



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO  
 ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES  
 ACATLAN

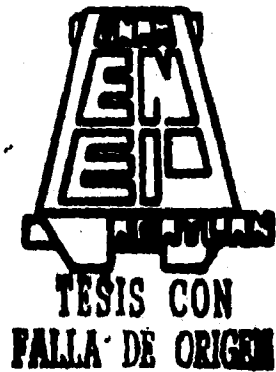
7  
 12  
 29

PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO DEL  
 CRUCE DEL METROPOLITANO LINEA B  
 CON EL EJE 1 PONIENTE GUERRERO  
 MEDIANTE TUNELEO FALSO



T E S I S  
 QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
 INGENIERO CIVIL  
 P R E S E N T A :  
 GERARDO LARA GARCIA

ASESOR: INGENIERO JORGE FLORES NUÑEZ.



NAUCALPAN, EDO. DE MEX.

1996

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN



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.

7

**TESIS**

**COMPLETA**



ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES "ACATLAN"  
PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL

UNIVERSIDAD NACIONAL  
AVENIDA DE  
MEXICO

SR. GERARDO LARA GARCÍA

ALUMNO DE LA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL.

PRESENTE.

De acuerdo a su solicitud presentada con fecha 26 de Junio de 1995, me complace notificarle que esta Jefatura de Programa tuvo a bien asignarle el siguiente tema de tesis titulado "PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO DEL CRUCE DEL METROPOLITANO LINEA B CON EL EJE 1 PONIENTE GUERRERO, MEDIANTE TUNELEO FALSO", el cual se desarrollará como sigue:

INTRODUCCION.

- I. ANTECEDENTES.
- II. LA CONSTRUCCION DE CAJONES SUBTERRANEOS DE METRO Y SU INFLUENCIA EN LAS VIALIDADES.
- III. ESTUDIO GEOTECNICO PARA LA SOLUCION EN CAJON DENTRO DE LA ZONA DEL LAGO.
- IV. OBRAS INDUCIDAS.
- V. ETAPAS DEL PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO.
- VI. INSTRUMENTACION

CONCLUSIONES

Así mismo fue designado como asesor de tesis el Ing. Jorge Flores Nuñez. Ruego a usted, tomar nota en cumplimiento de lo especificado en la Ley de profesiones, deberá prestar Servicio Social durante un tiempo mínimo de seis meses, como requisito básico para sustentar examen profesional, así como de la disposición de la Dirección General de Servicios Escolares en el sentido de que se imprima en lugar visible de los ejemplares de la tesis, el título del trabajo realizado. Esta comunicación deberá imprimirse en el interior de la tesis.

ATENTAMENTE.  
" POR MI RAZA HABLARA EL ESPÍRITU "  
Acatlán Edo. de México a 26 de Octubre de 1996

Ing. Carlos Rosales Aguilar.  
Jefe del Programa de Ingeniería Civil



ENEP-ACATLAN  
JEFATURA DEL  
PROGRAMA DE INGENIERIA

# DEDICATORIAS

*A ti, Dios Padre y Virgen Madre, agradezco infinitamente sus bendiciones, su guía y protección en mi diario andar por este mundo.*

*A mi madre Teresa García Padilla, por tu amor, cuidados y sacrificios, que incondicionalmente has realizado por mí; a ti madre ejemplar, mi infinito agradecimiento.*

*A mi padre Víctor M. Lara Meléndez, por que me enseñaste muchas cosas valiosas y me educaste con disciplina, mano firme y también con lo más importante que debe recibir un hijo: el ejemplo. Gracias a ti he alcanzado esta meta.*

*A mi hermano Alejandro Lara García, gracias por tu apoyo y amistad, que serían difíciles de encontrar en otra persona.*

*A mis tíos: Rodrigo García, Carmen García, Catalina García, Ma. de Jesús García, Mercedes Lara, Manuel Canales y Ana María Farías que han estado siempre cerca de mí para apoyarme en todos los aspectos, contribuyendo en mi formación como ser humano.*

*A todos y cada uno de mis primos, con los cuales e compartido excelentes momentos de mi vida.*

# AGRADECIMIENTOS

*Al Ing. Miguel Pozas Estrada, por su valiosa orientación y ayuda para realizar este trabajo de tesis.*

*A mi asesor, el Ing. Jorge Flores Nuñez, por brindarme su apoyo y confianza, así como por compartir su valiosa experiencia.*

*A mi tío Rodrigo García Padilla, por brindarme todos los medios a su alcance para realizar este trabajo y culminar mi carrera profesional.*

*A mi tía Carmen García Padilla, por su valiosa ayuda para realizar este trabajo.*

*A mi tía Mercedes Lara Meléndez, por su apoyo.*

*A mis primos Monserrat Canales García, Catalina Palma García, Magdalena Palma García y Rodrigo García Farías, por su ayuda para realizar este trabajo*

*A mis amigos y compañeros con los cuales conviví, en especial a Guillermo Adrián Ponce Martínez, Alexander Israel Montufar Martínez, Edilberto J. Jiménez Camacho, Neftalí Sarmiento Solano, Sergio A. Martínez Galván, Oscar López Velázquez, Urbano Castañeda Ramos.*

*Al personal de la Comisión de Vialidad y Transporte Urbano, en especial:*

*Ing. Andrés Sánchez Vega.*

*Ing. Guillermo Muñozcano Jiménez.*

*Ing. J. Francisco Gómez Mendoza.*

*Ing. José Luis Miramontes Rojas.*

*Ing. Juan Manuel Olac Cruz.*

7

*Ing. Luis Cuello.*

*Ing. M. Roberto Ocampo Franco.*

*Ing. Ricardo García.*

*Al Ing. Héctor Arce Paz, Ing. Juan Galván Endesca, Ing. Rubén Alfonso Ochoa Torres y Ing. José Santos Miramontes López; por sus valiosos comentarios y aportaciones.*

*A mis profesores, por compartir sus conocimientos y experiencias, en especial al Ing. Miguel Moisés Zurita Esquivel.*

*A la Universidad Nacional Autónoma de México.*

# ÍNDICE GENERAL

	PÁGINAS.
<u>INTRODUCCIÓN.</u>	5
<b>CAP. 1. <u>ANTECEDENTES.</u></b>	7
1.1. EVOLUCIÓN DE LOS METROS EN EL MUNDO.....	8
1.1.1. Desde sus inicios, hasta nuestros días.....	8
1.1.2. Resultados obtenidos.....	9
1.2. CREACIÓN DE UNA RED DE METRO.....	9
1.2.1. Estructuración de la red.....	9
1.2.2. Criterios generales de selección del tipo de línea.....	10
1.3. EL CRECIMIENTO DEMOGRÁFICO DE LA CIUDAD DE MÉXICO.....	11
1.3.1. Desde 1940 hasta nuestros días.....	11
1.3.1.1. La distribución de la población en el A.M.C.M.....	13
1.3.2. El transporte en el A.M.C.M.....	14
1.3.2.1. Situación actual de la red del Metro.....	15
1.3.2.2. Perspectivas del Metro.....	15
1.4. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA OBRA CIVIL EN LA LÍNEA B.....	16
1.4.1. Carácter metropolitano de la línea B.....	16
1.4.2. Localización y trazo.....	16
1.4.3. Procedimientos constructivos.....	16
1.4.4. Longitud y estaciones.....	18
1.4.5. Urbanización de vialidades.....	18
REFERENCIAS.....	20
<b>CAP. 2. <u>LA CONSTRUCCIÓN DE CAJONES SUBTERRÁNEOS DE METRO Y SU INFLUENCIA EN LAS VIALIDADES.</u></b>	21
2.1. TÚNELES DE CAJÓN.....	22
2.1.1. La construcción de túneles de cajón.....	22
2.1.1.1. La excavación a cielo abierto.....	22
2.1.1.2. Métodos de construcción que interfieren parcial o temporalmente con el tránsito superficial.....	23
2.2. EL TÚNEL DE CAJÓN EN MILÁN.....	24
2.3. EL TÚNEL DE CAJÓN EN MÉXICO.....	25
2.3.1. Las modificaciones al cajón de Milán.....	25
2.3.2. Tipos de estructuras en los cajones subterráneos de la Ciudad de México....	26
2.3.2.1. Tipo de cajón empleado en línea B.....	28
2.4. TÚNEL FALSO: DEFINICIÓN, DESCRIPCIÓN Y OBJETIVOS.....	28
2.4.1. Definición de túnel y tuneleo falso.....	28
2.4.2. Descripción general del tuneleo falso.....	28
2.4.3. Objetivos de su aplicación.....	29
2.5. TUNELEOS FALSOS EN ALGUNOS CRUCEROS VIALES IMPORTANTES.....	30



2.5.1.	Tuneleo falso en el cruce con la avenida Insurgentes Sur, correspondiente a la estación Chilpancingo, línea 9.....	30
2.5.2.	Tuneleos falsos en el cruce con la avenida Patriotismo y en la zona de cruce del trolebús, correspondiente al tramo Chilpancingo - Patriotismo, línea 9.....	30
2.5.3.	Tuneleo falso en el cruce con la avenida Nuevo León, correspondiente al tramo Chilpancingo - Patriotismo, línea 9.....	32
2.5.4.	Tuneleo falso en el cruce con la avenida Javier Rojo Gómez, correspondiente al tramo Iztapalapa - Cerro de la Estrella, línea 8.....	32
2.6.	TUNELEOS EN CONJUNCIÓN CON OTROS PROCEDIMIENTOS, APLICADOS BAJO DIFERENTES ESTRUCTURAS Y CRUCEROS VIALES.....	36
2.6.1.	Tuneleos en la línea "A".....	36
2.6.2.	Tuneleo aplicado en el cruce de línea 3, tramo Centro Médico - Etiopía con el viaducto Miguel Alemán y el ducto del río de la Piedad.....	37
2.6.3.	Tuneleo falso en el cruce con la calzada San Antonio Abad y línea 2 superficial, correspondiente al tramo Chabacano - Obrera de línea 8.....	38
2.6.4.	Otros tuneleos.....	41
2.7.	TUNELEOS FALSOS A APLICAR EN LÍNEA B.....	42
	REFERENCIAS.....	44
<b>CAP. 3. <u>ESTUDIO GEOTÉCNICO PARA LA SOLUCIÓN EN CAJÓN DENTRO DE LA ZONA DEL LAGO.</u></b>		<b>45</b>
3.1.	ANTECEDENTES GEOLÓGICOS Y GEOTÉCNICOS DEL VALLE DE MÉXICO.....	46
3.2.	DEPÓSITOS DEL LAGO.....	49
3.2.1.	Proceso de formación.....	49
3.2.2.	Evolución de las propiedades mecánicas.....	49
3.2.3.	Estratigrafía.....	51
3.3.	ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA DEL VALLE DE MÉXICO.....	53
3.4.	ESTUDIO GEOTÉCNICO EMPLEADO PARA LA SOLUCIÓN EN CAJÓN EN LA ZONA DEL LAGO.....	58
3.5.	SONDEO CON EL CONO ELÉCTRICO.....	64
3.5.1.	Desarrollo de la prueba.....	64
3.5.1.1.	Descripción del equipo necesario.....	64
3.5.1.2.	Realización de la prueba.....	65
3.5.1.3.	Recomendaciones para corregir los errores más comunes en la prueba de cono.....	67
3.5.2.	Alcances y beneficios.....	67
3.6.	PERFIL ESTRATIGRÁFICO DEL TRAMO BUENAVISTA-GUERRERO.....	70
	REFERENCIAS.....	71
<b>CAP. 4. <u>OBRAS INDUCIDAS.</u></b>		<b>72</b>
4.1.	LAS OBRAS INDUCIDAS.....	73
4.1.1.	Definición y aspectos que señalan a una instalación como obra inducida....	73
4.1.2.	Solución y repercusión de las obras inducidas.....	73

4.2.	PRINCIPALES OBRAS INDUCIDAS EN EL TRAMO BUENAVISTA-GUERRERO.....	74
4.2.1.	Ductos de alta tensión (230 KV) de C.L.F.....	75
4.2.2.	Alcantarillado.....	76
4.2.3.	Tuberías de agua potable.....	76
4.3.	PRINCIPALES OBRAS INDUCIDAS EN LA ZONA DEL TUNELEO FALSO.....	77
4.3.1.	Localización de instalaciones.....	77
4.3.2.	Alcantarillado.....	79
4.3.2.1.	Atarjea de Ø 45 cm.....	79
4.3.2.2.	Paso sobre el túnel interceptor Central.....	79
4.3.3.	Solución a la tubería de agua potable de Ø 12".....	82
	REFERENCIAS.....	83
<b>CAP. 5.</b>	<b><u>ETAPAS DEL PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO.</u></b>	<b>84</b>
5.1.	TRAMO SUBTERRÁNEO GUERRERO - BUENAVISTA.....	85
5.1.1.	Localización y gálibo.....	85
5.1.2.	Perfil.....	86
5.2.	BROCALES.....	87
5.3.	MUROS TABLESTACA.....	89
5.3.1.	Excavación, estabilización y limpieza de la zanja.....	89
5.3.1.1.	Equipo guiado de excavación.....	91
5.3.1.2.	Lodo estabilizador.....	92
5.3.2.	Cimbrado, armado y colado de tablestacas.....	93
5.4.	PRIMERA FASE DEL TUNELEO.....	95
5.4.1.	Excavación y colado de la losa de cubierta.....	95
5.4.2.	Restauración del pavimento.....	98
5.5.	SEGUNDA FASE DEL TUNELEO.....	100
5.5.1.	Abatimiento del N.A.F. por gravedad empleando bombas eyectoras.....	100
5.5.2.	Excavación entre muros tablestaca y troquelamiento.....	102
5.5.2.1.	Filtraciones en muros tablestaca.....	106
5.5.3.	Estructuración del cajón.....	107
5.5.4.	Rellenos sobre el cajón.....	110
	REFERENCIAS.....	112
<b>CAP. 6.</b>	<b><u>INSTRUMENTACIÓN.</u></b>	<b>113</b>
6.1.	CONCEPTOS GENERALES SOBRE LA INSTRUMENTACIÓN EN TÚNELES.....	114
6.1.1.	La instrumentación en las obras civiles.....	114
6.1.2.	El comportamiento de los túneles.....	114
6.1.3.	Objetivos y alcances de la instrumentación para la solución en cajón del Metro.....	115
6.2.	CONTROL TOPOGRÁFICO (PUNTOS DE CONTROL, "PALOMAS" Y PLOMOS).....	115
6.2.1.	Descripción del control topográfico.....	115
6.2.2.	Datos a obtener.....	117
6.3.	BANCOS DE NIVEL SEMIPROFUNDO.....	117

PÁGINAS

6.3.1. Descripción del dispositivo..... 117

6.3.2. Datos a obtener..... 118

6.4. PIEZÓMETROS Y TUBOS DE OBSERVACIÓN DEL NIVEL FREÁTICO..... 118

6.4.1. Piezómetro abierto (tipo Casagrande)..... 118

6.4.1.1. Estaciones piezométricas externas..... 120

6.4.1.2. Estaciones piezométricas internas..... 120

6.4.2. Tubo de observación del nivel freático..... 120

6.4.3. Datos a obtener..... 121

6.5. INCLINÓMETROS..... 121

6.5.1. Descripción del dispositivo..... 122

6.5.2. Criterios de instalación..... 123

6.5.3. Datos a obtener..... 123

6.6. VALORES MÁXIMOS ADMISIBLES DE DEFORMACIÓN..... 124

6.7. LOCALIZACIÓN DE LA INSTRUMENTACIÓN EN EL TRAMO BUENAVISTA-  
GUERRERO..... 124

REFERENCIAS..... 125

**CONCLUSIONES.** 126

**GLOSARIO.** 128

**BIBLIOGRAFÍA.** 134

# INTRODUCCIÓN

El ser humano es, en cierta forma el centro rector de todas las acciones de desarrollo; razón por la cual, en la actualidad los programas globales de población y desarrollo están encaminados a satisfacer las necesidades individuales a través de una estrategia mundial que plantea: un desarrollo ambiental sustentable, el combate a la pobreza, así como al acelerado crecimiento poblacional y la explosión demográfica en las ciudades, por mencionar los más importantes.

De las estrategias anteriores, el impulsar un desarrollo sustentable, implica equilibrar la evolución de los fenómenos demográficos con el crecimiento económico, sin olvidar la protección al medio ambiente así como la equidad social. Esto se traduce a final de cuentas, en una mejoría en las condiciones de vida de los habitantes del planeta.

En nuestro país, la situación actual de la población está representada por un rápido crecimiento de la misma, iniciando en los años sesentas y que continúa, a pesar de que la tasa de crecimiento poblacional ha disminuido; además de que la estructura por edades de la población, nos plantea la transición de una población joven a otra que envejece; esto implica, entre otras cosas, una disminución en la demanda de la educación básica, contra un aumento en la demanda de la educación media y superior, mayores requerimientos de empleo, entre otras.

A lo anterior se agrega la concentración de la población en ciudades como las de México, Guadalajara, Monterrey y Puebla, mismas que albergan poco más de la mitad de la población urbana del país. Si bien el fenómeno de atracción migratoria ejercido por las grandes urbes ha disminuido, el crecimiento demográfico de éstas, no se ha detenido.

Estas grandes concentraciones de población plantean una serie de problemáticas complejas, tales como la de abastecimiento de agua potable, drenaje, energía eléctrica, abastecimiento de alimentos, así como de energéticos para los diferentes procesos industriales, el transporte, entre otras.

En nuestros días, el transporte en las grandes urbes de todo el mundo, representa un elemento sustantivo para el desarrollo económico y social de los conglomerados humanos que las conforman. La trascendencia e importancia del transporte lo han convertido en un factor insoslayable para la convivencia ciudadana, además de representar un medio generador de riqueza y productividad en la vida cotidiana de las grandes urbes como la de la Ciudad de México.

El transporte en la Ciudad de México, que es una de las más pobladas del mundo, presenta en la actualidad una falta de integración y coordinación, propiciado por múltiples razones dentro de las cuales se encuentra el hecho de que la ciudad forma parte de dos entidades federativas, de administración independiente una de otra: Distrito Federal y estado de México. De ahí que el problema del transporte en la Ciudad de México se oriente hacia un enfoque metropolitano que integre a ambas entidades.

Dentro de esta perspectiva metropolitana, el sistema de transporte colectivo Metro se presenta como una de las mejores opciones a considerar, por su capacidad de transportación, energía empleada, mínima contribución a la contaminación del ambiente y por su carácter confinado que lo aísla del congestionamiento en las arterias viales de la ciudad, las cuales se encuentran saturadas por los millones de vehículos que circulan diariamente.

Este último punto es en cierta forma ambiguo cuando se habla del Metro subterráneo en cajón; ya que durante la etapa de construcción, las principales arterias en las cuales se realizan dichos trabajos, permanecen parcial o totalmente bloqueadas. Lo anterior se traduce en una limitación en la movilidad urbana en las principales vialidades, lo cual representa problemas de saturación en arterias aledañas a la afectada por las obras, generándose efectos nocivos en la productividad del trabajo, costos adicionales en la producción, deterioro del ambiente, así como en la calidad de vida de miles de personas, que viven cerca de la obra o que simplemente tienen que cruzar por esa zona para dirigirse a sus

fuentes de trabajo, estudio, etc.

Si bien la construcción se realiza por etapas, el tiempo empleado por etapa es el suficiente para ocasionar lo anteriormente señalado. Es por eso que las modificaciones en los procedimientos constructivos orientadas a disminuir la influencia negativa que tienen en la sociedad, durante la etapa de construcción, son cada vez más importantes.

En este trabajo, se analiza el procedimiento constructivo de la estructura subterránea del metropolitano línea B en el cruce con el eje 1 poniente Guerrero, mediante tuneleo falso; empleado para disminuir la afectación originada por los trabajos de excavación y construcción del cajón en el eje 1 poniente, el cual se intersecta con la zona de obras.

En el primer capítulo se hace referencia al gran desarrollo que han experimentado los sistemas de transporte eléctrico tipo Metro en el mundo desde 1970 hasta nuestros días, a consecuencia del crecimiento demográfico en las ciudades; mencionándose también, el fenómeno de crecimiento demográfico de la Ciudad de México, así como la situación actual y futura de la red del Metro en la ciudad. Se presentan las características generales de la línea B en cuanto a obra civil se refiere, señalándola como una de las primeras líneas en su tipo con carácter metropolitano.

En el segundo capítulo, se menciona la influencia que sobre las vialidades tiene la construcción de cajones subterráneos del Metro, haciéndose referencia de algunos métodos empleados en otros países para aminorar los efectos en vialidades; como es el caso del empleado en la Ciudad de Milán, señalándose la relación que existe entre este método y el empleado en la Ciudad de México. Se describe también el procedimiento de tuneleo falso, presentándose diferentes ejemplos de tuneleos empleados en los trabajos de construcción de anteriores líneas, así como los tuneleos proyectados para la línea B.

