

881215

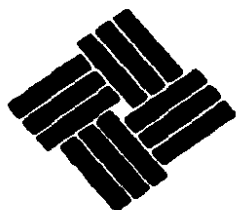
3

2ej

**UNIVERSIDAD ANAHUAC**

**ESCUELA DE INGENIERIA**

CON ESTUDIOS INCORPORADOS A LA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO



**SOLUCIONES CONSTRUCTIVAS PARA  
UN TREN URBANO**

**TEJIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

**T E S I S**  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
**I N G E N I E R O C I V I L**  
P R E S E N T A  
**EFRAIN GUTIERREZ GONZALEZ-KARG**

MEXICO, D. F.

1988



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

## SOLUCIONES CONSTRUCTIVAS PARA UN TREN URBANO

	<b>INTRODUCCION</b>	<b>1</b>
<b>I.</b>	<b>OBRAS INDUCIDAS</b>	<b>7</b>
1.1	Generalidades	10
1.2	Adquisición de predios y rescates arqueológicos	12
1.3	Drenajes y redes de agua	15
1.4	TELMEX, Compañía de Luz, semáforos, alumbrado público	18
1.5	Instalaciones Diversas	20
1.6	Desvfos de tránsito	23
1.7	Jardines	24
<b>II.</b>	<b>SOLUCION SUPERFICIAL</b>	<b>25</b>
2.1	Trabajos preliminares	29
2.2	Excavación	32
2.3	Losa de piso	35
2.4	Muros	40
2.5	Protección	41
<b>III.</b>	<b>SOLUCION SUBTERRANEA EN CAJON</b>	<b>43</b>
3.1	Trabajos preliminares	47
3.2	Brocales	50
3.3	Muros pantalla	53
3.4	Excavación del núcleo	59
	Abatimiento del nivel freático	59
	Excavación y apuntalamiento	60
3.5	Losa inferior	64
3.6	Muros estructurales	66
3.7	Losa superior	69
3.8	Rellenos y compactaciones	74
<b>IV.</b>	<b>SOLUCION SUBTERRANEA EN TUNEL</b>	<b>77</b>
4.1	Trabajos preliminares	81
4.2	Construcción de lumbreras	85
4.3	Excavación y construcción del túnel	91
	4.3.1 Procedimiento convencional	92
	Emportalamiento	95
	Excavación de la sección en túnel	96
	Colocación del concreto lanzado	98
	Márcos de soporte	98
	Colocación del recubrimiento definitivo	101
	inyección de contacto	104
	Instrumentación	106

4.3.2	Procedimiento con escudo de frente abierto	108
	Características del túnel	108
	Revestimiento del túnel	109
	Características generales del escudo	109
	Arranque inicial del escudo	109
	Avance del escudo	111
	Procedimiento para la colocación de anillos	117
	Inyección	119
	Secciones de medición y bancos de nivel	123
4.4	Losa de fondo	124
V.	SOLUCION ELEVADA	125
5.1	Trabajos preliminares	129
5.2	Pilotes	132
5.3	Zapatas	135
5.4	Columnas y cabezales	139
5.5	Trabes	144
5.6	Muretes de contención	151
VI.	REGENERACION URBANA Y OBRAS COMPLEMENTARIAS	153
6.1	Regeneración urbana	156
6.2	Obras complementarias	158
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	163
	APENDICE A	171
	LODO BENTONITICO	
	APENDICE B	177
	CONCRETO LANZADO	
	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	183

## INTRODUCCION

## I N T R O D U C C I O N

Las grandes ciudades y aquellas en crecimiento se enfrentan a la necesidad de trasladar a la población en las zonas de mayor intensidad y diversidad de actividades en forma eficiente, segura, rápida y cómoda. El Tren Urbano constituye en la actualidad la columna vertebral de los sistemas de transporte colectivo, dada su capacidad de movimiento de personas, mínima interferencia con otros medios de transporte, mínimo nivel de contaminación, alta seguridad para los usuarios, tiempos de traslado reducidos, etc.

La construcción de una línea de tren urbano es, en cualquiera de sus soluciones alternativas, sumamente interesante tanto por la complejidad del trabajo como por la relación necesaria que se presenta entre las distintas disciplinas de la Ingeniería Civil. En efecto, la realización de la obra civil del tren es un proceso complejo en la planeación, financiamiento del proyecto, análisis y cálculo de la estructura, determinación y calendarización de las actividades, ejecución y supervisión de las mismas, coordinación del personal, convivencia continua con profesionales ajenos a la industria de la construcción, etc. Asimismo, abarca las distintas áreas de la Ingeniería Civil: tránsito y urbanismo, topografía, mecánica de suelos, mecánica de rocas, estructuras de concreto, estructuras de acero, planeación y programación de obra, hidráulica, etc.

Este trabajo es una introducción a la metodología seguida para llevar a cabo la obra civil de un tren urbano. A través de la descripción del procedimiento básico de construcción de las cuatro soluciones desarrolladas en esta tesis, muestra las características de los trabajos comunes y particulares de cada tipo de línea estudiada.

Las soluciones desarrolladas en este trabajo son las que con más frecuencia se aplican para la construcción de un tren urbano cuyas características son el movimiento de grandes volúmenes de personas sobre líneas fijas, con estaciones de acceso construidas a intervalos regulares, convoys de tren separados físicamente de otros medios de transporte mediante la estructura que los contiene, y localización estratégica de rutas para integrarse en un plan maestro de transporte urbano. Para satisfacer las necesidades de un tren con estas características se cuenta con cuatro opciones: vía superficial, subterránea en cajón, subterránea en túnel, y elevada.

No es motivo de este estudio, aunque no podría considerarse completo sin hacerlo, el presentar en forma detallada la metodología para elegir el tipo de línea que mejor se adapte a cada situación particular. Me limitaré ahora a mencionar someramente este punto.

Los factores fundamentales para elegir un determinado tipo de línea son: costo de obra civil por kilómetro, tiempo de ejecución de la obra, amplitud de las calles para alojar al tren, interferencias con los servicios e instalaciones municipales, obstrucción de la vía pública durante la construcción, futura disponibilidad vial, y paisaje urbano.

También se deben analizar otros factores como el programa de necesidades, las obras inducidas, la ubicación de las estaciones, las características topográficas, las propiedades mecánicas del suelo, el análisis estructural, y las necesidades electromecánicas, hidráulicas y de seguridad. De los anteproyectos existentes se elige a aquel que ofrezca la mejor relación beneficio-costo dadas las necesidades de movilidad y las restricciones que deban respetarse. El proyecto definitivo así escogido incluye estudios detallados de mecánica de suelos, análisis estructural, hidráulico, electromecánico y de seguridad, factores operativos como velocidad, mantenimiento y comodidad, y todos los detalles y especificaciones de proyecto necesarios para la construcción de cada tramo.

El trabajo no pretende abarcar, ni podría hacerlo, todos los aspectos que intervienen en la construcción de una línea de tren. Explica, define e ilustra los pasos fundamentales a seguirse para la realización de la obra civil de una línea de tren.

La presentación de la tesis está diseñada de modo que se pueda consultar indistintamente por cualquiera de sus capítulos, según los intereses y necesidades del usuario. Sin embargo, es recomendable leer el capítulo 1 -Obras Inducidas- antes de consultar los capítulos de las soluciones propuestas y después leer el capítulo 6 -Regeneración Urbana y Obras Complementarias- ya que ambos son complementarios al resto de la obra. Cada capítulo referente a un tipo de solución particular puede ser estudiado independientemente de los otros; cada uno describe los



procedimientos constructivos correspondientes a la obra civil de esa solución específica.

Por último, agradezco a todas aquellos amigos que colaboraron en la realización de este trabajo, y sin cuya participación esta obra no hubiera sido posible.

## I. OBRAS INDUCIDAS

## OBRAS INDUCIDAS

Obras Inducidas son el conjunto de actividades programadas para solucionar todas las interferencias que se presentan al realizar una obra determinada, como la construcción de un tren urbano.

Las obras inducidas se desarrollan en forma preliminar, paralela, o independiente a la obra, y su ejecución es necesaria para afectar lo menos posible las actividades personales, bienes, y en su caso, a los servicios alojados en el área de influencia de la obra.

No obstante, es factible elevar las condiciones urbanas en su área de influencia, por ejemplo: señalamientos, puentes peatonales, alumbrado, reacomodo de rutas de camiones, estaciones de transbordo, etc.

## 1.1 GENERALIDADES

El análisis preliminar de factibilidad física se lleva a cabo al mismo tiempo que se estudian y determinan los corredores en los que puedan alojarse las líneas del tren. Dicho análisis incluye el estudio de las interferencias de la línea en proyecto con redes de agua potable, alcantarillado y drenaje, electricidad, teléfonos, gas y ductos de petróleo. A la vez se hace una consideración de las restricciones que implican la amplitud y continuidad de calles, altura y tipos de las construcciones, usos del suelo, zonas arqueológicas, históricas y de patrimonio de la ciudad. También se toman en cuenta las alternativas de desvíos de tránsito durante las etapas constructivas y las afectaciones y las obras viales inducidas por la propia construcción de las líneas.(1)

Una vez que se tienen los datos relativos a posibles obras inducidas se revisan los anteproyectos de la ruta elegida. Se realiza una primera evaluación de los alcances económicos implicados y un análisis de los proyectos contemplados para efectuar las modificaciones pertinentes y poder determinar los tipos de línea que más se ajusten a las restricciones físicas y económicas.

La planeación de las obras inducidas se lleva a cabo en coordinación con las autoridades responsables del patrimonio o servicio afectado.

El procedimiento seguido para este fin es básicamente el siguiente:

- Una vez determinado el trazo definitivo del tren y de acuerdo con el programa constructivo, es posible localizar las interferencias, por lo que se procede a solicitar a las autoridades correspondientes la modificación más conveniente.
- Cada organismo, con base en el citado programa constructivo y en el generado por ellos mismos, emite en forma particular (interna) sus órdenes de trabajo para el retiro de las interferencias en cuestión.

Así, las obras inducidas comprenden las actividades correspondientes a:

- Adquisición de predios y rescates arqueológicos
- Drenajes y redes de agua
- Teléfonos de México, Compañía de Luz, semáforos, alumbrado público
- Instalaciones diversas
- Desvíos de tránsito
- Jardines y otros.

## 1.2 ADQUISICION DE PREDIOS Y RESCATES ARQUEOLOGICOS

La construcción de una línea de tren genera afectaciones ocasionadas por el trazo, por la ubicación de las estaciones, por los puestos de rectificación o por los estacionamientos. Los predios afectados pueden ser de propiedad pública, privada o ejidal, o bien el trazo y las obras pueden afectar alguna zona arqueológica.

Conocido el proyecto del tren se determinan las afectaciones que se ocasionan. Si éstas son justificadas plenamente, se realizan los levantamientos de los predios, y se marca en ellos la zona necesitada.

Los predios de propiedad pública pueden pertenecer a instituciones federales, como son la Comisión Federal de Electricidad, Ferrocarriles Nacionales de México, Instituto Mexicano del Seguro Social, etc. Se pueden efectuar convenios particulares o permutar los terrenos por otros predios federales.

Los predios federales son adquiridos a través de las delegaciones o municipios de la ciudad, mediante el siguiente procedimiento:(2)

- Se solicita la boleta predial y las escrituras del inmueble a su propietario con el fin de acreditar su posesión.
- Se solicita un avalúo a una comisión especial.

- Se trata de llegar con el propietario a un arreglo de compra-venta basado en el avalúo. Generalmente se paga del 50 al 70% a la firma del convenio y entrada al predio, y del 50 al 30% restante a la escrituración, para cubrir algún gravamen del mismo.

- Si el predio es ocupado como negocio o vivienda, el inquilino tiene derecho a gastos de indemnización por concepto de gastos de desalojo.

Para adquirir las propiedades ejidales se requiere presentar una solicitud de expropiación a la Secretaría de la Reforma Agraria. Se requiere también efectuar el pago de cosechas, terrenos y construcciones.

Los predios destinados al uso de las instalaciones del tren son regenerados en varios aspectos: muchos lugares donde las condiciones de vida son ínfimas y los servicios públicos deficientes, se transforman en zonas verdes, con suficientes vialidades y medios de transporte, y se mejora el nivel de servicios para la población.

En ocasiones existen obras arqueológicas localizadas sobre el trazo del tren. Las obras civiles del tren permiten detectar, identificar y rescatar señales y restos culturales de los antiguos pobladores.

Cuando se trata de una zona arqueológica al comenzarse los trabajos de trazo de alguna línea del tren, los equipos de arqueólogos fijan sitios para excavar pozos de exploración, los que se excavan basados en estudios de la zona realizados anteriormente. Su objetivo es descubrir

muestras y pruebas de sitios arqueológicos de diferentes extensiones e importancia.

En el caso de que efectivamente existan restos arqueológicos en el trazo de una línea será conveniente adelantar los rescates arqueológicos para disminuir su interferencia a la construcción de la obra. Se debe excavar el núcleo y efectuar los rescates de la información y material hallados antes de iniciar las obras civiles. De ser necesario y posible, se trasladarán las piezas y el material arqueológico a otros lugares para su estudio y relocalización.



### 1.3 DRENAJES Y REDES DE AGUA

La construcción del tren urbano en cualquiera de sus soluciones encuentra a su paso drenajes y redes de agua que forman parte de la infraestructura de la ciudad. Estas tuberías y redes de agua pueden ser de drenaje o agua potable, y la interferencia ocasionada puede ser longitudinal o transversal.

Las tuberías más grandes y más importantes de una red hidráulica generalmente son construidas bajo las calles y avenidas más importantes de la ciudad. Los camellones y vialidades que alojan la infraestructura de agua potable y drenajes coinciden en muchos casos con el trazo del tren, lo que hace necesaria la realización de obras inducidas.

Comúnmente, las grandes ciudades utilizan tuberías para agua potable en diámetros de 10, 15 y 30 cm para redes secundarias, y 50, 91 y 122 cm para redes principales. Para el drenaje se utilizan tuberías cuyos diámetros son 30, 38, y 45 cm para atarjeas; 60, 76 y 91 cm para subcolectores; y 107, 122, 152, 183, 213, 244 y 305 para colectores. (3)

Las profundidades típicas a las que estas tuberías se localizan se muestran en la siguiente tabla: (4)

Díámetro	Profundidad de la zanja	Díámetro	Profundidad de la zanja
cm	m	cm	m
hasta 20	1.20	91	1.90
25	1.25	107	2.25
30	1.30	122	2.40
38	1.40	152	2.70
45	1.45	183	2.90
60	1.60	213	3.00
76	1.75	244	3.25

Las profundidades mayores a 2.70 m pueden variar de acuerdo con estudios de Mecánica de Suelos.

Las obras inducidas para líneas de drenaje se efectúan procurando que las atarjeas se relocalicen siempre sobre la misma vialidad, con una o dos líneas de servicio, según el procedimiento constructivo. Ahora bien, si el espacio colindante con el tren es limitado, se pueden relocalizar los colectores en calles paralelas a las que ocupaban anteriormente y si la interferencia es transversal se utiliza la solución tipo "By-Pass", pero cuando esto no es posible se recurre entonces a sifones invertidos.

La red de agua potable se rectifica de manera similar al drenaje. Las líneas secundarias que interfieren longitudinalmente son colocadas nuevamente en la misma avenida, en uno o dos lados de la calle, a conveniencia del procedimiento constructivo de las obras principales. Las tuberías que conforman la red primaria pueden ser situadas en la misma vialidad, si hay espacio, o en calles paralelas. Las interferencias transversales son desviadas localmente, mediante desvíos puntuales de tipo "By-Pass", complementando la solución con el uso de galerías, sifones y otras estructuras.

Para cuantificar la tubería desviada por kilómetro de construcción del tren es posible determinar índices, los que se obtienen dividiendo la suma de longitudes de tubería desviada de agua potable -y en su caso drenaje- entre la longitud de la línea construida. Las unidades de los índices son Km/Km de construcción del tren.

#### 1.4 TELMEX, COMPAÑIA DE LUZ, SEMAFOROS, ALUMBRADO PUBLICO

Las interferencias que representan las líneas de Teléfonos de México para la construcción del tren deben ser solucionadas cuidadosamente, procurando no suspender su servicio en ningún momento. Tanto las líneas troncales, principales y secundarias, que en forma aérea o subterránea se localicen a lo largo del trazo de las líneas del tren, son desviadas por otras calles. Si esto no fuera posible deberán ser protegidas a base de dos medias cañas metálicas que aíslan los cables. O bien, se elevan las líneas con cables. También es posible hacer gasas para dejar libres las áreas de trabajo y permitir el paso del equipo de construcción. El desvío de las instalaciones telefónicas es delicado y laborioso, pues se tiene que unir par con par en forma manual, sin interrumpir el servicio, lo que lo hace también un trabajo lento y minucioso.

No obstante, lo más conveniente en estos casos es que el ingeniero involucrado en el proyecto del tren, tome las medidas apropiadas con toda oportunidad mediante una estrecha comunicación con Teléfonos de México.

Por otra parte, las instalaciones de Compañía de Luz y Fuerza se deben desviar sin suspender el suministro de energía eléctrica a los usuarios. Las líneas eléctricas y sus instalaciones son aéreas y subterráneas, de baja, alta y muy alta tensión. Los desvíos alternos

deben estar totalmente terminados antes de suspender el servicio. Los movimientos provisionales o reubicaciones definitivas deben hacerse en un tiempo mínimo y en algunos casos será necesario trabajar con el sistema energizado; es decir, con línea viva. La conexión de los desvíos se debe realizar en fines de semana para minimizar las molestias al público. Cuando la solución del tren es superficial o elevada, las líneas aéreas de electricidad se convierten en líneas subterráneas.

El traslado, movimiento y reubicación de semáforos se lleva a cabo con la coordinación del Departamento o Dirección de Policía y Tránsito local.

Las instalaciones de alumbrado público ubicadas sobre las líneas del tren deben ser retiradas temporalmente. En el transcurso de las obras se colocan lámparas provisionales para evitar que las avenidas y calles estén oscuras. Evidentemente, al reinstalar el alumbrado público se pretende mejorar el nivel de iluminación con menor consumo de electricidad.

### 1.5 INSTALACIONES DIVERSAS

Las instalaciones diversas encontradas a lo largo de las obras del tren agrupan a los diversos elementos que en menor importancia, cantidad o frecuencia, interfieren los trabajos constructivos de las líneas. Este grupo incluye las instalaciones de Petróleos Mexicanos, del Servicio de Transportes Eléctricos, de Ferrocarriles Nacionales de México, y redes de televisión privada, principalmente.

Las instalaciones de Petróleos Mexicanos se concentran generalmente en las zonas industriales de las ciudades. Los trabajos de afectación a las tuberías y equipos de PEMEX estriban en el desvío de las instalaciones a calles paralelas siempre que sea posible. Instalaciones incapaces de ser desviadas por su magnitud porque el hacerlo puede ser peligroso, deben quedar bien protegidas durante la construcción de la línea. Para esto se construyen estructuras metálicas especiales para colgar las tuberías, o se encamisá cada una con otra tubería dos diámetros mayores. La ejecución de los trabajos de desvío y protección de las instalaciones petroleras lo lleva a cabo personal especializado de PEMEX, debido al minucioso control radiográfico que exigen las soldaduras de tuberías de gasoductos y poliductos para evitar fugas.

Las instalaciones y rutas del Servicio de Transportes Eléctricos que existan en una población y que interfieran con las obras deben ser modificadas o desviadas. Los transportes eléctricos se refieren a

trolebuses y tranvías. Las obras de desvfo constan de la desenergización del sistema y retiro o reubicación de vías y postes.

Las obras inducidas que las vías de ferrocarril ocasionan se coordinan con Ferrocarriles Nacionales de México. Los trámites seguidos para tal efecto a grandes rasgos son los siguientes:(2)

- Presentar a las autoridades de Ferrocarriles Nacionales el proyecto estructural ejecutivo de las obras de cruce de las instalaciones ferroviarias. El proyecto incluirá las memorias descriptiva y de cálculo, así como los programas de obra correspondiente.

- Ferrocarriles Nacionales revisa el proyecto para determinar el comportamiento futuro de la estructura. Elabora el programa de las obras pertinentes correspondientes a las necesidades de tránsito de los ferrocarriles.

- Personal o empresas calificadas por Ferrocarriles Nacionales de México ejecutan los trabajos de tendido de vía, durmientes y balasto, las conexiones con las vías en servicio, y los puentes de los mismos.

Los cables de telégrafos de ferrocarriles que representen interferencias son seccionados en parte para solucionar el problema.

Las líneas de televisión privada que se encuentren se deben reubicar. Mas aun, se modifican en forma similar a la relocalización de los postes de la Compañía de Luz, ya que sobre éstos se encuentran dichos cables de televisión.

Por último, dentro de las instalaciones diversas que pueden llegar a encontrarse sobre el trazo del tren urbano están las del Instituto Mexicano del Seguro Social y de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Estas instalaciones se reubicarán de acuerdo con proyectos especiales para cada situación particular.



## 1.6 DESVIOS DE TRANSITO

Los desvíos de tránsito que se efectúen a causa de las obras del tren y como reprogramación y ampliación de vialidades importantes deben ser cuidadosamente analizados. Al quedar determinadas las áreas de trabajo y consecuentemente las calles y avenidas afectadas se procede a hacer una investigación detallada de las alternativas existentes. Tanto las vialidades en que se restringe o se interrumpe la circulación, como las alternativas, son objeto de minuciosos estudios de aforo y capacidad de vía. Las propuestas de desvíos peatonales son presentadas a las autoridades para su aprobación y revisión de la señalización pertinente. Las rutas propuestas son recorridas con el fin de identificar los trabajos de mejoramiento para la circulación de vehículos que sean necesarios. Estos trabajos incluyen reencarpetados, bacheos, recorte de banquetas o camellones, señalización adecuada, etc.

## 1.7 JARDINES

Las áreas verdes también son afectadas por los trabajos y las obras del tren urbano. En una época en que la Ecología tiene un papel relevante en el desarrollo de las grandes ciudades, el trato a las especies vegetales debe resolverse satisfactoriamente.

Siempre que sea posible los árboles y arbustos deben ser protegidos y conservados en su lugar, de lo contrario, se procura trasladar las plantas a lugares cercanos, los que serán designados por las autoridades competentes.

## II. SOLUCION SUPERFICIAL

## SOLUCION SUPERFICIAL

La solución superficial es la más económica desde el punto de vista constructivo.

La solución superficial está constituida por una losa de concreto reforzado de ocho metros de ancho y dos muretes laterales de contención. Se desplanta sobre terreno previamente mejorado, aproximadamente a 1.30 m de profundidad para compensar adecuadamente las cargas. (Fig.2.1)

Sin embargo, las líneas superficiales requieren de un derecho de vía amplio, no menor que 50 m. Aún cuando esta condición se cumpla, el tren superficial establece una barrera física para el tránsito, para los peatones y para el desarrollo urbano ya que divide las zonas aledañas al trazo. Su construcción requiere pasos a desnivel y rampas para disminuir el impacto que ocasiona.

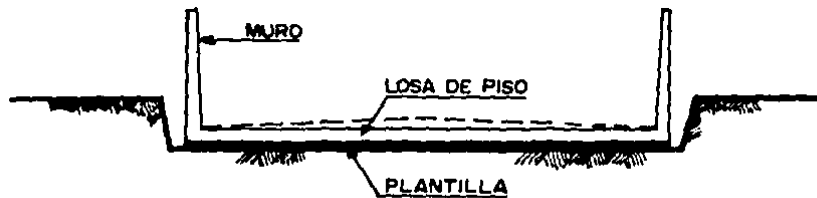


FIG. 2.1  
SOLUCION SUPERFICIAL.  
SECCION TIPICA

## 2.1 TRABAJOS PRELIMINARES

La solución superficial del tren urbano se debe trazar a lo largo de avenidas amplias, con derechos de vía que permitan al tren ocupar unos diez metros de ancho sobre ellas, y capaces a su vez de alojar la sección del tramo, transiciones y estaciones con sus accesos correspondientes.

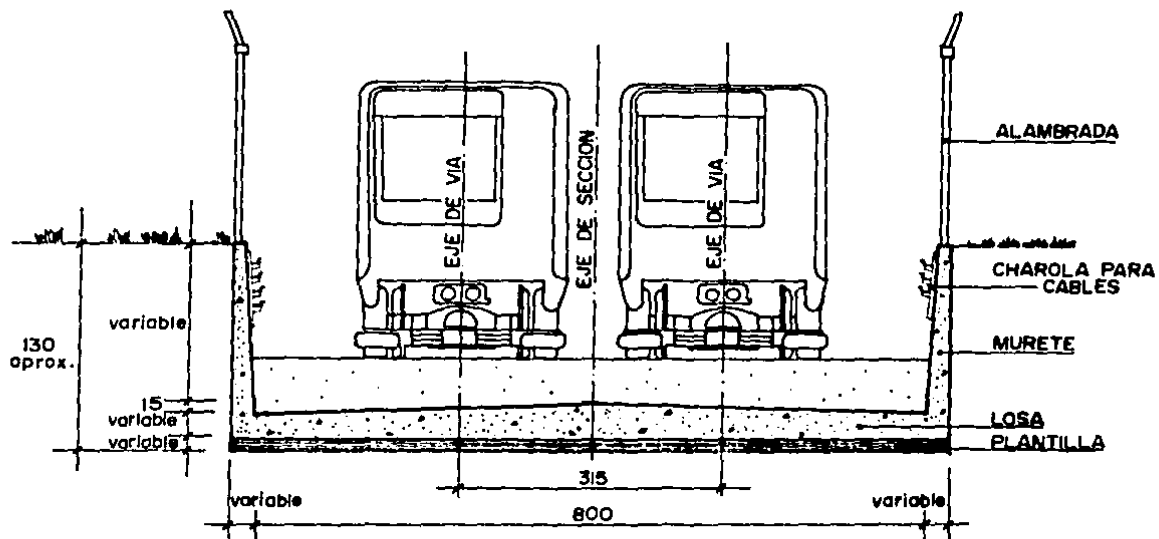
Estudios alternativos se deben realizar para esta solución a causa de la "frontera" generada y de las obras inducidas implicadas. También se deben efectuar análisis con respecto a la conservación y mantenimiento de las vías e instalaciones férreas y electromecánicas, expuestas permanentemente al intemperismo.

