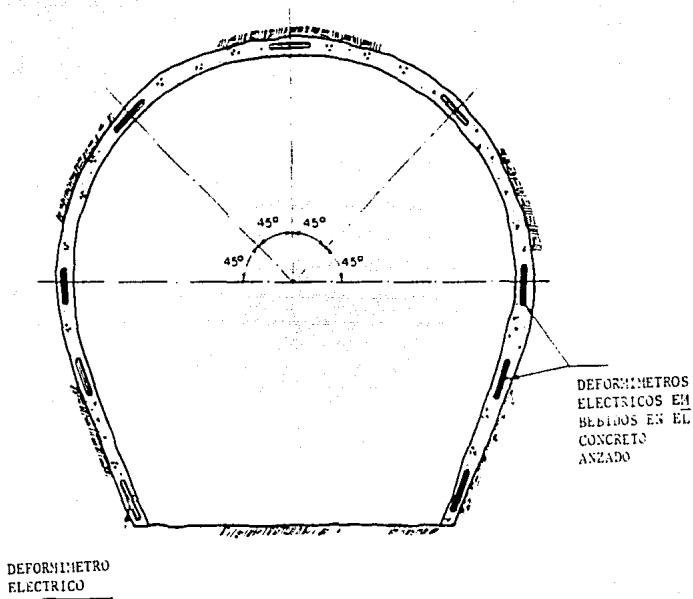


FIG. VI.8 ESTACION DE MEDICION CON DEFORMIMETROS ELECTRICOS

y bancos de nivel, lecturas de los extensómetros, inclinómetros, deformímetros eléctricos, celdas de carga y de los puntos de referencia en el interior del túnel, deberán ser realizados con la siguiente periodicidad.

FRECUENCIA DE LECTURAS PARA LA INSTRUMENTACION EN EL INTERIOR DEL TUNEL - DURANTE LA EXCAVACION.

- Movimientos convergentes en la excavación del túnel. La primera lectura en los extensómetros se hará cuando el frente de excavación se encuentre a no menos de $20 + 0.5$ m. Dependiendo del ritmo de avance, las lecturas se harán una cada 24 horas o una por ciclo de avance, hasta que el frente se encuentre a más de 50 m adelante de la sección. Cuando esto ocurra y si las velocidades de deformación son mayores de 0.05 mm/día, se continuará haciendo lecturas diarias hasta que se denote una franca estabilización.

- Medición de convergencias.- Las mediciones se realizarán por lo menos una vez al día durante las primeras dos semanas posteriores a la instalación de una sección. Una vez que las convergencias indiquen una tendencia franca a la estabilización (velocidades menores de 0.04 mm/día), la periodicidad se podrá ampliar a dos veces por semana hasta que la velocidad de deformación sea menor de 0.1 mm/semana cuando esto ocurra, las mediciones de una sección podrán suspenderse.

- Desplazamientos del subsuelo.- Se harán con una periodicidad de por lo menos una vez al día, durante las dos primeras semanas posteriores a su instalación. Cuando las velocidades sean menores de 0.04 mm/día la periodicidad se podrá ampliar a dos veces por semana hasta que la velocidad sea menor de 0.1 mm/semana en tal caso las mediciones deberán ser suspendidas.

- Movimientos horizontales. - Las lecturas de los instrumentos se tomarán por lo menos una vez al día mientras el frente de la excavación del túnel esté entre los tres diámetros posteriores a la estación de instrumentación; una vez cada semana en el siguiente avance de tres diámetros; una vez cada quince días en el siguiente avance de tres diámetros y una vez cada mes hasta concluir con el revestimiento final del túnel.

FRECUENCIA DE LECTURAS PARA LA INSTRUMENTACION EN LOS SOPORTES TEMPORALES Y EN LOS REVESTIMIENTOS PROVISIONAL Y DEFINITIVO.

- Marcos de acero estructural. - La toma de lecturas en las celdas de carga se harán por lo menos una vez al día mientras el sistema de soporte provisional esté entre los tres diámetros posteriores a la estación de instrumentación; una vez cada semana en el siguiente avance de tres diámetros; una vez cada quince días en el siguiente avance de tres diámetros y una vez cada mes hasta concluir el revestimiento final del túnel.