En el tercer capítulo se presentan los antecedentes geológicos y geotécnicos que dieron origen a las formaciones existentes en el subsuelo del Valle de México, señalándose el proceso de formación, evolución de las propiedades mecánicas y estratigrafía de los depósitos del lago; incluyéndose la zonificación geotécnica del Valle de México, así como los diferentes elementos que componen un estudio geotécnico en la zona del lago para la solución en cajón del Metro. Se resalta la importancia que ha tenido el cono eléctrico en la exploración geotécnica, finalizando éste capítulo con el perfil estratigráfico del tramo Buenavista-Guerrero, en el cual se ubica el tuneleo.

En resumen, en estos primeros tres capítulos se presenta la problemática social, constructiva y geotécnica que gira en torno del tema central de la tesis.

En el capítulo cuatro, se señalan los diferentes desvíos realizados en las instalaciones municipales tanto en el tramo como en el tuneleo en sí, ya que estas actividades forman parte importante en este tipo de construcciones.

En el capítulo cinco se señalan algunas características específicas del tramo concernientes al perfil y gálibo, y se analizan cada una de las fases que integran el procedimiento constructivo del tuneleo falso, mismas que abarcan la construcción de brocales, muros tablestaca, realización de la primera fase del tuneleo que comprende la excavación y colado de la losa de cubierta, así como la restauración del pavimento; y la realización de la segunda y última fase del tuneleo que comprende el abatimiento del nivel freático, la excavación del núcleo entre muros tablestaca y troquelamiento, el sellado de las filtraciones, la estructuración del cajón y por último, los rellenos sobre el mismo.

En el sexto y último capítulo, se presentan algunos conceptos generales sobre la instrumentación de túneles, se resalta la importancia de la instrumentación que como elemento de control tiene ésta para lograr una adecuada construcción. Se indican los diferentes dispositivos e instrumentos empleados en el tramo tales como el control topográfico, bancos de nivel semiprofundo, estaciones piezométricas, tubos de observación del nivel freático e inclinómetros. Se señalan las tolerancias admisibles en los valores de deformación, para los diferentes instrumentos y por último, se presenta la localización de la instrumentación en el tramo Buenavista-Guerrero.

# CAPÍTULO 1

## “ANTECEDENTES”

*Objetivo específico.* - Justificar el concepto metropolitano de la línea "B" del Metro, para regir e integrar más el transporte dentro del Área Metropolitana de la Ciudad de México.

- 1.1. EVOLUCIÓN DE LOS METROS EN EL MUNDO.
  - 1.1.1. Desde sus inicios, hasta nuestros días.
  - 1.1.2. Resultados obtenidos.
- 1.2. CREACIÓN DE UNA RED DE METRO.
  - 1.2.1. Estructuración de la red.
  - 1.2.2. Criterios generales de selección del tipo de línea.
- 1.3. EL CRECIMIENTO DEMOGRÁFICO DE LA CIUDAD DE MÉXICO.
  - 1.3.1. Desde 1940 hasta nuestros días.
    - 1.3.1.1. La distribución de la población en el A.M.C.M.
  - 1.3.2. El transporte en el A.M.C.M.
    - 1.3.2.1. Situación actual de la red del Metro.
    - 1.3.3.2. Perspectivas del Metro.
- 1.4. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA OBRA CIVIL EN LA LÍNEA B.
  - 1.4.1. Carácter metropolitano de la línea B.
  - 1.4.2. Localización y trazo.
  - 1.4.3. Procedimientos constructivos.
  - 1.4.4. Longitud y estaciones.
  - 1.4.5. Urbanización de vialidades.

REFERENCIAS.

1.1.- EVOLUCIÓN DE LOS METROS EN EL MUNDO.

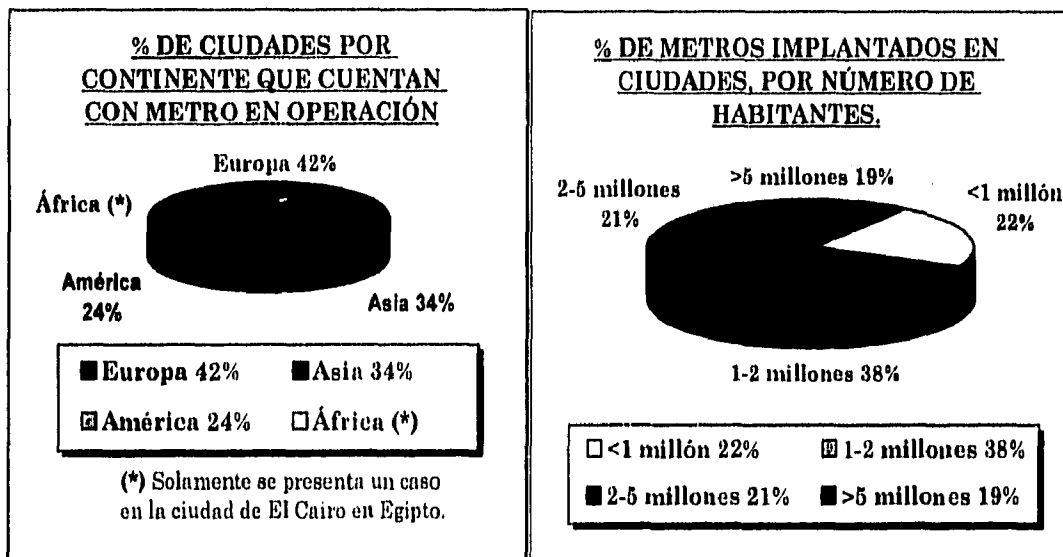
1.1.1.- Desde sus inicios, hasta nuestros días.

Los sistemas de transporte masivo de tipo férreo tuvieron sus orígenes en los denominados tranvías, mismos que se desarrollaron durante la segunda mitad del siglo pasado; empleando en un principio la tracción animal, pasando después por la tracción mecánica y finalmente empleando la energía eléctrica, con la cual alcanzaron su mayor desarrollo a fines de dicho siglo.

Y fue precisamente en el siglo pasado cuando se puso en servicio el primer sistema de Metro en el mundo. La ciudad de Londres, la más poblada del mundo en aquel entonces con cerca de 5 millones de habitantes, puso en servicio su primera línea de transporte subterráneo de pasajeros denominada "Metropolitan" el 10 de enero de 1863. Este nombre de la línea, derivado de la empresa que la construyó, (North Metropolitan Railway Company) ha sido utilizado en su forma abreviada conocida como "Metro", para designar a los sistemas subterráneos en todo el mundo, con excepción de Londres donde se les llama "underground" o "tube". La línea tenía un total de 5.6 kilómetros y para su construcción se emplearon además de la sección en cajón (que se menciona en posteriores capítulos), pequeños tramos con sección en túnel y a cielo abierto o superficial, (referencias 4 y 12).

Después de Londres, otras ciudades siguieron su ejemplo pero a un ritmo francamente lento, entrando en operación 17 nuevos sistemas, entre los años de 1863 y 1935; lo cual se estima que fue debido a la aparición del automóvil (1893), lo que hacía del Metro un sistema poco atractivo, además de los diferentes eventos mundiales como la 1ª Guerra Mundial (1914-18), la inestabilidad económica (1918-25) y la 2ª Guerra Mundial (1939-45).

Los años posteriores a 1945 y hasta mediados de la década de los setentas, se caracterizaron por un aumento en la tasa poblacional, el número de vehículos automotores y la crisis del petróleo, razón por la cual las personas encargadas de la planeación de las ciudades vieron en los transportes eléctricos un gran aliado para resolver sus problemas de tráfico vehicular y de contaminación.



De ahí que a partir de la década de los setentas y hasta nuestros días, se haya dado un incremento considerable en la puesta en operación de redes de ferrocarriles urbanos del tipo Metro y tren ligero (LRT), al grado de que alrededor de 53 nuevos sistemas en el mundo han iniciado su operación entre 1970 y 1990, cifra que representa el 58% del total de sistemas tipo Metro en el mundo. Todo lo anterior se resume en la tabla 1.1, (referencia 11).







De la misma tabla 1.1, se ha condensado información relevante sobre la distribución de Metros en operación a nivel mundial, por continentes y por el tamaño de las ciudades en cuanto a su población, (figuras 1.1 y 1.2.). de esta información podemos decir que la mayoría de los sistemas implantados, se encuentran preferentemente en países desarrollados, como lo son los países europeos, E.U.A. y Japón. Otro aspecto importante es el tamaño de las ciudades (población), en el cual se observa que el 60% de las ciudades que poseen Metro, no superan los dos millones de habitantes.

### 1.1.2.- Resultados obtenidos.

En un principio, se esperaba que este sistema disminuiría los problemas originados por el exceso de automóviles (tráfico y contaminación), pero como se menciona en la referencia 11, "no se han tenido resultados notables en ninguna ciudad, consecuentemente ha sido poco el impacto positivo tanto en el consumo de energía como en los efectos en el ambiente", de ahí que sus objetivos se centren fundamentalmente en proveer a las urbes, de un mejor transporte colectivo. Lo anterior se ha traducido en:

- Ahorro en tiempo para la población de bajos y medianos recursos, exceptuando en algunas ciudades a la población de bajos ingresos debido a las tarifas.
- Mayor fluidez en el desplazamiento de personas (trabajadores, estudiantes, etc.), manteniendo un crecimiento sostenido de las actividades.

## 1.2.- CREACIÓN DE UNA RED DE METRO.

### 1.2.1.-Estructuración de la red.

Existen tres puntos básicos de los cuales se debe de partir para poder estructurar toda una red de líneas de Metro, (referencia 10):

- 1) *Tránsito.*- Se refiere a el paso o trayecto que va a efectuar el Metro por ciertas áreas de la ciudad; dicho tránsito debe de cumplir ciertos aspectos:
  - a) Proporcionar un eficiente servicio a las zonas de mayor congestión.
  - b) Cubrir los centros donde se realizan las actividades principales.
  - c) Procurar que las líneas sean preferentemente rectas y con estaciones de transbordo, para proporcionar al usuario un ahorro en tiempo.
  - d) Procurar también, la correspondencia de las líneas con los flujos de tránsito de mayor volumen de pasajeros.
  - e) Cubrir las zonas que presentan una mayor densidad de población.
- 2) *Operación.*- Se refiere a como debe de funcionar el sistema, con el fin de alcanzar los siguientes objetivos:
  - a) Lograr la mayor cantidad de pasajeros transportados.
  - b) Alcanzar una alta velocidad comercial, en base a un trazo lo más recto posible.
  - c) Lograr un eficiente servicio con el mínimo de trenes.
  - d) Conseguir un movimiento regular promedio de pasajeros transportados al día.
  - e) Facilitar la coordinación y reestructuración de los otros sistemas de transporte con el Metro.
- 3) *Construcción.*- En este punto se busca lograr la máxima eficiencia de la obra al menor costo y en el menor tiempo, tomando en cuenta:
  - a) La suma total de la inversión requerida correspondiente al tipo de solución empleada (túnel, subterránea, superficial y elevada).
  - b) El costo y problemas originados por los desvíos de tránsito efectuados durante la construcción.
  - c) La comparación de la solución escogida con las otras opciones de trazo, en cuanto a si la opción escogida presenta más ventajas que desventajas.

**1.2.2.- Criterios generales de selección del tipo de línea.**

De lo anterior pasamos al análisis que se realiza de una línea, para verificar su trazo. Se llegan a estudiar hasta cerca de 40 posibilidades de trazado, tomando en consideración tres aspectos básicos (referencia 10):

- 1) La densidad de población.- Se estima que el 60% de la longitud total de una línea debe de cubrir zonas con una densidad de población de más de 250 habitantes por hectárea como mínimo.
- 2) El uso del suelo.- El trazo debe de corresponder en un 80% como mínimo con los principales flujos de transporte colectivo, que en su gran mayoría corresponden también a vialidades de gran importancia.
- 3) El estudio de origen y destino.- Que nos determina los movimientos de los grandes núcleos habitacionales, hacia los principales centros de trabajo.

Una vez que se ha determinado el trazo, se debe de elegir el tipo de solución a emplear (túnel, subterránea, superficial y elevada), para lo cual se debe de partir de ciertos criterios generales para realizar dicha elección, (referencia 1):

- El costo de la obra por kilómetro.- El más alto lo ocupan la solución subterránea y túnel, mientras que la soluciones elevada y superficial son similares en su costo.
- Tiempos de construcción de la obra.- En la solución subterránea se consiguen velocidades de 90 a 110 m. al mes; en la elevada las velocidades oscilan entre 70 y 90 m. al mes, en la superficial se consiguen avances de 130 a 150 m. al mes; y por último en la sección tipo túnel las velocidades son variables (dependiendo del tipo de terreno, procedimiento y maquinaria de excavación) pero inferiores a cualquiera de las antes citadas.
- Obstrucciones en la vía pública y desvíos en el transcurso de la obra.- Como es obvio, la solución que más afecta las vialidades es la subterránea, por lo cual, se han implementado ciertos procedimientos constructivos en los cruces con vialidades importantes para reducir dichas afectaciones como lo son los tuneleos falsos y los procedimientos de inyección.
- Interferencias con las instalaciones municipales.- El mayor número de interferencias se presenta en la solución subterránea, como lo son los desvíos de colectores, redes de agua potable y alcantarillado, cables de alta tensión y telefónicos, gasoductos, etcétera; mientras que en las otras soluciones, las interferencias son menores.
- Disponibilidad a futuro de la vialidad en donde se construya la línea.- La solución elevada ocupa un ancho en vialidad equivalente a dos carriles, mientras que la superficial ocupa tres carriles.
- Alteraciones de las vialidades que cruzan con la vialidad afectada.- La solución superficial es la que más afecta, teniéndose que construir puentes o deprimidos para salvar el obstáculo que representa dicha solución.
- Selección adecuada del procedimiento constructivo de la solución o soluciones escogidas.- Una misma solución puede tener variaciones en cuanto a su procedimiento constructivo, dependiendo fundamentalmente de las condiciones del subsuelo; por lo cual es necesario efectuar estudios geotécnicos para poder elegir el procedimiento constructivo óptimo.
- Conservación del equipo y obras.- El mayor desgaste se presenta en las soluciones superficial y elevada por estar los equipos a la intemperie.
- Paisaje urbano.- Las mayores alteraciones se producen en las soluciones elevada y superficial, ya que alteran la estética del paisaje y crean barreras continuas (como en el caso de la superficial).

El ancho de las calles es determinante en las alteraciones producidas al paisaje, existiendo límites predeterminados para minimizar dichas alteraciones; así tenemos, para la solución elevada 40 m. como mínimo en el ancho de la calle y 50 m. mínimo en la solución superficial para lograr resultados satisfactorios.

### 1.3.- EL CRECIMIENTO DEMOGRÁFICO DE LA CIUDAD DE MÉXICO.

#### 1.3.1.- Desde 1940 hasta nuestros días.

Para el año de 1941, la Ley Orgánica del Departamento del Distrito Federal, consideraba a la Ciudad de México como capital del Distrito Federal, con lo cual el D.F. quedaba integrado por la Ciudad de México o "ciudad central" (que en aquel entonces la constituían lo que hoy son las delegaciones Benito Juárez, Cuauhtémoc, Miguel Hidalgo y Venustiano Carranza), y doce delegaciones: Álvaro Obregón, Azcapotzalco, Coyoacán, Cuajimalpa, Gustavo A. Madero, Iztacalco, Iztapalapa, Magdalena Contreras, Milpa Alta, Tláhuac, Tlalpan y Xochimilco.

Es en la década de los cuarentas cuando se inicia el fenómeno de "metropolización" en la Ciudad de México, quedando constituida la Zona Metropolitana por la Ciudad de México y las delegaciones Álvaro Obregón, Azcapotzalco, Coyoacán, Gustavo A. Madero, Iztacalco y Magdalena Contreras, contando con una población de 1,645,000 habitantes.

La expansión de la mancha urbana continúa, a consecuencia de la explosión demográfica así como por la creación de nuevos espacios urbanos extendiéndose hacia el estado de México y la delegación Iztapalapa, aumentando la población a 2,800,000 habitantes para 1950.

Para la década de los sesentas, el área urbanizada se extiende a las delegaciones Cuajimalpa, Tlalpan y Xochimilco, así como a 3 municipios del estado de México: Naucalpan, Chimalhuacán y Ecatepec; registrándose una población de 5,125,438 habitantes.

En la década de los setentas, el acelerado crecimiento poblacional, así como la migración de otros estados incrementó el número de habitantes a 9,462,952; además de integrar físicamente a 11 municipios a la Zona Metropolitana.

Para 1980 la Zona Metropolitana incorporaba a todas las delegaciones del Distrito Federal y a 17 municipios conurbados del estado de México, con una población aproximada de 13,640,000 habitantes, de los cuales el 35% correspondía a los municipios conurbados.

Lo anterior originó que cada delimitación establecida para la Zona Metropolitana se viera rebasada en pocos años por el crecimiento acelerado de la mancha urbana, por lo cual fue necesario establecer una delimitación más amplia para que no se viera superada en el corto plazo y permitiera considerar las relaciones campo-ciudad. Así, el 27 de octubre de 1983 se publicó el *Programa de Desarrollo del Área Metropolitana de la Ciudad de México y de la Región Centro* (figura 1.3 a), que considera a la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (Z.M.C.M.) conformada por el Distrito Federal, 53 municipios del estado de México y uno del estado de Hidalgo; siendo el objetivo principal de esta delimitación la prevención y orientación del crecimiento de la ciudad, (referencia 5).

En la actualidad el Área Metropolitana de la Ciudad de México (A.M.C.M.) está conformada por las 16 delegaciones del Distrito Federal y 27 municipios conurbados del estado de México, delimitación elaborada por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (I.N.E.G.I.) recientemente (ref. 6) basándose en la continuidad urbana, ya sea parcial o total de los municipios conurbados y en la proximidad y comunicación con la mancha urbana. En la figura 1.3 b, se muestra un mapa en el cual se delimita el A.M.C.M.

Este continuo crecimiento de la Ciudad de México, la ubicó dentro de las 15 aglomeraciones urbanas más grandes del mundo según la Organización de las Naciones Unidas (O.N.U.), registrando un importante incremento en el número de sus habitantes entre 1960 y 1980, (tabla 1.2). Sin embargo, se



**CAPÍTULO 1**

1.3.1.1.- La distribución de la población en el A.M.C.M.

El número de habitantes en el A.M.C.M. es de 15,047,685 (I.N.E.G.I., 1990), cifra que corresponde al 18.52% del total del país, en un área urbanizada cercana a los 1500 km<sup>2</sup>, que corresponde a menos del 0.08% del total de la superficie del país. Esta población se encuentra distribuida de la siguiente manera: 8,235,744 en el Distrito Federal y 6,811,941 en los 27 municipios conurbados, (ref. 7). Comparando el porcentaje de habitantes del D.F. y los municipios conurbados del estado de México con respecto al A.M.C.M., entre los años de 1970 y 1990 se observa un notable incremento en el porcentaje de población de los municipios conurbados y un decremento en el peso relativo de la población del D.F.; lo cual significa que dentro del A.M.C.M., la población correspondiente a los municipios mexiquenses ha crecido más rápidamente que la del D.F. en dicho periodo, (tabla 1.3).

Porcentaje de población del total del A.M.C.M.		
AÑO	D.F.	Municipios conurbados.
1970	76.3	23.7
1990	54.7	45.3

Tabla 1.3.- % de población del D.F. y municipios conurbados respecto al A.M.C.M., (I.N.E.G.I.).

DISTRITO FEDERAL, ESTADÍSTICAS (1990).			
DISTRIB. DE LA POBLACIÓN	Nº DE HAB.	DENSIDAD DE POBLACIÓN	HAB/KM <sup>2</sup>
E.U.M.	81,249,645	1) Iztacalco.	19,283
Distrito Federal.	8,235,744	2) Cuauhtémoc.	18,371
1) Iztapalapa.	1,490,499	3) Venustiano Carranza.	15,374
2) Gustavo A. Madero.	1,268,068	4) Benito Juárez.	15,251
3) Álvaro Obregón.	642,753	5) Gustavo A. Madero.	14,487
4) Coyoacán.	640,066	6) Azcapotzalco.	14,212
5) Cuauhtémoc.	595,960	7) Iztapalapa.	13,205
6) Miguel Hidalgo	605,560	8) Coyoacán.	11,984
7) Venustiano Carranza.	519,628	9) Miguel Hidalgo	8,824
8) Tlalpan.	484,866	10) Álvaro Obregón.	6,622
9) Azcapotzalco.	474,688	:	:
10) Iztacalco.	448,322	Distrito Federal.	5,489
11) Benito Juárez.	407,811	E.U.M.	41

Tabla 1.4.- Cifras comparativas de la distribución y densidad de población en el Distrito Federal (I.N.E.G.I., 1990).

ESTADO DE MÉXICO, ESTADÍSTICAS (1990).			
DISTRIB. DE LA POBLACIÓN	Nº DE HAB.	DENSIDAD DE POBLACIÓN	HAB/KM <sup>2</sup>
E.U.M.	81,249,645	1) Nezahualcóyotl.	20,260
Estado de México.	9,815,795	2) Ecatepec.	9,655
1) Nezahualcóyotl.	1,256,115	3) Tlalnepantla	8,524
2) Ecatepec.	1,218,135	4) Chimalhuacán.	7,195
3) Naucalpan.	786,551	5) Naucalpan.	5,078
4) Tlalnepantla	702,807	6) Atizapán de Zaragoza.	4,205
5) Toluca.	487,612	7) La Paz.	3,651
6) Cuautitlán Izcalli.	326,750	:	:
7) Atizapán de Zaragoza.	315,192	:	:
8) Chalco.	282,940	:	:
9) Tultitlán.	246,464	Estado de México.	457
10) Chimalhuacán.	242,317	E.U.M.	41

Tabla 1.5.- Cifras comparativas de la distribución y densidad de población en el estado de México (I.N.E.G.I., 1990).