Para el proyecto geométrico de la línea en la solución superficial se analizan los gálibos estático y dinámico de los trenes en convoy, las instalaciones electromecánicas e hidráulicas sanitarias, los espacios para andadores, y el sistema de fijación de vía. En cuanto al trazo de la línea, los radios nominales de curvatura para operación normal y para el perfil se establecen en 200 metros, como mínimo. (2) (Fig.2.2)

La solución superficial del tren crea una barrera natural entre las zonas por donde se traza la línea, desarrollando así una "frontera" que hay que superar. Como resultado de la solución se construyen pasos de vehículos en las intersecciones importantes así como pasos peatonales para lograr el cruce seguro sobre las vías rápidas y sobre las vías del

tren, combinados a su vez con los pasos de acceso a las estaciones superficiales.

Antes de comenzar la construcción del tren se realizan estudios detallados de Ingeniería de Tránsito para decidir el número y la ubicación de puentes metálicos cuya función será desviar el tránsito transversal, así como para determinar el impacto que los trabajos tendrán sobre el tránsito local. Los puentes se colocan en diversos cruces de avenidas de acuerdo con el avance de las obras, y sirven como rampas para permitir el paso provisional sobre la estructura del tren superficial.



COTAS EN CMS.

FIG. 2.2

SECCION TIPO SUPERFICIAL



## 2.2 EXCAVACION

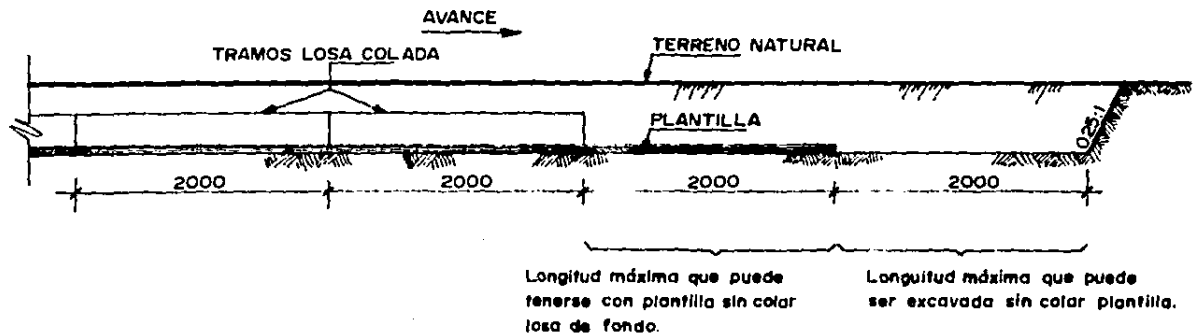
La excavación para alojar los elementos estructurales -losa de piso y muros- se desarrolla desde el nivel de terreno natural hasta alcanzar la profundidad de proyecto. La excavación es muy sencilla, a cielo abierto y a base de taludes cuya inclinación varía de 0.25:1 a 0.5:1 (horizontal a vertical).

La longitud de avance de las excavaciones es de veinte metros a lo largo del eje del trazo. Se cuela una plantilla en cada tramo antes de abrir el siguiente tramo. De este modo se previene que el terreno sea afectado por el intemperismo (lluvia, basura, etc), y se permite el ataque del frente por etapas. (Fig 2.3)

Al realizar las excavaciones se debe eliminar la materia vegetal en la zona. Acto seguido se procede a escarificar el fondo de la excavación en 20 cm y compactar ésta hasta lograr el 90% con respecto a la Norma AASHTO Estandar T-99-74. (5)

La excavación se hace frecuentemente sin presencia de agua y por lo tanto sin problemas de bombeo.

Si durante la excavación se presentan filtraciones, el agua se controla por medio de pequeños cárcamos. Estos se construyen sobre el eje longitudinal de la excavación, y se comunican entre sí por medio de zanjás rellenas de grava limpia. En los cárcamos se colocan bombas autocebantes para extraer el agua, procurando que el fondo de la excavación permanezca siempre estanco.



COTAS EN CMS.

FIG. 2.3  
SECUENCIA DE EXCAVACION

### 2.3 LOSA DE PISO

Una vez escarificado y compactado el material del fondo de la excavación se procede a colar una plantilla de 10 cm de espesor, constituida por concreto pobre de  $f'c=100$  Kg/cm<sup>2</sup> y un aditivo acelerante de fraguado; o bien, se coloca una plantilla de grava compactada con pisón de mano. (6)

La secuencia de excavación debe ser tal que jamás se tenga una zona abierta de más de 20 m sin colar la plantilla.

El tiempo entre el momento en que se termina la excavación y el inicio de colado de plantilla no debe ser mayor que 12 horas.

Dos horas después del colado de plantilla se llevan a cabo el armado, cimbrado y colado de las losas de piso, también en longitudes de 20 m. Hay que dejar las preparaciones necesarias en el armado de la losa para continuar con el armado y colado de los muros.

A partir del momento en que se alcance la máxima profundidad de excavación, se cuenta con 24 horas para efectuar el colado de la losa de piso.

La losa inferior o de piso tiene un peralte de unos 60 cm. En su armado intervienen dos parrillas y también se dejan armados para las barbas de los muretes. Para la cimbra sólo se requieren tapones en sus

extremos. El concreto utilizado tiene una resistencia f'c=150 Kg/cm<sup>2</sup>.

(6)

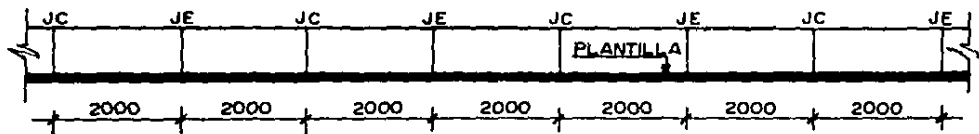
La losa de piso debe tener pendiente longitudinal y transversal para controlar el drenaje tanto transversal como longitudinal de la sección, por lo que las filtraciones son conducidas hacia los puntos bajos de la línea, en donde se captan en cárcamos para extraer el agua.

Si durante el colado de un tramo de losa llueve, o se teme que llueva, se coloca una lona de hule grueso encima de ésta, para evitar que la lluvia caiga sobre el colado y altere la relación agua-cemento.

Con el fin de proporcionar flexibilidad a la estructura superficial del tren, se colocan juntas de contracción y expansión. Las primeras se construyen a cada 40 m y entre ellas se alojan las juntas de expansión. En otras palabras, la ubicación de las juntas de expansión y de contracción, será a cada 20 metros. (Fig.2.4)

En cuanto a las juntas de expansión, constan de una barra de refuerzo que desliza dentro de un casquillo y de un material compresible colocado entre los tramos de losa.

La barra de refuerzo se ahoga en la losa, aproximadamente a la mitad del espesor de ésta, y en una longitud de 30 cm. La barra mide el doble de la distancia ahogada, por lo que la otra mitad no queda ahogada. En la losa adyacente se coloca un casquillo metálico, a la misma profundidad que la barra, y con una longitud suficiente para que la barra quepa dentro. La barra se recubre con grasa en su mitad



JC = JUNTA DE CONTRACCION

JE = JUNTA DE EXPANSION

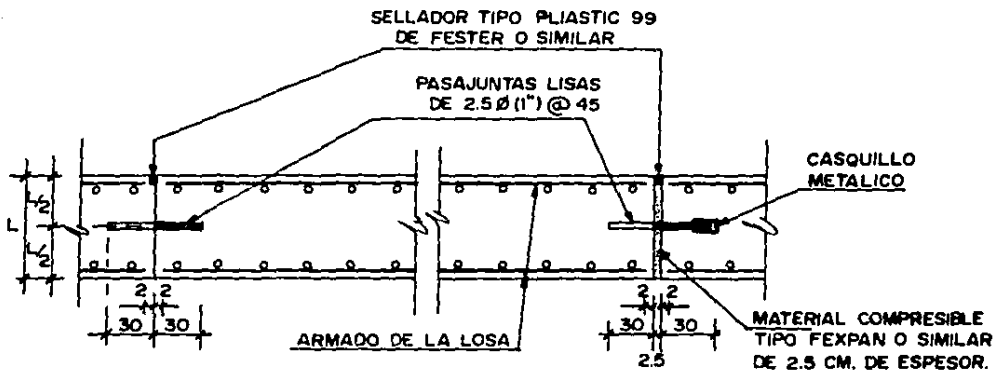
COTAS EN CMS.


FIG. 2.4  
UBICACION DE LAS JUNTAS DE CONTRACCION Y EXPANSION

correspondiente al casquillo, para evitar que se adhiera al concreto. (Fig.2.5)

El material compresible que se coloca entre los tramos de losa puede ser del tipo Fexpan de 2.5 cm de espesor o alguno similar.(4) Se coloca desde la plantilla hasta 3 cm por debajo del lecho superior de la losa. Estos 3 cm correspondientes a la porción superior de la ranura se rellenan con sellador para juntas de expansión horizontal del tipo Pliastic 99, Parlactic, o algún producto similar. (5)

Las juntas de contracción cuentan con la barra de refuerzo y el casquillo, pero sin colocar el material compresible entre todo el peralte de los tramos de la losa; es decir, "en frío". Sin embargo, en la parte superior de las losas se deja una ranura de 2 cm de ancho y 2.5 cm de profundidad, que finalmente se rellena con algún sellador de los ya mencionados.



 ESTA ZONA DE LA PASAJUNTAS SE DEBERA LUBRICAR CON GRASA.

JUNTA DE CONTRACCION

JUNTA DE EXPANSION

COTAS EN CMS.

FIG. 2.5



## 2.4 MUROS

Una vez transcurridas 24 horas del colado de la losa de piso, se puede iniciar el armado y colado de los muros, y no deberán pasar más de ocho días sin efectuar dichas actividades.

Para el diseño de los muros laterales, se toma en consideración el empuje de tierras, el cual depende de la profundidad de desplante de la estructura del tren.

Los muros son pequeños, de sección trapecial y se construyen con concreto de  $f'c = 150 \text{ Kg/cm}^2$ . (6)

Cuando los muros alcanzan un 85% de su máxima resistencia de proyecto, se podrá iniciar el proceso de relleno en los respaldos de los muros, el que se hace con material producto de la excavación, exento de partículas mayores que 15 cm, colocándose en capas de 30cm de espesor suelto y compactadas con pisón de mano o con máquina compactadora, de modo que alcance el 90% de la norma AASHTO Esnd T-99-74.

Al mismo tiempo, podrá iniciarse la colocación de una capa de balasto de 25 cm de espesor mínimo.

## 2.5 PROTECCION

Con el objeto de proporcionar al tren y a su estructura protección contra daños causados por impactos de vehículos, se construyen muros deflectores laterales a los muretes estructurales. Jardíneras con plantas, flores y enredaderas se siembran en el espacio entre ambos. Un doble propósito queda satisfecho: el de protección al tren urbano y el de embellecimiento de la vialidad por la que corre éste.

### III. SOLUCION SUBTERRANEA EN CAJON

## SOLUCION SUBTERRANEA EN CAJON

La solución subterránea en cajón consiste en una estructura rectangular de concreto armado que se construye a cielo abierto y se desplanta a la menor profundidad posible. Consiste básicamente en la erección de dos muros de contención de tierras paralelos, separados por la holgura del cajón. La excavación del núcleo (sección que aloja al cajón) se realiza por secciones y se va apuntalando hasta llegar al nivel de proyecto. En el fondo de la excavación se cuele una losa y si el proyecto lo indica se construyen muros estructurales. El cajón se cierra con una losa de techo y finalmente se restituye el pavimento o el acabado final de la superficie. (Fig.3.1)

La solución subterránea en cajón no afecta el paisaje urbano, ni necesita pasos a desnivel para permitir la continuidad del tráfico. Sin embargo, provoca un gran número de obras inducidas, requiere sistemas especiales de ventilación y afecta a la población vecina durante su construcción.

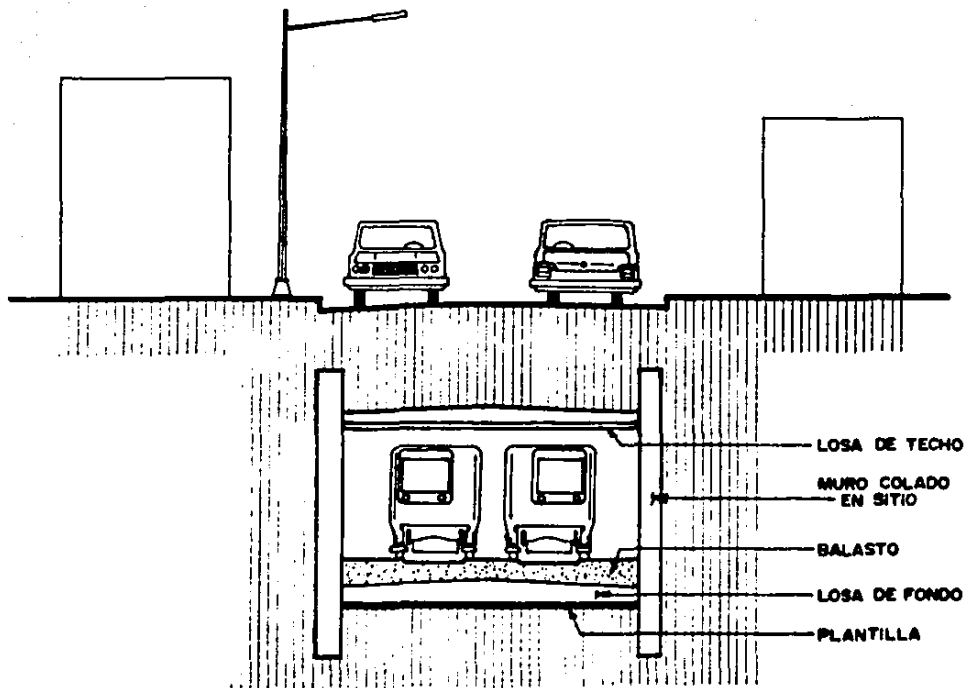


FIG. 3.1

SOLUCION SUBTERRANEA EN CAJON

### 3.1 TRABAJOS PRELIMINARES

Existen dos tipos de soluciones en cajón: cajón con muros tablaestaca y muros de acompañamiento y cajón con muros tablaestaca estructurales. Para la elección del tipo de cajón se toma en cuenta el peso volumétrico del suelo, su contenido de agua y sus propiedades mecánicas, procurando de este modo dejar sobrecompensado el terreno en aproximadamente 1.5 Ton/m<sup>2</sup> para garantizar la estabilidad del cajón.

Antes de definir el trazo definitivo del tren se hacen sondeos de exploración para determinar el perfil estratigráfico y las propiedades del subsuelo. De los sondeos se obtienen muestras inalteradas y muestras alteradas.

Las muestras inalteradas conservan la densidad y humedad natural del suelo y proporcionan datos muy confiables y cercanos a la realidad. Las muestras alteradas permiten correlacionar las características del subsuelo entre los sondeos de las otras. (7)

Por otro lado, es evidente que la sección transversal típica del cajón debe cumplir los requisitos mínimos de espacio para el tránsito del convoy del tren.

A modo de que la exposición resulte más clara, a continuación se mencionan las cotas vigentes más importantes: (2) (Fig.3.2)

En el sentido horizontal la distancia es de 6.90 m, cumpliendo con las siguientes medidas:

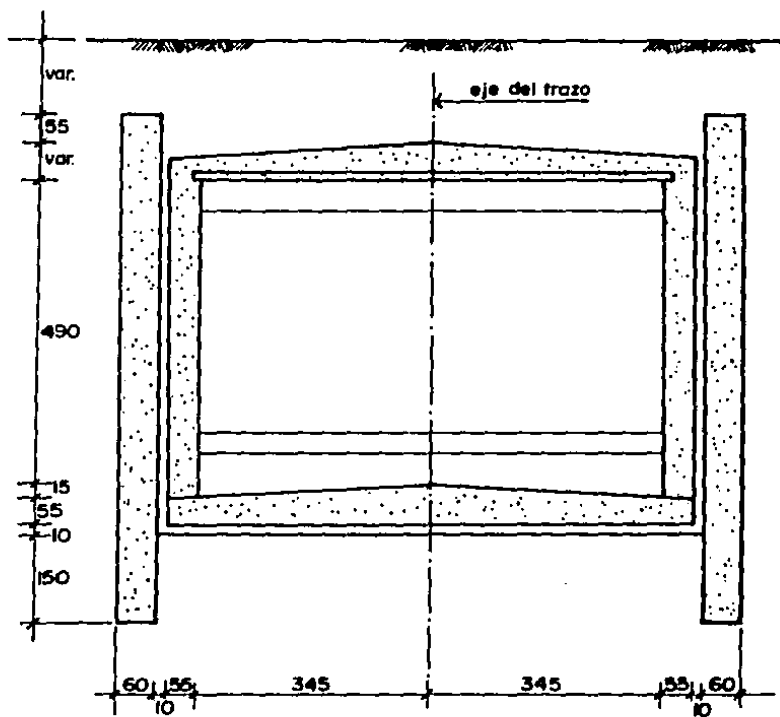
1.- Dos espacios de 2.50 m para cada vagón .....	2 x 2.50 = 5.00
2.- Un espaciamiento entre vagones de 0.40 m .....	0.40
3.- Dos andadores laterales de 0.75 m .....	2 x 0.75 = <u>1.50</u>
	6.90

En el sentido vertical el gálibo es de 4.90 m, de acuerdo con:

1.- Una capa de balasto de 0.50 m de espesor .....	0.50
2.- Pista de rodamiento y durmientes de 0.31 m de peralte .....	0.31
3.- Altura del vagón de 3.60 m .....	3.60
4.- Claro sobre el techo del vagón de 0.49 m .....	<u>0.49</u>
	4.90

En cuanto al trazo geométrico, éstas deben satisfacer las siguientes condiciones:

Los tramos en tangente y en curva se trazan con radios nominales de curvatura mayores a 500 metros. En curvas de radio menor o igual a 500 m, la distancia horizontal se incrementa 50 cm (espacio de 7.40 m) hacia el lado externo de la curva y el gálibo se incrementa 15 a 25 cm (gálibo de 5.05 a 5.15 m). (2)



COTAS EN CMS.

FIG. 3. 2

SECCION TIPICA DEL CAJON EN TRAMOS RECTOS.



### 3.2 BROCALES

El proceso constructivo de la solución en cajón comienza con la construcción de los brocales, que son piezas de concreto armado en forma de "L" invertida colados en sitio. Su función es retener los rellenos sueltos de la superficie y servir como guías a las herramientas de excavación para los muros colados del cajón. Por este motivo es necesario dejar un claro de 65 cm para muros de 60 cm de espesor y de 85 cm para muros de 80 cm. El alineamiento de las zanjas debe ajustarse al trazo. (Fig.3.3)

Para construir los brocales se excavan primero las zanjas que alojarán a los muros tablaestaca. La profundidad de estas zanjas, cavadas a mano o con herramienta manual, varía con el espesor de los rellenos, procurando no excavar menos de 1.50 m ni más que la profundidad del nivel freático.

La profundidad del faldón del brocal se determina de tal manera que exista un traslape mínimo de 30 cm con los muros tablaestaca.

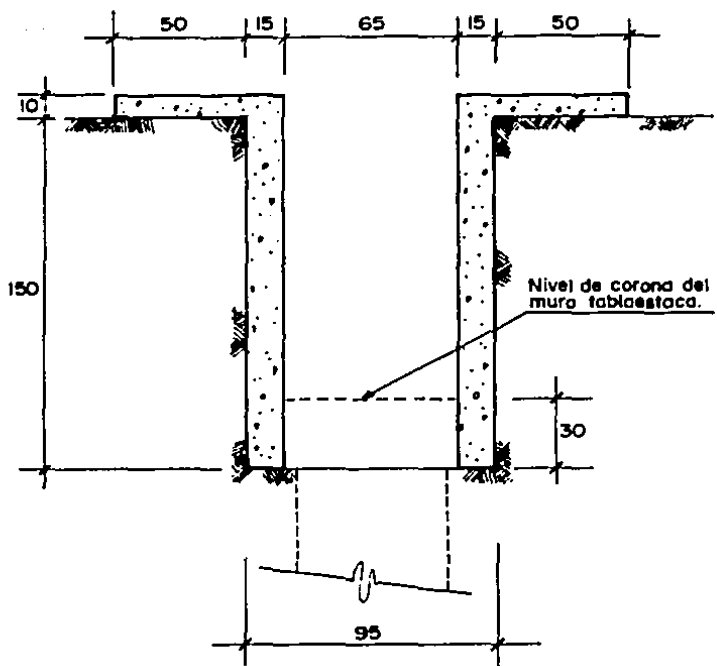
La cimbra para colar los faldones o ramas verticales del brocal se coloca frente a frente; la cimbra de un lado se apoya contra la del otro por medio de puntales para evitar irregularidades y abolsamientos.

Las ramas horizontales trabajan como losas sobre las que se pueden maniobrar las máquinas excavadoras. Para garantizar que el brocal no

sufra volteos, las ramas horizontales deben contar con un ancho mínimo de 50 cm y troquelarse.

Después de colar estas ramas se debe retirar la basura y los obstáculos importantes dentro de las zanjas. A continuación se colocan compuertas de acero o de madera en el brocal, y de este modo quedan aislados tramos de zanja guía para la construcción de los tableros, cuya longitud determina la distancia entre las compuertas.

Los tramos aislados por las compuertas se llenan con lodo bentonítico hasta alcanzar un nivel de 80 cm por debajo del borde superior del brocal. Este lodo se mantiene en el mismo nivel durante las excavaciones y colados posteriores.



COTAS EN CMS.

FIG. 3.3  
 PROFUNDIDAD DEL FALDON DEL BROCAL.

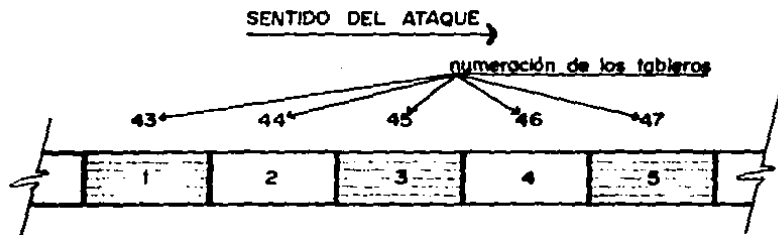
### 3.3 MUROS PANTALLA

Terminados los brocales, se procede a construir los muros pantalla o tablaestaca, que son muros -provisionales o fijos- de contención de tierras durante una excavación. Comúnmente sirven para estabilizar mecánicamente laderas y taludes. Los muros que realizan lo primero en la construcción del tren se conocen como Muros Milán.

La excavación de las zanjas para los muros se realiza con equipo de herramienta de corte guiada. Es importante mantener la verticalidad, alineamiento e integridad en las paredes de la zanja y tratar que la maquinaria alcance sin dificultad la profundidad media de proyecto para el muro.

Para evitar los caídos del material durante la excavación se cuida que el equipo de excavación se deslice con suavidad sin golpes ni chicoteos; y se hincan sin dejar que caiga libremente o choque con el lodo bentonítico.

Las zanjas se excavan en forma alternada; esto es: no se deben excavar tableros contiguos simultáneamente. La excavación de un tablero no deberá comenzarse si el tablero contiguo no ha sido colado y han transcurrido al menos 12 horas para que el concreto alcance su resistencia inicial. (Fig.3.4)



NUM. DE ORDEN DEL PROCESO DE CONSTRUCCION

- 1- Tablero excavado y colado
- 2- Tablero excavado sin colar
- 3- Tablero en proceso de excavación
- 4- Tablero sin excavar
- 5- Tablero sin excavar

FIG. 3.4

Las zanjas para los muros Milán del cajón tienen una longitud promedio de 6.00 metros, y su profundidad varía de acuerdo con el nivel de proyecto mas 20 cm debido a que la herramienta de excavación de la zanja es curva.

El tiempo que transcurre entre la terminación de la excavación de la zanja y el inicio de los colados de cada tablero no deberá ser mayor que 24 horas.

Terminada la excavación de la zanja se verifica su profundidad y las propiedades del lodo. En seguida se introducen las juntas metálicas y la parrilla de refuerzo.

Las juntas son tubos de metal de forma trapecial, que en una de sus caras tienen forma de macho y están ranuradas para sujetar una banda de PVC integrada. Parte de esta banda queda ahogada al colar el concreto y la restante queda libre en el interior de la junta para quedar ahogada en el colado del muro adyacente.

La parrilla de refuerzo, contraventeada y rigidizada, se introduce una vez instaladas las juntas, y se hace descender por peso propio mediante una grúa asegurándose así la verticalidad, el alineamiento y la profundidad de penetración. La parrilla se empuja hacia abajo para evitar la tendencia a la flotación y una vez que queda colocada en su lugar se instalan dos gatos en la superficie apoyados contra el brocal, que impiden su movimiento durante el colado.

En la parrilla de refuerzo se dejan libres varios huecos para introducir las trompas de colado, que sirven para colar el concreto sin que éste caiga bruscamente con la consiguiente segregación de materiales. Cada trompa está compuesta por tramos de dos metros de largo y 30 cm de diámetro, y entre su extremo inferior y el fondo de la excavación se mantendrá una distancia de 30 cm. Los coples de unión entre estos tramos se deben hermetizar completamente para evitar que la succión de la columna de concreto chupe aire o lodo del exterior cuando baje. (Fig.3.5)

Es recomendable colocar un embudo en el extremo superficial de cada trompa para vaciar el concreto directamente de las ollas revolvedoras.

Ahora bien, en el tramo superior de la trompa se coloca una cámara de hule que trabaja como tapón para impedir la entrada de lodo y que al mismo tiempo irá descendiendo en su interior debido al peso del concreto, hasta ser botada. En este momento se iniciará un flujo suave y la descarga de concreto será sin mucha energía y sin la consiguiente contaminación con el lodo.