- Revestimiento provisional y definitivo. - Las mediciones en los deformímetros eléctricos así como en las celdas de presión, deberán realizarse con la siguiente periodicidad:

- a) Diariamente durante los quince días siguientes a su colocación o hasta que el revestimiento de que se trate quede alejado tres diámetros del túnel desde la zona de instrumentación.
- b) Semanalmente durante los siguientes quince días a los anteriores o hasta que el revestimiento en estudio avance otros tres diámetros del túnel.

c) Quincenalmente o tres diámetros más del avance del revestimiento.

d) Mensualmente o tres diámetros más del avance del revestimiento.

- Convergencias. - Las mediciones de convergencias en soportes definitivos o en revestimientos, se harán con una periodicidad de una lectura por semana hasta que las velocidades de deformación sean inferiores a -- 0.05 mm/semana.

CAPITULO VII

CONCLUSIONES

CONCLUSIONES

A medida que ha pasado el tiempo, el hombre cuenta con más herramientas y tecnología para resolver sus problemas, sin embargo sigue con la inquietud de optimizar recursos, ya que cada vez es más importante el ahorro de tiempo y dinero, combinado con el menor esfuerzo en el desempeño de sus labores, desarrollando nuevos métodos y tecnología.

Durante el desarrollo de este trabajo, se da a conocer las técnicas que se han fijado para la realización de túneles en las líneas del metro, ya que cuando la línea se localiza a lo largo de calles y avenidas importantes, la suspensión del tránsito de vehículos ocasiona grandes perturbaciones a la población y es conveniente recurrir a la construcción de túneles, reduciéndose al mínimo la afectación superficial y la de la zona subterránea poco profunda donde comúnmente se localiza la infraestructura municipal.

Ante esta circunstancia, se impulsaron métodos de excavación de túneles. Uno de estos es el convencional, ampliamente empleado con resultados satisfactorios, pero se ha obtenido mayor seguridad y una mayor velocidad de avance con el uso de escudos de frente abierto y semicerrado.

Con base en las experiencias obtenidas en perforaciones con escudo, se creó uno que proporciona rendimientos mayores y un nivel de seguridad más alto. Este nuevo escudo es autó

no en cuanto a las operaciones de excavación, estabilización del material del frente, extracción del material de re zaga y colocación del revestimiento.

Los continuos adelantos alcanzados en los últimos años en el proceso de construcción de túneles, repercuten en forma sumamente favorable en las obras del metro.

BIBLIOGRAFIA

D.D.F., S.G.O. y COVITUR .
PROGRAMA MAESTRO DEL METRO.
México, D.F. 1985.

Asociación Mexicana de Ingeniería de Tuneles y Obras
Subterráneas A.C. - Colegio de Ingenieros Civiles
CURSO VÍCTOR HARDY
México, D.F. 1987.

D.D.F., COVITUR.
ESTUDIO SOBRE EL USO DE MAQUINAS PERFORADORAS PARA
TUNELES EN LA CIUDAD DE MEXICO.
México, D.F. 1987.

COVITUR
Serie 100 Kilómetros de Metro
CONSTRUCCION DE TUNELES PARA METRO EN ZONA PONIENTE
DE LA CIUDAD DE MEXICO.
México, D.F. Julio 1988.

D.D.F., COVITUR.
MANUAL DE DISEÑO GEOTECNICO VOL. I.
México, D.F. Agosto 1987.

D.D.F., COVITUR
MANUAL DE DISEÑO GEOTECNICO VOL. II.
México, D.F. Septiembre 1988.

D.D.F., COVITUR
ESPECIFICACIONES PARA EL PROYECTO Y CONSTRUCCION DE
LAS LINEAS DEL METRO DE LA CIUDAD DE MEXICO VOL. II.
México, D.F. Enero 1987.

Furjeat Páramo Daniel
DISEÑO Y CONSTRUCCION DE TUNELES, EXCAVACION CON
ESCUDOS DECFI
México, D.F. 1984.

ISTME.
INFORME TECNICO DE LA EXCAVACION Y COMPORTAMIENTO
DEL TUNEL.
México, D.F. Agosto 1988.

Tesis Jesus Eduardo Mejia Nava
EXCAVACION DE TUNELES POR MEDIO DE UN ESCUDO
MECANIZADO DE FRENTE ABIERTO.
México, D.F. 1989.

Tesis Juan Manuel Cadena Soto
UTILIZACION DE ESCUDO DE FRENTE ABIERTO 9.15m ϕ
EN LA CONSTRUCCION DEL TUNEL PATRIOTISMO-TACUBAYA
PARA LA LINEA 9 PONIENTE DEL METRO DE LA CIUDAD
DE MEXICO.
México, D.F. 1987.