De igual forma, se registra una disminución en el porcentaje de población en las delegaciones Benito Juárez, Cuauhtémoc, Miguel Hidalgo y Venustiano Carranza, mismas que en 1970 representaban el 31.6% del total del A.M.C.M., representando en 1990 el 12.8%. Según cifras de 1990 proporcionadas por el I.N.E.G.I., las delegaciones Iztapalapa y Gustavo A. Madero, junto con los municipios de Nezahualcóyotl y Ecatepec, representan actualmente el 34.8% de la población del A.M.C.M.

Hablando en números absolutos, la población del A.M.C.M. se incrementó de 1970 a 1990 en poco más de 6 millones de habitantes, de los cuales 1,346,000 corresponden al D.F. y 4,672,000 a los municipios conurbados, (referencia 6).

Por último, en las tablas 1.4 y 1.5 se muestran estadísticas de distribución y densidad de población, del Distrito Federal y estado de México, en las cuales se observa que los municipios de Nezahualcóyotl y Ecatepec ocupan el 1º y 2º lugar respectivamente en cuanto al número de habitantes y densidad de población en el estado de México, siendo estas cifras equiparables a las de las delegaciones con mayor número de habitantes (Iztapalapa y Gustavo A. Madero), y mayor densidad de población (Iztacalco y Cuauhtémoc), con excepción del municipio de Ecatepec, cuya densidad de población es relativamente baja, (referencias 8 y 9).

### 1.3.2.- El transporte en el A.M.C.M. (ref. 3).

La distribución que presentan las actividades económicas y académicas, con respecto a las zonas habitacionales dentro del A.M.C.M. es muy irregular; esto trae como consecuencia la generación de un gran número de viajes largos en su gran mayoría, los cuales son realizados en dos o más modalidades de transporte, para lo cual es necesario invertir hasta más de 3 horas al día por persona, en su realización.

En la actualidad el número de viajes por persona al día que se realizan en el A.M.C.M., supera los 36 millones, mismos que se encuentran distribuidos a *grosso modo* de la siguiente manera:

- El Metro, tren ligero, trolebuses así como la ex-ruta 100, representan el sistema más eficiente y con mayor capacidad, transportando solamente al 15% de los usuarios de transporte público y empleando sólo el 0.31% del parque vehicular. Según estimaciones realizadas partiendo de las cifras del Anuario de Transporte y Vialidad de 1992, se estima que durante 1994 el Sistema de Transporte Colectivo Metro (S.T.C.) atendió el 9.2% de la demanda, la ex-ruta 100 el 6.0% y los trolebuses y tren ligero el 0.7%.
- El denominado sistema colectivo de baja capacidad, que se encuentra integrado por combis y microbuses, atiende el 57% de la demanda para lo cual emplea el 4.7% del parque vehicular.
- Por último, los taxis y autos particulares que integran el sistema de baja capacidad, atienden el 32% de la demanda empleando el 95% del parque vehicular. Estos vehículos ocupan en promedio 10 veces más superficie vial por pasajero transportado en comparación con un autobús urbano; además de que consume 15 veces más combustible por persona transportada en promedio. De ahí que se estime que el 92% de la contaminación lo generen estos vehículos, situación que se complica si se toma en cuenta la antigüedad del parque vehicular proveniente del estado de México, que en un porcentaje considerable sobrepasa los 15 años.

Si a lo anterior agregamos los horarios de máxima afluencia vehicular, tenemos que el 37% de los viajes realizados en todo el día se verifican entre las 6 y 9 horas, lo cual incrementa sustancialmente la inversión de horas-hombre en transporte y los costos de operación en los sistemas.

Un dato importante de mencionar lo constituye el hecho de que el 66% de los viajes que se generan en los 27 municipios conurbados corresponden a 4 municipios: Nezahualcóyotl, Ecatepec, Naucalpan y Tlalnepantla; además de que en el Distrito Federal se registran cerca de 33.2 millones de viajes al día.

**1.3.2.1.- Situación actual de la red del Metro.**

Desde su inauguración el 5 de septiembre de 1969 hasta nuestros días, el Metro de la Ciudad de México, ha mantenido un alto nivel de eficiencia y calidad en su servicio como sistema de transporte masivo, operando con altos niveles de seguridad y productividad, que lo ubican actualmente dentro de los primeros lugares a nivel mundial: 1° en costo de operación por pasajero, 5° por el número de pasajeros transportados por empleado, 5° por la extensión de su red de servicio, 5° por el número de vagones, 3° por número de pasajeros transportados anualmente, entre otros.

Dentro del Programa Integral de Transporte, el Metro posee una función vertebral como base para estructurar un sistema de transporte metropolitano.

Actualmente el sistema cuenta con una red de 10 líneas que en conjunto suman 178 km., con 154 estaciones, movilizandando un promedio diario de 4.5 millones de pasajeros. Sin embargo, la demanda en el servicio se encuentra segmentada en dos bloques claramente identificables: uno de ellos, conformado por las líneas 4 a 9, las cuales poseen una capacidad de oferta suficiente y holgada; mientras que en las líneas 1, 2, 3 y "A" se registran altos volúmenes de demanda con diversos grados de saturación. Las causas principales de la demanda desproporcionada se deben:

- A que la red actual se encuentra incompleta, ya que algunas líneas como la 4, 7 y 8, tienen construida solamente el 71% de su longitud proyectada.
- La modificación en la ubicación y estructura de la ocupación, lo que origina cambios en los patrones y flujos de movilidad de los usuarios.
- El crecimiento acelerado del autotransporte urbano.

Este desequilibrio no será solucionado en el corto plazo, de ahí que sea necesaria la implementación de nuevas líneas de transporte masivo en el mediano plazo; situación que obliga a la actualización del Programa Maestro del Metro identificando las prioridades de construcción según los resultados que se obtengan con los estudios correspondientes, siendo fundamental su expansión sobre corredores metropolitanos, aún fuera de los límites territoriales del Distrito Federal. Según los últimos estudios disponibles, existen importantes corredores insuficientemente atendidos en los municipios de Naucalpan, Tlalnepantla, Coacalco, Ecatepec y Nezahualcóyotl, así como en las delegaciones Gustavo A. Madero, Iztapalapa y Álvaro Obregón, dentro de las más importantes.

**1.3.2.2.- Perspectivas del Metro.**

Según una hipótesis media de crecimiento poblacional de la Ciudad de México, se estima que ésta llegará a los 18 millones de habitantes para el año 2010, estimándose el número de viajes por persona al día cercano a los 76.4 millones.

Lo anterior obliga la construcción en el mediano plazo de:

- La línea "B" de carácter metropolitano, la cual atenderá la zona nor-oriente, que presenta un importante volumen poblacional.
- La ampliación de las líneas 4 y 7, las cuales extenderían su servicio hacia la delegaciones del sur y sur-poniente del D.F.
- La conclusión de la 2ª etapa de la línea 8, conectando directamente las delegaciones del sur-oriente y norte con el centro de la ciudad.

De llevarse a cabo lo anterior, la longitud de la red del Metro se vería incrementada en un 24.2%, integrada por 11 líneas y 221 km. de longitud.



#### 1.4.- CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA OBRA CIVIL EN LA LÍNEA B.

##### 1.4.1.- Carácter metropolitano de la línea B.

El Plan Maestro del Metro presentado en Marzo de 1981 planteaba la creación de 21 líneas (18 en el D.F. y 3 en el estado de México), con una longitud total de 378.13 km.; sin embargo este plan ha tenido que ser modificado conforme la ciudad ha ido creciendo. Así sus metas se han ido replanteando, teniéndose planeado completar (según la última revisión) 483 km. distribuidos en 14 líneas de rodadura neumática, 3 de Metro férreo y 10 de tren ligero, para el año 2020; sin embargo, se menciona (referencia 3) que este plan "...debe sujetarse a una revisión que permita adecuarlo a las necesidades previsibles de transporte metropolitano".

Dentro de este marco metropolitano se encuentra la línea "B", que según el Plan Maestro de 1981 tendría un recorrido con orientación poniente a oriente por las avenidas F.C. de Cuernavaca, Mosqueta y Oceanía principalmente, contando con una longitud estimada en 19.0 km., ubicándose esta línea en el territorio correspondiente al Distrito Federal exclusivamente, (referencia 10). Poco más de una década después, este trazo tuvo que ser verificado, siendo el cambio más significativo la introducción de la línea en el estado de México; con lo cual cambiaría su nombre de línea 10 por el de línea B.

Esta línea permitirá avanzar en la integración del transporte metropolitano, al atender fundamentalmente las necesidades de la región nor-oriente del A.M.C.M., debido a que 8 de sus 21 estaciones en 1ª etapa, se encuentran en el estado de México dentro de los municipios de Nezahualcóyotl y Ecatepec específicamente. Esto implica que cerca de 10 km. de la línea, de los 23.7 totales en 1ª etapa se encuentren fuera del D.F., lo que representa aproximadamente un 43% en 1ª etapa, y cerca del 33% concluida la 2ª etapa.

A diferencia de la primera línea metropolitana, que es la línea "A", la cual opera con trenes de rodadura metálica que corren sobre vías de riel soldado (vía elástica) y alimentación de energía eléctrica mediante pantógrafo, (referencia 2); la línea "B" operará con trenes de rodadura neumática (que favorecen la adherencia entre riel y rueda, mejorando notablemente la aceleración y la rapidez de frenado), como los usados normalmente en las líneas 1 a 9.

Según cifras del S.T.C., se espera que la línea transporte a cerca de 60,000 pasajeros por hora-sentido, operando en principio con 28 trenes de 9 carros, con una capacidad promedio de 1530 pasajeros cada tren. De esta forma, al concluirse la primera etapa de la línea, el sistema alcanzará una extensión de 201 km. con 175 estaciones, (referencia 13).

##### 1.4.2.- Localización y trazo.

En su primera etapa, la línea B partirá de la zona de Ciudad Azteca en el municipio de Ecatepec, estado de México con dirección norte-sur, sobre lo que es la avenida Central, cruzando una "pequeña" parte del municipio de Nezahualcóyotl para después adentrarse al Distrito Federal por la avenida 608 y su continuación Oceanía, atravesando las delegaciones Gustavo A. Madero y Venustiano Carranza respectivamente; cambia de dirección ahora en el sentido sur-norte tomando la avenida Ing. Eduardo Molina para orientarse en el sentido oriente-poniente y tomar el eje 1 norte e introducirse a la delegación Cuauhtémoc hasta su terminal provisional que se ubicará en la Estación de Ferrocarriles "Buenavista" en lo que es la avenida Insurgentes Norte.

En su segunda etapa se contempla prolongar la línea en su sentido oriente-poniente hasta los límites del Distrito Federal con el estado de México, en lo que son las inmediaciones del Hipódromo de las Américas, atravesando con ello la delegación Miguel Hidalgo en dicho sentido.

##### 1.4.3.- Procedimientos constructivos.

En la construcción de la línea B se emplearán tres soluciones: subterránea, superficial y elevada.

**CAPÍTULO 1**

La solución subterránea se construirá a base de un cajón rectangular empleando muros tablesta- ca de acompañamiento de concreto reforzado colados en el lugar, losa de fondo, muros estructurales y losa de techo; tendrá una longitud de 5923.431 m. desde lo que es el Circuito Interior hasta la avenida Ing. Eduardo Molina en donde se hará elevado. Cabe mencionar que se emplearán dos tipos de cajón subterráneo, el subterráneo profundo y el subterráneo superficial. Se dice que es subterráneo superficial, cuando el nivel de subrasante de nuestro cajón se encuentra a una distancia aproximada de 7.50 m. o menor del nivel de remate de la tablestaca; cuando la distancia es mayor de 7.50 m se dice que el cajón es subterráneo profundo.

<b>LÍNEA - "B" DISTANCIA ENTRE ESTACIONES, 1ª Y 2ª ETAPAS.</b>		
<b>TRAMO</b>	<b>DIST. (m)</b>	<b>DISTANCIA SEGÚN SECCIÓN.</b>
<b>LÍNEA - B 1ª ETAPA.</b>		
Cola de maniobras - Ciudad Azteca.	2105.712	2105.712 (S)
Ciudad Azteca - Plaza Aragón.	723.813	723.813 (S)
Plaza Aragón - Olímpica.	859.033	859.033 (S)
Olímpica - Tecnológico.	746.154	746.154 (S)
Tecnológico - M. Múzquiz.	1635.445	1635.445 (S)
M. Múzquiz - Río de los Remedios.	1305.450	1305.450 (S)
Río de los Remedios - Impulsora.	585.972	585.972 (S)
Impulsora - Continentes.	1543.038	1543.038 (S)
Continentes - Villa de Aragón (CL-6)	1485.481	633.069 (S) 413.000 (E) 439.412 (S)
Villa de Aragón - Tesoro.	934.410	934.410 (S)
Tesoro - Bosque de Aragón	1315.290	1315.290 (S)
Bosque de Aragón - Oceanía (CL-5)	1012.895	527.684 (E) 485.211 (S)
Oceanía - Romero Rubio.	959.165	959.165 (E)
Romero Rubio - Gran Canal.	1058.488	1058.488 (E)
Gran Canal - San Lázaro (CL-1)	1056.895	1056.895 (E)
San Lázaro - Morelos (CL-4)	1445.866	976.053 (SS) 469.721 (E)
Morelos - Tepito.	647.749	238.123 (SS) 252.000 (SP) 157.626 (SS)
Tepito - Lagunilla.	760.765	760.765 (SS)
Lagunilla - Garibaldi (CL-8)	623.994	285.043 (SP) 338.951 (SS)
Garibaldi - Guerrero (CL-3)	906.899	316.942 (SP) 175.000 (SS) 414.957 (SP)
Guerrero - Buenavista (CL-15)	670.897	337.839 (SS) 333.058 (SP)
Buenavista - Cola de maniobras.	1338.161	1338.161 (SS)
<b>LONGITUD TOTAL EN 1ª ETAPA.</b>	<b>23721.572</b>	<b>5923.431 (SS,SP) 13337.000 (S) 4461.132 (E)</b>
<b>LONGITUD DE SERVICIO</b>	<b>20277.699</b>	
<b>LÍNEA - B 2ª ETAPA.</b>		
Buenavista - Nogal.	109.000	109.000 (SS)
Nogal - Colegio Militar (CL-2)	693.259	214.259 (SS) 479.000 (SP)
Colegio Militar - Anáhuac.	1126.691	331.000 (SP) 620.000 (SP) 175.691 (SP)
Anáhuac - San Joaquín (CL-7)	1250.426	234.000 (SP) 1016.426 (SS)
San Joaquín - Irrigación.	1423.000	544.000 (SS) 340.000 (SP) 539.000 (SS)
Irrigación - Hipódromo.	1798.000	261.000 (SS) 1537.000 (E)
Hipódromo - Nave de depósito.	795.000	216.000 (E) 580.000 (I)
<b>LONGITUD TOTAL EN 2ª ETAPA.</b>	<b>7195.376</b>	
<b>LONGITUD DE SERVICIO.</b>	<b>6400.376</b>	
<b>LONGITUD TOTAL DE LÍNEA "B"</b>	<b>30916.948</b>	

SS: Subterráneo superficial  
 SP: Subterráneo profundo.  
 S: Superficial.  
 E: Elevado.  
 I: Intermedio.

Tabla 1.6.- Distancia entre estaciones en 1ª Y 2ª etapas.

La solución elevada se construirá a base de zapatas apoyadas sobre pilotes de fricción, columnas coladas in situ, las cuales tendrán preparaciones para recibir las traveses preesforzadas; tendrá una longitud de 4461.132 m. desde lo que es la avenida Ing. Eduardo Molina hasta la avenida Oceanía en su entronque con la avenida J. Loreto Fabela.

**CAPÍTULO 1**

La solución superficial se construirá a base de una losa de fondo de concreto reforzado apoyada sobre terreno previamente mejorado y dos muretes laterales de seguridad y confinamiento; tendrá una longitud de 13337.009 m. desde las inmediaciones de la avenida 602 hasta el Bulevar de los Aztecas en el municipio de Ecatepec, aproximadamente.

**1.4.4.- Longitud y estaciones.**

La línea contará en su primera etapa con una longitud total de 23721.572 m. con un total de 21 estaciones cuya longitud es de 150.00 m. y 5 estaciones de correspondencia, los detalles se resumen en la tabla 1.6.

**1.4.5.- Urbanización de vialidades.**

Se contempla la construcción de obras complementarias, que coadyuvarán a mejorar el entorno urbano, tales como la restitución de la superficie de rodamiento en las avenidas por donde la línea es subterránea, la semaforización de las avenidas, la creación de paraderos en las estaciones Buenavista, Oceanía, Villa de Aragón y Cd. Azteca, la construcción de puentes peatonales (tablas 1.7 y 1.8), así como de puentes vehiculares y distribuidores viales (tabla 1.9).

<b>PUENTES PEATONALES EN EL ESTADO DE MÉXICO</b>			
<b>No.</b>	<b>CADENAMIENTO</b>	<b>LOCALIZACIÓN</b>	<b>TIPO DE OBRA</b>
1	11+210	Bosque de Asia.	Nueva.
2	10+413	Bosque de Argelia.	Nueva.
3	9+959	Hacienda Rancho Seco.	Nueva.
4	9+457	Hacienda de la Noria.	Reestructuración.
5	8+850	Valle del Congo.	Reestructuración.
6	8+163	Valle de Amur.	Reubicación.
7	7+855	Valle de Conchos.	Ya existente
8	7+593	Valle de Éufrates.	Nueva.
9	6+974	Valle de Iguala.	Nueva.
10	6+872	Valle de Mayo.	Nueva.
11	6+166	Manuel Ávila Camacho.	Nueva.
12	5+900	Avenida Jacarandas.	Nueva.
13	5+321	Avenida Villada.	Reubicación.
14	4+631	Avenida Albatros.	Nueva.
15	4+011	Avenida Piedad.	Nueva.
16	2+881	Quinto Sol.	Nueva.
17	2+191	Oaxaca.	Nueva.
18	2+011	SUTERM.	Nueva.

**Tabla 1.7.- Puentes peatonales en el Estado de México.**

<b>PUENTES PEATONALES EN EL DISTRITO FEDERAL</b>			
<b>No.</b>	<b>CADENAMIENTO</b>	<b>LOCALIZACIÓN</b>	<b>TIPO DE OBRA</b>
1	14+180	Calle 575	Nueva.
2	13+931	Calle 585	Nueva.
3	13+584	Calle 597	Nueva.
4	12+698	Calle 637	Nueva.
5	12+630	Calle 655	Nueva.
6	11+770	Ay. Morazán.	Nueva.

**Tabla 1.8.- Puentes peatonales en el Distrito Federal.**

DISTRIBUIDORES Y PUENTES VEHICULARES.									
N°	PUENTE	UBICACIÓN ACCESO	SENTIDO	CARRILES PROPUUESTOS	LONG. DE PTE. (M)	SECC. DE PTE. (M)	PEND. %	VEL. DE OP. K/MH	
1	PUENTEROS.	AV. OCEANÍA (VIA TAPO).	NTE-SUR	4	1800.000		6	60	
		FCO. DEL PASO Y TRONCOSO.	SUR-NTE	4	2300.000	14.48	6	60	
1A	PUENTEROS.	AV. OCEANÍA (VIA TAPO).	NTE-SUR	3	1800.000	11.40	6	60	
		FCO. DEL PASO Y TRONCOSO.	SUR-NTE	3	2300.000		6	60	
2	MARRUECOS.	AV. DEL PEÑÓN	OTE-PTE	2	639.330	15.40	6	60	
		MARRUECOS	PTE-OTE	2					
3	DISTRIBUIDOR VIA TAPO.	VIA TAPO (AV. 602)	OTE-PTE	3	517.600	12.10 A 15.60	6	60	
		AV. 506	PTE-OTE	3					
4	DISTRIBUIDOR AV. 412.	AV. CENTRAL A AV. 608	NTE-SUR	2					
		AV. 412	OTE-PTE	5	582.500	12.10 A 15.60	6	60	
		AV. 412	PTE-OTE	5	558.500	15.60 A 19.10	6	60	
5	CONTINENTES.	BLVD. CONTINENTES	OTE-PTE	1/BAHÍA	602.000	9.6/22.56	6	60	
		AV. JORGE JIMÉNEZ C.	PTE-OTE	1/BAHÍA					
6	ZAPATAS CAMPESTRE.	AV. V DE LAS ZAPATAS	OTE-PTE	1/BAHÍA	580.000	9.6/22.56	6	60	
		AV. V. DE LAS ZAPATAS	PTE-OTE	1/BAHÍA					
7	RÍO DE LOS REMEDIOS NTE.	ANILLO PERIFÉRICO	OTE-PTE	3/BAHÍA	580.000	12.1/18.92	6	60	
		RÍO DE LOS REMEDIOS	PTE-OTE	3/BAHÍA					
8	GOB. FDEZ. MÚZQUIZ.	V. DE GUADIANA	OTE-PTE	2/BAHÍA	570.000	17.6/31.21	6	60	
		AV. GOB. J. FERNÁNDEZ	PTE-OTE	2/BAHÍA					
9	GOB. A. MAZO GOBERNADO-RES.	AV. DEL JUACAR	OTE-PTE	2	575.000	17.60	6	60	
		AV. ALFREDO DEL MAZO	PTE-OTE	2					
10	AV. CD. AZTECA TECNOLÓGI-CO.	SOR JUANA I. DE LA CRUZ	OTE-PTE	1/BAHÍA	587.300	9.10/16.10	6	60	
		AV. CD. AZTECA	PTE-OTE	1/BAHÍA					
11	BLVD. DE LOS AZTECAS.	BLVD. DE LOS AZTECAS	OTE-PTE	2	564.970	9.10	6	60	
12	BLVD. DE LOS TEOCALLIS.	BLVD. DE LOS TEOCALLIS	PTE-OTE	2	569.000	9.10	6	60	

Tabla 1.9.- Distribuidores y puentes vehiculares.