El concreto debe ser fluido y tener un revenimiento de  $18 \pm 2$  cm para que penetre y se distribuya uniformemente por todo el tablero sin necesidad de vibrado. La trompa de colado no debe quedar ahogada menos de 1.5 metros en el concreto que se cuele. (8)

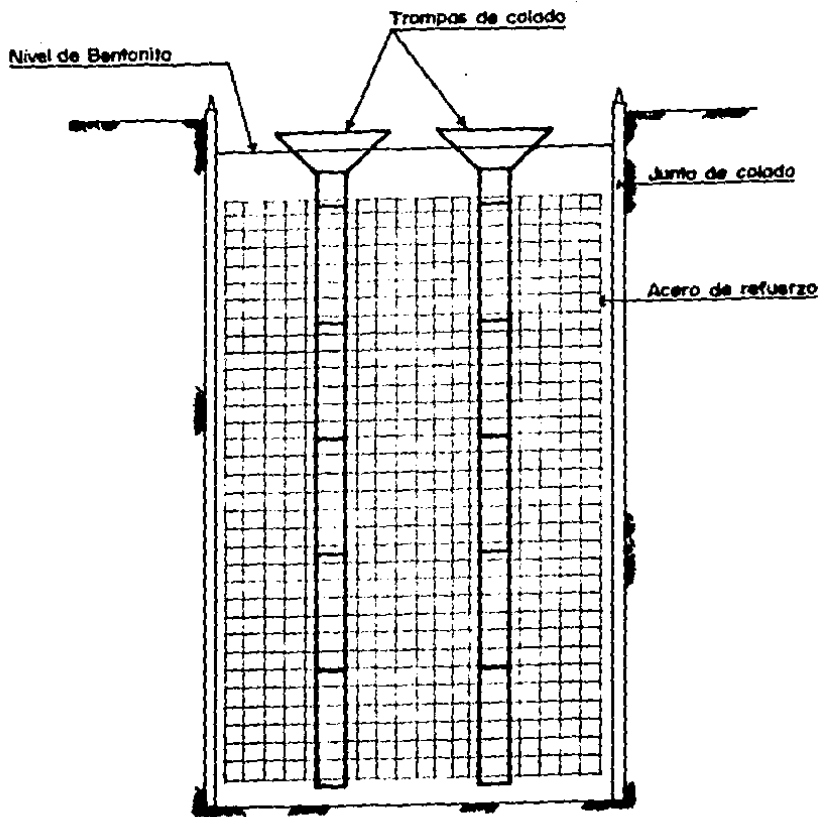


FIG. 3.5  
PREPARACION DE UN TABLERO PARA  
COLARSE.



La trompa se chicotea verticalmente con un malacate para ayudar a fluir al concreto pero hay que vigilar que no haya contaminación y que permanezca suficientemente ahogada.

El plazo para introducir la parrilla de refuerzo en la zanja e iniciar el colado de los muros es de cuatro horas. Periodos mayores favorecen la formación del "cake", que es una membrana de lodo, impermeable y resistente, que reduce la adherencia concreto-acero. Por este motivo el colado debe iniciarse inmediatamente después de introducir la parrilla de refuerzo.

Sin embargo, es muy importante verificar durante el colado los volúmenes de concreto inyectado y lodo desplazado y compararlos con los volúmenes calculados para la geometría del tablero. Diferencias notables indican posibles fugas o que hay mezclas del lodo con el concreto.

### 3.4 EXCAVACION DEL NUCLEO

Cuando los muros pantalla adquieren su resistencia de proyecto, 14 días posteriores al colado para cemento tipo III, ó 28 días para cemento tipo I, y sólo si se han colado por pares en una longitud no menor de 30 metros, se pueden iniciar las excavaciones del núcleo.

Dichas excavaciones alojarán al cajón y se realizan a cielo abierto y por etapas, entre la estructura formada por los muros tablaestaca.

#### ABATIMIENTO DEL NIVEL FREÁTICO

Antes de empezar las excavaciones es necesario abatir el nivel freático. Para ello se instalan pozos de bombeo sobre el eje del trazo, con una separación recomendable de diez metros. Los pozos se perforan más allá de la profundidad máxima de excavación, dependiendo de la permeabilidad del suelo.

Normalmente, los ademes de los pozos son tubos de fierro de 10 cm (4") de diámetro, ranurados en toda su longitud excepto 1.50 m en ambos extremos. La extracción del agua en su interior se lleva a cabo con bombas de pozo profundo del tipo eyector de 1" x 1 1/4" operadas a una presión de 5 Kg/cm<sup>2</sup>. (9)

El bombeo debe comenzar unos días antes de principiar la excavación. La longitud de los tramos bombeados varía de 20 a 30 m, medida a partir del frente donde se esté construyendo la losa de piso.

El bombeo se suspende después de colar la losa de piso correspondiente a cada pozo.

En caso de que se presenten filtraciones o escurrimientos pluviales durante la excavación en cualquier etapa, éstas se deben controlar con zanjas de 30 x 30 cm, alojadas en ambas orillas de la excavación. Las zanjas se rellenan con grava limpia y se conectan con los cárcamos de bombeo, de donde se extrae el agua por medio de bombas autocebantes.

#### EXCAVACION Y APUNTALAMIENTO

La experiencia recomienda que la excavación, colocación de puntales y colado de la estructura del cajón se haga por etapas. No obstante, el avance máximo de las excavaciones dependerá de las condiciones del suelo y la profundidad de proyecto que se necesite alcanzar. La excavación del núcleo se hace en general en tres niveles y en una longitud no mayor que 15 metros.

En lo que sigue se describen las etapas críticas que corresponden a los trabajos de excavación. Se inician desde el nivel de terreno natural hasta unos 30 cm por debajo de la elevación correspondiente al primer nivel de puntales.

Los puntales se deben colocar por pares separados un metro, centro a centro, en sentido horizontal, con el fin de que queden colocados simétricamente con respecto a la junta de construcción de los muros tablaestaca. (Fig.3.6)

Una vez instalados, se sujetan de sus extremos con cables de acero, los cuales cuelgan de las varillas de los muros. Su longitud será la necesaria para sostener los puntales y evitar su desplazamiento vertical.

Los puntales se deben apoyar sobre concreto sano. Cuando se encuentre concreto contaminado en los niveles de apuntalamiento se reconstruirá la zona para poder garantizar la continuidad estructural.

Bajo ninguna circunstancia se deben proseguir las excavaciones si los puntales no han sido colocados en sus elevaciones correspondientes.

Colocado el primer nivel de puntales se continúa con la excavación hasta alcanzar la elevación para colocar los correspondientes al siguiente nivel. El proceso se repite hasta alcanzar la profundidad de proyecto.

El número y la elevación de los niveles de puntales se especifica para cada tramo de la construcción, ya que es función de las características del suelo y de la profundidad de proyecto. El tiempo máximo para efectuar la excavación y la instalación de los puntales en cada etapa, así como la precarga de cada uno, depende del empuje a que estén sujetos los muros tablaestaca. La presión de carga es de

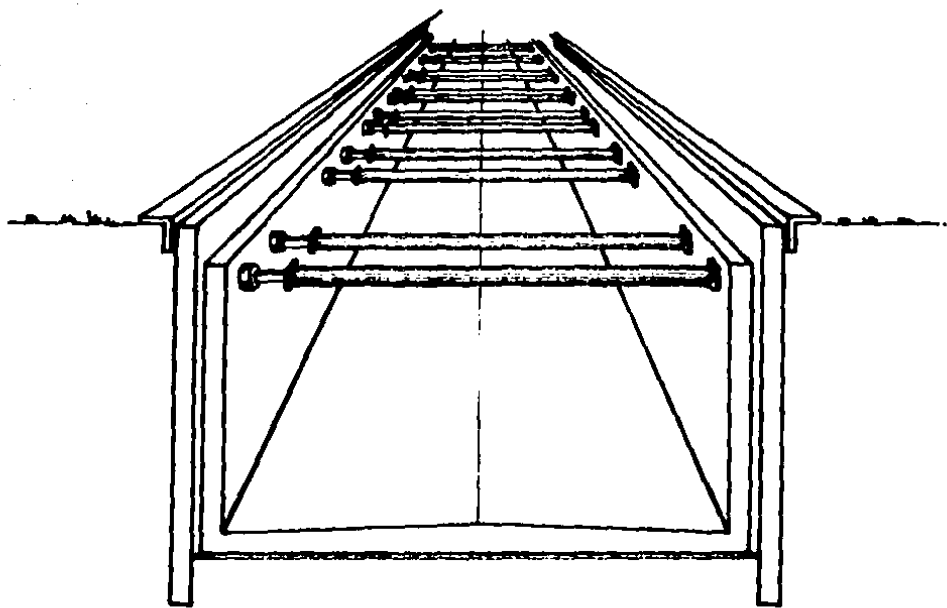


FIG. 3.6  
SOLUCION SUBTERRANEA EN CAJON.  
ATROQUELAMIENTO.

aproximadamente 30 Ton, aplicada en los extremos del puntal mediante gatos hidráulicos.

De no haberse alcanzado la profundidad de proyecto no es conveniente interrumpir las excavaciones. Si por alguna razón se tienen que suspender, como en fines de semana o días festivos, la profundidad en la que se suspenda no deberá exceder el 50% de la profundidad de proyecto, ó 3.0 m sobre dicho nivel.

Las excavaciones deberán acatar siempre taludes de corte en el frente de ataque. Los taludes varían con las condiciones del suelo, pero comúnmente son del orden de 1:1 ó 0.75:1 (horizontal:vertical). (10) La estabilidad del talud se asegura con una o dos bermas que impiden su falla. La superficie de los taludes cabeceros se protege con mortero de cemento-arena reforzado con malla de tela de gallinero.

### 3.5 LOSA INFERIOR

Al alcanzar el núcleo la máxima profundidad de proyecto se cuela una plantilla de concreto pobre de 10 cm de espesor, con aditivo acelerante de fraguado o se coloca una plantilla de grava compactada con pisón de mano, también de unos 10 cm de espesor.

Si la plantilla se coloca de grava es conveniente proteger los 3 cm superiores de ésta con un mortero cuando exista exceso de agua en el fondo de la excavación.

Cuando la plantilla es de concreto pobre, el colado debe efectuarse en un tiempo máximo de cuatro horas.

La función de la losa inferior es lastrar y trabajar estructuralmente como parte del cajón, ya sea anclándose al muro tablaestaca o al muro estructural de acompañamiento.

El armado, cimbrado y colado de la losa inferior se hará unas dos horas después de colar la plantilla en el caso de que ésta sea de concreto pobre. Si es de grava, el armado, cimbrado y colado de la losa inferior se hará inmediatamente.

Ninguna excavación puede permanecer abierta más de 24 horas sin colar la losa inferior correspondiente. Antes de los fines de semana o días festivos no laborables, la losa de fondo deberá quedar colada o la excavación deberá suspenderse 3.0 m sobre su máxima profundidad. (7)

Al armar y colar la losa de fondo se deben dejar las preparaciones necesarias para efectuar posteriormente la liga con los muros estructurales cuando el proyecto determine su construcción.

Con el fin de proporcionar lastre al cajón y para poder soportar el peso de los trenes, el espesor de la losa inferior es de unos 60 cm.

Los niveles inferiores de puntales se pueden empezar a retirar 24 horas después de haber colado la losa de piso.

El sistema de bombeo se desconecta conforme se cueban las losas, y consecuentemente se restituyen los niveles freáticos originales. Para asegurar el desalojo de filtraciones de agua en el cajón se colocan cárcamos de bombeo definitivos. Estos se colocan a una distancia aproximada de 400 m y hacia ellos fluirán todas las filtraciones a través de drenes longitudinales.

Aparentemente, la estructura del cajón no es flexible, sin embargo, la relación de longitud a peralte es elevada y permite absorber los movimientos diferenciales sin necesidad de juntas. Sólo se dejan juntas en los cambios de sección y en la unión con las estaciones. Por efecto sísmico, se colocan juntas en los tramos localizados sobre la zona de transición de terreno compresible a terreno firme. (6)



### 3.6 MUROS ESTRUCTURALES

El siguiente paso en la construcción del cajón es el levantamiento de muros estructurales cuando el proyecto lo determine.

La estructura de cajón utiliza dos variantes: cajón con muros tablaestaca y muros estructurales de acompañamiento y cajón con muros tablaestaca estructurales. La elección de una u otra solución depende de las propiedades mecánicas del suelo, como son peso volumétrico y contenido de agua, procurando dejar sobrecompensado el terreno en 1.5 Ton/m<sup>2</sup>, aproximadamente.

En las secciones del cajón que lleven muro sencillo, es decir, que no se necesite la presencia de muros estructurales de acompañamiento, se procede a colocar las losetas preesforzadas y al armado y colado de la losa del techo.

El nivel superior de puntales se puede retirar 24 horas después de colar la losa del techo en la sección que lleve muro sencillo. Previamente se deben haber retirado los niveles inferiores de troqueles.

Obviamente, en las secciones del cajón que lleven muros de acompañamiento el procedimiento es distinto. Primero se retira el nivel inferior de puntales 24 horas después de colada la losa de piso. Inmediatamente se comienzan los trabajos de armado, cimbrado y colado de los muros estructurales, dejando cajas sin construir en los lugares en

donde esten apoyados los troqueles, para efectuar su retiro después. Para el armado se toma como base la continuación del armado del lecho bajo de la losa inferior.

El armado y colado de los muros debe efectuarse en un período que no exceda 36 horas. Los muros se cueban por parejas, uno frente a otro. En el armado de los muros deberán dejarse las preparaciones necesarias para ligarse con el armado de la losa superior.

Los muros estructurales tienen un espesor de 0.55 m y están separados 0.10 m de los muros Milán. Este espacio, que se cueba junto con el muro estructural, se deja para asegurar los espesores requeridos ya que en el muro Milán existen protuberancias e imperfecciones, y se rellena para darle continuidad a los muros estructurales y tablaestaca.

El ancho de los muros estructurales queda determinado con el tamaño de la cimbra, que generalmente tiene un ancho de 5.25 m y una altura de 5.00 m. La cimbra está compuesta por hojas de triplay de 1 1/2" de espesor, unidas entre sí por perfiles tubulares de acero. Los perfiles forman una pequeña armadura en forma piramidal, proporcionando así a la cimbra rigidez absoluta. (9)

La altura de cada muro es la que señale el proyecto respectivo.

Antes de colar una sección de muro, se verifica el armado y amarrado del acero, y se pica la junta del muro anterior, de modo que presente una superficie áspera en la unión muro con muro.

Colocada la cimbra se colocan las trompas o tubos de colado y se empieza a vaciar el concreto en forma lenta para evitar segregaciones de los agregados.

Los huecos que quedan en el muro a causa de puntales retirados después del colado se rellenan de concreto con aditivo estabilizador de volumen.

El terminado del muro en la parte superior no se pule, pero se cuida que esté perfectamente nivelado.

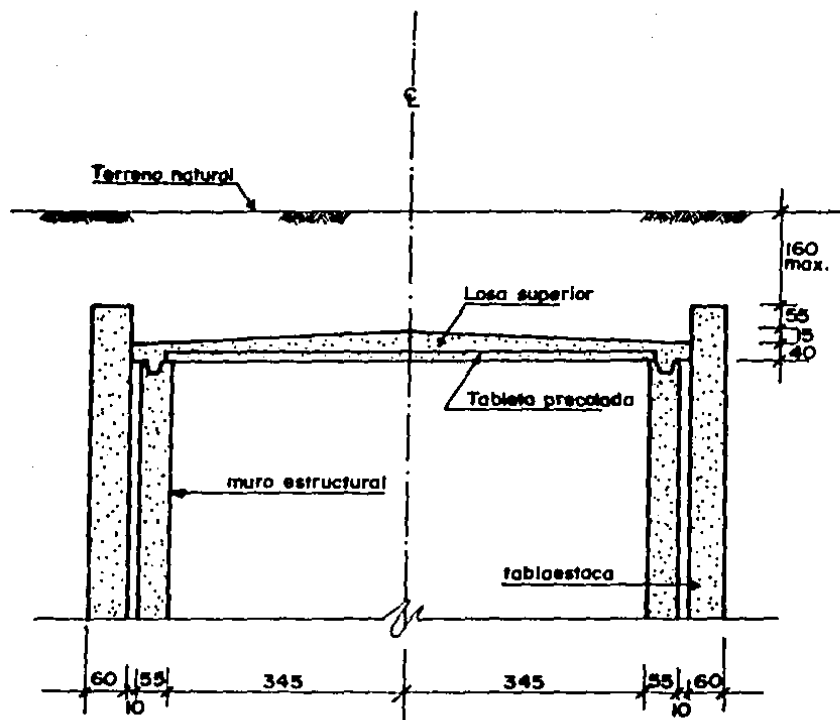
### 3.7 LOSA SUPERIOR

Para cerrar el cajón se utiliza una losa superior, construida a base de tabletas precoladas y/o de una losa de concreto armado y colado en el lugar. Las tabletas precoladas son losetas preesforzadas. La losa está diseñada para soportar las cargas estáticas -rellenos- y las dinámicas que provienen de la superficie del terreno donde circulan los vehículos. (Fig.3.7 y Fig.3.8)

La necesidad de aprovechar un procedimiento constructivo rápido, con un bajo costo y que cubra gran volumen de obra, justifica el empleo de piezas prefabricadas. Para cubrir la estructura de cajón se utiliza una placa maciza, de 7 a 8 metros de largo, de 40 x 94 cm de espesor aproximado, armada con torones.

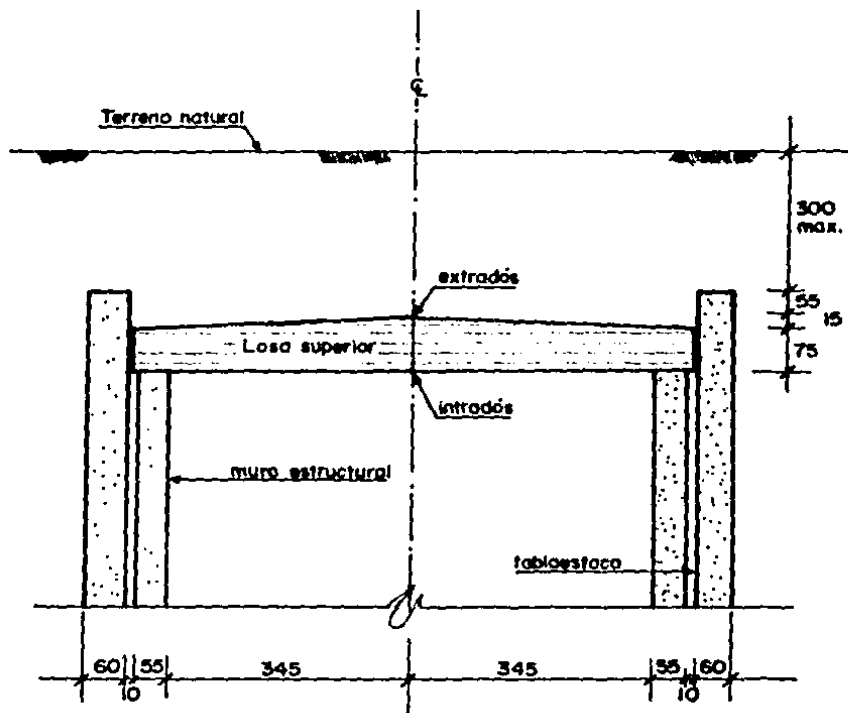
Las tabletas se fabrican con concreto de  $f_c 400 \text{ Kg/cm}^2$ , y acero de preesfuerzo de 2 mm de diámetro con  $F_s 22,000 \text{ Kg/cm}^2$ . Se fabrican con moldes metálicos con un alto grado de estandarización para lograr ciclos completos de fabricación en 18 horas. (11)

Las ventajas que presenta el uso de elementos prefabricados para la losa de techo son principalmente el ahorro de cimbra y la considerable reducción en el tiempo de ejecución de la misma. Asimismo, el uso de las tabletas trae consigo grandes progresos en cuanto a colocación, limpieza, economía y seguridad.



COTAS EN CMS.

FIG. 3.7  
 LOSA SUPERIOR EN CAJON NORMAL.



COTAS EN CMS.

FIG. 3.8  
LOSA SUPERIOR COLADA EN SITIO.

Las losetas preesforzadas se pueden empezar a colocar poco tiempo después de colar los muros de acompañamiento y se colocan sobre el bordo libre de los muros, habiendo previsto que la superficie de unión entre ambos esté limpia de basura y restos de madera. En esta unión se coloca un mortero pobre de proporción 1:3. Posteriormente se arma y se cuele la losa de techo.

Las uniones de loseta con loseta se calafatean, esto es, se aplica una mezcla de mortero pobre de proporción 1:1.

Una vez colocadas las losetas, se habilita un emparrillado sobre éstas, lo que da continuidad y rigidez a la losa.

Después del armado se colocan los tapones de cimbra, y se hace una limpieza somera del área por colar. Se colocan trompas y canalones, y finalmente se vacía el concreto del firme de compresión.

La continuidad en el techo del cajón se rompe con la presencia de rejillas de ventilación. Su función es desalojar el aire caliente y captar aire fresco de la superficie a través del funcionamiento del convoy, que actúa como un pistón generador de estos cambios de temperatura. Las rejillas de ventilación también se pueden localizar a un costado del techo, pero esto resulta menos conveniente.

También en ocasiones sobre el techo del cajón se dejan las alcancías, que son huecos de 20 x 4 metros, destacadas a cada 300 metros. Durante la operación del servicio pueden ser habilitadas como rejillas de ventilación, pero durante la etapa constructiva su objetivo

principal es introducir al cajón los materiales para la obra electromecánica, como son tramos de vía, durmientes, tubería, etc.

Una vez que el concreto del firme de compresión de la losa superior alcanza resistencia se retiran los troqueles existentes. Hecho esto se coloca el material de relleno.

En algunas circunstancias se busca minimizar el tiempo de construcción, como sucede en los cruceros. En estos casos el procedimiento constructivo del cajón es diferente; es decir:

Se construyen los brocales y se cuejan los muros tablaestaca. Pero ya no se excava hasta el nivel de desplante, sino hasta el nivel de la losa superior. Se cueja una plantilla de concreto pobre similar a la de la losa inferior. Se arma el emparrillado, ligándolo con el acero del muro Milán y se cueja la losa. Posteriormente se rellena, compacta y coloca la carpeta asfáltica para abrir el cruce al tránsito.

De este modo, la losa inferior y los muros estructurales se construyen al cavar el túnel soportado por los muros tablaestaca y la losa superior.



### 3.8 RELLENOS Y COMPACTACIONES

El relleno sobre el cajón subterráneo se inicia cuando el concreto de la losa de techo adquiere resistencia, formando así la infraestructura de las vialidades que se construirán o reconstruirán sobre las obras del tren.

El material de relleno se escoge de acuerdo con el peso volumétrico indicado en las especificaciones. Si es menor que 1.6 Ton/m<sup>3</sup>, se utiliza un tepetate de material predominantemente areno-limoso, limpio de materia orgánica, fragmentos de materiales extraños y sin partículas mayores que 7 cm. Si se requiere que el material tenga un peso volumétrico mayor que 1.6 Ton/m<sup>3</sup>, se puede usar grava cementada con tepetate, cuidando que la dosificación grava-arena garantice el peso volumétrico en el lugar. (10)

Para la compactación se puede usar cualquier equipo manual que asegure la obtención del peso volumétrico especificado.

Se puede utilizar equipo autopulsado de ruedas neumáticas o metálicas, o a base de orugas, para el acomodo y la compactación del material, con la condición de que no se ejerza sobre la losa de techo una presión mayor que 3.0 Ton/m<sup>2</sup>. La presión indicada toma en cuenta el peso del equipo y el peso del material de la primera capa.

Después de colocar la segunda capa de relleno es posible utilizar equipo vibratorio autopropulsado, que no pese más de dos toneladas.

El tendido del material se hace con el equipo con el que se logre una buena incorporación del agua al material para obtener la humedad óptima requerida.

La primera capa de material colocada sobre el cajón tiene un espesor compactado no menor de 30 cm. La compactación de esta capa debe alcanzar un 90% de la norma AASHTO Estándar T99-74. (10)

Los rellenos en capas posteriores deben también alcanzar el 90% de la misma norma, pero se hacen en capas no mayores que 30 cm de espesor.

La última capa, que funciona a su vez como subrasante, se compacta para alcanzar el 95% de la norma mencionada.

ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA

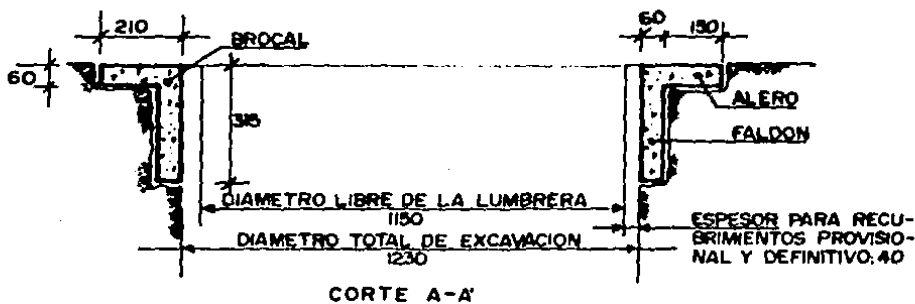
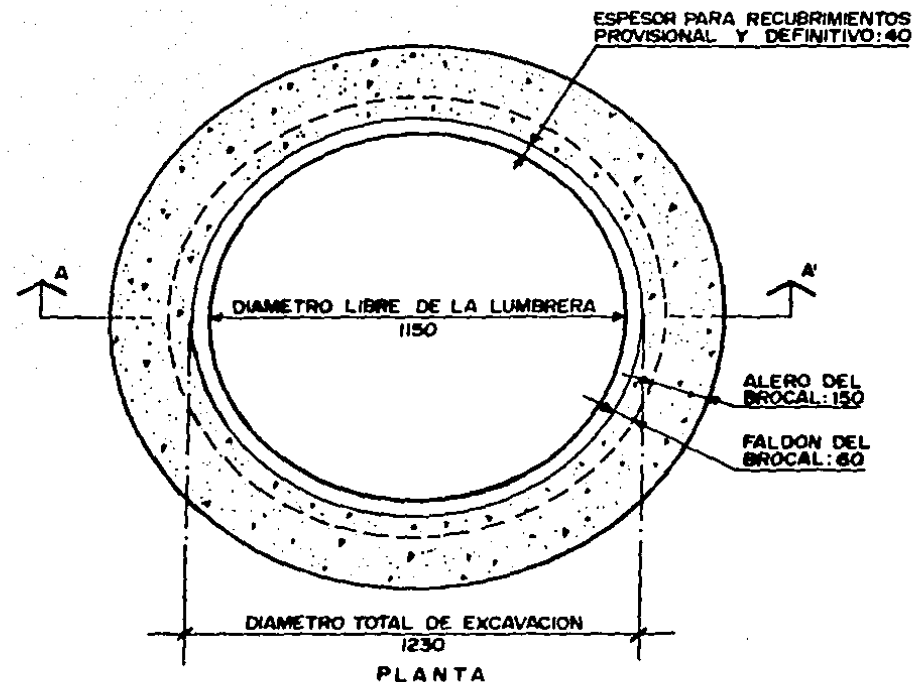
#### IV. SOLUCION SUBTERRANEA EN TUNEL

## SOLUCION SUBTERRANEA EN TUNEL

La solución subterránea en túnel se utiliza cuando no se cuenta con la suficiente amplitud de calles para efectuar la obra a cielo abierto o cuando las interferencias superficiales son de consideración. La solución consiste en la construcción de lumbreras a lo largo de la línea, por las que se introduce y se retira el material y la maquinaria necesaria para la excavación y construcción del túnel que aloja al propio tren. Estas lumbreras se construyen a cada medio kilómetro, aproximadamente. (Fig.4.1)

La excavación del túnel puede ser de frente abierto o bien con escudos. En este caso son máquinas perforadoras, cuya aplicación está en función del tipo de subsuelo que se desee atacar.

Las principales ventajas de la solución subterránea en túnel residen en que las líneas no interfieren con las redes municipales, no requieren de calles amplias y ocasionan un mínimo de molestias al tránsito y al público durante su construcción. Sin embargo, su costo es mayor que otras soluciones.



COTAS EN CMS.

FIG. 4.1

#### 4.1 TRABAJOS PRELIMINARES

Antes de comenzar los trabajos relacionados con la solución subterránea en túnel se realiza un vasto programa de sondeos y levantamientos topográficos en la zona inmediata a la excavación y a las áreas adyacentes a ésta con objeto de definir la estratigrafía, las características físicas y mecánicas del subsuelo, obtener los niveles del terreno y poder detectar movimientos causados por la construcción del túnel.

De hecho, los sondeos de exploración se efectúan a cada 100 m aproximadamente, y se pueden obtener muestras inalteradas y alteradas. Las primeras se obtienen hincando a presión tubos muestreadores de pared delgada tipo Shelby de 10 cm de diámetro interior. En cambio, las muestras alteradas se obtienen hincando a presión tubos muestreadores de pared gruesa de 3.5 cm de diámetro interior y 5 cm de diámetro exterior. (7)

El control topográfico debe ser riguroso debido a las tolerancias en la implantación de vfa, condicionada por los gálibos permisibles, la presencia de curvas horizontales y verticales, y los problemas propios de la excavación de un túnel.

Para definir la profundidad de desplante de los túneles se toman en cuenta dos aspectos fundamentales: el techo mínimo para desarrollar un procedimiento constructivo seguro según el tipo de suelo, considerando

las características del suelo y la cercanía con estructuras importantes; y la ubicación adecuada de los accesos a las estaciones, para evitar que los usuarios recorran grandes profundidades.

En general, se considera adecuado alojar los túneles en los suelos duros, estableciéndose una distancia mínima entre la clave y el nivel de terreno natural de una a una y media veces el diámetro de la sección excavada y una distancia mínima entre la clave del túnel y la frontera entre los estratos de suelo duro y de suelo blando igual al diámetro de la sección excavada. (12)

La geometría de las secciones se define considerando los siguientes factores: gálibos estáticos y dinámicos del convoy y sus instalaciones; la estabilidad de la sección durante su construcción, tomando en cuenta el tiempo que transcurre entre la excavación y el colado del revestimiento definitivo; y el comportamiento a corto y a largo plazo de la estructura ante las cargas que le transmite el terreno.

La sección interior del túnel para tramos de dos vías tiene 8.64 m de diámetro, intersectada por una losa de sección variable a manera de cuerda, con una altura de 6.73 m. En estaciones se usan túneles gemelos, cada uno de dimensiones semejantes al túnel de doble vía. (2) Las dimensiones del túnel para tramos de una sola vía se muestran en la figura 4.2.

## TIPOS DE SECCIONES Y DIMENSIONES (en metros)

TIPO DE SECCION	RADIO	ENTREVIA	GALIBO	GALIBO
			HORIZONTAL	VERTICAL
<b>Para estación:</b>				
- Doble túnel, dos vías, dos andenes laterales	4.32	4.00	15.54	6.73
- Un solo túnel, dos vías, dos andenes laterales	6.58	2.90	14.66	9.30
- Un solo túnel, una vía un andén	4,32		8.64	5.83
<b>Para tramos:</b>				
- Túnel transición de tramo a estación de doble túnel	4.65	4.00	9.32	6.54
- Sección en tramo convencional	4.32	2.90	8.64	6.88
- Sección túnel circular para escudo	4.32	2.90	8.64	8.14



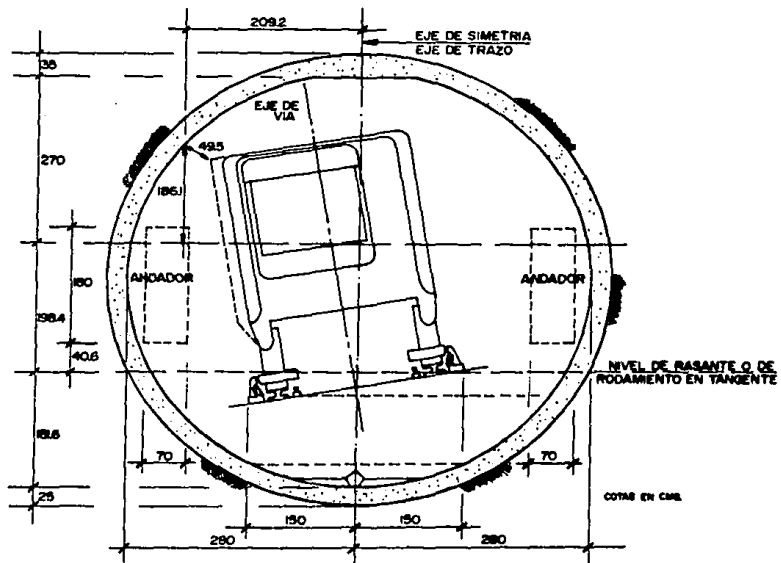


FIG. 4.2  
 SECCION EN CURVA

#### 4.2 CONSTRUCCION DE LUMBRERAS

Las lumbreras se construyen con el objeto de introducir el equipo necesario de excavación y construir los túneles de las líneas del tren así como para extraer la rezaga producto de las excavaciones.

Se construyen aproximadamente a cada medio kilómetro y sus dimensiones son variables, pero en general son de sección circular con un diámetro libre de unos once metros y sección excavada de diámetro mayor al libre en 80 cm. Cuentan con una estructura de retención constituida por concreto lanzado, el que funciona como ademe provisional; el revestimiento definitivo es de concreto reforzado. (Fig.4.3)

Si se requiere, se instalan pozos de abatimiento en el perímetro de la lumbrera para disminuir las filtraciones. Su profundidad depende del nivel freático y su diámetro es de 30 cm ( 12" ). Se perforan con broca tricónica o de dientes y se deben ademar con tubos de fierro de 10 cm (4") de diámetro, ranurados en toda su longitud excepto en los extremos. Para la extracción de agua del interior de estos pozos, se utilizan bombas de pozo profundo del tipo eyector de 1" x 1 1/4" operadas a una presión de 5 Kg/cm<sup>2</sup>. (13) El nivel de succión de las bombas se localiza a unos tres metros por encima de la profundidad de perforación de los pozos. El bombeo se inicia al mismo tiempo que la excavación de la lumbrera y se suspende inmediatamente después de colar la losa de piso.

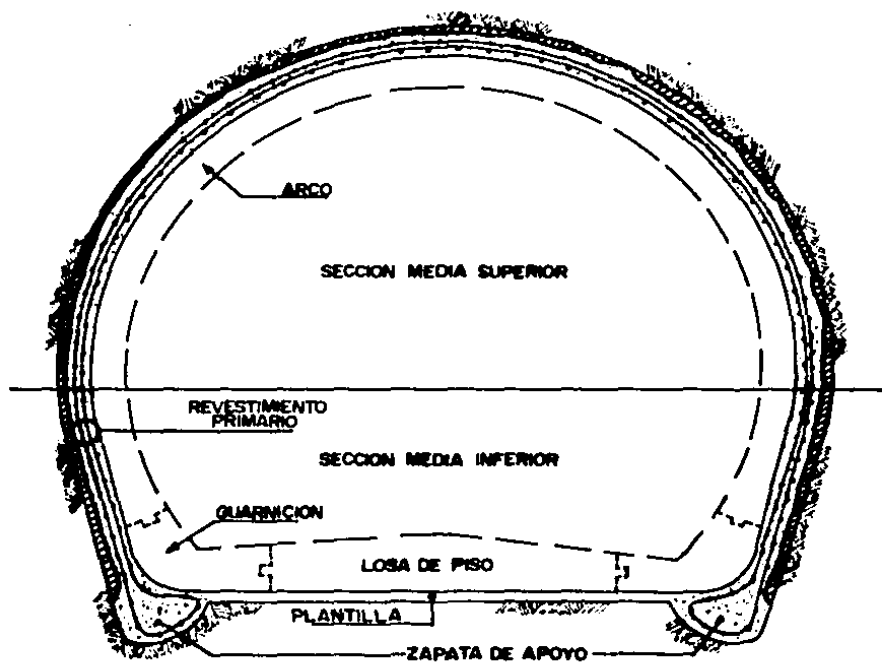


FIG. 4.3  
SOLUCION TUNEL  
CORTE TRANSVERSAL

En caso de que se presenten filtraciones hacia el interior de la lumbrera durante la excavación, aún operando los pozos de bombeo, se deben controlar mediante zanjas en las orillas del fondo de la excavación, que conducen a cárcamos de 30 x 30 x 30 cm. El agua se extrae con bombas autocebantes de gasolina.

Para proteger el terreno de sobrecargas locales se cuele un brocal en el perímetro exterior de la lumbrera. Una vez definido el trazo de la lumbrera sobre el terreno, se excava a mano o con maquinaria hasta unos tres metros y en un ancho de un metro donde se construirán los faldones del brocal. Para colarlos se usa una cimbra apoyada con puntales de madera de 10 x 10 cm (4" x 4") contra el terreno de la excavación. Los puntales se colocan a cada dos metros y medio horizontalmente, y a metro y medio en sentido vertical, en dos niveles.

El alero, rama horizontal del brocal, es una pequeña losa que permite a las máquinas de excavación que rueden libremente sin que se produzcan caídas en la superficie de la lumbrera. El alero del brocal tiene 1.50 m de ancho; el faldón tiene 0.60 m de espesor. (14)

Cuando el brocal ha alcanzado su resistencia de proyecto, se está en condiciones de iniciar la excavación para la construcción de la lumbrera.

La excavación de las lumbreras se efectúa con métodos tradicionales. La excavación del núcleo se hace con draga con cucharón de almeja o con traxcavos. La rezaga es extraída con el uso de botes izados por dragas.

La excavación se hace a cielo abierto en toda el área de la lumbrera entre una estructura de contención formada por concreto lanzado de 15 cm de espesor reforzado con malla electroforjada del tipo 6 x 6 - 6/6. (15)

Los tramos de excavación son de unos dos metros de profundidad. No puede atacarse ninguna etapa si no se ha colocado completamente el revestimiento primario de la etapa anterior.

Una vez alcanzada la profundidad de proyecto de la lumbrera se cuela una plantilla de concreto pobre de 10 cm de espesor con acelerante de fraguado.

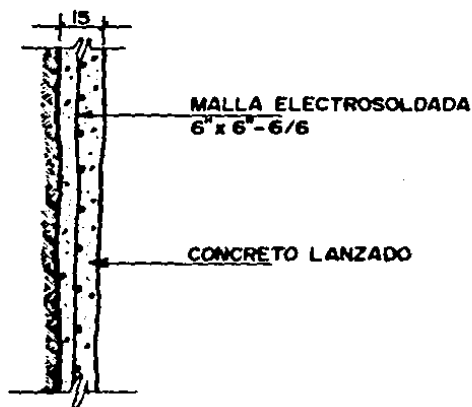
Dos horas después de colada la plantilla, se inicia el armado de la losa de piso, dejando las preparaciones necesarias para la liga estructural con el muro del ademe definitivo. La losa de piso forma parte del revestimiento definitivo. El espesor de la losa es de 60 cm.

Si el proyecto lo requiere, se construye un cárcamo de bombeo en el fondo de la lumbrera. Al colar la losa de piso se deja libre un espacio para excavar el cárcamo. Este se construye en forma análoga al resto de la lumbrera y después se cuela la sección faltante de la losa de piso de la lumbrera.

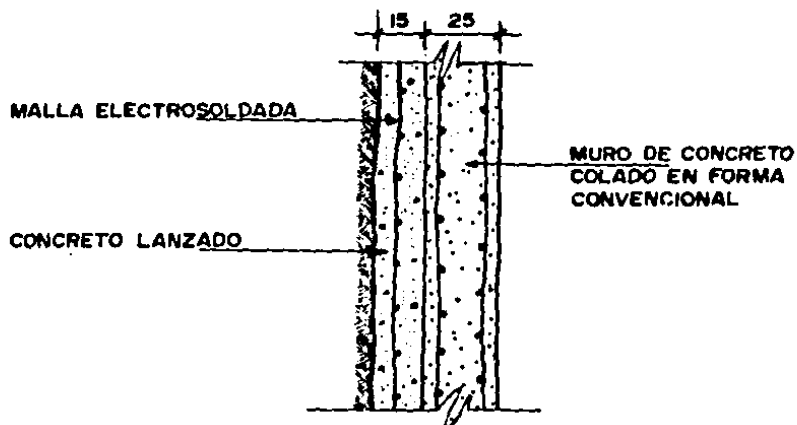
Completado esto, se inicia la colocación del revestimiento definitivo, que consiste en un muro de concreto armado, colado con cimbra convencional o con cimbra deslizante, (Fig.4.4)

El ademe definitivo de la lumbrera con dirección al túnel puede ser eliminado dejando una caja de madera de modo que quede únicamente el recubrimiento provisional.

La construcción de la estructura que soportará al escudo en el fondo de la lumbrera se inicia cuando la losa de piso alcance su resistencia de proyecto.



DETALLE DEL RECUBRIMIENTO PROVISIONAL CON CONCRETO LANZADO REFORZADO CON MALLA ELECTROSOLDADA 6"x6"-6/6.



DETALLE DEL RECUBRIMIENTO DEFINITIVO FORMADO POR UN MURO DE CONCRETO ARMADO Y COLADO EN FORMA CONVENCIONAL.

COTAS EN CMS.

FIG. 4. 4

#### 4.3 EXCAVACION Y CONSTRUCCION DEL TUNEL

Al terminar la construcción de la lumbrera se bajan los ejes de la misma hasta el nivel de piso. En cada etapa de excavación del túnel se prolonga el trazo y nivel, marcando en el frente la sección a excavar. Se hace un seccionamiento transversal y se determinan las zonas que se recortarán para alojar el revestimiento definitivo. Se utilizan también pozos de control topográfico para ratificar la posición del eje del túnel.

Frecuentemente, el eje del túnel coincide con vialidades superficiales, por lo que hay que desplazar las lumbreras y construir túneles de conexión perpendiculares a la línea del tren.

Los procedimientos constructivos de túnel se clasifican en túnel convencional y túnel excavado con escudo. El procedimiento constructivo convencional radica fundamentalmente en excavar el túnel e inmediatamente colocar un revestimiento primario de concreto lanzado reforzado con malla de acero, recurriendo en algunos casos a la instalación de anclas. Posteriormente se coloca un ademe definitivo de concreto colado con cimbra o de concreto lanzado. En túneles excavados con escudo el revestimiento está constituido por anillos o dovelas prefabricadas con concreto armado.

Los procedimientos de excavación y las propiedades del ademe primario varían de acuerdo con las características del suelo, la



presencia de estructuras encima y cerca del túnel, y el techo existente para cada tramo. Con estos factores se zonifican los tramos y se proporciona un procedimiento constructivo y de excavación típico de cada zona, para reducir al máximo los riesgos de falla y agilizar lo más posible los ciclos de excavación.

En los casos de tuneleo convencional, el concreto lanzado remata en una zapata de 40 x 80 cm bajo el nivel de plantilla. El espesor del concreto lanzado varía entre 15 y 25 cm como máximo. También varía la colocación de una o dos mallas electroforjadas, el refuerzo de zonas críticas con marcos metálicos, la distancia máxima excavada sin ademe (2.40, 1.20, ó 1.00 m), el ataque a sección completa o con banqueo y su distancia correspondiente. (12)

Tanto en el procedimiento convencional como en el procedimiento con escudo, la rezaga del material que resulta de las excavaciones se desaloja mediante un cargador de descarga lateral que la deposita en vagonetas montadas sobre trucks para vía.

Unas locomotoras jalan estos trucks para vía hasta la lumbrera, en donde son izados con grúa. En la superficie, las vagonetas izadas descargan en tolvas o en camiones.

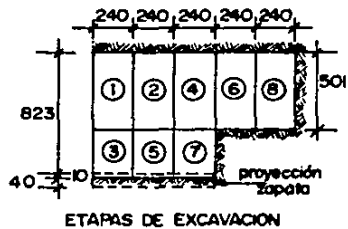
#### 4.3.1 PROCEDIMIENTO CONVENCIONAL

En cuanto al procedimiento constructivo convencional más comúnmente empleado en todos los tramos, consiste básicamente en lo siguiente: Se

inicia en la zona de clave, con pistolas neumáticas o equipo de corte especializado, en etapas de una longitud variable entre 1.20 y 2.40 metros.

El equipo especializado consiste en rozadoras con capacidad de 20 a 40 m<sup>3</sup>/hr o brazos cortadores montados sobre equipos caterpillar. El material excavado se traspalea en forma manual o mecánica. Si el ataque es a media sección, se lanza el concreto del ademe primario hasta el piso del banqueo y se refuerza con malla de acero. La excavación del banco inferior se puede hacer con traxcavo o con rozadora. Las pistolas neumáticas se usan para alojar la zapata de apoyo del concreto lanzado de la parte inferior y para afine. La excavación se suspende hasta completar el lanzado del concreto, en un espesor de 15 cm, apoyándolo en las zapatas extremas, constituidas también por concreto lanzado. En los casos críticos, se restringe la longitud de avance, se aumenta el espesor de concreto lanzado, se instalan anclas y adicionalmente se colocan marcos de acero. En zonas donde el túnel encuentre basaltos, con la perforadora de pierna se hacen barrenos de 38 mm y 2.40 m de profundidad, se cargan explosivos en cartuchos de 150 gramos, se truena, y finalmente se excava en tres etapas: una central en la parte superior, ampliaciones laterales a ambos lados de la media sección superior y, finalmente, el banco inferior. (Fig.4.5)

Si durante la excavación del túnel se observan filtraciones de agua freática o si las mediciones piezométricas revelan presiones hidráulicas que disminuyan la estabilidad, se suspende la excavación del frente



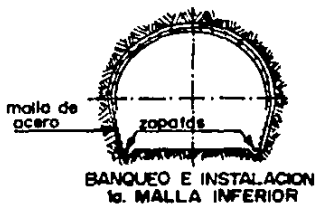
ETAPAS DE EXCAVACION



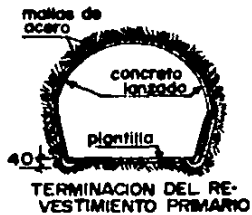
INSTALACION 1a. MALLA



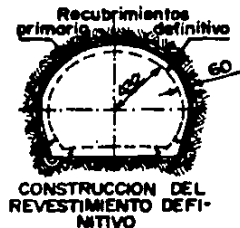
COLOCACION DE LA CAPA DE CONCRETO LANZADO



BANQUEO E INSTALACION 1a. MALLA INFERIOR



TERMINACION DEL REVESTIMIENTO PRIMARIO



CONSTRUCCION DEL REVESTIMIENTO DEFINITIVO

COTAS EN CMS.

FIG. 4.5

PROCESO CONSTRUCTIVO  
SOLUCION TUNEL

colocando concreto lanzado para proceder a la construcción de pozos de bombeo.

#### EMPORTALAMIENTO

El ataque del túnel comienza con un "emportalamiento" en la intersección con la lumbrera a base de anclas de fricción en la parte superior del portal. Las anclas proporcionan una mayor estabilidad en el terreno al inicio de la excavación del túnel. Posteriormente se descubre el área de la sección del túnel para colar una trabe de borde. Este procedimiento se aplica en todas las intersecciones de túneles.

Las anclas son barras de acero instaladas en el terreno alrededor del túnel. (16) Las anclas se cuelan desde el interior de la lumbrera. Se realizan perforaciones de 3.8 cm (1½") de diámetro en la parte media superior de la sección del túnel a cada 0.75 m de separación, con una profundidad de 4.5 m y con una inclinación de 15° con respecto al eje del túnel. Se deben colocar once anclas como mínimo. Se colocan varillas de 2.5 cm (1") de diámetro y se rellenan los barrenos con inyección de lechada en una proporción de dos partes de cemento por una de agua y con una presión de 4 Kg/cm<sup>2</sup>. (Fig.4.6)

Una vez colocadas todas las anclas se descubre la sección del túnel sobre el revestimiento de la lumbrera y se excava una zanja perimetral o bien en toda el área de la sección. Inmediatamente se arma y se cuele la trabe de borde.

## EXCAVACION DE LA SECCION EN TUNEL

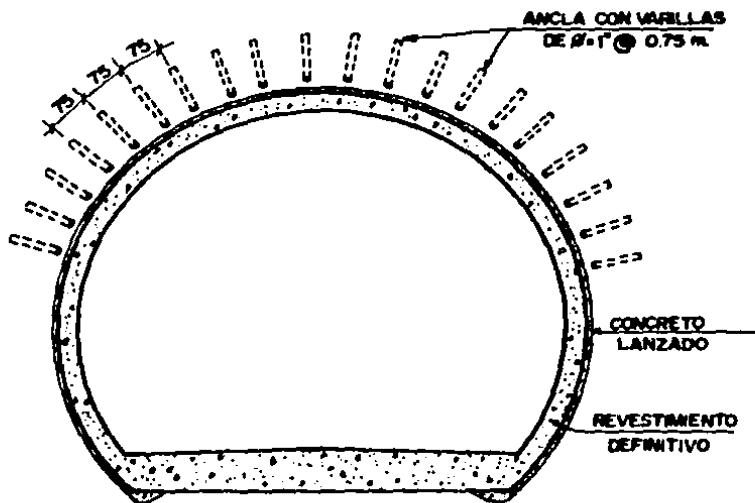
La excavación se inicia en la parte media superior de la sección del túnel si el ataque es a media sección. Si el ataque es a sección completa se inicia también en la parte superior.

En seguida se describe el ataque a media sección, empleándose para ello maquinaria tipo "Alpine", "Westfalia", o similar. (17)

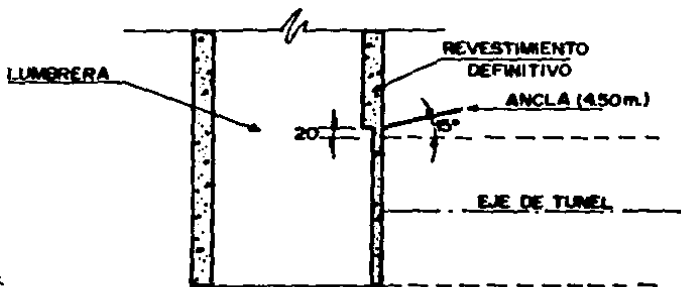
Mientras que la excavación de la parte superior se hace en tramos de 1.20 a 2.00 m de longitud, llevando un banqueo de 2.40 m, dependiendo de las condiciones de estabilidad del terreno, el talud del frente de la excavación es vertical o muy pequeño. Cada tramo excavado debe ser protegido con concreto lanzado formando el ademe provisional antes de iniciar la excavación de la parte inferior.

La excavación de la parte media inferior se desarrolla igual que la excavación de la parte media superior.

En algunos tramos del túnel, con el proceso de excavación normal, no se alcanza la sección de proyecto, lo que obliga a realizar "peines". (18) Se considera como peine a la excavación necesaria que debe hacerse para alcanzar la línea establecida por el proyecto para fijar los límites de la excavación. Las zonas por peinar pueden estar localizadas en la sección media superior, en la sección media inferior, o en ambas. De cualquier modo, los peines se inician en la parte superior de la sección y se hacen en forma alternada en tramos o franjas de túnel de 2.0 m de longitud. (Fig.4.7)



**CORTE TRANSVERSAL**



COTAS EN CMS.

**CORTE LONGITUDINAL**

**FIG. 4.6**

## COLOCACION DEL CONCRETO LANZADO

El concreto lanzado se coloca en las paredes de la excavación mediante maquinas lanzadoras que utilizan aire comprimido inyectado.