## REFERENCIAS.

- 1.- Castañeda N., Carlos Enrique. El Proyecto de la Obra Civil del Metro. Revista *Ingeniería*. Volumen LII. Número 1. Año 1982. Páginas 127-149. Facultad de Ingeniería U.N.A.M. México D.F.
- 2.- Ciudad de México Departamento del Distrito Federal y Gobierno del Estado de México. Línea "A" Pantitlán-La Paz. 20 páginas.
- 3.- Comisión de Vialidad y Tránsito Urbanos de la A.R.D.F. Secretaría de Transportes y Vialidad del D.D.F. Hacia un plan rector de transporte para la zona metropolitana de la Ciudad de México. (Seminario). Memorias. Museo Tecnológico de la C.F.E. Ciudad de México 17, 18 y 19 de Mayo 1995. Julio 1995. México, D.F. 262 páginas.
- 4.- Espinoza Ulloa, Jorge. EL METRO. Una solución al problema del transporte urbano. Representaciones y Servicios de Ingeniería. S.A. 1ª edición. 28 de Noviembre de 1975. México, D.F. 143 páginas.
- 5.- Instituto de Estudios Metropolitanos de Barcelona. Ciudades. (Información Estadística, Administrativa y Gráfica de las Mayores Aglomeraciones Urbanas del Mundo) Tomo III, 1988.
- 6.- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Ciudad de México. (Área Metropolitana) Perfil sociodemográfico. XI Censo general de población y vivienda 1990. Diciembre de 1993. Aguascalientes, México. 85 páginas.
- 7.- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Ciudad de México. (Área Metropolitana) Resultados definitivos. Tabulados básicos. XI Censo general de población y vivienda 1990. 1990. Aguascalientes, México. 126 páginas.
- 8.- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Distrito Federal. Síntesis de resultados. XI Censo general de población y vivienda 1990. Diciembre de 1993. Aguascalientes, México. 114 páginas.
- 9.- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Estado de México. Síntesis de resultados. XI Censo general de población y vivienda 1990. Septiembre de 1994. Aguascalientes, México. 228 páginas.
- 10.- Noreña Casado, Francisco; Carreño Romani, José y Negrete García, Ernesto. Plan Maestro del Metro. Revista *Ingeniería*. Volumen LII. Número 1. Año 1982. Páginas 115-126. Facultad de Ingeniería U.N.A.M. México D.F.
- 11.- Ocampo Franco, M. Roberto. Crecimiento de puesta en operación de redes de ferrocarriles urbanos. COVITUR. Abril 1993. México, D.F., 26 páginas y anexo.
- 12.- Sistema de Transporte Colectivo. (Metro). El Metro de México. 1ª Memoria. México D.F. 1973. 117 páginas, ilustraciones.
- 13.- Sistema de Transporte Colectivo. Informe de actividades. 1994, 46 páginas.
- 14.- United Nations. World Urbanization Prospects. The 1994 Revision. (Estimates and Projections of Urban and Rural Populations and of Urban Agglomerations). New York. 1995. 178 páginas.

7

## CAPÍTULO 2

# “LA CONSTRUCCIÓN DE CAJONES SUBTERRÁNEOS DE METRO Y SU INFLUENCIA EN LAS VIALIDADES”

*Objetivo específico.* Realizar un planteamiento deductivo de los procedimientos constructivos empleados en la solución de cajón subterráneo del Metro para disminuir sus efectos en las vialidades.

- 2.1. **TÚNELES DE CAJÓN.**
  - 2.1.1. **La construcción de túneles de cajón.**
    - 2.1.1.1. **La excavación a cielo abierto.**
    - 2.1.1.2. **Métodos de construcción que interfieren parcial o temporalmente con el tránsito superficial.**
- 2.2. **EL TÚNEL DE CAJÓN EN MILÁN.**
- 2.3. **EL TÚNEL DE CAJÓN EN MÉXICO.**
  - 2.3.1. **Las modificaciones al cajón de Milán.**
  - 2.3.2. **Tipos de estructuras en los cajones subterráneos de la Ciudad de México.**
    - 2.3.2.1. **Tipo de cajón empleado en línea B.**
- 2.4. **TÚNEL FALSO: DEFINICIÓN, DESCRIPCIÓN Y OBJETIVOS.**
  - 2.4.1. **Definición de túnel y tuneleo falso.**
  - 2.4.2. **Descripción general del tuneleo falso.**
  - 2.4.3. **Objetivos de su aplicación.**
- 2.5. **TUNELEOS FALSOS EN ALGUNOS CRUCEROS VIALES IMPORTANTES.**
  - 2.5.1. **Tuneleo falso en el cruce con la avenida Insurgentes Sur, correspondiente a la estación Chilpancingo, línea 9.**
  - 2.5.2. **Tuneleos falsos en el cruce con la avenida Patriotismo y en la zona de cruce del trolebús, correspondiente al tramo Chilpancingo - Patriotismo, línea 9.**
  - 2.5.3. **Tuneleo falso en el cruce con la avenida Nuevo León, correspondiente al tramo Chilpancingo - Patriotismo, línea 9.**
  - 2.5.4. **Tuneleo falso en el cruce con la avenida Javier Rojo Gómez, correspondiente al tramo Iztapalapa - Cerro de la Estrella, línea 8.**
- 2.6. **TUNELEOS EN CONJUNCIÓN CON OTROS PROCEDIMIENTOS, APLICADOS BAJO DIFERENTES ESTRUCTURAS Y CRUCEROS VIALES.**
  - 2.6.1. **Tuneleos en la línea "A".**
  - 2.6.2. **Tuneleo aplicado en el cruce de línea 3, tramo Centro Médico - Etiopía con el viaducto Miguel Alemán y el ducto del río de la Piedad.**
  - 2.6.3. **Tuneleo falso en el cruce con la calzada San Antonio Abad y línea 2 superficial, correspondiente al tramo Chabacano - Obrera de línea B.**
  - 2.6.4. **Otros tuneleos.**
- 2.7. **TUNELEOS FALSOS A APLICAR EN LÍNEA B.**

**REFERENCIAS.**

## **2.1.- TÚNELES DE CAJÓN.**

Existen diferentes instalaciones municipales las cuales tienen que ser distribuidas debajo de la superficie, tales como Metros, pasajes y túneles ambos para tránsito vehicular y peatonal, bodegas subterráneas, garajes y estacionamientos, así como túneles para drenaje, alcantarillado y suministro de agua potable, entre otros.

Sin duda, este es un rasgo característico y común de todas estas estructuras que aunado a la poca capacidad de soporte y el relativamente pequeño espesor de las capas superpuestas de los estratos donde tienen que ser instaladas, dificulta la tarea de atravesar dichos estratos para construir tales estructuras. Además, las grandes ciudades en las cuales todas estas estructuras tienen que ser efectuadas, se construyen sobre sedimentos del Pleistoceno y Holoceno, formaciones geológicas relativamente jóvenes en su mayor parte saturadas con agua subterránea, lo cual implica además extraer dicha agua. Todas estas circunstancias ejercen un efecto decisivo en el procedimiento constructivo y por ende en los costos.

Generalmente se siguen dos procedimientos que pueden ser aplicados:

- 1) Las estructuras subterráneas son construidas desde la superficie con excavaciones a cielo abierto, para después cubrirlas en forma íntegra o parcialmente (método de túneles en cajón también conocido como "cut and cover").
- 2) Se emplean métodos especiales de construcción bajo la superficie, con muy pocas alteraciones sobre esta última (túneles profundos).

En los siguientes párrafos nos enfocaremos a analizar el procedimiento constructivo de los túneles de cajón empleados en algunos Metros, debido a los diferentes problemas que ocasiona su construcción en el flujo vehicular de las vialidades.

### **2.1.1.- La construcción de túneles de cajón.**

#### **2.1.1.1.- La excavación a cielo abierto.**

Los túneles de alcantarillado y pasajes subterráneos poco profundos (vehiculares y peatonales) se realizan a menudo mediante excavaciones a cielo abierto. Esto es por lo general más económico y más práctico que hacer túneles, ya que se pueden alcanzar profundidades de 10 m. o más, realizando excavaciones a cielo abierto, en las cuales sus paredes son contenidas por pantallas de pilotes, por simple cimbra de madera, o por muros de concreto ya sea prefabricados o colados en sitio con el empleo de bentonita.

Para la construcción de túneles de cajón existen diferentes métodos a emplear, siendo el más antiguo de ellos el denominado "cut and cover", que traducido literalmente significa "cavar y cubrir", lo cual es válido interpretar como excavación a cielo abierto. Este método ha sido empleado en la construcción de diferentes líneas del Metro en el mundo, siendo la ciudad de Londres en Inglaterra, la primera en emplearlo. En términos generales el procedimiento consistía en cavar una amplia zanja, para después reforzar con muros laterales (los cuales tenían el grueso de tres ladrillos) a la misma y finalmente construir la bóveda elíptica formada por seis capas superpuestas de ladrillos, sobre la cual se colocaría de nueva cuenta la superficie de rodamiento.

En fechas posteriores, este procedimiento fue desarrollado y perfeccionado en diferentes aspectos de su construcción, prueba de ello lo constituyen los Metros de París, Nueva York, Toronto, Montreal, Estocolmo, Frankfurt, México, entre otros.

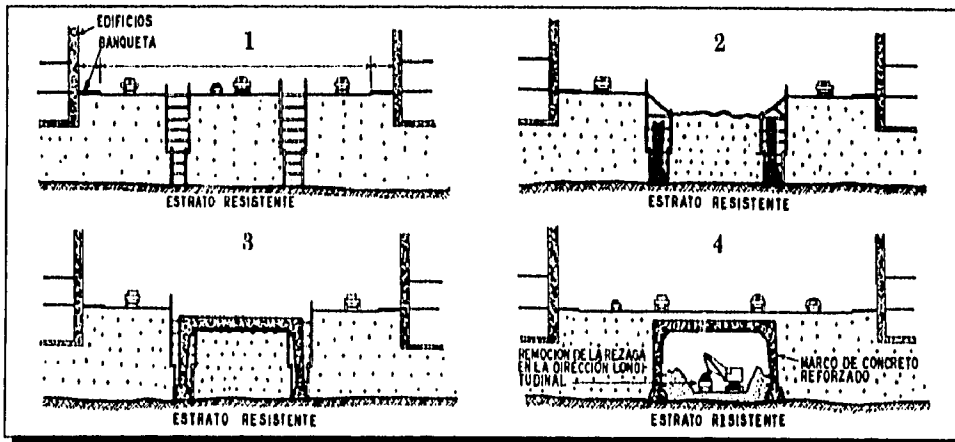
Si bien, este método es el más económico, sus principales desventajas son la obstrucción del tránsito en las calles y avenidas, la restricción del alineamiento en la red vial y además requiere la reubicación y reconstrucción de los conductos de las instalaciones municipales que interfieren. De los anteriores problemas, el primero de ellos, es el que mayor impacto tiene dentro de la sociedad. De ahí que la

ruta más viable para mantener el flujo vehicular en la superficie, con la menor afectación posible durante el tiempo que dura la construcción, sea la de desviar en forma planeada el flujo vehicular por diferentes calles y avenidas que así lo permitan, aunque en realidad, solo se resuelve en parte el problema.

**2.1.1.2.- Métodos de construcción que interfieren parcial o temporalmente con el tránsito superficial.**

Contrario a la construcción por los diferentes métodos de excavación a cielo abierto ("cut and cover"), existen otros métodos los cuales han sido desarrollados para la construcción de metros subterráneos bajo grandes arterias viales, cuando el tránsito demanda que los métodos de construcción se subordinen a la no perturbación del mismo. De acuerdo a la regla de mantener al mínimo las interferencias en el tránsito superficial, los métodos de construcción desarrollados (aunque comienzan la excavación desde la superficie), permiten en la mayor parte de los casos efectuar las tareas de construcción bajo la protección de un techo instalado rápidamente y en forma permanente. La inevitable molestia inicial, puede eliminarse ya sea en espacio, a través de pequeños accesos; o en tiempo, durante la noche cuando el flujo vehicular disminuye considerablemente. Una característica común de todos estos métodos es que los muros así como la parte superior de la estructura subterránea son construidos por separado desde la superficie a través de pequeños accesos, efectuando la excavación bajo la protección del consecuentemente establecido soporte o apuntalamiento en forma de "U". En consecuencia, los trabajos de construcción (excavación, estructuración, etc.) pueden ser realizados ya sin interferir con el tráfico de la superficie.

Una más perfecta realización del anterior concepto se obtiene cuando la construcción desde la superficie no está restringida en tiempo, pero si en espacio: cuando el ancho del área por excavar es de gran magnitud que resulta poco desfavorable para lograr este concepto de construcción, los muros y el soporte interior son construidos primero en trincheras, zanjas o perforaciones, para proceder después a colocar la parte superior de la estructura del cajón con el fin de restablecer la superficie de rodamiento y en consecuencia el flujo vehicular, realizando la excavación del núcleo bajo la superficie (figura 2.1). La interferencia con el tráfico en las calles es, de esta forma, restringida al mínimo, debido al tiempo requerido para colocar la cubierta, además de hacer posible una razonable reubicación de las instalaciones municipales.



**Figura 2.1.- Método de excavación aplicado en Estocolmo, procurando mínima afectación superficial (ref. 13).**

Sin embargo, un pre-requisito indispensable para la aplicación de este método es la existencia de un estrato de material resistente para apoyar los muros y capaz de soportar tanto las cargas superiores que serán colocadas por la construcción del cajón, como las cargas y vibraciones originadas por el tráfico vehicular existentes sobre la superficie durante la construcción, sin llegar a producir hundimientos que resulten perjudiciales tanto al cajón como a las estructuras aledañas a la obra.

Esta forma de construcción de túneles de cajón "bajo la superficie" (aunque en realidad son "túneles falsos" como se verá más adelante) ha sido empleada con sus variantes en diferentes países,



siendo algunos de ellos sobresalientes en este aspecto. Tal es el caso del Metro de Toronto (1954), y el del Metro de Milán (1964), referencia 12. Un resumen de la secuencia seguida del procedimiento constructivo del Metro de Toronto se muestra en la fig. 2.2, resaltando la mínima afectación producida en el flujo vehicular de la superficie.

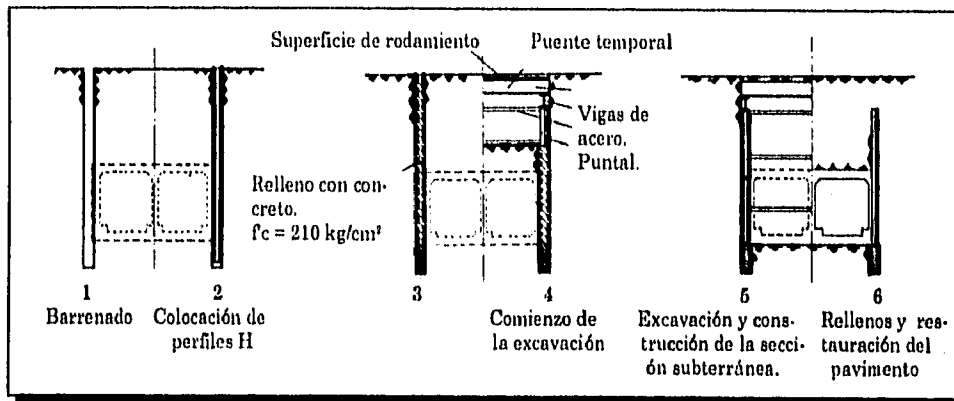


Figura 2.2.- Procedimiento aplicado en el Metro de Toronto, Canadá 1954 (ref. 15).

El procedimiento seguido para el Metro de Milán, se detalla en los siguientes párrafos debido a que la sección en cajón subterráneo de nuestro Metro y en particular el procedimiento de tuneleo falso presentan grandes similitudes con el practicado en Milán.

### 2.2.- EL TÚNEL DE CAJÓN EN MILÁN.

"La línea 1 del Metro de Milán, abierta al público el 1º de noviembre de 1964 con 14 km. de extensión, en parte en túnel profundo, y 24 estaciones, utilizó en la construcción de sus túneles de superficie un nuevo método que ha quedado incorporado a la técnica de construcción de Metros con el nombre de; Cajón de Milán", (ref. 5).

Su principal ventaja radica en el hecho de que el flujo vehicular no se ve obstruido en su totalidad, tanto de la avenida por donde pasa el eje de trazo, como por las que la intersectan, además de resultar muy económico según se menciona en la referencia 14. La secuencia del procedimiento es la siguiente:

En la primera fase de construcción (fig. 2.3 N° 1) se excavan dos trincheras poco profundas de 1 m. de ancho, empleando una máquina especial, para después limitar la trinchera por ambos lados con unos brocales de concreto reforzado de 15 cm. de espesor. Después las trincheras son llenadas con una densa suspensión de bentonita (de propiedades estabilizadoras) en tramos de 5 m., para comenzar a excavar y de esta forma profundizar las trincheras hasta una profundidad de 14.30 m., manteniendo siempre fijo durante el periodo de excavación el nivel de la suspensión de bentonita.

En la segunda etapa, el refuerzo es sumergido en la suspensión y fijado dentro de la zanja, para después colocar el concreto de acuerdo a las reglas de colado bajo agua; de esta forma, la suspensión bentonítica es expulsada a medida que se introduce el concreto, siendo transferida al siguiente tramo para asegurar la excavación, (figura 2.3 sección A-A' y N° 2). De acuerdo a la experiencia obtenida, la suspensión no puede ser reutilizada en más de 3 o 4 ocasiones por los efectos de la contaminación producto del mismo concreto y de las partículas del subsuelo excavado, además por la pérdida del contenido de bentonita en la suspensión a causa de la sedimentación y adherencia.

En la tercera etapa, se comienza la excavación entre los muros colados con el fin de construir la losa de techo del cajón, prosiguiendo con la reinstalación de tuberías, cables, etc., previamente desviados, restableciendo de esta forma la superficie de rodamiento para abrirla a la circulación (fig. 2.3 N° 3).

Por último, se procede a efectuar la excavación bajo la estructura resultante hasta la profundidad requerida, para después colar la losa de piso, completando la estructura del cajón, (figura 2.3 N° 4). De esta forma se obtenía un túnel de 9.0 m. de ancho, para la circulación de dos trenes.

Este método ha sido empleado en nuestro país para la construcción de gran parte del Metro en cajón subterráneo, pero con ciertas modificaciones para adaptarlo a las condiciones específicas del subsuelo de la Ciudad de México, como se menciona en los siguientes párrafos y en el capítulo 3 de este trabajo.

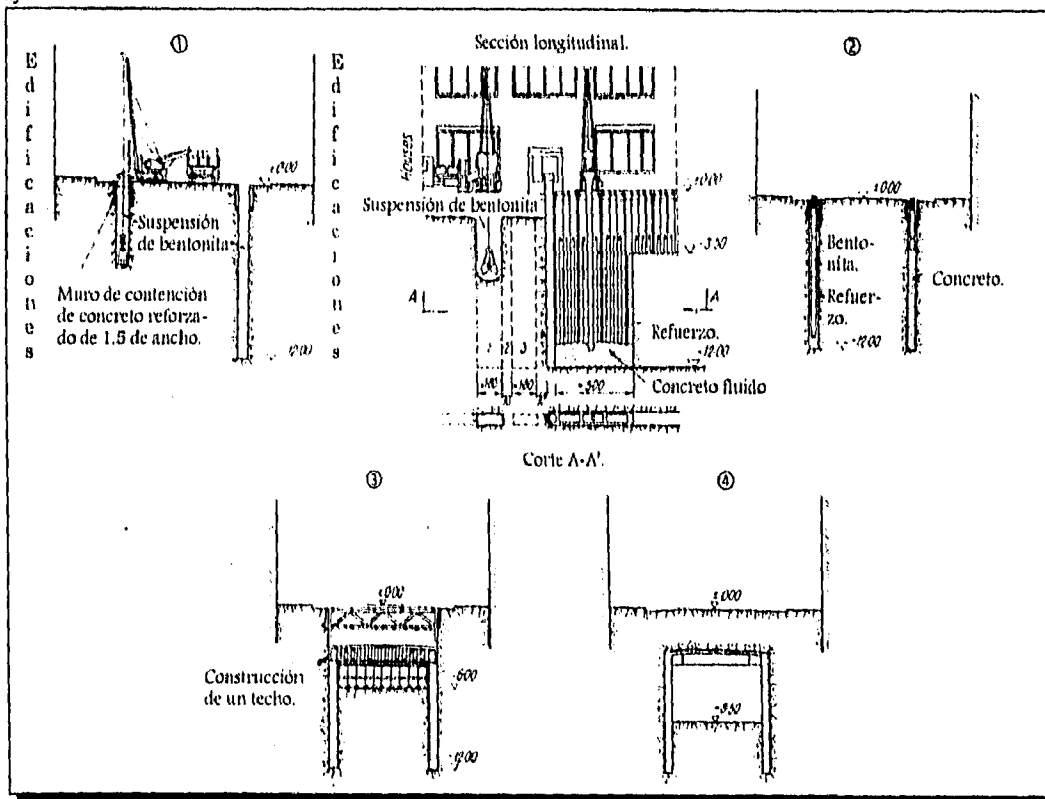


Figura 2.3.- Cajón de Milán, Italia 1964 (ref. 15).