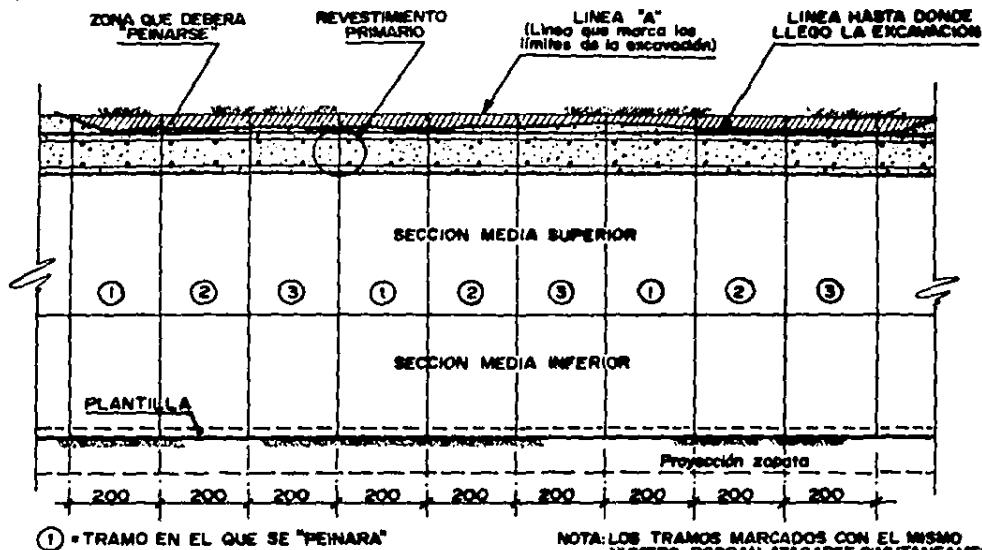
Una vez descubierto cada tramo de excavación se lanza una primera capa de concreto de 5 cm de espesor. A continuación se debe colocar una malla electrosoldada del tipo 6"x6"-6/6" ó 6"x6"-4/4" dejando 30 cm de malla para traslape con la malla de la sección inferior. (19) Es en este momento cuando se colocan los marcos de soporte. (Fig.4.8)

Cuando la primera capa de concreto lanzado ha fraguado, se coloca inmediatamente una segunda capa de 10 cm de espesor, para constituir el recubrimiento provisional de 15 cm de espesor.

Antes de lanzar la primera capa de concreto en la parte inferior se coloca un emboquillado con manguera PVC Ø 5 cm (2") para las anclas de soporte, cuando el proyecto determine su utilización. La longitud exterior de estas anclas no debe ser menor al espesor total del recubrimiento provisional. Las mangueras se taponean para evitar la entrada del concreto en ellas. Después de lanzar el concreto se colocan las anclas.

## MARCOS DE SOPORTE

Los marcos de soporte son estructuras formadas por viguetas de acero tipo IPR-8" x 5 1/2" ( 29.8 Kg/m ) cuya función es mantener el túnel abierto y estable. (17)



COTAS EN CMR.

FIG. 4.7  
CORTE LONGITUDINAL  
SOLUCION TUNEL



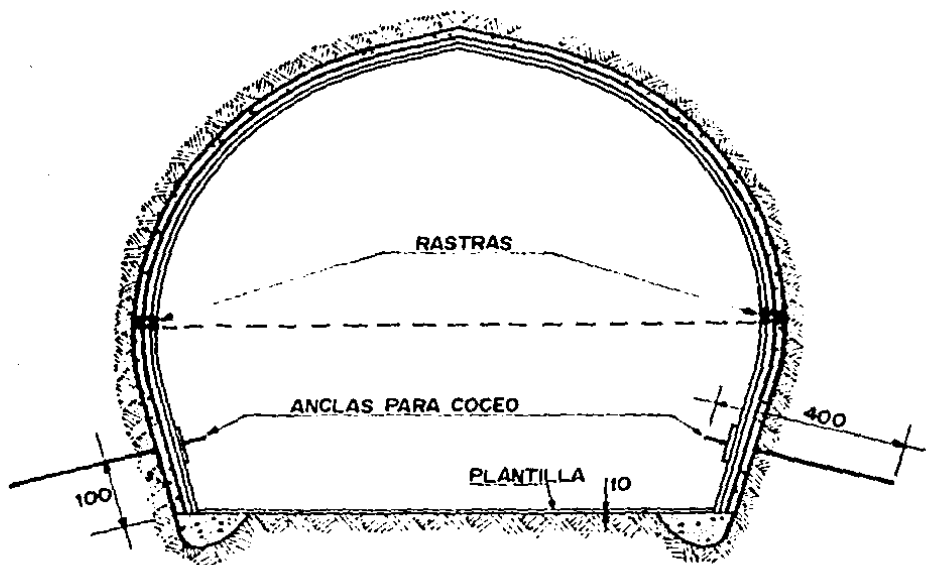
Los marcos se instalan cuando el proyecto determina la necesidad de proporcionar mayor refuerzo al túnel. Su espaciamiento varía según el proyecto.

En la figura 4.9 se pueden observar las rastras, que son estructuras de soporte instaladas en el sentido longitudinal. Sirven para dar la separación adecuada y transmitir a los marcos las cargas correspondientes a los espacios comprendidos entre ellos.

La colocación de marcos comienza después de lanzar la primera capa de concreto de 5 cm de espesor, al mismo tiempo que se instalan las rastras. Se coloca entonces la parte superior del marco formado por dos viguetas soldadas en sus puntos de unión y acuñada contra el concreto lanzado por medio de polines de madera. (20) Se excava la parte inferior del túnel y se lanza la primera capa de concreto. Antes de colocar las dos partes restantes del marco se instalan dos anclas de 3 a 4 m de longitud y a 35 ó 40 cm del centro de la vigueta para tomar las fuerzas horizontales de coceo del marco. Después de instalar el marco en su totalidad se lanza la segunda capa del concreto del recubrimiento primario.

#### COLOCACION DEL RECUBRIMIENTO DEFINITIVO

El recubrimiento definitivo del túnel se constituye por una capa de concreto hidráulico reforzado de 35 cm de espesor.



COTAS EN CMB.

FIG. 4. 9

COLOCACION DEL MARCO, PARTES SUPERIOR E INFERIOR.

El armado y colado del revestimiento definitivo se inicia una vez recubiertas las paredes del túnel y colocados los marcos metálicos. Se recomienda que el recubrimiento se lleve como máximo 100 m atrás del frente de ataque, aunque esta condición no es limitante.

El suministro de concreto se lleva a cabo mediante camiones revolventes que descargan en tolvas instaladas en las lumbreras, en los pozos de control topográfico y en pozos perforados especialmente para tal fin. Cada tolva se conecta a una tubería de 30 cm (12") unida en su extremo inferior a un tanque amortiguador que descarga directamente a las bombas. Las bombas envían el concreto a la parte superior de la cimbra, desde donde se vacía para colar el recubrimiento definitivo del túnel.

Es muy práctico utilizar cimbras metálicas en módulos de 6.0 m de longitud. La estructura se desliza sobre rieles y se desplaza mediante Tirfor. El descimbrado y movimiento a una nueva posición de la cimbra deslizante se efectúa 12 horas después de colada la clave del túnel.

Se coloca un "emportalamiento" y una trabe de borde en lugar del revestimiento definitivo en los sitios donde se localicen las salidas del túnel.

El concreto para el revestimiento tiene una resistencia  $f'c = 250$  Kg/cm<sup>2</sup> y el armado se hace generalmente con varilla #6. Es necesario verificar la calidad del concreto con cilindros de control ensayados a

compresión, igualmente se debe comprobar la resistencia del acero por medio de pruebas mecánicas de tensión y doblado.

#### INYECCION DE CONTACTO

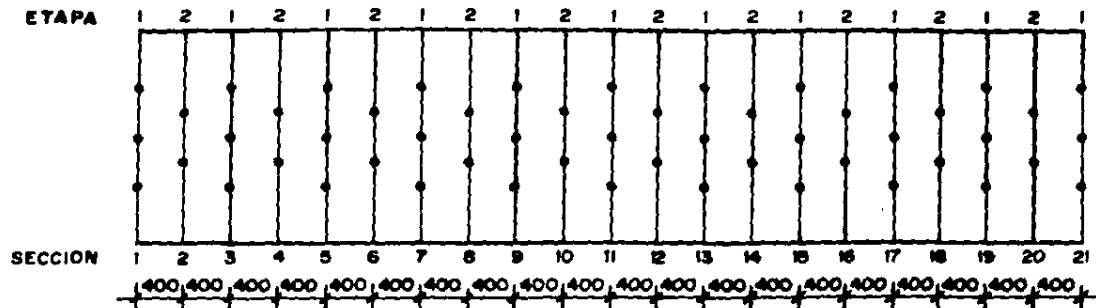
La inyección de contacto se realiza con el fin de rellenar todos los vacíos existentes entre el revestimiento primario a base de concreto lanzado y el revestimiento definitivo de concreto hidráulico.

Para facilitar la inyección se deben dejar preparaciones durante el colado del revestimiento definitivo, que consisten en segmentos de tubos PVC de 5 cm (2") de diámetro, con una penetración de 5 cm dentro del revestimiento primario para detectar la presencia del mismo. Más aún, se debe prever un mínimo de 4 secciones adelante equipadas con sus respectivas válvulas de paso.

La inyección se hace en secciones que tienen tres barrenos en la parte media superior del túnel, llamadas impares, y en secciones que tienen dos barrenos en la misma zona, llamadas pares. Cada sección tiene 4 m de longitud y van alternadas. (Fig.4.10)

Al mismo tiempo la inyección se hace en dos etapas. La primera en las secciones impares y la segunda en las secciones pares.

La primera etapa se realiza cuando el concreto del recubrimiento definitivo ha alcanzado al menos el 75% de la resistencia de proyecto. Se efectúa en tramos de 80 m, lo que equivale a no menos de 11 secciones impares perforadas, y en cada una se inyectan primero los barrenos



SIMBOLOGIA:

- } SECCION "IMPAR"
- }
- } SECCION "PAR"
- }

COTAS EN CMS.

FIG. 4.10

INYECCION DE CONTACTO ENTRE EL REVESTIMIENTO  
DEFINITIVO Y EL REVESTIMIENTO PRIMARIO.  
PLANTA

laterales y después el central. En caso de haber comunicación con barrenos adyacentes, se obturan estos antes de continuar. Una vez inyectadas las 11 secciones impares como mínimo, se inician las secciones pares de la segunda etapa.

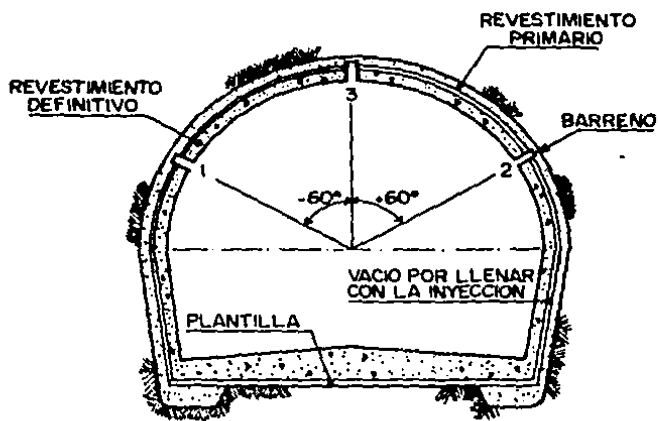
La segunda etapa se inicia a los 3 días de edad de la primera etapa. Se perfora un mínimo de 10 secciones pares, las cuales se inyectan en forma alternada, esto es, primero el barreno de la izquierda antes que el de la derecha, y viceversa.

Para la inyección se utiliza una lechada agua-cemento en proporción 3:1 en peso si el volumen total es menor que 4.0 m<sup>3</sup>; en caso de que el volumen total sea mayor, la lechada se cambia por un mortero para cubrir el excedente. En ambos casos la presión no debe sobrepasar el valor de 2 Kg/cm<sup>2</sup>. (21)

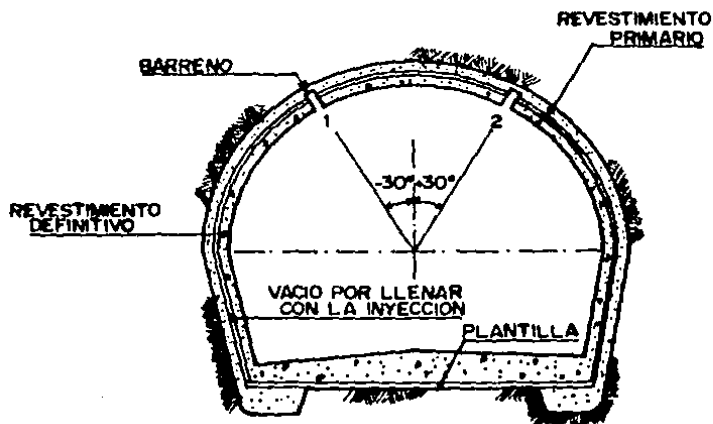
Se considera un barreno sellado cuando se ha inyectado un volumen total de 6.0 m<sup>3</sup>, o cuando no exista absorción con cualquier tipo de mezcla a 1.5 Kg/cm<sup>2</sup> de presión en un lapso de 15 minutos. (21) (Fig.4.11)

#### INSTRUMENTACION

La instrumentación es a base de extensómetros, inclinómetros y bancos de nivel, los que permiten determinar la magnitud, la variación de deformaciones y las presiones del subsuelo. En este sentido, las deformaciones son los movimientos horizontales y verticales que se



SECCION IMPAR



SECCION PAR

FIG. 4.11

provocan en el subsuelo antes, durante y después de realizar la excavación del túnel, en la zona inmediata a la excavación y áreas adyacentes.

Brevemente, los extensómetros proporcionan los valores de las deformaciones durante la excavación del túnel, los inclinómetros miden los movimientos horizontales en la zona inmediata a la excavación del túnel y los bancos de nivel registran los asentamientos del subsuelo en las áreas adyacentes. Para medir las deformaciones interiores durante la excavación de la sección se instalan secciones de convergencia.

Se recomienda instalar los instrumentos cuando el frente de ataque se encuentre a veinte metros antes de la sección de instrumentación.

#### 4.3.2 PROCEDIMIENTO CON ESCUDO DE FRENTE ABIERTO

Terminada la construcción de la lumbrera se procede a bajar por ella todas las partes componentes del escudo para armarlo en su interior.

La función del escudo es contener las paredes de excavación entre la sección de ataque y la sección ya revestida.

#### CARACTERISTICAS DEL TUNEL

El diámetro interior del túnel es de aproximadamente 8.64 m y el diámetro exterior tiene aproximadamente 9.15 m. El revestimiento o



ademe consta de tres segmentos o dovelas prefabricadas con concreto armado.

#### REVESTIMIENTO DEL TUNEL

Las dovelas se dividen en tipo a,b,c, según su tipo. Cada anillo está formado por las tres dovelas, las a y b forman los costados y la clave y la c forma la cubeta.

Las dovelas son de concreto armado, con un ancho de 0.80 m excepto las correctivas cuyo ancho está en función de la curvatura del túnel.

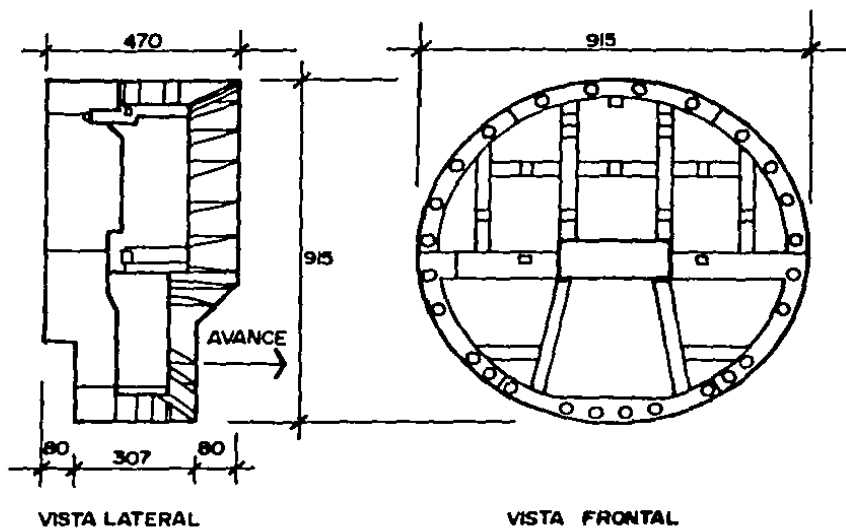
#### CARACTERISTICAS GENERALES DEL ESCUDO

Estructuralmente, el escudo esta constituido por un cilindro de acero de 9.15 m de diámetro y 4.70 m de longitud. Cuenta con frente abierto, constituido por cachucha de corte en el frente, gatos frontales, gatos de empuje, plataforma de trabajo, centro y faldón. (22) (Fig.4.12)

Si las características del material por atravesar lo hacen necesario, se puede trabajar con frente cerrado gracias a un "tapón" de madera.

#### ARRANQUE INICIAL DEL ESCUDO

Antes de iniciar la excavación del túnel se debe construir en la lumbrera un anillo de apoyo inicial. Contra éste se colocan dovelas



COTAS EN CMS.

FIG. 4.12

ESCUDO DE FRENTE ABIERTO

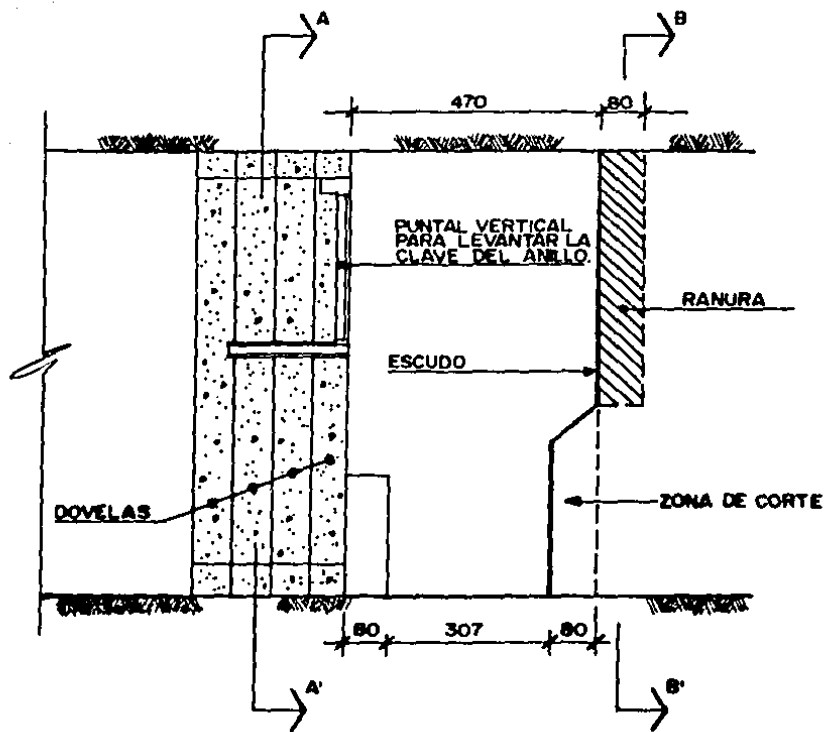
tipo a y b en posición invertida formando semianillos y a su vez, el escudo se apoya contra éstos. El conjunto constituye así una estructura que transmitirá el empuje de los gatos al muro opuesto al frente de ataque del escudo.

Ya que esté colocado el frente del escudo sobre el muro de la lumbrera, se demuele éste y simultáneamente se procede a colocar el primer semianillo dentro de la camisa del escudo con ayuda de los brazos erectores. La rezaga del muro demolido se retira al terminar de colocar el primer y segundo semianillos. También se procede entonces a avanzar el escudo en tramos de 80 cm, dando oportunidad para colocar los semianillos subsecuentes.

Cuando el escudo está prácticamente a punto de desaparecer de la lumbrera, se pueden empezar a colocar los anillos completos. Con el fin de garantizar la seguridad en su colocación, se apuntalan en la parte superior contra el anillo de apoyo inicial.

#### AVANCE DEL ESCUDO

Antes de ejecutar algún avance del escudo se efectúa el corte del material en el frente. El corte se hace en el perímetro interior del escudo en una profundidad mínima de 80 cm. Para que el escudo pueda avanzar sin resistencia en la zona correspondiente a la cachucha se excava una ranura de 80 cm de profundidad y 40 cm de ancho. (Fig.4.13 y Fig.4.14)



COTAS EN CMS.

FIG. 4.13  
 APUNTALAMIENTO DE DOVELAS

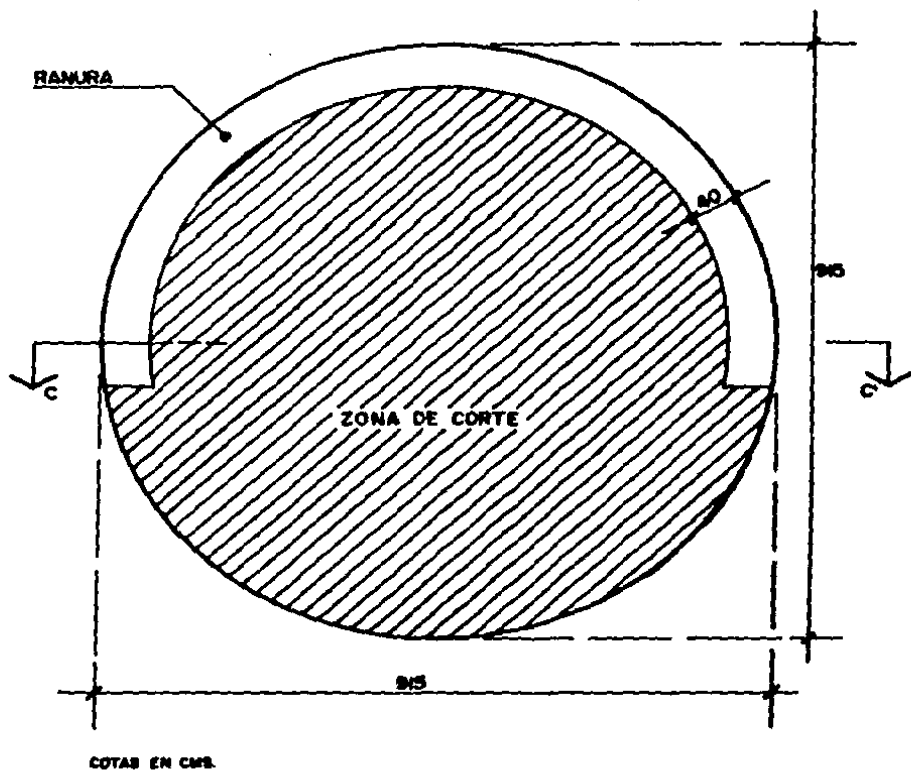


FIG. 4.14  
CORTE B-B'

Preferentemente, la excavación de la ranura se hace a ras de la cachucha del escudo, si las condiciones de estabilidad del terreno lo permiten. En caso de encontrar estratos de arcilla blanda en el frente la ranura se excava en forma biselada; es decir, del perímetro interior del escudo hacia el núcleo central. (Fig.4.15)

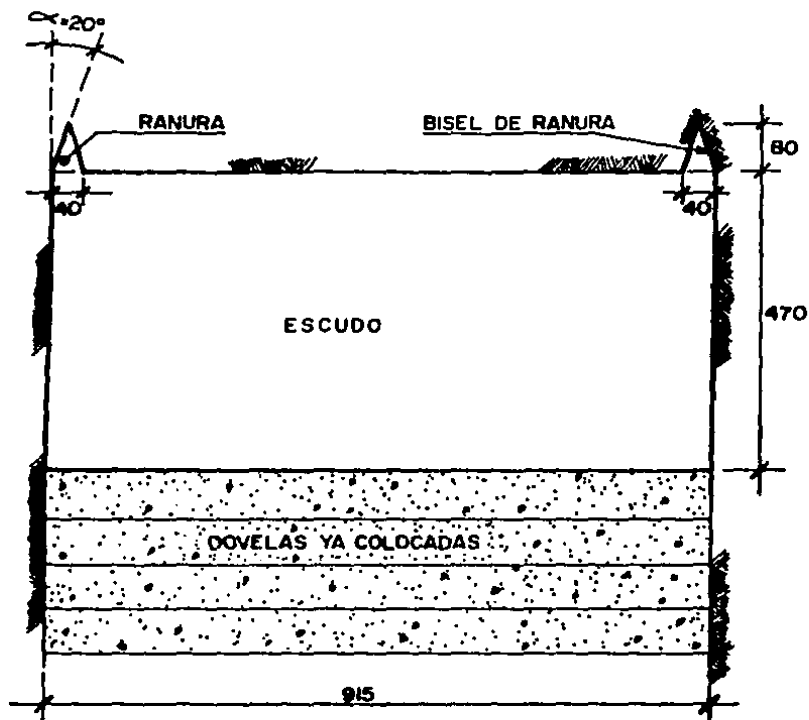
La excavación de las ranuras admite sobreexcavaciones no mayores a 10 cm en caso de zona de curva en el trazo. Esto se hace para facilitar el control topográfico y evitar posibles daños a los anillos colocados debido a empujes forzados.

Una vez hecho el corte se procede a avanzar una longitud mínima de 80 cm medidos en la carrera de los vastagos de los gatos de empuje.

No obstante, el ataque del frente se lleva a cabo con herramienta manual o mecánica, de acuerdo con los aditamentos instalados en el escudo. Las excavaciones se inician al terminar el empuje del escudo, mientras se colocan las dovelas que forman el último anillo. Se desaloja la rezaga del frente y se procede a realizar un nuevo avance del escudo.

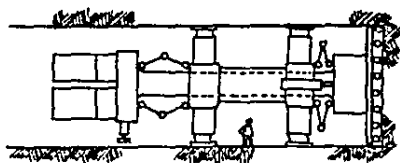
Los gatos de la parte trasera, apoyados por medio de sus zapatas en los anillos ya colocados, sirven para empujar el escudo. (Fig.4.16)

Sin embargo, es importante mencionar que si durante el avance la presión en los gatos de empuje se rebasa los 259.00 Kg/cm<sup>2</sup> (3700 lb/in<sup>2</sup>), es conveniente inyectar una mezcla compuesta por lodo bentonítico al que se le agrega el 5% de aceite soluble, que se aplica a

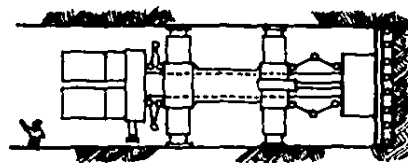


COTAS EN CMS.

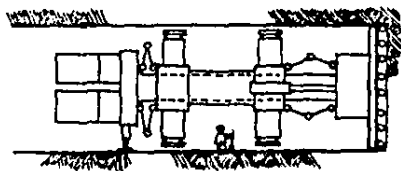
FIG. 4.15  
PLANTA C-C'



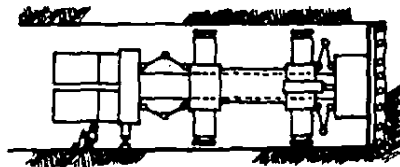
A- POSICION PARA INICIO DE EXCAVACION



B- POSICION CUANDO TERMINO LA EXCAVACION



C- APOYO PARTE TRASERA Y CABEZA  
CORTADORA



D- AVANCE DEL CUERPO CENTRAL.

FIG. 4. 1 6



través de preparaciones existentes en el escudo y la presión de inyección máxima no debe ser mayor que 3.00 Kg/cm<sup>2</sup>, en tanto que el volumen límite de inyección sera de 4.50 m<sup>3</sup>. (23)

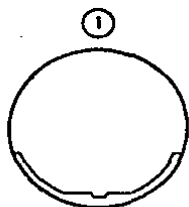
La mezcla inyectada tiene por objeto reducir las fuerzas de fricción generadas en la superficie de contacto entre la camisa del escudo y el suelo circundante, y evitar así presiones excesivas en los gatos de empuje que pudieran danar los anillos colocados previamente. Cuando en un tramo se mantengan las presiones de empuje altas, se podrán aplicar las inyecciones a cada 10.0 m.

#### PROCEDIMIENTO PARA LA COLOCACION DE LOS ANILLOS

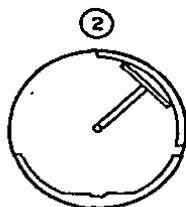
Las dovelas se pueden colocar en forma indistinta. Sin embargo, con el fin de plantear una secuela de colocación ascendente, se transporta primero la dovela c o cubeta hasta la rampa de la deslizadera en donde se iza para colocarla en posición dentro del faldón del escudo. Después se transporta la dovela a y luego la dovela b, hasta la rampa de la deslizadera para ser izada y colocada en posición para ser acoplada a los brazos erectores que la instalarán en su posición definitiva.

Las dovelas a y b tienen insertos en la clave para ser unidas mediante una placa.

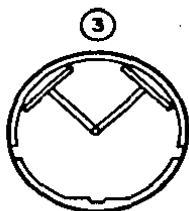
Hecho esto, se transporta un troquel (horizontal) hasta la parte posterior del escudo, que se ensambla en los insertos que tienen las dovelas a y b.



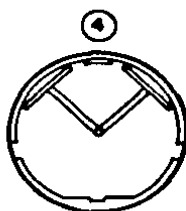
COLOCACION DE LA DOVELA "c"



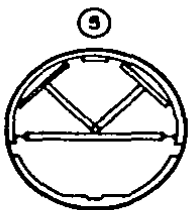
COLOCACION DE LA DOVELA "a"



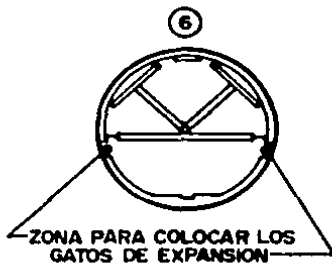
COLOCACION DE LA DOVELA "b"



COLOCACION DE LA PLACA EN LA CLAVE



COLOCACION DEL PUNTAL HORIZONTAL



ZONA PARA COLOCAR LOS GATOS DE EXPANSION

FIG. 4 . 1 7  
 PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO PARA LA EXCAVACION Y  
 CONSTRUCCION DEL TUNEL.

Cuando el anillo ha salido de la camisa del escudo se debe colocar un puntal vertical de acero cédula 40 y 15 cm (6") de diámetro, el cual, por medio de un gato hidráulico ayudará a levantar la clave del anillo. (11)

Se procede a aplicar entonces una precarga de 15 Ton y a expandir el anillo con los gatos de expansión, colocados en los extremos de las dovelas a-c y b-c. La carga de los gatos se aplica en forma alternada y es de 40 Ton.

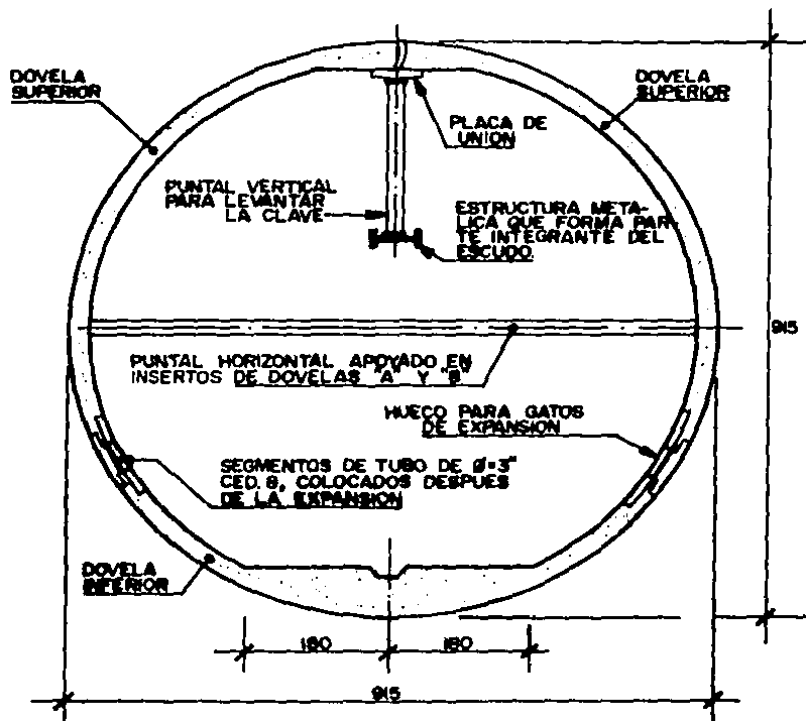
Al terminar la expansión se colocan dos tramos de tubo cédula 80 de 7.5 cm (3") de diámetro, con placa de 3/8 de 15 x 15 cm para recibir las dovelas. Se retiran los gatos de expansión y se ligan las dovelas a-c y b-c. (22) (Fig.4.18)

El hueco de los gatos de expansión se rellena con concreto de  $f'c = 300 \text{ Kg/cm}^2$  con aditivo estabilizador de volumen, dejando ahogados en el colado los dos tramos de tubo. Después se retira el puntal vertical.

El puntal horizontal colocado en los insertos de las dovelas a y b permanecerá en posición por lo menos 24 horas a partir de su colocación antes de ser retirado.

#### INYECCION

Con el propósito de reducir los asentamientos superficiales que se presentan durante la excavación del túnel y reducir las filtraciones de



COTAS EN CMS.

FIG. 4.18

CORTE A-A'

agua freática a su interior, se inyecta una mezcla mortero-bentonita que puede llevar también acelerante de fraguado.

Para efectuar las inyecciones se utilizan los insertos para maniobras con que cuenta cada dovela (insertos H y J), por donde se perforan barrenos extras. Las perforaciones tienen 5 cm (2") de diámetro y 25 cm de penetración.

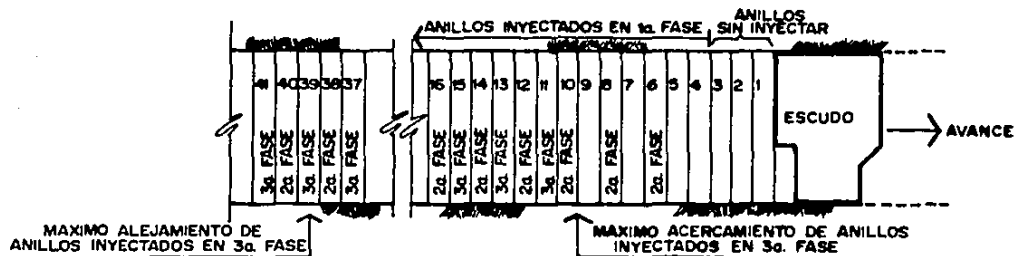
Perforaciones adicionales se harán para la de la 2ª y 3ª fase de inyección: tres en los anillos que se inyectarán en la 2ª fase y una en los de 3ª fase. (Fig.4.19)

Cada anillo debe contar con una inyección de dos fases. (23) La inyección de 1ª fase se efectúa en todos los anillos y las inyecciones de 2ª y 3ª fase se efectúan en anillos alternados.

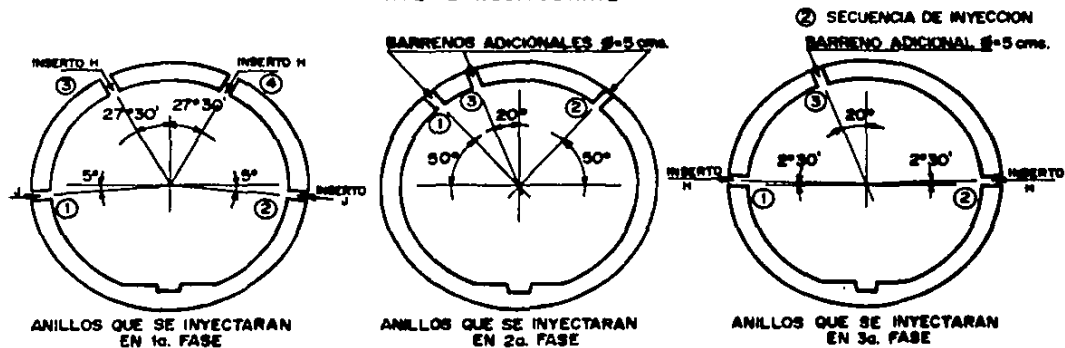
La inyección de 1ª fase se efectúa cuando el anillo por inyectar cuente con 3 anillos entre sí mismo y el faldón del escudo.

El sexto anillo atrás del faldón se inyecta en la 2ª fase siempre que ya cuente con la inyección de 1ª fase. Los cuatro anillos subsiguientes se inyectan también en 2ª fase; es decir, hasta el décimo anillo inclusive.

A partir del anillo 11, las fases de inyección son 3ª y 2ª, en forma alternada. El último anillo en que se realice la inyección de 3ª fase no deberá estar 40 anillos más allá del faldón del escudo.



CORTE LONGITUDINAL



CORTES TRANSVERSALES

FIG. 4.19

PROPORCION DE CADA INYECCION	1ª FASE	2ª FASE	3ª FASE
AGUA (L)	136	160	152
CEMENTO (Kg)	250	250	250
BENTONITA (L)	67	42	50.2
ARENA (Kg)	160	150	--
ACELERANTE DE FRAGUADO (Kg)	2.5	--	--

#### SECCIONES DE MEDICION Y BANCOS DE NIVEL EN SUPERFICIE

Durante la construcción del túnel se hace necesario llevar un control acerca de los movimientos del terreno superficial, para ello se requieren: (16)

Secciones de control de niveles a cada 50.0 m de longitud a lo largo del eje del túnel. En cada sección se colocan 11 bancos de nivel superficiales separados en el sentido transversal al eje del túnel 0.00, 2.00, 4.00, 6.00, 8.00, y 10.00 m, instalados simétricamente con respecto al eje del túnel.

Durante 25 días, 10 días antes de que el escudo pase por la sección y 15 días después de que lo haga, se harán las lecturas, una vez al día.

Se eligen secciones superficiales en donde se tomarán medidas de los diámetros del túnel en sentido horizontal, diagonal y vertical. Las lecturas se realizarán durante tres semanas, una vez al día. La primera lectura se tomará cuando el escudo se localice a una distancia de dos anillos adelante de la sección de medición.

#### 4.4 LOSA DE FONDO

Finalmente, se llevan a cabo el colado de la losa de fondo y de los muros de la parte inferior en la última etapa constructiva, de manera que no haya interferencia con el sistema de transporte de la rezaga del túnel.

Nótese que los tramos excavados con el procedimiento convencional no presentan desniveles entre el fondo del túnel y el nivel de la losa de fondo.

Contrariamente, en los tramos contruidos con el método del escudo se presenta un desnivel entre la cubeta del túnel y el nivel correspondiente a la subrasante. Los rellenos necesarios para alcanzar tal nivel se hacen con grava en capas de espesor compacto máximo de 30 cm, compactadas al 95% de su peso volumétrico seco máximo. El material debe estar libre de materia orgánica y materiales pétreos de más de 5 cm (2") de diámetro. El relleno se coloca hasta 15 cm abajo del nivel subrasante para colar entonces la losa de fondo. (24)

Por lo general, la losa de fondo está constituida por concreto reforzado, con un  $f'c = 150 \text{ Kg/cm}^2$  y tiene un espesor de 15 cm. El colado de la losa debe realizarse en tramos alternados de 10.00 m. Posteriormente se cuela sobre dicha losa, el firme necesario para la fijación de la vía. (24)



## V. SOLUCION ELEVADA

## SOLUCION ELEVADA

La solución con base en una estructura elevada, similar a un puente continuo, presenta innumerables ventajas funcionales. Por ejemplo, se evita la construcción de pasos a desnivel para vehículos, no existe la necesidad de realizar pasos peatonales; no origina ninguna barrera natural ni crea fronteras entre las zonas paralelas al desarrollo del trazo; no demanda sistemas especiales de ventilación; y la circulación no se ve interrumpida aún durante las etapas de construcción, con el aprovechamiento íntegro de la vialidad existente. Sin embargo, requiere una amplitud de calles alrededor de los 40 metros, ya que se ocupa un ancho equivalente a dos carriles de circulación; asimismo se debe tener cuidado para no afectar la imagen urbana, siendo que en ocasiones se mejora el paisaje urbano con el moderno diseño de esta alternativa. Su costo es intermedio entre la solución superficial y el túnel profundo.

La solución elevada está constituida por zapatas de concreto reforzado apoyadas en pilotes de fricción, una sola hilera de columnas en sentido longitudinal, y vigas de concreto presforzado unidas por diafragmas para formar la sección. Los claros entre apoyos son de 35 a 45 m. La unión entre vigas y columnas se logra mediante apoyos de neopreno. (Fig.5.1)

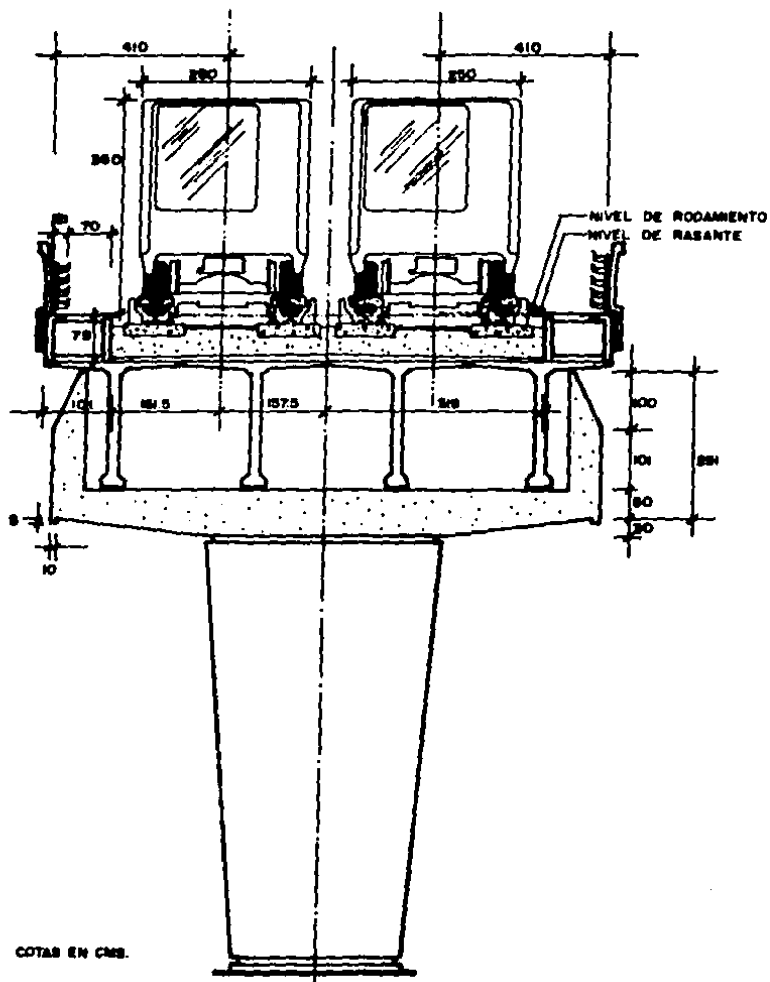


FIG. 5.1  
 SOLUCION ELEVADA  
 CORTE TRANSVERSAL

## 5.1 TRABAJOS PRELIMINARES

El espacio necesario para la libre circulación de dos trenes se analiza tomando en cuenta el galíbo dinámico del convoy en operación normal para tramos tangentes y para zonas de curva, estableciendo velocidades de operación máxima de 75 km/h y radios de curvatura mínima de 300 m de tal manera que se conserva una sección transversal uniforme a lo largo de la línea. El resultado es utilizar una entreavía de 3.15 m en tangente y 3.35 m en curva. (2)

El análisis para definir el tipo de estructura se hace desde el punto de vista del material a emplear, de la sección transversal y de los claros que podrán salvarse, considerándose la posibilidad de usar estructuras continuas o simplemente apoyadas. Sin embargo, es condición obligada utilizar una sola hilera de columnas de apoyo dada la necesidad de conservar el mayor número posible de carriles de circulación vehicular. Un caso excepcional lo constituyen los marcos, utilizados cuando por motivos de vialidad no se puede construir una sola columna.

Para hacer una comparación económica de las distintas alternativas estudiadas se toman en cuenta la cantidad de materiales necesarios para cimentación y superestructura por cada kilómetro de línea, considerando también claros desde 20 metros hasta 45 metros. Se tienen en cuenta las dificultades de tipo constructivo y los equipos que será necesario utilizar durante la obra.

Las estructuras continuas altamente hiperestáticas presentan grandes ventajas, sin embargo, para su correcto funcionamiento requieren que los apoyos no permitan hundimientos diferenciales que ocasionan esfuerzos adicionales de importancia. Para lograr ésto se requiere cimentar con pilotes de punta, lo que puede motivar que se afecte la zona adyacente a la cimentación. Además, las ventajas de la continuidad sólo son en la dirección de la línea, pues en la perpendicular la estructura es isostática.

La solución isostática es preferida en el análisis porque admite hundimientos diferenciales razonables desde el punto de vista estructural y de operación del sistema. Las dimensiones características de la estructura elegida son: claro de 35 m, y traveses TA de 2.09 m de ancho por 2.20 de peralte y TC de 2.09 x 1.70 m. (12)

Las traveses TA son Traveses de Apoyo o Portantes; las traveses TC son Traveses Centrales o Portadas, apoyadas sobre las TA, las que a su vez se apoyan en los cabezales de las columnas. Para formar la sección del tramo se utilizan cuatro traveses unidas entre sí por diafragmas transversales.

Los tramos son diseñados como libremente apoyados, lo que facilita el ataque de frentes múltiples en forma independiente; un apoyo es fijo y el otro móvil, lo que permite absorber tanto los giros y desplazamientos producidos por la presencia de las cargas dinámicas, como las otras deformaciones de la estructura producidas por cambios de temperatura y sismo.

Previo al inicio de la construcción de la obra y considerando las especificaciones técnicas, se hace necesario un análisis exhaustivo de las propiedades mecánicas del suelo a lo largo del eje de la obra.

## 5.2 PILOTES

La especificación de cimentación con base en pilotes de fricción con longitud promedio de 36 m hace necesario hincarlos con equipo especializado. Cada pilote consta de tres secciones unidas con soldadura perimetral en placas, previstas para ese propósito, mismas que garantizan la continuidad necesaria de transmisión de carga al terreno.

Los pilotes son de concreto reforzado y tienen una sección de 30 x 30 cm. La resistencia del concreto a los 28 días debe ser de  $f'c = 200$  Kg/cm<sup>2</sup>. (12)

Cada uno de ellos se analiza para soportar cargas impuestas por su transporte, izaje e hincado, y evidentemente por las condiciones de servicio.

Con respecto al manejo de los pilotes y su transporte, debe hacerse de tal modo que se eviten esfuerzos de flexión excesivos. Se recomienda ubicar los puntos de izado a 1/4 y 3/4 de la longitud del pilote.

Antes de proceder al hincado de los pilotes deberá efectuarse una perforación previa de 10 cm de diámetro, extrayendo el material, hasta 1/4 de la longitud total del pilote. Los pilotes deben estar limpios y no presentar agrietamientos o fisuras. Los pilotes dañados durante el hincado deben ser retirados y sustituidos por otros en perfecto estado. El hincado se realiza con maquinaria de impacto. Cada tramo se hinca

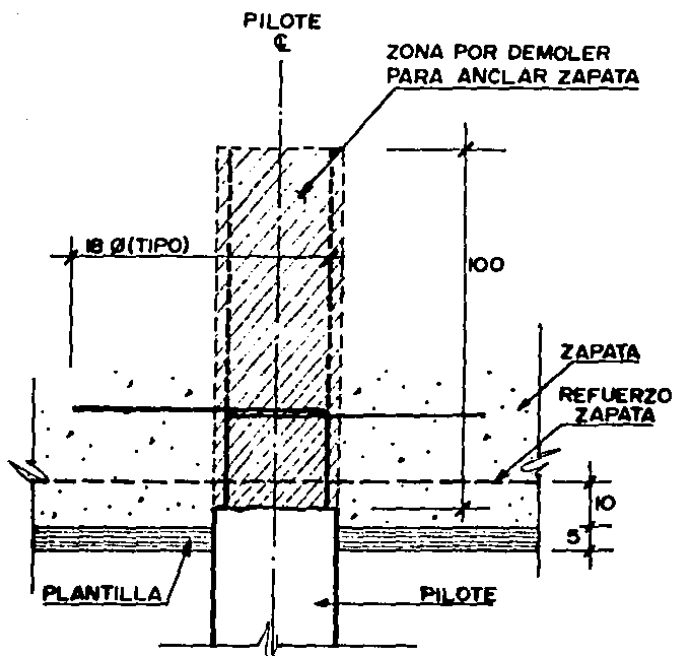
hasta dejar el extremo superior a un metro sobre el terreno natural para colocar la siguiente sección. Esta unión se resuelve soldando las placas de acero ancladas al concreto en cada uno de los extremos por unir. El pilote se hínca hasta que su extremo superior queda un metro por encima del nivel de plantilla de zapata para posteriormente efectuar el descabezado y unirlo estructuralmente a la zapata. (25) (Fig.5.2)

El número de pilotes, de 20 a 30, varía de acuerdo con su capacidad de carga y las propiedades del terreno bajo cada zapata.

La diferencia del número total de pilotes se distribuye uniformemente en las cuatro caras de la zapata dejando libre las retículas de las esquinas para alojar en ellas, en caso necesario, los pilotes de control.

Esta cimentación basada en pilotes que no se apoyan en las capas duras hace posible el acompañamiento en los movimientos diferenciales ocasionados por el hundimiento local, sin necesidad de adecuaciones o reparaciones mayores a nivel de vía.





COTAS EN CMS.

FIG. 5. 2  
CONEXION DE PILOTE A ZAPATA

### 5.3 ZAPATAS

La zapata de cimentación recibe las cargas muertas de la estructura y las originadas por el movimiento de trenes, así como las producidas por efectos sísmicos transmitiéndolas a su vez al sistema de pilotes.

La zapata se construye como una losa aligerada utilizando concreto de resistencia  $f'c = 200 \text{ Kg/cm}^2$  y acero de refuerzo con un  $f_y = 4200 \text{ Kg/cm}^2$  alta resistencia. La zapata descansa sobre una plantilla de concreto pobre de resistencia  $f'c = 100 \text{ Kg/cm}^2$ . (12)

Las dimensiones de la misma se determinan por estudios del subsuelo para controlar los hundimientos, de tal manera que se respetan las siguientes condiciones:

- a) Hundimiento total en un apoyo no mayor de 15 centímetros
- b) Hundimiento diferencial máximo entre apoyos contiguos no mayor de cuatro centímetros
- c) Esfuerzos finales inducidos por la punta de los pilotes en los estratos compresibles no mayores que la carga de preconsolidación del suelo en la profundidad de análisis

Para el claro típico de 35.0 m las zapatas de cimentación tienen dimensiones del orden de 15.00 x 8.00 m, y espesor de 2.20 m. (Fig.5.3 y Fig.5.4)

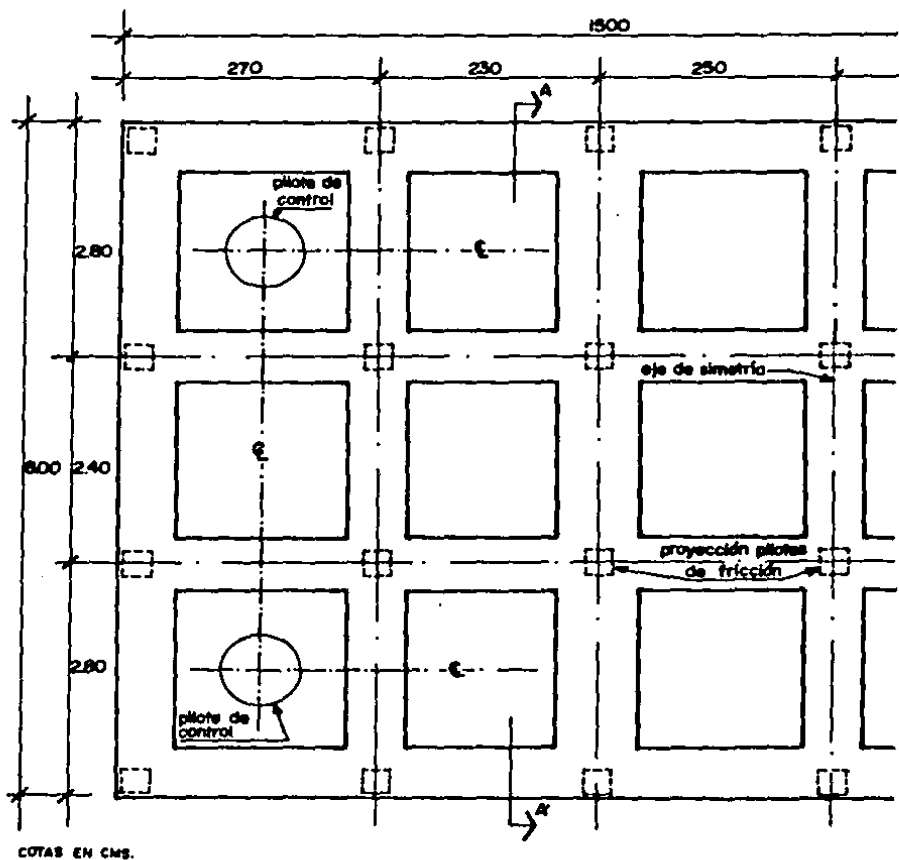
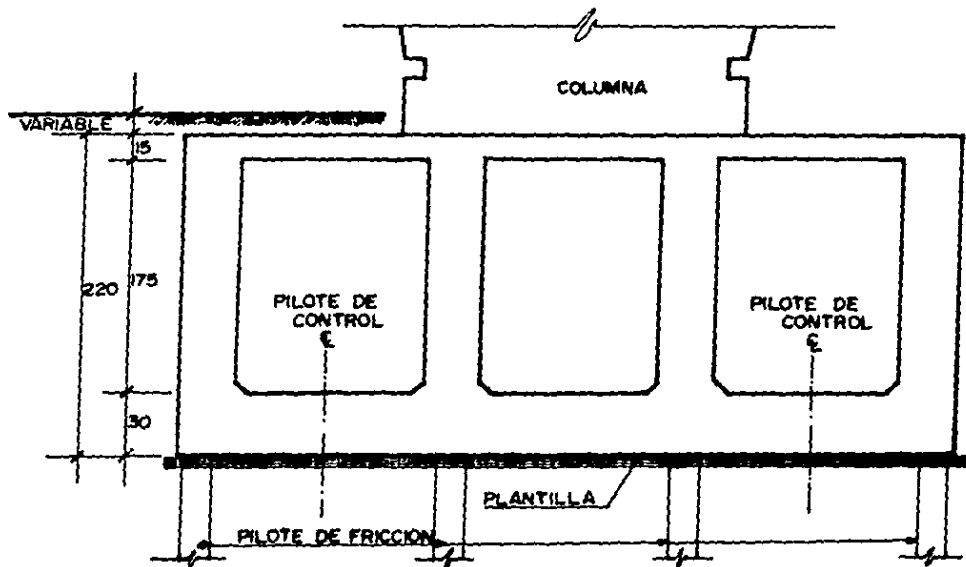


FIG. 5. 3  
 ZAPATA TIPO  
 PLANTA DE CIMENTACION



COTAS EN CMS.