### 2.3.- EL TÚNEL DE CAJÓN EN MÉXICO.

“La decisión de construir un sistema de transporte rápido en nuestra ciudad, sistema que necesariamente habría de ser subterráneo en su mayor parte, se vio demorada durante muchos años por la índole de los problemas específicos que en el caso de nuestra ciudad venían a sumarse a los que son normales en obras de esta índole en cualquier lugar del mundo; de manera destacada la índole de nuestro subsuelo y la incidencia de temblores. Sin restar importancia a las grandes dificultades del financiamiento de las obras, no eran aquellas, sino las de tipo técnico, las que parecían presentar más obstáculos, hasta el extremo de que durante mucho tiempo éstos fueron considerados insuperables.” (ref. 6).

En cierta forma, el que la decisión se haya demorado permitió que las técnicas de construcción empleadas en nuestro Metro fueran más recientes y avanzadas. De ahí que partiendo de las experiencias acumuladas y de los estudios realizados, se optara por aplicar la técnica del cajón empleado en la Ciudad de Milán, con ciertas variantes.

#### 2.3.1.- Las modificaciones al cajón de Milán.

Son fundamentalmente tres diferencias principales las que existen entre los cajones de Milán y los de la Ciudad de México:

- 1) "A diferencia de Milán, en donde se construyó el techo del túnel antes que el piso, en México se invirtió el orden, con el consiguiente ahorro en esfuerzo y tiempo, ya que los trabajos de excavación se realizaron a cielo abierto,...., reservando el procedimiento de Milán para los cruces de ciertas calles." (ref. 5), siendo esto último analizado en posteriores párrafos, así como en el capítulo 5 ya que de esto se deriva el tuneo falso y por consiguiente el motivo del presente trabajo.
- 2) "En el curso de la construcción se observó que las arcillas de nuestro subsuelo presentan características análogas a las de la bentonita,...., lo que permitió utilizar las arcillas procedentes de las excavaciones..." (ref. 5).
- 3) "La tercera y más importante de las diferencias entre nuestros cajones y los originales de Milán y en el resto de las ciudades que utilizan aquel sistema, se cuenta con subsuelo firme, en México fue preciso combatir los dos extremos a que la índole de nuestro subsuelo nos exponía: el hundimiento o la salida de los cajones a la superficie" (ref. 5).

Además de lo anterior, la estructuración de los cajones es diferente, inclusive dentro de una misma línea.

### 2.3.2.- Tipos de estructuras en los cajones subterráneos de la Ciudad de México.

Se han adoptado (desde sus inicios) tres tipos de estructuras para la solución en cajón, atendiendo a las características propias del subsuelo de la Ciudad de México y a los problemas de hundimientos que se presentan. La aplicación de una de estas soluciones depende no sólo de las características geotécnicas, si no además de aspectos económicos, estructurales y constructivos; sin dejar a parte la funcionalidad.

A continuación se describen las características más importantes de los 3 tipos de estructuras empleadas para la solución en cajón:

- 1) *Cajón convencional.* - Este tipo de cajón se construye empleando solamente muro estructural, y se trabaja en excavaciones a cielo abierto, resultando de vital importancia el adecuado diseño de los taludes a todo lo largo de la excavación, para evitar una posible falla en los mismos; el diseño depende en gran medida de las características del subsuelo en cada tramo. El cajón rectangular se construye a base de concreto, con las siguientes dimensiones, aproximadas:

Muros..... 1.00 m. de espesor.  
 Losa inferior..... 0.80 m. de espesor.  
 Losa superior..... 0.60 m. de espesor.

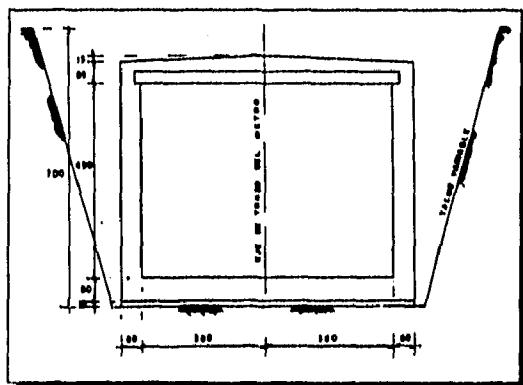


Figura 2.4.- Cajón convencional (ref. 2).

En la figura 2.4 se muestra una sección de dicho cajón; cabe resaltar que este tipo de estructura requiere para su aplicación de calzadas o avenidas de sección sumamente grande, además de que actualmente ya no se utiliza e inclusive no se le menciona en las actuales especificaciones para el

proyecto y construcción de las líneas del Metro de la Ciudad de México; se le empleó en la construcción de la línea 1, específicamente en la calzada Ignacio Zaragoza (ref. 5).

- 2) *Cajón con muro Milán estructural o tablestaca estructural.*- Es un cajón rectangular que se construye empleando un sistema de ademado con muros de concreto armado que son colados (en el caso de muros tablestaca colados "in situ") o introducidos (para el caso de muros tablestaca prefabricados) en zanjas previamente excavadas con un cucharón del tipo de almeja guiada y estabilizadas con lodo bentonítico, lodos fabricados con arcilla del lugar o agua. Una vez que los muros han alcanzado su resistencia, se procede a la excavación del núcleo o prisma que se encuentra entre los dos muros, previo abatimiento del nivel freático; conforme se profundiza en la excavación, se van apuntalando los muros con puntales o troqueles de acero, y una vez que se alcanza el nivel máximo de excavación, se procede a unir estructuralmente las losas de fondo y superior a los muros tablestaca. En la figura 2.5 se puede observar una sección de este tipo de estructuración.

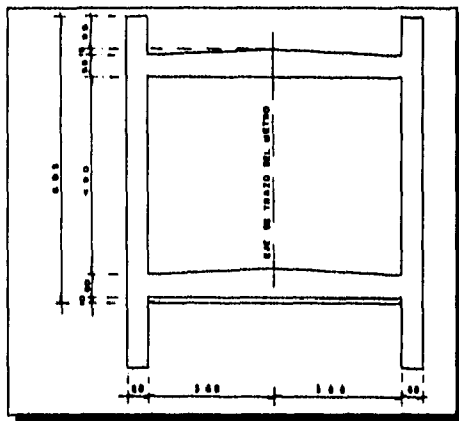


Figura 2.5.- Cajón con muro Milán estructural o tablestaca estructural (ref. 2).

- 3) *Cajón con muro Milán de acompañamiento o tablestaca de acompañamiento.*- Este tipo de cajón es muy similar al anterior, con la excepción de que no se ligan directamente las losas de fondo y superior a los muros tablestaca: los muros tablestaca sirven como un elemento estructural temporal durante la etapa de excavación (y como lastre durante la vida útil), para después construir un cajón de concreto armado como se ve en la figura 2.6.

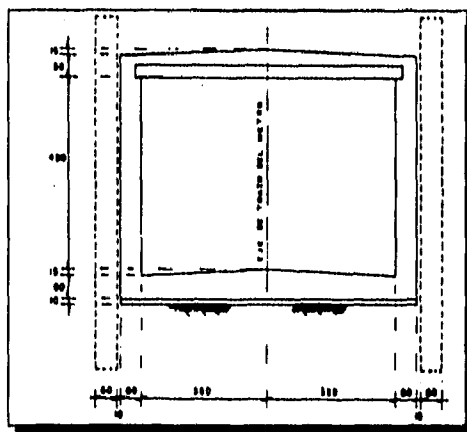


Figura 2.6.- Cajón con muro Milán de acompañamiento o tablestaca de acompañamiento (ref. 2).

Un comentario adicional sobre este tipo de estructura es que su aplicación se justifica cuando la profundidad de desplante del Metro es tan grande que es necesario compensar el peso del material excavado "numentando" el peso de la estructura agregando el muro de acompañamiento.

### 2.3.2.1.- Tipo de cajón empleado en línea B.

Para la línea B se ha adoptado una estructura de cajón con tablestaca de acompañamiento, entre otras razones por lo que se citaba en el párrafo anterior con respecto a la profundidad de desplante del cajón, ya que en su trazo (correspondiente al tramo subterráneo), la línea hace correspondencia con otras dos líneas subterráneas que son la línea 3 y la 8, que por sus características de perfil, obligan a la línea B a que cruce por debajo de las mismas (estaciones Guerrero y Garibaldi respectivamente). Teniéndose desplantes de muros (tablestacas) y de losas a profundidades próximas a los 20 y 15 m. en las zonas más profundas, caso contrario de los tramos más superficiales en los cuales se tienen profundidades de desplante de muros y losas de 10 y 8 m. aproximadamente.

El tratar de dar una explicación lo más completa posible de el por qué se eligió este tipo de estructura queda fuera de los alcances de esta tesis, más sin embargo con lo explicado en el capítulo 1 (sección 1.2 Creación de una red de metro) y lo mencionado en párrafos anteriores, se puede llegar a comprender el por qué de dicha elección.

## 2.4.- TÚNEL FALSO: DEFINICIÓN, DESCRIPCIÓN Y OBJETIVOS.

Este procedimiento sigue la misma secuencia empleada en el Metro de Milán vista en la sección 2.2; aplicado a las características especiales de la Ciudad de México. Aunque en la bibliografía antigua (refs. 5 y 6), se menciona la aplicación del método de "cajón de Milán" en los cruces de avenidas importantes que cruzaban el eje de trazo del Metro, actualmente a dicho procedimiento se le conoce como "tuneleo falso" debido a que la excavación del núcleo se verifica dentro de una estructura previamente construida. Aunque el cajón de Milán o tuneleo falso no es correcto incluirlo en los métodos de hacer túneles, constituye un importante procedimiento que sólo difiere en la forma de ser efectuado y en la restitución de la superficie del pavimento después de completar la estructura.

### 2.4.1.- Definición de túnel y tuneleo falso.

Para poder definir lo que es un tuneleo falso, es necesario conocer el concepto de túnel, considerando tres aspectos: *forma, función y método de construcción*. "Por su forma, es característicamente una cavidad subterránea, de gran longitud en relación con su sección transversal, y por su alineamiento, es más bien horizontal que vertical. Típicamente, la función del túnel es permitir el paso y transporte de personas y materiales por debajo del terreno. Se podría restringir el método de construcción, en una definición limitada, a una perforación con excavación y revestimiento hechos desde el interior" (ref. 11).

Existen también otras acepciones, que amplían o disminuyen los alcances de lo que se podría considerar como un túnel. Una definición informal sería: "...la construcción o montaje de una estructura dentro de una zanja, bajo el terreno o bajo el agua, produce realmente un túnel." Otra definición más formal sería: "...un túnel podría ser: un pasaje construido por debajo del terreno o del agua, de forma esencialmente cilíndrica y cuya alineación axial no difiere mucho de la horizontal, con dimensiones suficientes para permitir el paso de maquinaria y vehículos, excavado y revestido desde el interior o por otros medios." (ref. 11).

Es esta última definición, la que mejor nos delimita el concepto de túnel en cuanto a que conjuga los tres aspectos mencionados de forma, función y método de construcción.

De lo anterior podemos decir que un tuneleo falso cumple el primer punto referente a la forma, al ser una cavidad subterránea (aunque no de gran longitud); cumple también el segundo punto de función, pero el tercer punto concerniente al método de construcción, escapa en cierta forma de la definición de túnel.

### 2.4.2.- Descripción general del tuneleo falso.

La gran mayoría de los tuneleos falsos aplicados en las líneas subterráneas del Metro, presentan un procedimiento constructivo muy similar en cuanto a la secuencia a seguir; teniendo variantes en

cuanto a su dimensión, localización, estructuración y desvíos tanto de instalaciones como vehiculares, entre otras variables. Esto se ejemplifica en la siguiente sección, donde se describen brevemente diferentes tuneleos, los cuales siguen en forma regular el procedimiento constructivo para realizar un tuneleo falso, mismo que a continuación se explica y detalla más adelante en el capítulo 5:

El primer trabajo a realizar, consiste en la construcción de los brocales que entre otras cosas funcionan como guía para la excavación de las zanjas y proceder después a la construcción de los muros tablestaca que pueden ser estructurales o de acompañamiento; todo esto se verifica durante la noche, colocando placas metálicas para cubrir las zanjas al final de cada sesión nocturna con el objetivo de no interrumpir el flujo vehicular.

En la mayor parte de las situaciones, las instalaciones municipales interfieren con la construcción de los muros tablestaca, por lo cual, es necesario efectuar "colganteos" (en el caso de compañía de luz y fuerza y ductos de fibra óptica de TELMEX), desvíos o suspensiones temporales en el servicio de tuberías y colectores; para liberar él o los muros interferidos y proceder a su construcción, aunque en ocasiones se llega a prescindir de dichos muros, empleando otro tipo de estructura de contención como se verá más adelante en los ejemplos.

En forma simultánea a la construcción de los muros tablestaca, se realiza la instalación del sistema de pozos de bombeo, para abatir el N.A.F. previo y durante la excavación del núcleo; el número, distribución y profundidad a la cual son instalados los pozos depende del proyecto en cuestión.

Terminado todo lo anterior, se procede a realizar el bandeo del tránsito, que consiste en cerrar parte de la vialidad (por lo general la mitad) que cruza con el cajón del metro, para comenzar con el tuneleo, el cual se compone de dos fases o etapas.

En la primera fase, se comienza con la excavación a cielo abierto hasta una profundidad comprendida entre 2.0 y 3.0 metros medida a partir del nivel de terreno natural y en algunos casos colocando un nivel de puntales para contener el empuje del terreno sobre los muros tablestaca. Terminada la excavación se tienen dos posibilidades: una es colocar tabletas prefabricadas, para después armar y colar sobre las tabletas un firme de compresión que se liga estructuralmente a los muros tablestaca; la otra opción es colocar un plantilla de grava de 5 cm. para después armar y colar la losa del tuneleo la cual se liga estructuralmente a los muros tablestaca. Cuando se llega a esta etapa es necesario dejar las preparaciones en el lecho bajo de la losa para izar los puntales cuando se excave el núcleo. Dicha losa, puede llegar a formar parte del cajón del Metro si el mismo no es muy profundo, en caso contrario, la losa se emplea exclusivamente durante los trabajos del tuneleo, construyéndose otra losa superior para el cajón. Terminado lo anterior y habiendo alcanzado la losa un 75 % de su resistencia, se colocan los rellenos y la estructura del pavimento, para reabrir al tránsito en esta zona y hacer lo mismo con la otra mitad de la vialidad. En ocasiones es necesario construir la losa en etapas de 10.0 metros cuando el tramo de tuneleo es muy grande.

La segunda y última fase comprende el grueso del trabajo consistente en el abatimiento del nivel freático, excavación, apuntalamiento, estructuración del cajón y en el caso de cajones profundos la colocación de rellenos sobre el mismo; todo esto bajo la vialidad como si se tratara de la excavación de un túnel.

#### **2.4.3.- Objetivos de su aplicación.**

Cuando se proyecta la construcción de un tuneleo falso, los objetivos que se persiguen son fundamentalmente dos; los cuales no necesariamente se encuentran vinculados:

- 1) Disminuir el impacto que sobre las vialidades tienen este tipo de obras (sobre todo en cruceos importantes que no pueden permanecer cerrados durante mucho tiempo), manteniendo abiertas a la circulación parcialmente, durante un periodo relativamente corto de tiempo; las vías o arterias principales que se intersectan, ya sea con el eje de trazo o con algunos accesos subterráneos en cajón a las estaciones (subterráneas o superficiales).

- 2) Cruzar bajo estructuras, las cuales por lo general no permiten la suspensión del servicio que prestan, tales como el propio Metro, vías férreas, acueductos, pasos deprimidos, entre otros.

En la gran mayoría de las líneas subterráneas en cajón y en algunas superficiales con tramos o accesos subterráneos en cajón; se ha aplicado con éxito el procedimiento de tuneleo falso. En la siguiente sección se exponen brevemente, diferentes situaciones en las cuales se tuvieron que emplear tuneleos falsos y la combinación de éstos con otros procedimientos, lo cual nos permite conocer los diferentes grados de complejidad en los mismos, así como su versatilidad de aplicación, para diferentes casos.

**2.5.- TUNELEOS FALSOS EN ALGUNOS CRUCEROS VIALES IMPORTANTES.**

**2.5.1.- Tuneleo falso en el cruce con la avenida Insurgentes Sur, correspondiente a la estación Chilpancingo, línea 9 (ref. 10).**

Este tuneleo se efectuó entre los cadenamientos 16+490.500 y 16+531.300 correspondiente a la estación Chilpancingo. Fue necesario colar los muros tablestaca de la futura línea 15 como se muestra en la figura 2.7 hasta el nivel de subrasante de la línea 9. En los cadenamientos 16+512.760 y 16+524.370 se tenían dos colectores de  $\varnothing = 122$  cm. y  $\varnothing = 60$  cm. respectivamente, por lo cual fue necesario extraerlos para permitir la construcción de los muros tablestaca. Se emplearon tabletas para construir la losa del tuneleo misma que forma parte de la estación. En la figura 2.8 se muestran las etapas de la primera fase del tuneleo, misma que se llevó hasta una profundidad aproximada de 2.22 m.

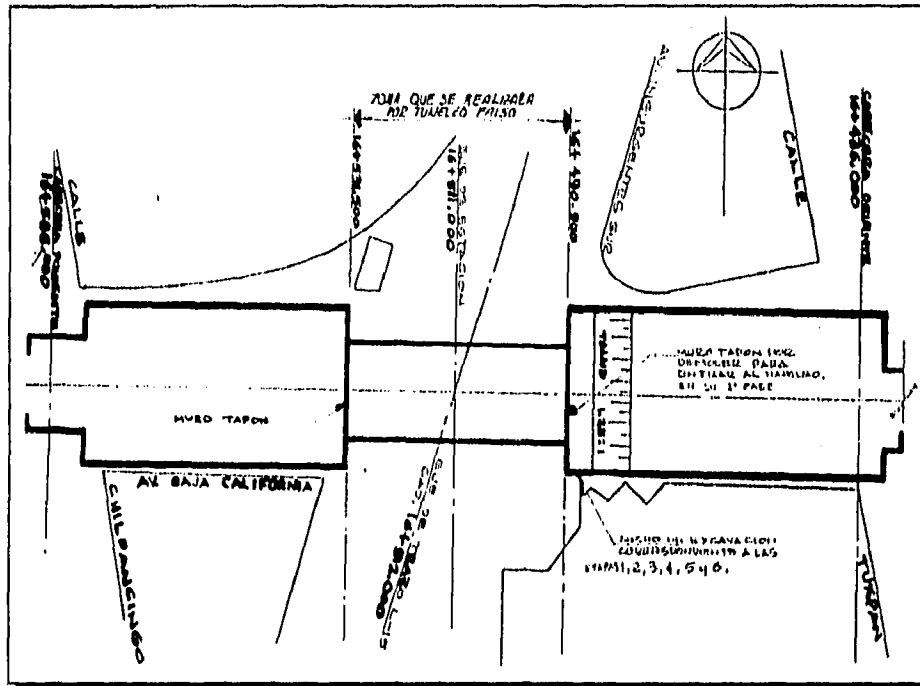


Figura 2.7.- Planta estación Chilpancingo.

**2.5.2.- Tuneleos falsos en el cruce con la avenida Patriotismo y en la zona de cruce del trolebús, correspondiente al tramo Chilpancingo - Patriotismo, línea 9 (ref. 10).**

El tuneleo correspondiente a la avenida Patriotismo se ubicó entre los cadenamientos 17+409.000 y 17+495.000, como se ve en la figura 2.9.

La profundidad a la cual se desplantó la losa fue de 2.00 m., realizándose los colados de la losa en 5 etapas de 8.0 m. cada una. Esta losa no formó parte del cajón y el espacio vacío que se dejó entre la misma y la losa superior del cajón fue de 2.95 m.