FIG. 5.4  
 ZAPATA TIPO  
 CORTE A-A'

Para aligerar el peso de la zapata, esta se diseña como una losa reticulada; es decir, cuenta con casetones espaciados de tal modo que se procura que las nervaduras sobre las que descansan las columnas tengan 85 cm de ancho y las demás nervaduras tengan 60 cm. (26) Una vez coladas las zapatas, se colocan tapas precoladas de concreto.

Por indicación de proyecto en las retículas de las esquinas de cada zapata se dejan preparaciones para hincar a futuro pilotes de control. Su función será la de corregir la verticalidad de la columna en caso de existir hundimientos irregulares de las zapatas.

Tanto los pilotes como las zapatas y los dados son elementos de concreto reforzado. Dada la función y gran volumen de las zapatas es muy importante vigilar que no se produzcan juntas frías de colado. Las juntas de construcción deben ser con un acabado rugoso y deben permanecer húmedas durante 24 hrs previas al nuevo colado.

#### 5.4 COLUMNAS Y CABEZALES

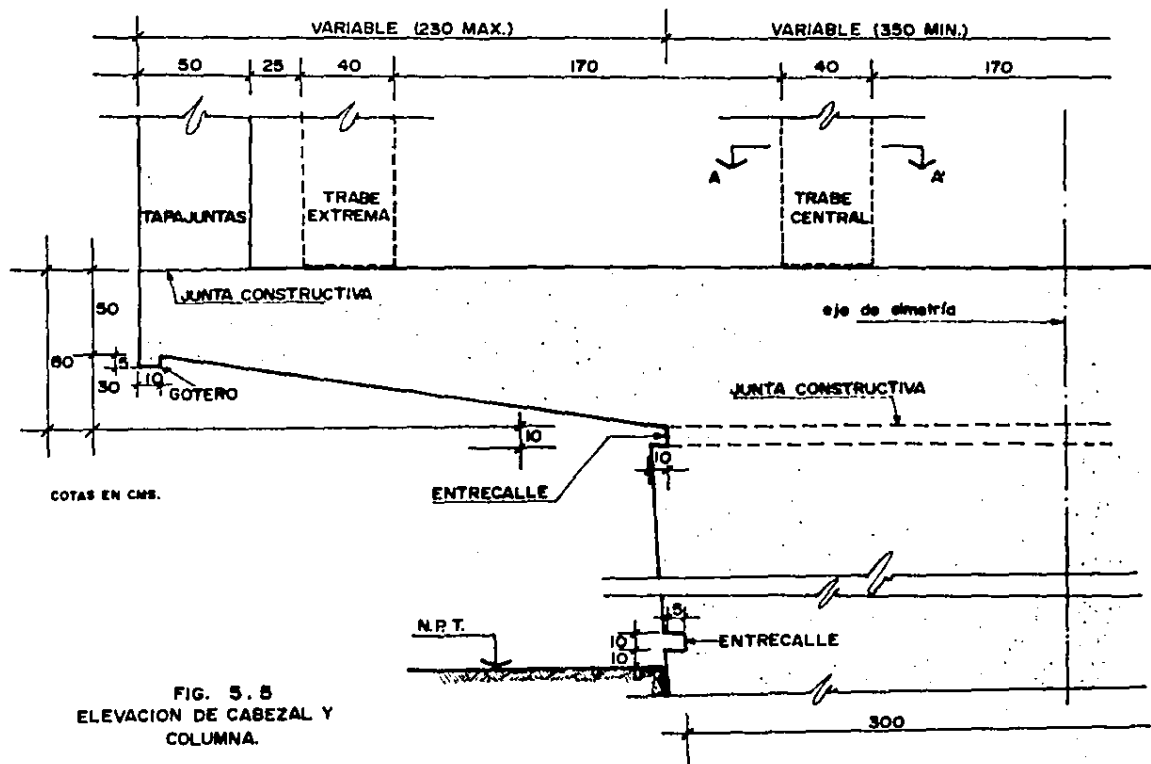
Las columnas y cabezales tienen la función de soportar las travesaños sobre las que correrá el tren, trabajan como una sola pieza, de tal modo que la columna se ancla hasta el lecho bajo de la cimentación para trabajar con ésta en la repartición de cargas a los pilotes.

Las dimensiones de la columna en el extremo superior están regidas por el espacio necesario para postensar las travesaños y por la separación entre apoyos de neopreno (orientados en dirección perpendicular a la línea). (Fig.5.5)

En la base de la columna, la sección que resulta, por requisitos de funcionamiento estructural, es de menores dimensiones que en el extremo superior de tal modo que la columna es de sección variable.

Para su construcción se utiliza concreto de  $f'c = 350 \text{ Kg/cm}^2$ ; es decir, concreto de alta resistencia, y acero de grado duro  $f_y = 4200 \text{ Kg/cm}^2$ .(12) La alta resistencia exigida al concreto responde a la necesidad de soportar las cargas impuestas por las travesaños y los vagones del tren, principalmente.

Para el análisis y diseño de las columnas se les considera como péndulo invertido, ya que más del 50% de su masa está concentrada en el extremo superior. Se toma como sección crítica la del desplante de la



columna que además de ser la de menores dimensiones es sobre la que actúan los mayores efectos de flexocompresión.

Para identificar y aislar fallas menores o agrietamientos en la columna se construye una entrecalle en la base de la columna y una entrecalle en el extremo superior, debajo del cabezal. Las entrecalles son ranuras de 10 cm de altura y 5 cm de profundidad y se hacen en las cuatro caras de la columna. Trabajan como juntas de contracción. La entrecalle inferior tiene también la ventaja de servir como referencia para los niveles de viabilidad, pues ésta deberá ubicarse por debajo de la entrecalle. (Fig.5.5)

Como resultado, el dimensionamiento de columnas es de 3.00 x 0.70 m en la entrecalle inferior y de 3.50 x 0.70 en la superior. En consecuencia, la sección de la columna en la base es de 3.10 x 0.80 m y en la corona es de 3.60 x 0.80 m. (27) (Fig.5.5)

Los cabezales funcionan con las columnas para soportar las cuatro trabes TA que forman la sección de tramo. Cada cabezal está ligado estructuralmente a la columna ya que el armado de ésta se continúa hacia arriba para que a su vez forme parte del refuerzo del cabezal. Se cuela después la columna existiendo entre ellos una junta de construcción de acabado rugoso y humedecida 24 hrs antes.

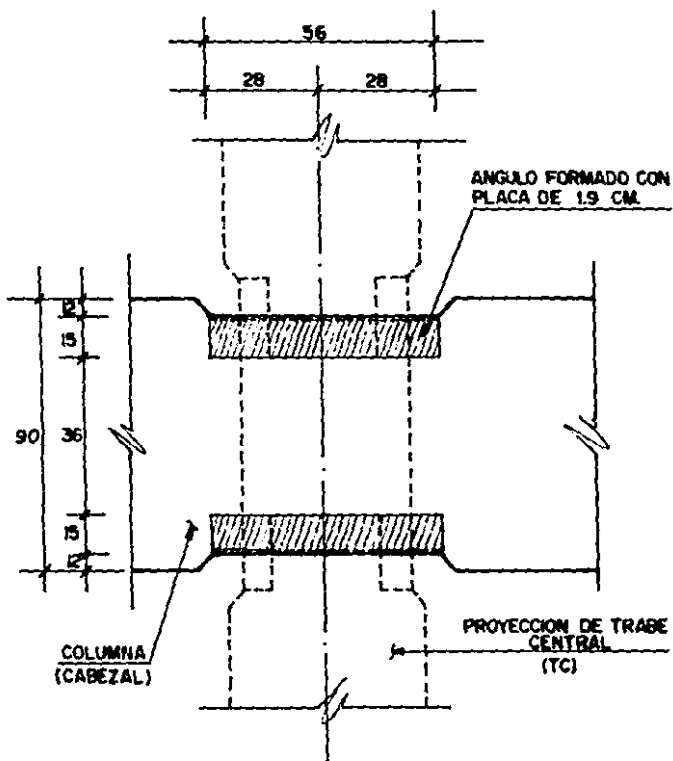
Las dimensiones de los cabezales son: 90 cm de ancho (20 más que la columna en la entrecalle superior), 8.10 m de longitud (variable) y un



espesor que disminuye de 80 cm en la parte central a 50 cm en sus extremos. (27) (Fig.5.5)

La sección del cabezal que recibe la trabe portante cuenta con dos ángulos formados por placas de acero de 19 mm de espesor. Cada placa se localiza a 12 cm del extremo del cabezal, la placa horizontal mide 56 x 15 cm y la placa vertical mide 56 x 20 cm. Se sueldan a 45° con arco eléctrico y se utiliza acero de  $f_y = 2530 \text{ Kg/cm}^2$ . (27) (Fig.5.6)

Las columnas como elementos de apoyo visibles exigen concretos aparentes. La cimbra especialmente diseñada es una estructura perimetral que toma las presiones del concreto durante el colado, dando como resultado una calidad y magnífica apariencia de las columnas. Se utilizan moldes metálicos recuperables, lo que permite optimizar el proceso constructivo en tiempos y costos.



COTAS EN CMS.

FIG. 5. 6  
CABEZAL. CORTE A-A'

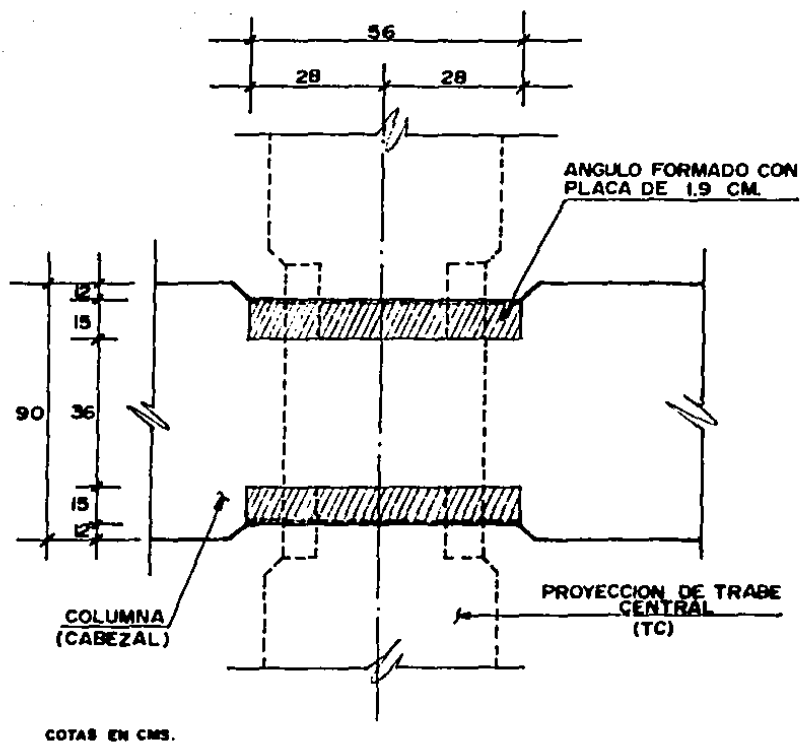


FIG. 5. 6  
CABEZAL. CORTE A-A'

## 5.5 TRABES

La superestructura está resuelta con base en traveses presforzadas de dos tipos: TA y TC. Las traveses TA son Traveses de Apoyo o Portantes; las traveses TC son Traveses Centrales o Portadas. Las TA se apoyan en los cabezales de las columnas. Las TC se apoyan en las TA, un apoyo es fijo y el otro es móvil.

Las traveses TA y TC son presforzadas, construidas con concreto de alta resistencia de  $f'c = 350 \text{ Kg/cm}^2$  y acero de grado duro de  $f_y = 4200 \text{ Kg/cm}^2$  y de  $f_y = 19\,000 \text{ Kg/cm}^2$  para el presfuerzo. (12) Tanto las TA como las TC cuentan con ductos transversales cuya función es permitir el paso de los torones para postensar el sistema. Los torones a usarse tienen un área de  $1.03 \text{ cm}^2$  y se tensan a  $13,700 \text{ Kg}$  cada uno. La aplicación de este presfuerzo en la estructura se realiza simultáneamente por los extremos.

Las traveses TA tienen una sección variable de  $2.09 \text{ m}$  de ancho x  $2.20$  de peralte en la parte central y  $2.09 \times 1.70$  en los extremos. Su longitud es de  $20.66 \text{ m}$  incluyendo dentellones inferiores en cada extremo para el acoplamiento con la trabe TC. (28) (Fig.5.7 y Fig.5.8)

Las traveses TC tienen una sección de  $2.09 \text{ m}$  de ancho x  $1.70 \text{ m}$  de peralte. Su longitud es de  $14.50 \text{ m}$  incluidos dentellones superiores para el traslape con las traveses TA. (28) (Fig.5.9 y Fig.5.10)

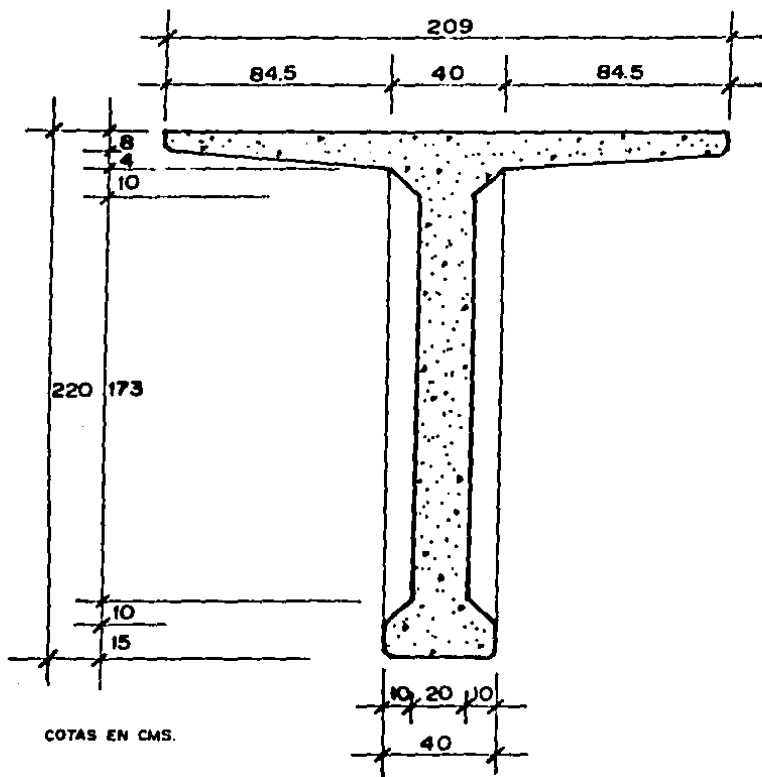


FIG. 5.7  
 TRABE DE APOYO (TA)  
 CORTE TRANSVERSAL

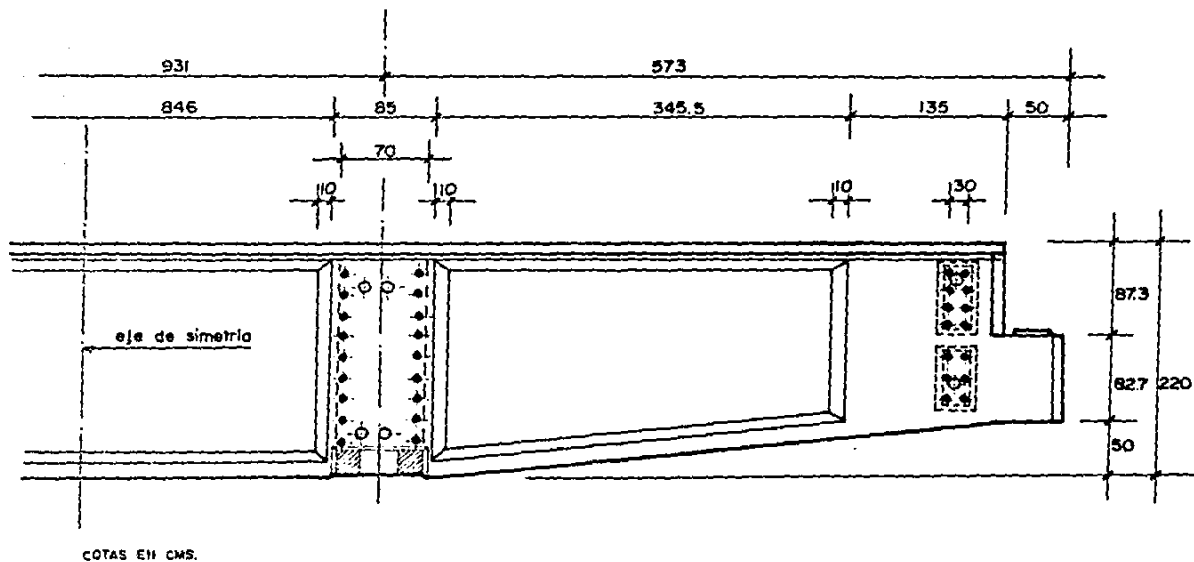


FIG. 5. 8  
 TRABE DE APOYO (TA)  
 VISTA LATERAL

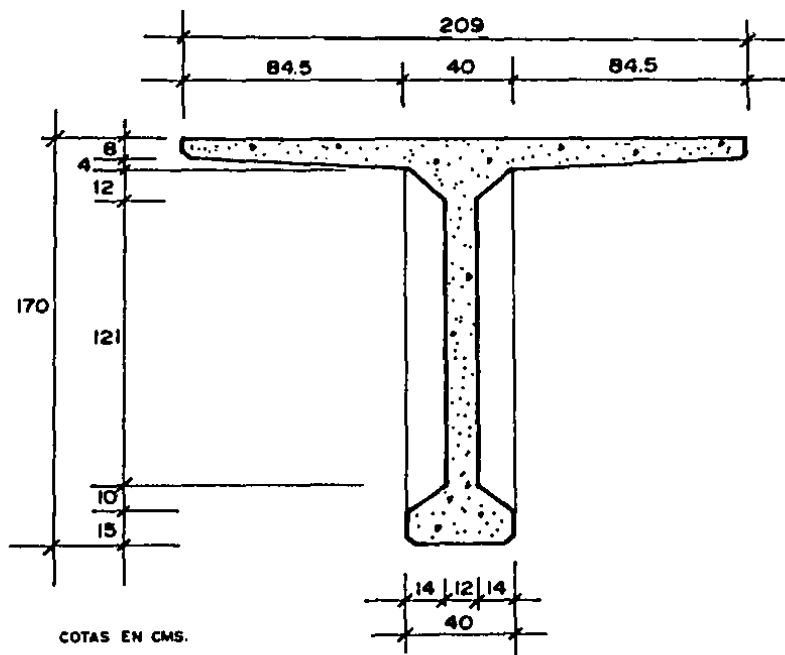


FIG. 5 . 9  
 TRABE CENTRAL (TC)  
 CORTE TRANSVERSAL

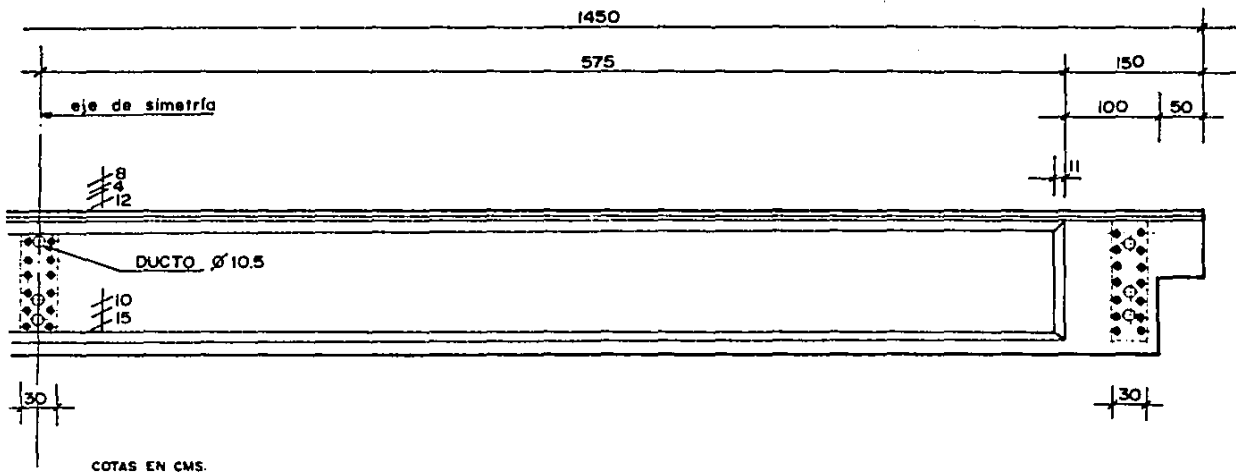


FIG. 5.10  
 TRABE CENTRAL (TC)  
 VISTA LATERAL



En cuanto a la colocación de las trabes sobre los cabezales, se emplazan cuatro trabes TA de modo que las trabes centrales queden a distancias simétricas del eje de la columna. Las secciones de la trabe que se apoyan en el cabezal cuentan con placas metálicas para soldarse con las existentes en el cabezal. Se utiliza acero de  $f_y = 2350 \text{ Kg/cm}^2$  soldado con arco eléctrico. Colocadas las cuatro trabes se pasan los torones a través de los ductos destinados al postensado y se cuelan los diafragmas y un murete a cada extremo del cabezal para contener el concreto. Para colar este murete se requiere que el cabezal tenga una junta constructiva de acabado rugoso y humedecida 24 hrs previas al colado. Finalmente se tensan los torones a 13,000 Kg cada uno.

Las trabes se reciben sobre apoyos de neopreno, uno rígido horizontalmente para restringir los desplazamientos y el otro flexible, equivalente a un apoyo móvil. Para restringir los movimientos de la trabe en dirección perpendicular a la línea, y para disminuir el cortante, se usa un saliente que encaja en un hueco dejado previamente en la columna.

Una alternativa constructiva para la superestructura del tren elevado es utilizar sección transversal de trabes de 35 m de claro en tramos libremente apoyados. Las trabes son coladas in situ y trabajan como una pieza monolítica. El elemento está compuesto de tres nervaduras de ancho variable unidas entre sí por dos diafragmas extremos y dos intermedios; el peralte total es 2.20. Las trabes son construidas

con concreto de alta resistencia de  $f'c = 350 \text{ Kg/cm}^2$  y son postensadas en dos etapas para evitar deformaciones en el concreto. (11)

Las traveses se reciben sobre apoyos de neopreno que funcionan en forma idéntica a los apoyos en traveses precoladas.

Dadas las características de los diversos tramos de la línea, se utilizan dos tipos de obra falsa; una a base de andamios y la otra a base de estructuras metálicas. La primera a base de andamios, tiene por objeto cimbrar elementos, principalmente en curvas y ocasionalmente en claros cortos. La segunda, formada por estructuras metálicas, denominadas jumbos, de 30 m de longitud reduce tiempos y facilita el movimiento transversal para cimbrado y descimbrado. La cimbra de contacto integrada a soportería metálica también exige condiciones de concreto aparente. Tanto la jumbo como la cimbra de contacto son una sola unidad que se desplaza simultáneamente de tramo en tramo.

En claros mayores de 35 m se utilizan traveses metálicos construidos a pie de obra cuando resulta imposible o de graves consecuencias desviar la enorme circulación de vehículos, como en el caso de un cruce.

Esta alternativa presenta algunas ventajas estructurales, como proporcionar mayor rigidez al tramo. Sin embargo, la solución basada en las traveses precoladas es más ventajosa, pues implica un gran ahorro en tiempo y costo.