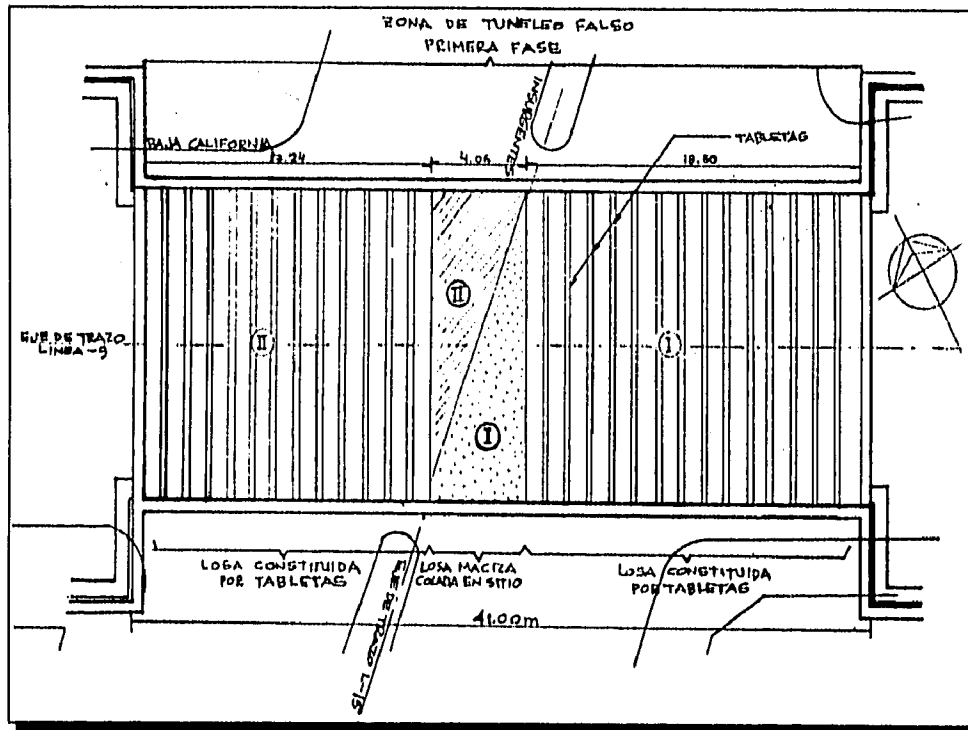


Figura 2.8.- Planta de losa de la primera fase del tunelero.

El tunelero correspondiente a la zona de cruce del trolebús se ubicó entre los cadenamientos 17+409.000 y 17+451.000, como se ve en la figura 2.9.

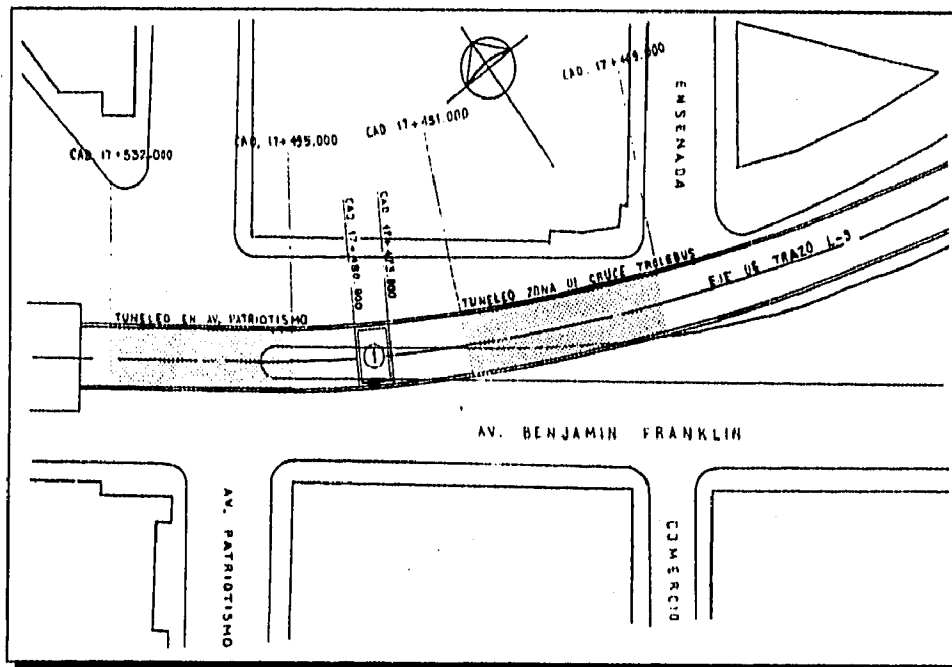


Figura 2.9.- Planta de localización.

La profundidad a la cual se desplantó la losa del tunelero (y superior del cajón) fue de 4.75 m., realizándose los colados de la losa en 5 etapas de 11.0 m. aproximadamente; construyéndose al mismo tiempo la galería de concreto para recibir al colector de  $\varnothing = 1.22$  m.



**2.5.3.- Tunnelleo falso en el cruce con la avenida Nuevo León, correspondiente al tramo Chilpancingo - Patriotismo, línea 9 (ref. 10).**

El procedimiento constructivo se dividió en dos zonas:

- 1) Zona de tunelleo falso (cadenamiento 16+900.300 a 16+861.720).
- 2) Zona a cielo abierto (cadenamiento 16+861.080 a 16+840.830).

Lo anterior, como consecuencia de las interferencias provocadas por un colector  $\varnothing = 0.91$  m. y un cable de 20 KV., estos en la zona de tunelleo; y en la zona a cielo abierto, un cable de 85 KV. y una galería de agua potable de 48" como se ve en la figura 2.10.

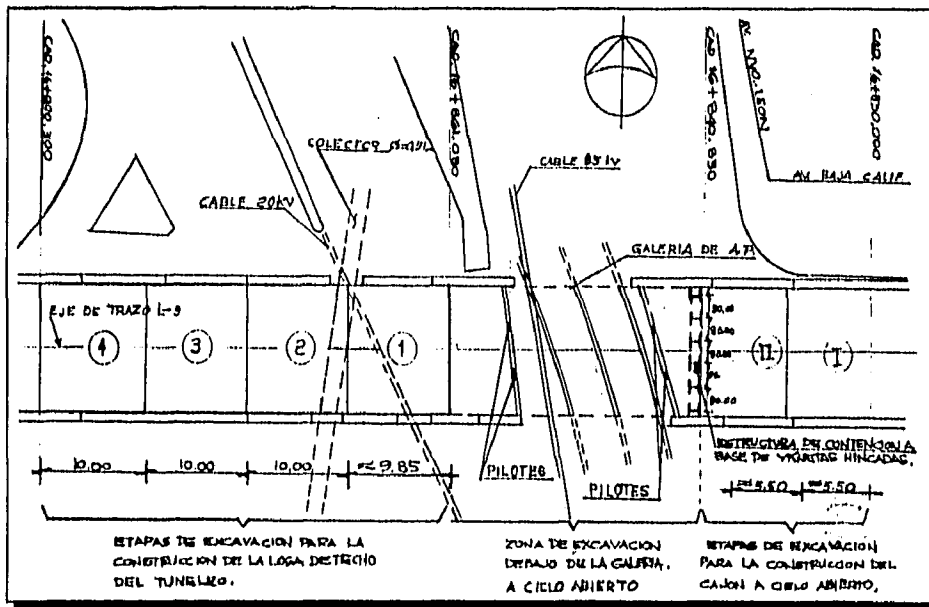


Figura 2.10.- Etapas de excavación.

El procedimiento se efectuó en tres fases o etapas, que a continuación se describen brevemente:

En la primera etapa, se construyó la losa de techo del tunelleo (y superior del cajón) en etapas de 10.0 m. (fig. 2.10) hasta una profundidad de 2.70 m. colocando un nivel de puntales, al mismo tiempo se efectuó el puenteo del cable de 20 KV. mediante tabloncillos y viguetas (fig. 2.11), y la construcción de la estructura de contención a base de viguetas y tabloncillos, donde no se pudo colar el muro tablestaca por la interferencia del colector, (fig. 2.12). Terminado lo anterior se restituyó el pavimento y se encauzó todo el flujo vehicular por esta zona.

En la segunda etapa, se inició la excavación en la zona a cielo abierto hasta el cadenamiento 16+840.880, hincando previamente las viguetas para construir la estructura de contención cuya función era delimitar la zona de excavación debajo de la galería de A.P. (fig. 2.10) y realizar un proceso similar al efectuado con el colector y el cable de alto voltaje en la etapa anterior.

Por último, la tercera etapa consistió en la excavación en la zona de tunelleo, teniendo ya estructuradas las zonas a cielo abierto, ligando la losa de techo del cajón en este tramo con la del tunelleo.

**2.5.4.- Tunnelleo falso en el cruce con la avenida Javier Rojo Gómez, correspondiente al tramo Iztapalapa - Cerro de la Estrella, línea 8 (ref. 9).**

Ubicado entre los cadenamientos 4+206.186 y 4+234.000, las mayores interferencias estaban dadas por un colector de  $\varnothing = 60$  cm. y una tubería de agua tratada de 72" de diámetro (fig. 2.13).

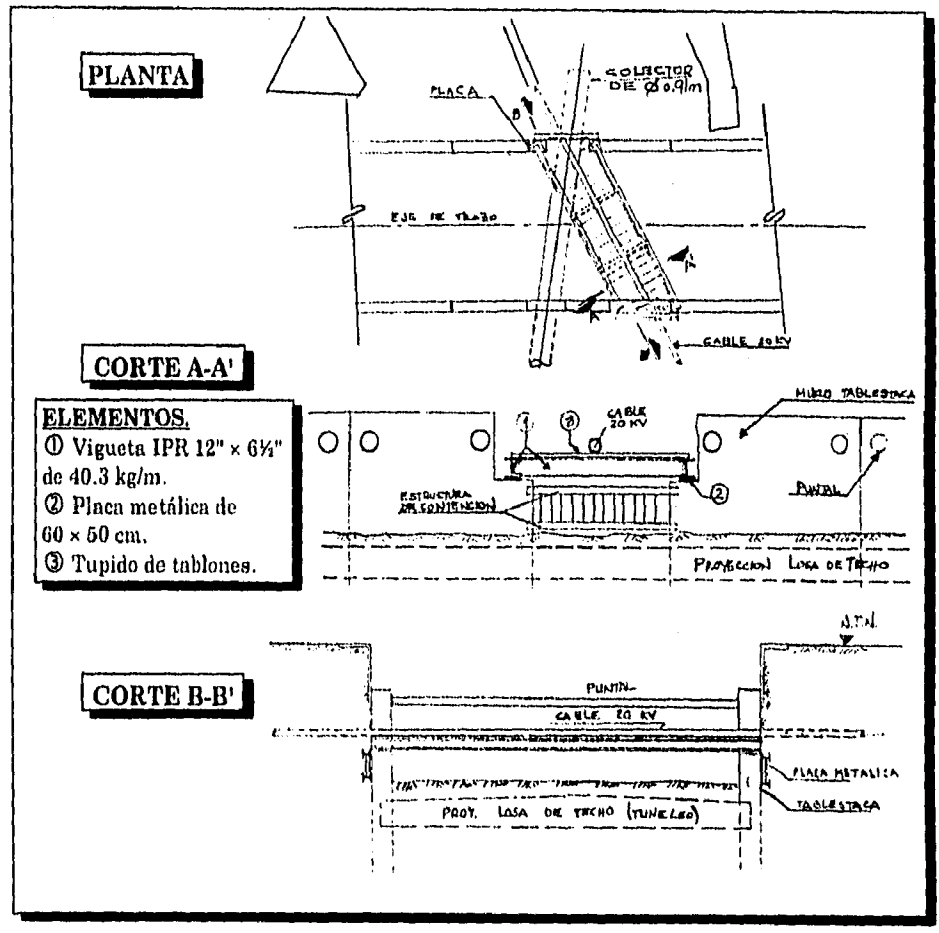


Figura 2.11.- Puenteo de cable de alta tensión de 20 KV.

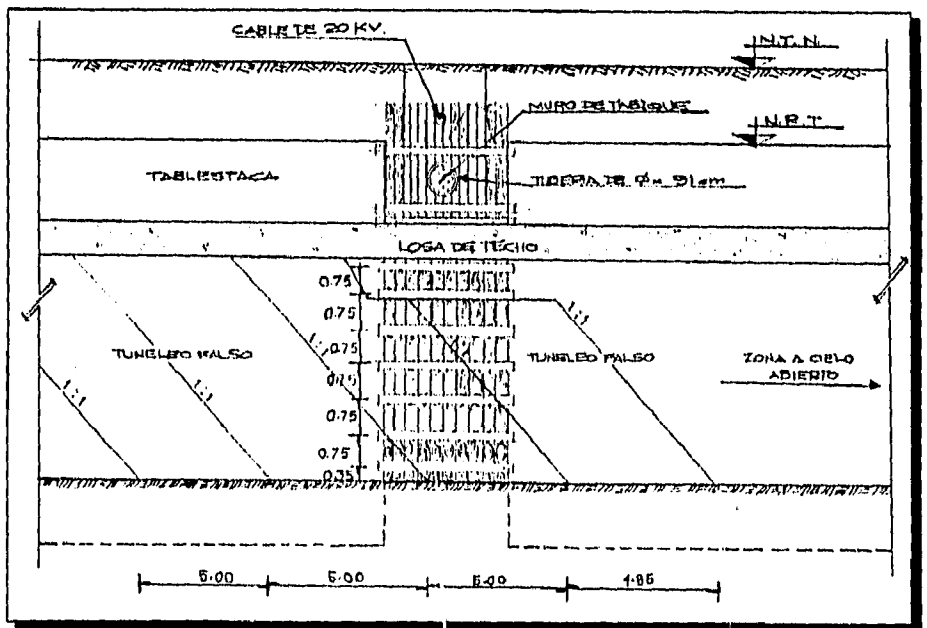


Figura 2.12.- Zona de tuneleo falso.

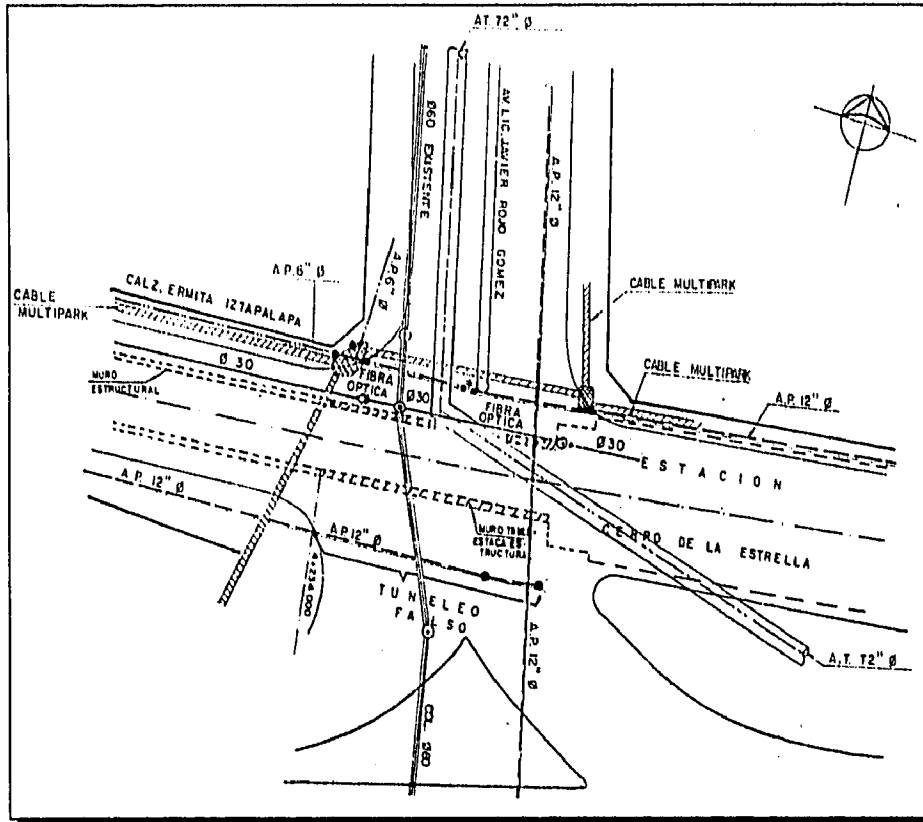


Figura 2.13.- Planta de localización de instalaciones.

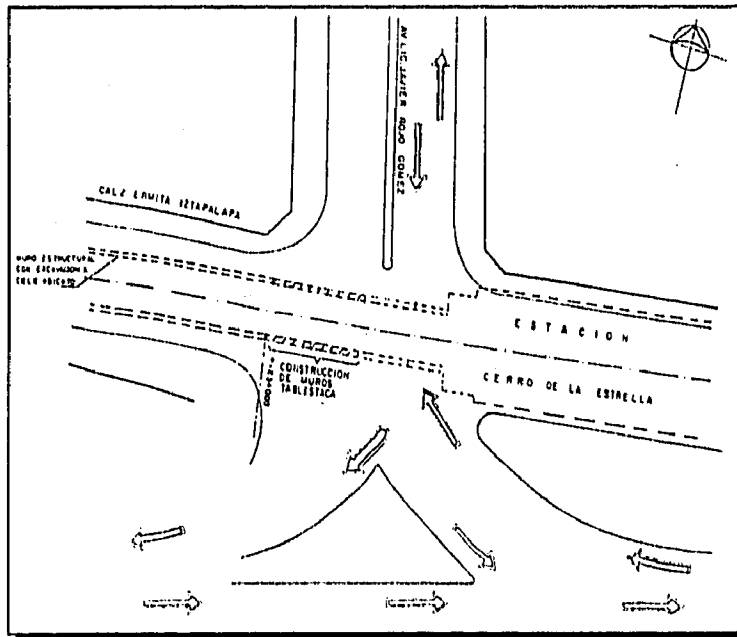


Figura 2.14.- Bando de tránsito al arroyo oriente.

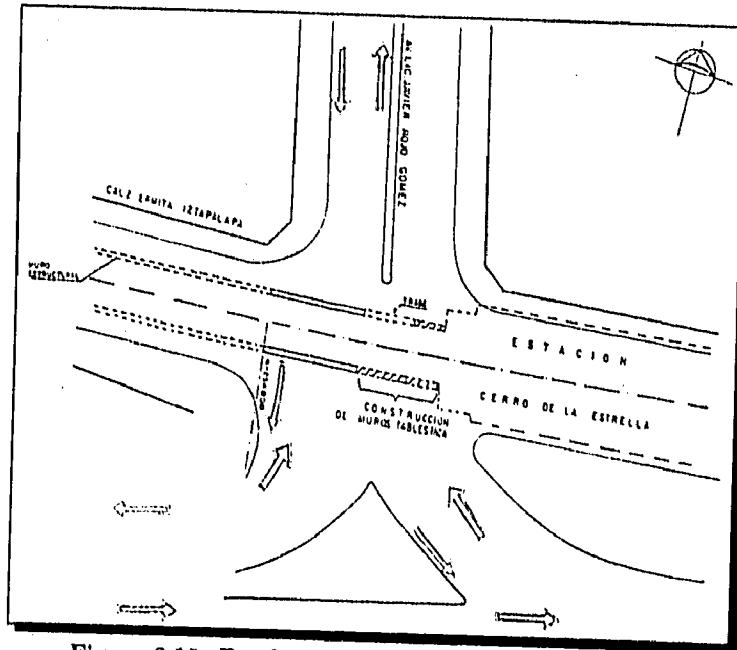


Figura 2.15.- Bandeo de tránsito al arroyo poniente.

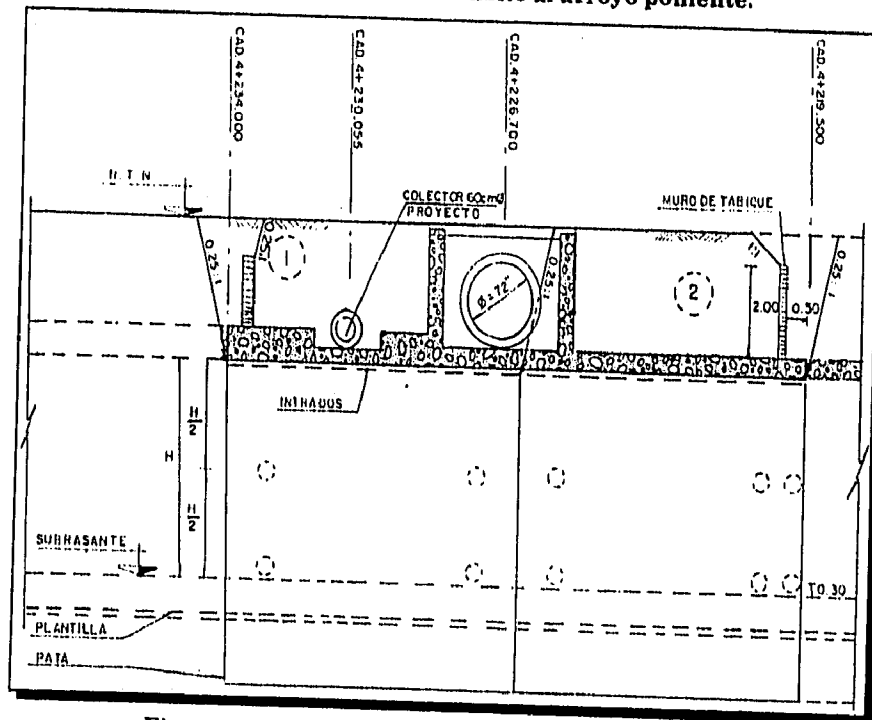


Figura 2.16.- Cruce de tuberías con cajón de metro.

Los trabajos consistieron en bandear el tránsito de la avenida Rojo Gómez por el arroyo oriente de la misma (fig. 2.14), para construir la losa del tuneleo (superior del cajón) así como las galerías para el desvío de las dos tuberías antes citadas (figs. 2.16 y 2.17).

Realizado lo anterior y restituido el pavimento, se realizó el bandeo del tránsito ahora por el arroyo poniente de la avenida (fig. 2.15), para construir, la losa del tuneleo, la trabe invertida en donde no se pudo colar el muro tablestaca estructural norte por la interferencia de la tubería de agua tratada de 72" y por último restituir el pavimento para abrir la vialidad.

Ya en la etapa de excavación, en la zona donde no se pudo construir el muro tablestaca estructural, se construyó un muro de contención a base de viguetas y tablonés como se observa en la figura 2.18 para poder construir la losa de piso y muro estructural.

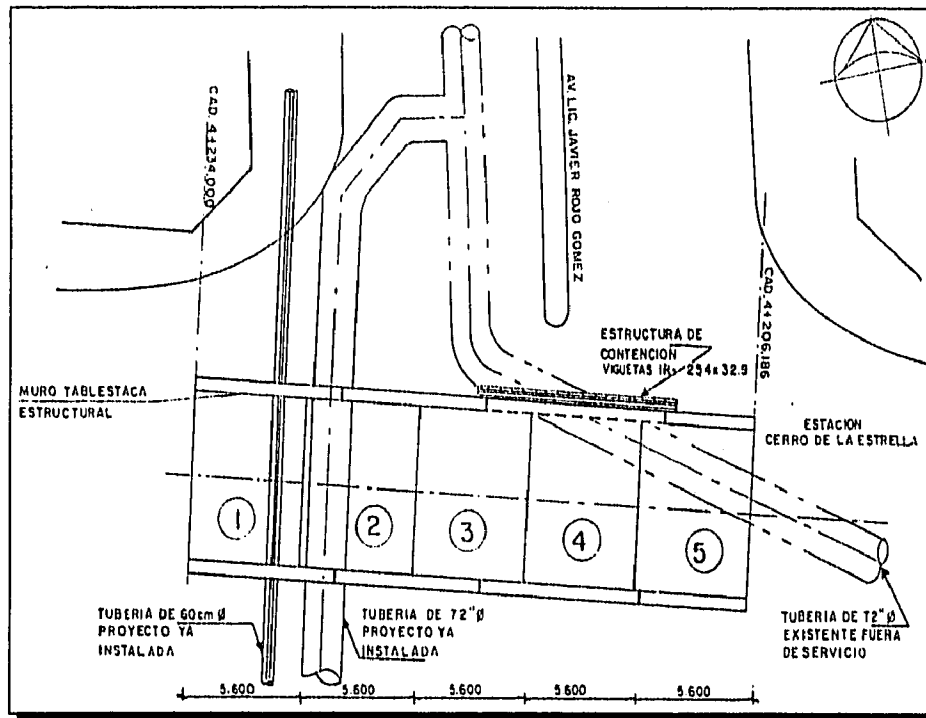


Figura 2.17.- Segunda fase de tuneleo falso.

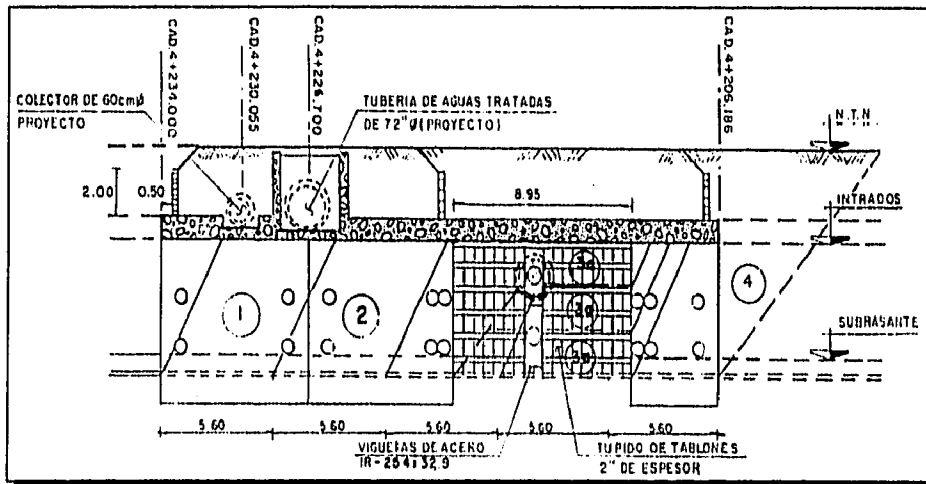


Figura 2.18.- Etapas de excavación en tuneleo falso.

## 2.6.- TUNELEOS EN CONJUNCIÓN CON OTROS PROCEDIMIENTOS, APLICADOS BAJO DIFERENTES ESTRUCTURAS Y CRUCEROS VIALES.

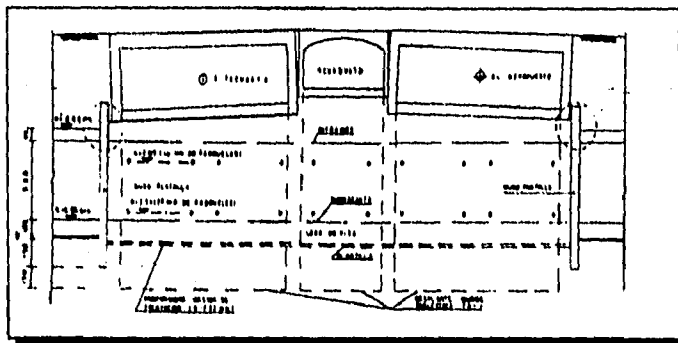
### 2.6.1.- Tuneleos en la línea "A" (ref. 4).

"La construcción de la línea A del Metro se realizó en dos soluciones: subterránea y superficial. La primera, se construyó a base de un túnel falso de sección rectangular conformado a base de muros tablestaca y estructurales, losa de piso y techo integrado por tabletas prefabricadas y firme de compresión..."

"La solución subterránea se consideró en tres tramos de la Línea el primero de aproximadamente 1600 m. de longitud desde Pantitlán hasta la Calzada Ignacio Zaragoza, para poder cruzar por debajo de la Línea 5 del Metro y los carriles norte de la Calzada Ignacio Zaragoza; el segundo tramo de 500 m. de longitud se construyó entre Acatitla y Santa Marta a efecto de librar la vialidad de la propia Calzada, así mismo, se consideró un paso deprimido del metro en cajón subterráneo de aproximadamente 385 m. en el tramo Santa Marta Los Reyes. Lo anterior, debido a la importancia que representa la Avenida Simón Bolívar en el Municipio de Los Reyes, Estado de México".

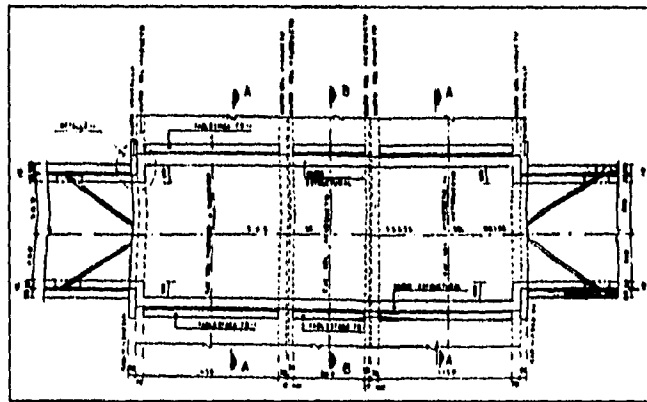
**2.6.2.- Tunneler aplicado en el cruce de línea 3, tramo Centro Médico - Etiopía con el viaducto Miguel Alemán y el ducto del río de la Piedad (ref. 16).**

En este procedimiento el mayor obstáculo lo representó el hecho de construir el cajón del Metro bajo los cajones del viaducto (2) y el del acueducto que conduce el río de la Piedad (fig. 2.19) correspondiente al tramo Centro Médico - Etiopía de la línea 3 sur y entre los cadenamientos 11+210.215 y 11+243.990.



**Figura 2.19.- Corte transversal del viaducto y acueducto.**

Los trabajos se iniciaron con el desvío del tránsito del viaducto hacia las laterales del mismo, para proceder a efectuar la demolición de las franjas de las losas superior e inferior del viaducto con la finalidad de construir los muros tablestaca (figura 2.20), restituyéndose las franjas demolidas del viaducto una vez construidos los muros.



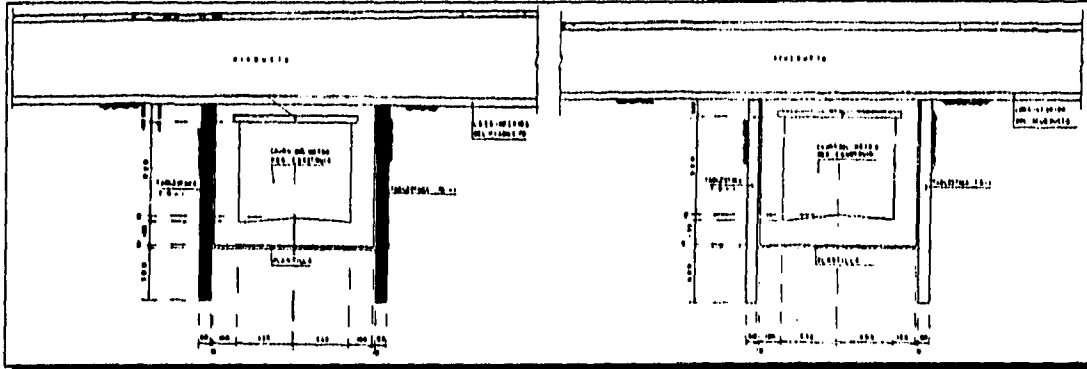
**Figura 2.20.- Planta general y localización de tablestacas.**

El siguiente paso fue desviar en forma provisional el río de la Piedad, para poder construir los muros tablestaca bajo el acueducto; mediante la colocación de 4 tubos de acero (2 a cada lado) de 36"Ø (0.915 m.), salvando con esto una distancia de 20 m. de acueducto. Para colocar la tubería fue necesario demoler los muros del acueducto y del viaducto bajando el caudal del río (desviándolo por el colector Morena) hasta un tirante de 30 cm., colocando en seguida una costalera aguas arriba y aguas abajo (ataguía) con lo cual el caudal era desviado hacia los tubos de 36"Ø; construyendo finalmente dos muros de 2.20 m. de altura para reforzar las costaleras.

Terminado lo anterior, se demolieron las franjas de las losas superior e inferior del acueducto

para poder construir los muros tablestaca en esa zona (figura 2.20), restituyéndose las franjas demolidas del acueducto una vez construidos los muros.

El siguiente paso consistió en efectuar inyecciones de impermeabilización y consolidación bajo el viaducto y acueducto, realizándose después los trabajos de excavación del túnel bajo la protección de los muros tablestaca y las losas inferiores del acueducto y viaducto (tuneleo), empleando una retroexcavadora y un cargador frontal para transportar el material excavado hasta la alcancía de extracción.

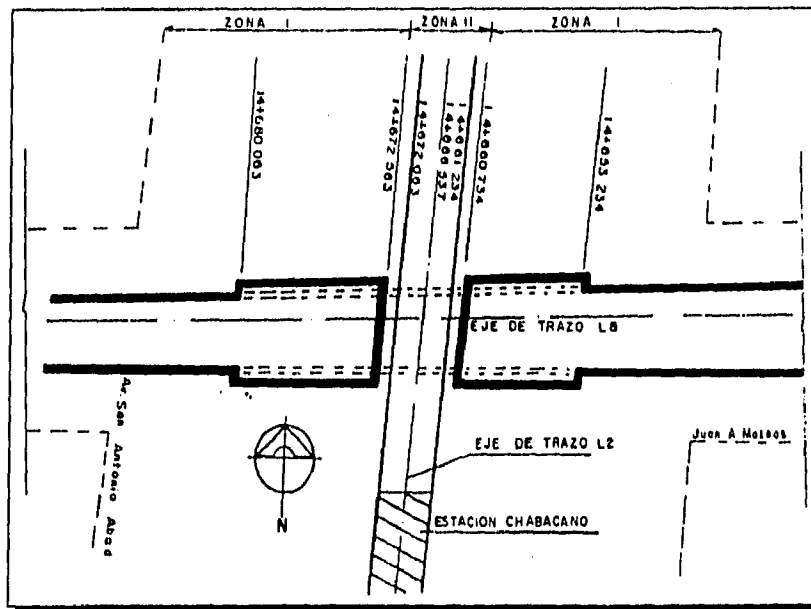


**Figura 2.21.- Dimensiones y estructuración general del cajón bajo viaducto y acueducto.**

Finalmente se estructuró el cajón del Metro (figura 2.21) y se volvió a su cauce original el acueducto, retirando la tubería, costaleras y muros del desvío, rehabilitando finalmente los muros del acueducto y viaducto.

**2.6.3.- Tuneleo falso en el cruce con la calzada San Antonio Abad y línea 2 superficial, correspondiente al tramo Chabacano - Obrera de línea 8 (ref. 3).**

Este procedimiento es importante por el grado de complejidad que representa, ya que la estructura de la línea 2 no permite suspensiones en su servicio, de ahí que el tuneleo a efectuar fuera en cierta forma complicado (figura 2.22).



**Figura 2.22.- Planta de localización.**

Para empezar, el proceso se dividió en dos zonas, una correspondiente a la avenida San Antonio Abad y la otra al cruce bajo línea 2. La primera se atacó realizando los bandeos de tránsito en dos etapas

(en cada arroyo), para disminuir los efectos sobre el flujo vehicular como se observa en la figura 2.23, empleando tabletas en la construcción de dicha losa.

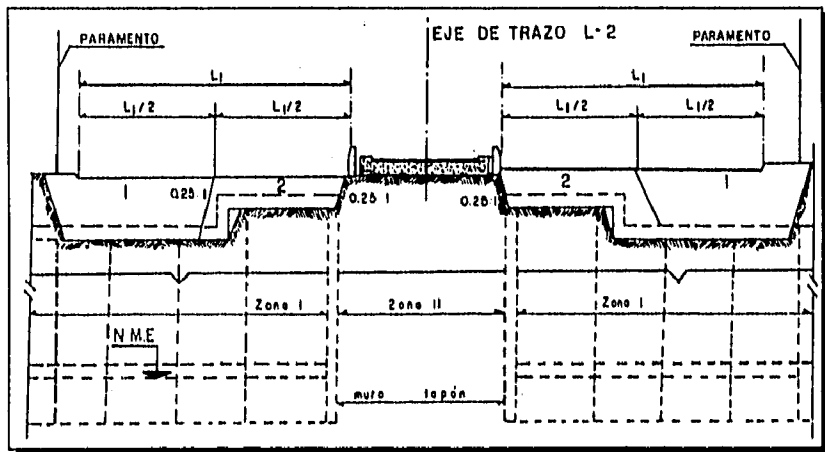


Figura 2.23.- División del proceso en dos etapas.

Terminada la primera etapa y restituido el pavimento, se comenzó con la excavación y estructuración del cajón bajo la vialidad hasta el muro tapón, para así iniciar la segunda etapa, de la cual se presenta un breve resumen a continuación:

Para poder iniciar la excavación bajo línea 2, fue necesario realizar una inyección de consolidación (en horas en que línea 2 no daba servicio) para después construir la estructura que soportaría dicha línea. Esta estructura estaba compuesta por columnas metálicas (4), vigas portantes (2) y cajones metálicos, hincados estos últimos a manera de pilotes empleando gatos hidráulicos apoyados en los muros que forman parte de la losa del tuneo (fig. 2.24 y 2.25). Construida esta estructura, se procedió al apuntalamiento e hincado del ademe lateral formado por secciones tubulares (figs. 2.26 y 2.27), y terminado lo anterior, se inició el proceso de excavación y estructuración del cajón, retirando al final las columnas metálicas, vigas portantes y la parte saliente de los cajones metálicos, inyectando en la zona de los cajones metálicos con el fin de apoyar la estructura de la línea 2 sobre el nuevo cajón.

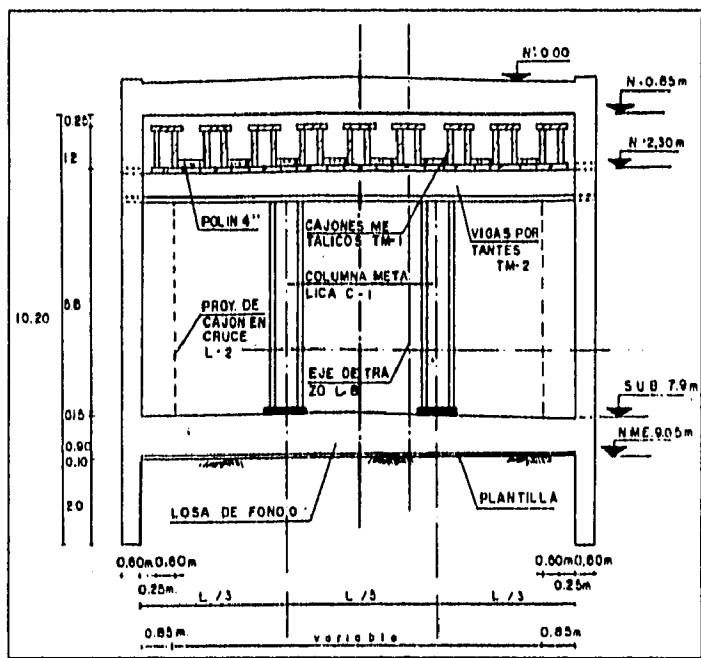


Figura 2.24.- Corte de la estructura temporal bajo línea 2.



**CAPÍTULO 2**

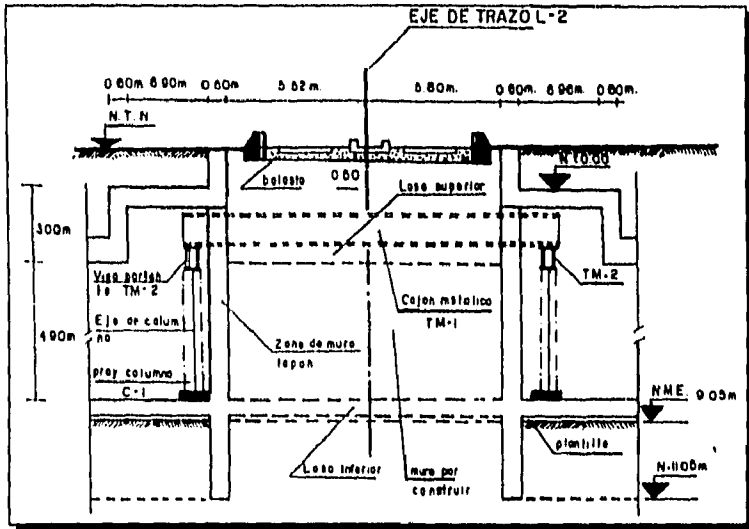


Figura 2.25.- Perfil de la estructura temporal bajo línea 2.

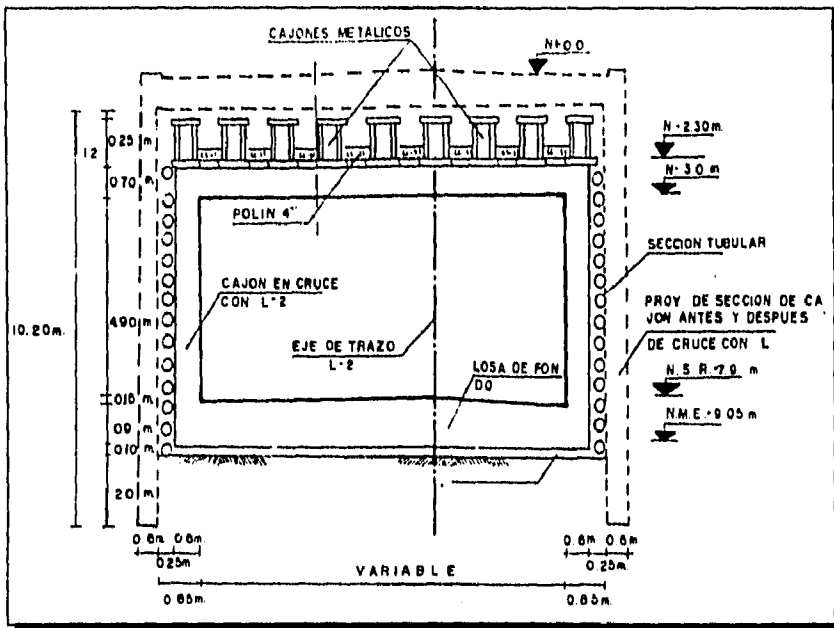


Figura 2.26.- Ade-me lateral para estructuración de cajón de línea 8.