## 5.6 MURETES DE CONTENCIÓN

Una vez que se han montado las traveses y se han postensado y colado los diafragmas, se procede a colar sobre éstas un firme de compresión de 8 cm de espesor. En la unión de trabe con trabe en apoyos móviles se utiliza junta Selotex para no impedir la movilidad de éstos. (1)

Al mismo tiempo se dejan listas las instalaciones electromecánicas y se preparan los ductos para las bajadas de aguas pluviales. Se coloca una contención para el balasto y parapetos de sujeción para los muretes de contención de la estructura. Los ductos formados por estos elementos alojan tanto las charolas como los mandos eléctricos. El balasto se coloca sobre el firme y sobre éste las vías del tren. Los muretes de contención se sujetan al parapeto de la estructura y su función es alojar señalamientos, proteger la vía y dar una sensación de seguridad a los usuarios del tren elevado.

Para proteger al acero de la estructura de la corrosión ocasionada por corrientes vagabundas inherentes al funcionamiento de los trenes se coloca en la losa superior una malla conectada a tierra física.

## VI. REGENERACION URBANA Y OBRAS COMPLEMENTARIAS

REGENERACION URBANA Y  
OBRAS COMPLEMENTARIAS

El mejoramiento de la imagen urbana a lo largo de las líneas del tren urbano se analiza con detenimiento a causa de la importancia del desarrollo de los espacios urbanos.

La implantación de líneas de tren exigen la presencia de obras complementarias como son:

- Areas de acceso a las estaciones con señalización adecuada para los usuarios
- Estacionamientos para vehículos particulares
- Paraderos en las estaciones para autobuses y taxis

## 6.1 REGENERACION URBANA

El tren satisface las necesidades de transporte pero también constituye una estructura vial y urbana que abarca el aspecto constructivo, funcional y urbanístico. Esto produce una imagen de crecimiento y mejoramiento de las ciudades, implicando una transformación del aspecto urbano y en la estructura vial en zonas desfavorecidas con el paso de los años. (29)

El proyecto de regeneración urbana del tren pretende satisfacer dos objetivos:

- Elevar el nivel socio-económico de las zonas de influencia de las estaciones y así incrementar la plusvalía de la tierra.
- Permitir la regularización de la tenencia de la tierra y la integración de comunidades y zonas al resto de la ciudad en lugares donde el crecimiento urbano se ha presentado en forma desordenada.

A1 mismo tiempo, se evita la modificación de las características fundamentales de las zonas en las que se ubican las estaciones del tren urbano.

Para solucionar problemas de tránsito, como los congestionamientos en vialidades importantes, se construyen estacionamientos para vehículos particulares en las áreas de acceso a las estaciones. Esta medida busca disminuir el uso de automóviles particulares.

Las facilidades, los servicios y el aspecto externo de cada estación en particular son afectados por factores basados en su ubicación. Algunos de estos factores son: uso del suelo; actividad económica; estado de las construcciones afectadas para determinar su costo; origen y destino de los habitantes; rutas de transporte; ubicación de sitios para taxis; vialidades; áreas verdes y alumbrado existente.

## 6.2 OBRAS COMPLEMENTARIAS

El acceso a las estaciones del tren, tanto para peatones como para vehículos, justifican la elaboración de proyectos de obra exterior para cada estación que solucionen espacios seguros y cómodos para los usuarios. El proyecto incluye el apeaje de autobuses urbanos y suburbanos y áreas de estacionamiento para vehículos particulares.

A su vez, las estaciones funcionan como moduladores de los espacios exteriores, razón por la cual se debe prestar atención a los proyectos desarrollados para cada una de ellas.

Para el desarrollo de cada proyecto se utiliza la siguiente metodología: (2)

1.- Analizar los planos arquitectónicos y con ellos conjuntar las características de las zonas con las de proyecto de la línea en general. Los planos consultados son:

- 1.A. Planos de Escaleras de Acceso
- 1.B. Niveles
- 1.C. Conjunto
- 1.D. Andén y Vestíbulo
- 1.E. Rejillas de Ventilación
- 1.F. Vialidad
- 1.G. Topográficos



## 1.H. Cortes Generales

### 1.I. Rutas de Transporte

### 1.J. Uso del Suelo

2.- Se determinan los alcances de cada proyecto y se enumeran las posibles características y materiales. Los elementos de aspecto técnico considerados son entre otros: la disponibilidad del espacio para el proyecto de cada estación, el funcionamiento, dimensionamiento de la caseta o escaleras de acceso y los elementos arquitectónicos disponibles con lo que resulta la obra exterior de las estaciones.

3.- Se define un programa arquitectónico, basado en el análisis de los puntos 1 y 2.

3.A. Plazas de Acceso: Ubicadas principalmente cerca de las escaleras o casetas de acceso. Su función es distribuir y encausar los movimientos direccionales de los peatones.

3.B. Plazas de Estar: Se ubican cuando el espacio lo permite en las áreas de circulación como áreas de esparcimiento y descanso.

3.C. Andadores: Surgen como el resultado del análisis de las direcciones de los peatones.

3.D. Áreas Jardinadas: Las áreas jardinadas se localizan en los espacios que permiten su habilitación como lugares agradables a la vista y como remates visuales o separadores de áreas.

3.E. Paraderos Terminales: Se instalan en estaciones terminales. Tienen una capacidad de almacenamiento considerada con base en las líneas de transporte que ahí lleguen.

3.F. Bahías Paraderos: Se proyectan como solución a las paradas en los recorridos de las rutas que solo pasen por ahí.

3.G. Estacionamientos: Se plantean como apoyo a los proyectos de vialidades de acuerdo con la actividad económica que domine en la zona.

3.H. Diseño Especial de Lumbreras: Las lumbreras cuentan con elementos ornamentales para cubrir ductos y maquinaria y no presentar un aspecto externo desagradable.

3.I. Pasos Peatonales: Los pasos peatonales se construyen cuando se presentan vías con gran afluencia de vehículos, los que generalmente circulan a altas velocidades, o cuando existen barreras físicas. Los pasos son de tipo elevado o a desnivel. Su ubicación debe garantizar la seguridad de los peatones y su separación no debe ser mayor de 500 metros.

4.- Se plantea un primer anteproyecto delimitando las zonas y los elementos, así como conjugando el funcionamiento con la estética. Se analiza la ubicación de los túneles y los niveles de la estación para ubicar correctamente los jardines. El análisis se lleva a cabo ya que en zonas donde el nivel de estación es muy cercano al nivel de plaza, es posible que se presenten filtraciones.

- 5.- Se revisan los planos de las instalaciones especiales y de infraestructura básica, y se adecúan al primer anteproyecto.
- 6.- Se determinan los materiales y sistemas constructivos que se utilizarán en plazas y áreas jardinadas cuando se haga el planteamiento del conjunto.
- 7.- Se elabora el proyecto ejecutivo con detalles y cortes y se diseña el mobiliario urbano, así como la señalización necesaria que contendrá el proyecto de obra exterior.
- 8.- Si existe la necesidad de diseñar muros en colindancias o remates de áreas afectadas, se llevan a cabo los levantamientos en campo. y de acuerdo con el funcionamiento de la zona se hace el proyecto.

Como conclusiones de este capítulo se puede decir que es importante lograr que el conjunto de obra exterior sea la unión armónica y funcional de todos los elementos que la conforman y no dejarlo confinado al área de acceso a la estación. Se pretende analizar el área en que influye ésta, dando perspectivas de desarrollo. En consecuencia, las estaciones cuentan con elementos atractivos que invitan al peatón a hacer uso del servicio, lo que a su vez evita en parte el incremento en el uso del automóvil. Esto contribuye para que las obras viales y los planes de transporte masivo operen en forma óptima.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El Tren Urbano es, como medio de transporte, el sistema que ofrece las condiciones mas favorables en cuanto al número de pasajeros transportados, seguridad, rapidez y comodidad.

Como consecuencia, se considera la columna vertebral del sistema de transporte colectivo y los demás medios de transporte deben complementario.

Una pregunta clave es cual solución constructiva es la mejor, que tipo de vía conviene construir. Es difícil hablar de una única mejor solución para todos los casos y por lo tanto sería inconveniente e incorrecto recomendar el empleo de una u otra para todas las situaciones dadas. Al contrario, la elección del tipo de vía a emplearse debe basarse en la mejor adecuación a las condiciones del problema y a las restricciones que éste dicta. Factores como costo, tiempo, espacio, obras inducidas, deben tomarse en cuenta para tomar una decisión.

A su vez, cada tipo de solución presenta ventajas e inconvenientes con respecto a las otras. Una breve comparación de las soluciones tratadas en esta tesis -superficial, subterránea en cajón, subterránea en túnel y elevada- permite comprobar este punto.

La solución superficial es, por su obra civil, la más económica, pero es preciso contar con una amplitud vial no menor de 60 metros. Además, crea una barrera física para el tránsito, para los peatones y para el desarrollo urbano, lo que se soluciona con un gran número de pasos a desnivel y puentes peatonales.

La solución subterránea en cajón no necesita pasos a desnivel porque no interfiere con el tránsito. Sin embargo, es necesario llevar a cabo obras inducidas para librar las interferencias con las redes municipales, lo cual se traduce en costos. El proceso constructivo toma más tiempo.

La solución subterránea en túnel no interfiere con redes ni instalaciones municipales, la amplitud de calles no es un factor limitante y provoca un mínimo de molestias al tránsito y peatones durante su construcción. Por otro lado, esta solución exige una mayor inversión monetaria.

La solución elevada ocupa calles de unos 40 metros de amplitud, pero no obstruye en forma considerable las redes urbanas transversales ni las instalaciones municipales. Por su fisonomía es importante no descuidar el impacto que esta obra causa sobre el paisaje urbano. Su costo es intermedio al que tienen las soluciones superficial y en túnel.

La elección del tipo de vía debe hacerse analizando en cada caso particular una serie de factores clave, mencionados anteriormente, para ver como se adecuaría la solución estudiada a las condiciones del

problema y así poder comparar las alternativas entre sí. Condición indispensable para tomar una decisión es ponderar todas las circunstancias relacionadas con el estudio, ya que en más de un caso puede resultar que un sólo factor impida la construcción de la línea como el resto del estudio pudiera sugerir.

Con objeto de optimizar los trabajos de obra civil del tren urbano, se expone a continuación una serie de recomendaciones y consejos prácticos para el constructor, el supervisor y el responsable del proyecto.

El trazo de la línea debe contar con estaciones suficientes, estratégicamente ubicadas y adecuadamente separadas, evitando paradas innecesarias que reduzcan la eficiencia y rapidez del servicio. La ubicación de las estaciones debe permitir que se intercepten corrientes alimentadoras de medios de superficie así como poder conectar puntos importantes de tipo habitacional, comercial, recreativo, religioso, de abasto y otros.

En el tiempo que duren los trabajos de construcción es importante colocar un sistema de señalización para el tránsito y el público en general, además de la señalización adecuada para los trabajadores del tren. Lo primero busca minimizar incomodidades al público, agilizar la circulación de vehículos por calles alternas, prevenir sobre zanjas abiertas, cables eléctricos, salida de camiones y todo aquello que resultar peligroso para peatones y vehículos. Dentro de la obra hay que colocar señalamiento para los mismos trabajadores indicando la presencia

de situaciones de peligro, espacios que deben quedar libres, cruces de camiones, grúas y maquinaria de construcción. Otras señales y letreros y el uso de pintura de colores específicos identifican la obra, funcionan como elemento de ornato y proporcionan información a trabajadores y público.

En numerosas ocasiones, plantillas, muros, brocales y otros elementos constructivos se diseñan para trabajar a determinados esfuerzos pero se construyen en forma "sobrada". Esto se debe en gran parte al descuido de ciertas normas elementales del proceso constructivo. Por ejemplo, el arrojar la varilla de acero al fondo de una excavación en la que la plantilla no fue calculada para resistir el impacto provoca que se tengan que colar plantillas con resistencias superiores a las especificadas; o el aplicar más presión de la indicada a los gatos hidráulicos de los brocales en excavaciones a cielo abierto y en túneles genera en los muros de concreto y en las paredes del terreno presiones mayores a las permitidas, por lo que hay reforzar los muros aún más y el caso contrario, en el que la presión no es la suficiente para aligerar el trabajo de los muros y éstos se ven obligados a cargar cuando aún no han alcanzado su resistencia de proyecto. Estos defectos se traducen en costos por lo que es lógico recomendar que se tenga cuidado con los mismos.

Ya que el concreto es el elemento clave para la construcción del tren en todas las soluciones presentadas en esta tesis, es obligatorio prestarle la atención que se merece. La mezcla debe estar hecha con



materiales sanos que cumplan las especificaciones y la dosificación debe garantizar resistencias no menores a las requeridas. Es importante no dejarlo caer durante la colocación para evitar disgregación, así como emplear vibradores cuando sea posible. Por último, no hay que descuidar el curado para evitar agrietamientos por resequedad.

El constructor, los responsables de la obra y las autoridades, no deben limitarse exclusivamente a realizar los trabajos de obra civil. La construcción del tren urbano debe también abarcar aspectos sociales, por lo que hay que procurar, hasta donde sea posible, mejorar las condiciones urbanas existentes y embellecer el paisaje por el que pasan las líneas del tren.

No existen leyes universales en la construcción. Hay normas y criterios definidos, establecidos con base en la investigación y en la experiencia, cuya función es guiar al ingeniero e informarle sobre las técnicas más avanzadas aplicables al problema al que se enfrenta. Por su naturaleza, estas normas son válidas en infinidad de casos, siempre y cuando el ingeniero las pondere para cada caso en particular. Es aquí donde se manifiesta la labor de la Ingeniería: en el análisis y razonamiento de un problema para poder elegir la mejor alternativa. Y para esto se requiere el criterio que proporciona el estudio de la Ingeniería, y en particular, de la Ingeniería Civil.

APENDICE "A"

LODO BENTONITICO

## L O D O   B E N T O N I T I C O

Se utiliza el lodo tixotrópico en la solución subterránea en cajón para estabilizar los tableros excavados que alojarán los muros tablaestaca y evitar caídas de material.

El lodo empleado es una suspensión de bentonita sódica en agua, en proporción agua-bentonita 12:1 a 15:1 en peso.

Tixotropía es la propiedad de un material de presentar resistencia al corte cuando está en reposo -actuando como gel-, pero no presentaría cuando está en movimiento (al agitarlo o bombearlo) -actuando como un sol-. El paso de gel a sol es reversible.

El lodo debe tener una densidad mayor que la del agua para contrarrestar la presión hidrostática. El nivel del lodo en la excavación debe ser superior al nivel freático con objeto de generar un gradiente de presiones sobre las paredes para contribuir a su estabilidad. El nivel máximo del lodo será de 0.50 m a partir del nivel del terreno.

A su vez, el gradiente provoca infiltraciones del lodo en las paredes, por lo que se debe controlar la proporción agua-coloides para minimizarlas.

Por el proceso de infiltración del lodo en las paredes se origina una membrana impermeable y resistente en la frontera lodo-suelo, llamada cake. Esta membrana está constituida por una película de pequeño espesor de moléculas de lodo y junto con la presión hidrostática del lodo, contribuye a estabilizar las paredes de la excavación. Si el cake no se forma o se forma gruesa pero poco resistente, el lodo penetrará a través de los poros del suelo y no se alcanzará la estabilidad deseada. Pequeñas variaciones en la dosificación del lodo y contaminación por arena u otras partículas sólidas no coloidales ocasionan cambios substanciales en las características del cake.

Siempre que sea posible, el lodo bentonítico debe cumplir con las siguientes propiedades físicas y mecánicas: (B)

1. Contenido de arena	Máximo 3%
2. Densidad	1.03-1.06 gr/cm <sup>3</sup>
3. Volumen de agua filtrada	Máximo 20 cm <sup>3</sup>
4. Espesor de la membrana (cake)	1.0-1.5 milímetros
5. P.H.	7-10
6. Límite de fluencia	5-25 lb/100 ft <sup>2</sup> .
7. Viscosidad Marsh	10-15 centipoises

Las propiedades de los lodos se verifican en laboratorio para determinar la relación agua-arcilla inicial y también se lleva un monitoreo periódico de sus propiedades. El número de usos de un lodo está en función de dichas propiedades.

El lodo debe ser una suspensión estable, sin sedimentación o floculación de las partículas de bentonita. Debe poderse agregar material inerte más pesado, como la barita, sin sedimentarse. La barita se utiliza para proporcionar mayor densidad al lodo cuando el tablero está próximo a construcciones o sobrecargas que ejerzan sobre las paredes de la excavación esfuerzo de corte y compresión mayores que los originados por peso propio.

Se debe evitar el empleo de bentonita cálcica, ya que reacciona con el concreto.

La preparación del lodo se realiza en un mezclador de chiflón, de donde se bombea a los recipientes de almacenamiento y de ahí a las zanjas con una bomba centrífuga para lodos.

El lodo podrá ser recirculado por desarenado o regeneración mientras sus propiedades estén dentro de especificaciones. La recirculación se lleva a cabo en la planta central de fabricación y almacenamiento o en una batería portátil de hidrociclones, pudiéndose recircular localmente de una zanja a otra.

Durante la excavación cada zanja se lleva un control cualitativo y cuantitativo del lodo bentonítico y sus propiedades. El primero se efectúa por medio de pruebas que señalan si las propiedades del lodo satisfacen los límites especificados. Se realizan al menos dos pruebas de lodo en cada tablero. Una al vaciar el lodo en la zanja antes de iniciar las excavaciones y la otra inmediatamente antes de introducir la

parrilla de refuerzo. Cuando los resultados obtenidos indiquen que alguna propiedad no cumpla las especificaciones el lodo deberá recircularse desde la zanja hasta la batería de los hidrociclones desarenadores.

La cantidad de lodo inyectada se monitorea y compara con la cantidad calculada para el volumen excavado. En caso de existir fugas se anotan sus características, se suspende el suministro e inyección y se aplaza el colado del muro hasta solucionar la fuga.

APENDICE "B"  
CONCRETO LANZADO

## C O N C R E T O      L A N Z A D O

El concreto lanzado es el producto formado por la mezcla de cemento Portland, grava, arena y aditivos acelerantes de fraguado, colocado en las paredes de la excavación con máquinas especiales llamadas lanzadoras. El concreto se aplica utilizando aire comprimido inyectado a la máquina y a través de una manguera y chiflón se inyecta el agua a la mezcla.

El éxito del concreto lanzado se puede atribuir a su aplicación inmediata, adquisición temprana de resistencia y la flexibilidad suficiente que permite una eficiente interacción terreno-soporte. Si cumple exitosamente estas condiciones entonces puede suplir otros tipos de soportes más costosos y más difíciles de colocar.

La función principal del concreto lanzado es mantener la estabilidad de la excavación hasta que se desarrolle en el terreno una distribución de esfuerzos que quede bajo el valor de la resistencia del propio suelo. Sirve como revestimiento del túnel proporcionándole estabilidad y evitando la caída de materiales sueltos en su interior.

La calidad de una mezcla de concreto lanzado depende de su relación agua-cemento, el tamaño y graduación de los agregados, el tipo de cemento, los aditivos y la aplicación adecuada.



El tamaño máximo de agregados es 3/4". A su vez, las arenas deben constituir menos del 60% de la mezcla de agregados.

Los aditivos acelerantes de fraguado son adecuados para aplicar la mezcla en superficies húmedas y aún sobre filtraciones, pero reducen la resistencia final del concreto.

El aditivo empleado debe garantizar en el cemento una resistencia de 90 Kg/cm<sup>2</sup> a las 24 horas. Asimismo, debe satisfacer los siguientes requisitos de la norma ASTM C-191:

- El tiempo de fraguado inicial (máximo) será 3 minutos
- El tiempo de fraguado final (máximo) será 12 minutos
- La resistencia a la compresión simple de la pasta, a una edad de 8 horas, en cubos de 5 cm de lado será 60 Kg/cm<sup>2</sup> (mínimo). (30)

Se utiliza el procedimiento de mezclado en seco: se mezclan perfectamente el cemento, los agregados y el aditivo; se coloca la mezcla en un recipiente y se le conduce neumáticamente a través de una manguera hasta la boquilla de expulsión, en donde se añade el agua antes de lanzar la mezcla.

La superficie sobre la que se aplicará el concreto lanzado debe estar húmeda y libre de polvo para facilitar la adhesión del concreto.

La boquilla debe estar a una distancia de 1.0 a 1.5 m de la superficie de aplicación en posición normal con respecto a la misma. El ángulo y la distancia de lanzado se pueden variar para que el rebote

(desperdicio) del concreto sea el menor posible.

Si las condiciones de humedad alrededor del concreto lanzado son adecuadas no es necesario curarlo, pero si las condiciones son secas se debe curar con agua 6 horas después de haber sido lanzado y durante un período no menor de 4 días.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. NOREÑA CASADO, CASTAÑEDA HARVAEZ: Planeación y Construcción en Líneas de Metro; CIC Ingeniería Civil, 231, 1985
2. DEPARTAMENTO DEL DISTRITO FEDERAL: Covitur 77-82; México, 1982
3. BABBITT-BAUMANN: Alcantarillado y Tratamiento de Aguas Negras; CECSA
4. Normas de Proyecto para Obras de Alcantarillado Sanitario en Localidades Urbanas de la República Mexicana
5. ISTME: Procedimiento Constructivo del Tramo Cola El Rosario Comprendido entre el Km. 1+376.228 y el Km. 2+057.590 de la Línea 6 del Metro; México, 1981
6. ISTME: Procedimiento Constructivo del Tramo El Rosario-Tezozomoc Comprendido entre el Km. 2+207.590 al 3+465.014 de la Línea 6 del Metro; México, 1978
7. ESTRADA, VIEITEZ, TAMEZ: Mexico City Metro; ISTME, 1969
8. LEAL KURI, Jacinto: Procedimiento Constructivo para la Ampliación de la Línea 3 Sur del Metropolitano de la Ciudad de México en el Subtramo: Dr. Márquez-Estación Centro Médico; Tesis Profesional, UNAM, 1980
9. ISTME: Procedimiento Constructivo del Tramo Azcapotzalco-Ferrería en el Subtramo Comprendido entre los Kms. 4+747.067 y 6+116.820; México, 1980
10. ISTME: Especificaciones para el Procedimiento Constructivo de la Estación Azcapotzalco Correspondiente a la Segunda Alternativa y a los Frentes de Avance "A" y "C"; México, 1982
11. MUÑOZCANO, Guillermo: Los Prefabricados en el Metro de la Ciudad de México; ISTME, 1985
12. DIAZ CANALES, Manuel: Un Metro de 111 Kilometros; Obras, 116, 1982
13. ISTME: Especificaciones para la Excavación y Construcción de la Lumbera TJ-B, Correspondiente a la Sección en Túnel del Tramo Tacuba - San Joaquín de la Línea 7 del Metro; México, 1981

14. ISTME: Especificación para la Excavación y Construcción de la Lumbraera CJ-1, Ubicada en la Cuchilla Formada por la Calle de Prolongación Golfo de Tehuantepec y los Peines de Ferrocarriles Nacionales de México que dan Servicio a la Refinería "18 de Marzo" (Cadenamiento 7+ 91.759) Correspondiente al Tramo Cola Tacuba de la Línea 7 del Metro; México, 1983
15. ISTME: Especificación para la Excavación y Construcción de la Lumbraera CT-2 Ubicada en las Calles Golfo de Mexico y Calzada México Tacuba (Cadenamiento 8+562.377) Correspondiente al Tramo Cola Tacuba de de la Línea 7 del Metro; México, 1981
16. ISTME: Procedimiento Constructivo para el Túnel que Unirá la Lumbraera CT-2 con la Cabecera Norte de la Estación Tacuba Línea 7 del Cad. 8+568.8 al Cad. 8+573.2 Aproximadamente; México, 1981
17. ISTME: Especificaciones Generales para la Excavación y Construcción del Túnel de Distribución y el Túnel de Andén, Correspondiente a la Línea 7; México, 1981
18. ISTME: Especificaciones para "Peinar" los Tramos de Túnel Pertenecientes a al Línea 7 del Metro que no Cumplen con la Sección Especificada por el Proyecto; México, 1982
19. ISTME: Especificaciones Generales del Procedimiento para la Excavación y Construcción del Túnel de Unión entre la Lumbraera y el Túnel de Tramo, Correspondiente a la Línea 7; México, 1981
20. COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD: Manual de Diseño de Obras Civiles, Sección B, tema 3: Mecánica de Rocas; México, 1980
21. ISTME: Especificaciones para Efectuar la Inyección de Contacto entre el Revestimiento Primario y el Revestimiento Definitivo de los Túneles Pertenecientes a la Línea 7 del Metro; México, 1983
22. COMETRO: Procedimiento Constructivo para la Excavación y Construcción de Túneles con Escudo de Frente Abierto para la Línea 7 del Metro; México, 1985
23. ISTME: Procedimiento Constructivo para la Excavación y Construcción del Túnel en el Tramo Cola-Tacuba entre las Lumbraeras CT-1 y CT-2, Ubicadas en los Cadenamientos 7+891.759 y 8+562.377 Respectivamente, Correspondientes a la Línea 7 del Metro; México, 1983
24. ISTME: Especificacion para Realizar los Rellenos Correspondientes al Túnel Existente entre las Lumbraeras CT-1 (L-1) y CT-2 (L-2); México, 1984

25. COVITUR: Plano 84-M5-100900-III-006-021-P: Plano General de Fabricación de Pilotes 30 x 30; México, 1984
26. COVITUR: Plano 84-M5-100900-III-007-023-P: Plano General de Zapatas Tipo (con Pilotes 30 x 30); México, 1984
27. COVITUR: Plano 84-E-100900-III-006-016-P: Plano General de Columnas y Cabezales; México, 1984
28. COVITUR: Plano 85-E-100900-III-388-1641-P: Plano de Fabricación Trabe de Apoyo Tipo-13 (TA-13); México, 1984  
Plano 84-E-100900-III-677-1937-P: Plano de Estación Fabricación Trabe Central Tipo-10 A-1 (TC-10 A-1); México, 1984
29. SCHJETNAN, CALVILLO, PENICHE: Principios de Diseño Urbano/Ambiental; Ed. Concepto, México, 1984
30. GAXIOLA, Vicente: Especificación para la Elaboración y Aplicación de Concreto Lanzado, que Servirá como Revestimiento Definitivo de los Túneles del Metro de la Ciudad de México; ISTME, México, 1982