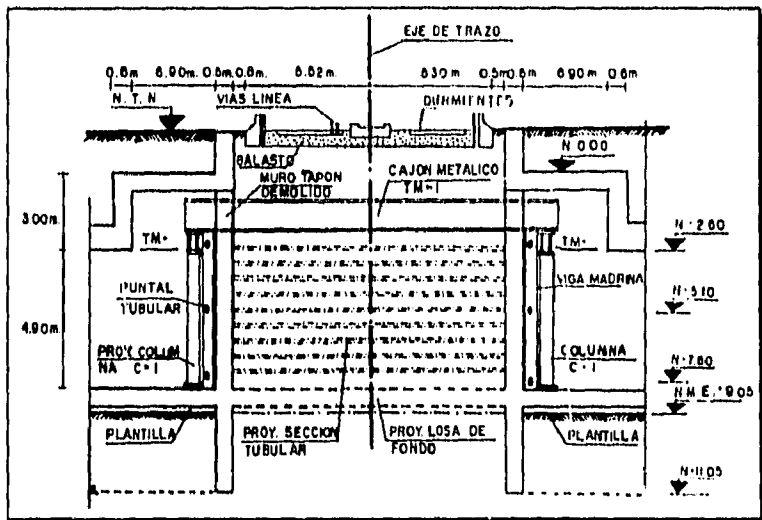
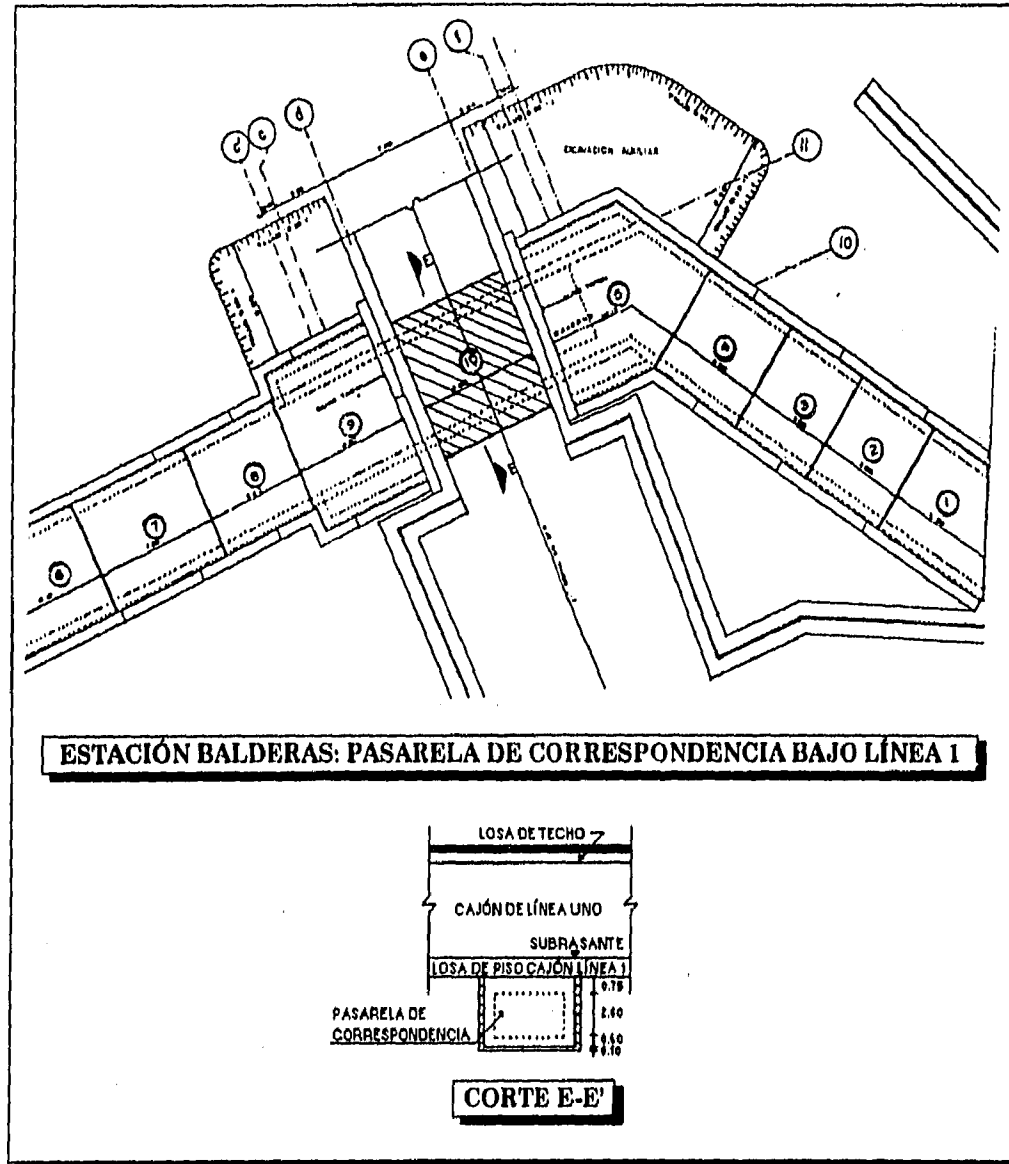


Figura 2.27.- Ade-me lateral.



Y por último, en la pasarela de correspondencia de línea 1 con línea 3, estación Balderas (ref. 7); se realizó un tuneleo falso para cruzar por debajo de la línea 1 en operación (fig. 2.30).



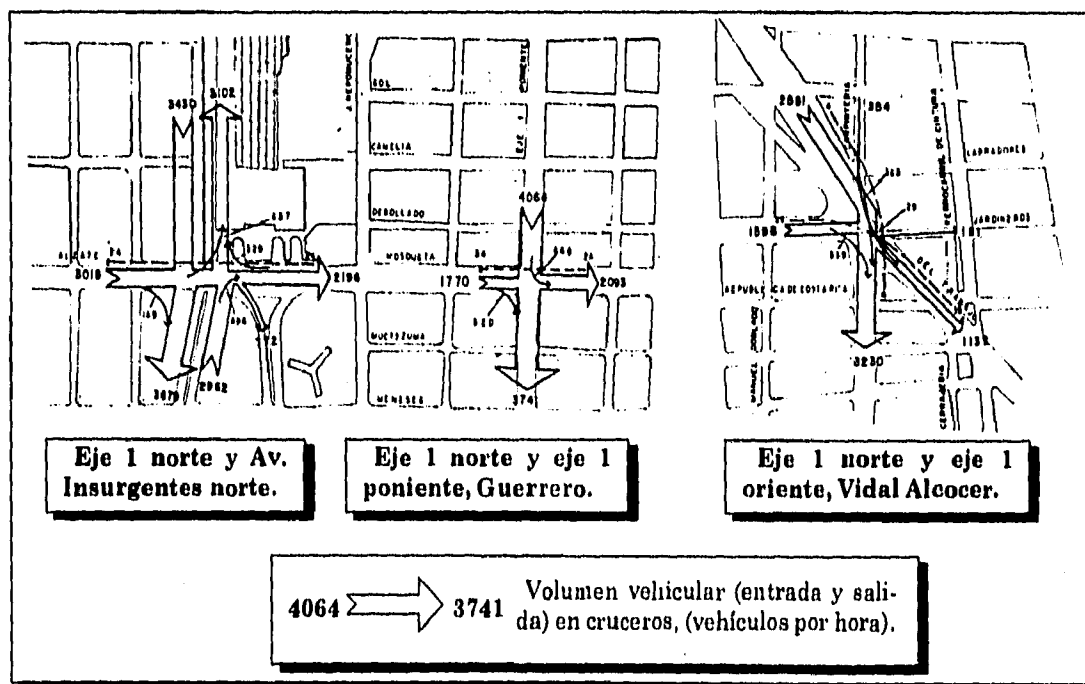
**Figura 2.30.- Pasarela de correspondencia bajo línea uno en estación Balderas, línea 3.**

**2.7.- TUNELEOS FALSOS A APLICAR EN LÍNEA B (ref. 8).**

Para el caso de la línea B, se proyectaron diferentes tuneleos, tanto para disminuir el efecto sobre las vialidades como para cruzar por debajo de la estructura de otras líneas. En el primer caso, los tuneleos se definieron según los estudios de volúmenes vehiculares realizados en el tramo subterráneo que comprende desde la cola de maniobras de la terminal provisional Buenavista, hasta la transición de subterráneo a elevado en la estación San Lázaro. Los resultados de estos estudios, integran a los diferentes aforos vehiculares realizados en los principales cruces viales, aledaños al eje 1 norte. En la figura 2.31 se observan los resultados de esos estudios para los cruces del eje 1 norte con las siguientes vialidades: avenida Insurgentes, el eje 1 poniente Guerrero y el eje 1 oriente Vidal Alcocer. Los tuneleos proyectados se enlistan a continuación:

**CAPÍTULO 2**

- Tunnels falsos en el cruce con la avenida Insurgentes Norte, correspondiente a la estación Buenavista.- Además de efectuarse el túnel, se dejarán ciertas preparaciones, para la construcción de la futura línea 15 que correrá por avenida Insurgentes.
- Tunnels falsos en el cruce con el eje 1 poniente Guerrero, correspondiente al tramo Buenavista - Guerrero.
- Tunnels falsos en el cruce con el cajón de la estación Guerrero de línea 3 en operación.- Localizado en el cruce del eje 1 Norte con la calle de Zarco.
- Tunnels falsos en el cruce con la lateral Nor-poniente de la avenida Paseo de la Reforma, correspondiente al tramo Guerrero - Garibaldi.- Este túnel fue cancelado, debido a que el ancho de calzada en esta zona, permitió desviar el flujo vehicular sobre la misma.
- Tunnels falsos en el cruce con el deprimido correspondiente al eje central y con el cajón de la estación Garibaldi de línea 8 en operación.- En este túnel existían preparaciones bajo el deprimido y el cajón de línea 8, recientemente construidos, con lo cual no se afectó significativamente la vialidad de Paseo de la Reforma.
- Tunnels falsos en el cruce con el eje 1 oriente Vidal Alcocer, correspondiente al tramo Tepito - Morelos.



**Figura 2.31.- Volúmenes vehiculares actualizados en avenida Insurgentes, Guerrero y Vidal Alcocér.**

## REFERENCIAS.

- 1.- Alcántara Cárdenas, Luis Eduardo. Proceso constructivo de la estación de correspondencia Consulado de la línea 5 de las obras de ampliación del metro. Tesis profesional. Facultad de Ingeniería, U.N.A.M. 1981.
- 2.- Castañeda N., Carlos Enrique. El Proyecto de la Obra Civil del Metro. Revista *Ingeniería*. Volumen LII. Número 1. Año 1982. Páginas 127-149. Facultad de Ingeniería U.N.A.M. México D.F.
- 3.- Centeno Hernández, José Arturo. Línea 8 del metro proceso constructivo (Chabacano - Obrera). Tesis profesional. Facultad de Ingeniería, U.N.A.M. 1993. 90 páginas.
- 4.- Ciudad de México Departamento del Distrito Federal y Gobierno del Estado de México. Línea "A" Pantitlán-La Paz. 20 páginas.
- 5.- Espinoza Ulloa, Jorge. EL METRO. Una solución al problema del transporte urbano. Representaciones y Servicios de Ingeniería. S.A. 28 de Noviembre de 1975. México, D.F. 143 páginas.
- 6.- Espinoza Ulloa, Jorge. S.T.C. (Metro). El Metro de México. 1ª Memoria. México D.F. 1973. 117 páginas, ilustraciones.
- 7.- Gómez Stauder, Roberto. Importancia y descripción del proceso constructivo de las obras de ampliación de la estación Balderas del metro. Tesis profesional. Facultad de Ingeniería, U.N.A.M. 1980. 149 páginas.
- 8.- ICA. Especificaciones de mecánica de suelos para el metropolitano línea B.
- 9.- ICA. Especificaciones de mecánica de suelos para la línea 8 del Metro.
- 10.- ISTME. Especificaciones de mecánica de suelos para la línea 9 del Metro.
- 11.- Megaw, T. M. y Bartlett, J. V. Túneles. Planeación, diseño y construcción. Volumen 1. Versión española: Carlos Alberto García Ferrer. Editorial LIMUSA S.A. de C.V. Marzo de 1988. México D.F. 331 páginas.
- 12.- Ocampo Franco, M. Roberto. Crecimiento de puesta en operación de redes de ferrocarriles urbanos. COVITUR. Abril 1993. México, D.F., 26 páginas y anexo.
- 13.- Rico Rodríguez, Alfonso y Del Castillo Mejía, Hermilo. La Ingeniería de suelos en las vías terrestres. Volumen 2. (Carreteras, Ferrocarriles y Aeropistas). Editorial LIMUSA S.A. 7ª reimpresión. Julio de 1992. México D.F. 643 páginas.
- 14.- Schneebeli, Georges. Muros pantalla. Técnicas de realización. Métodos de cálculo. Traducción del francés: Francisco Javier Calveras Marles. Editores técnicos asociados S.A. 1974. Barcelona, España. 221 páginas.
- 15.- Széchy, Károly. The art of tunnelling. Akadémiai Kiadó. 2ª edition. 1973. Budapest, Hungary. 1097 páginas.
- 16.- Torre García, Francisco de la. Procedimiento constructivo del cruce de la línea 3 sur del metro con el viaducto Miguel Alemán. Tesis profesional. Facultad de Ingeniería, U.N.A.M. 1980. 70 páginas con ilustraciones.
- 17.- Trejo Caballero, Carlos Enrique. Principales interferencias hidráulicas causadas por la construcción de la línea 8 del metro. Tesis profesional. Facultad de Ingeniería, U.N.A.M. 1993. 107 páginas.

7

## **CAPÍTULO 3**

# **“ESTUDIO GEOTÉCNICO PARA LA SOLUCIÓN EN CAJÓN DENTRO DE LA ZONA DEL LAGO”**

*Objetivo específico.* - Identificar los diferentes elementos que componen un estudio geotécnico dentro de la zona del lago para la solución en cajón del Metro.

- 3.1. ANTECEDENTES GEOLÓGICOS Y GEOTÉCNICOS DEL VALLE DE MÉXICO.**
  - 3.2. DEPÓSITOS DEL LAGO.**
    - 3.2.1. Proceso de formación.**
    - 3.2.2. Evolución de las propiedades mecánicas.**
    - 3.2.3. Estratigrafía.**
  - 3.3. ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA DEL VALLE DE MÉXICO.**
  - 3.4. ESTUDIO GEOTÉCNICO EMPLEADO PARA LA SOLUCIÓN EN CAJÓN EN LA ZONA DEL LAGO.**
  - 3.5. SONDEO CON EL CONO ELÉCTRICO.**
    - 3.5.1. Desarrollo de la prueba.**
      - 3.5.1.1. Descripción del equipo necesario.**
      - 3.5.1.2. Realización de la prueba.**
      - 3.5.1.3. Recomendaciones para corregir los errores más comunes en la prueba de cono.**
    - 3.5.2. Alcances y beneficios.**
  - 3.6. PERFIL ESTRATIGRÁFICO DEL TRAMO BUENAVISTA-GUERRERO.**
- REFERENCIAS.**

**3.1.- ANTECEDENTES GEOLÓGICOS Y GEOTÉCNICOS DEL VALLE DE MÉXICO.**

Conocer la Geología del Valle de México, es un punto importante para poder comprender mejor las características geotécnicas de los diferentes estratos sobre los que se encuentra la Ciudad de México; en el manual de diseño geotécnico de COVITUR (referencias 3 y 5), se hace una división de las características geológicas en base a la actividad volcánica presente en la cuenca, las diferentes condiciones climáticas y los diferentes tipos de materiales depositados a partir del cierre de la cuenca del Valle de México; lo anterior es descrito en base a tres marcos de referencia: "el geológico general, el paleoclimático y el vulcanológico". A continuación se explicará en que consiste cada uno de ellos.

*a) Marco geológico.*

La cuenca cerrada del Valle de México era una cuenca cerrada hasta el año de 1789 en que es abierto el tajo de Nochistongo. Su ubicación es la siguiente: se encuentra limitada al Norte por las Sierras de Pachuca, Tepotzotlán y Tezontlalpan; al sur por las Sierras de Chichinautzin (Cuauhtzin) y la del Ajusco; al Este por la Sierra Nevada y los llanos de Apan; y al Oeste por la Sierra de las Cruces, Monte Alto y Monte Bajo, (referencia 2).

El haber sido en sus orígenes una cuenca cerrada (hace aproximadamente medio millón de años, que concuerda con el Pleistoceno superior), trajo consigo, una deposición de materiales constituidos en su mayoría por arcillas de origen lacustre en su parte superior, mientras que en su parte inferior se pueden encontrar depósitos clásticos debido a la acción de ríos, arroyos, volcanes y glaciares.

Intercalados dentro los estratos mencionados, se pueden encontrar diferentes capas de material volcánico (ceniza y pómez), debido a las erupciones volcánicas de mayor y menor magnitud ocurridas durante el inicio del cierre de la cuenca. Es posible encontrar también en dichos depósitos, diferentes tipos de suelos, como consecuencia de las modificaciones causadas por los agentes atmosféricos (meteorización) de los materiales depositados (de origen aluvial, fluvial, glacial y volcánico); de ahí que estos suelos antiguos (paleosuelos), tengan ciertas características representativas del clima en el cual fueron formados.

*b) Marco paleoclimático.*

Para comprender mejor la situación climática dentro de la cuenca, es necesario remontarse hasta el periodo geológico del Plioceno. Durante este periodo el clima era fundamentalmente semiárido; cambiando en el Pleistoceno a un clima húmedo y frío durante ciertos periodos denominados glaciaciones, intercalados con periodos cálidos de clima denominados interglaciales. En la tabla 3.1 se proporciona información de los cambios climáticos más importantes ocurridos en Norteamérica (periodos glaciales e interglaciales):

PERIODOS GLACIALES E INTERGLACIALES	
AÑOS	PERIODOS
10,000	Holoceno reciente.
10,000 — 80,000	4a. Glaciación: Wisconsin 3 avances.
80,000 — 100,000	3er. Interglacial: Sangamon.
100,000 — 300,000	3a. Glaciación: Illinois 2 avances.
300,000 — 400,000	2o. Interglacial: Gran Interglacial Yarmouth.
?	2a. Glaciación: Kansas.
?	1er. Interglacial.
~ 900,000	1a. Glaciación: Nebraska.

Tabla 3.1.- Periodos glaciales e interglaciales.

A partir del cierre de la cuenca (hace 500,000 años), podemos deducir la ocurrencia de dos periodos interglaciales (Yarmouth y Sangamon), y dos periodos glaciales (Illinois y Wisconsin). Lo anterior se puede corroborar a través de las barrancas de la Magdalena, Santa Rosa y la Cañada, originadas por la

erosión glacial (Illinois); mientras que la presencia de suelos rojizos arcillosos subyacentes a formaciones glaciales, comprueba la existencia de periodos interglaciales.

Así tenemos que en base a el color que presentan los estratos, se puede determinar aproximadamente el tipo de clima que imperaba, así se tiene que coloraciones amarillas, son típicas de ambientes fríos, y coloraciones café y hasta rojizos, son producto de ambientes moderados a subtropicales.

*c) Marco vulcanológico.*

La influencia de la actividad volcánica en la cuenca se puede observar en el tipo de material depositado en la misma, que es eminentemente de origen volcánico. La formación de dichos depósitos se debió tanto a los diferentes derrames de los aparatos volcánicos, como a las acumulaciones de polvo y cenizas volcánicas transportadas por el viento.

Al sobrevenir las efusiones de lava del Chichinautzin, con un espesor aproximado de 2000 m., el drenaje natural de la cuenca por el sur se cerró y fue entonces cuando el Valle de México se convirtió en una cuenca cerrada.

Dentro de los volcanes que aportaron mayor volumen y variedad de materiales dentro de la cuenca se encuentra el denominado cerro de San Miguel que se ubica al sur-oeste de la Ciudad de México. Dentro de las contribuciones menores podemos mencionar el cerro de Chapultepec, el del Tepeyac, el Peñón del Marqués, la Sierra de Santa Catarina y los derrames del Xitle en San Ángel.

El transporte efectuado por el viento del polvo y cenizas de origen volcánico, fue otro factor importante en la formación de los depósitos: si el material era depositado en las laderas durante un periodo frío, con el tiempo se convertía en tobas amarillas; pero si era depositado en el lago, las partículas sufrían una hidratación que las transformaba en arcillas; si la deposición ocurría en un periodo cálido el material con el paso del tiempo se transformaba en tobas rojizas arcillosas, debido a la actividad fitológica (desarrollo de plantas).

A continuación se presenta un breve resumen de los antecedentes geotécnicos de los tres tipos de depósitos clasificados en base a la estratigrafía, para adentrarnos después a las características específicas de los depósitos del lago.

*a) Depósitos del lago.*

Estos depósitos se encuentran dentro de lo que fue el lago, aunque no siempre fue así; ciertas condiciones climáticas imperantes (clima frío o cálido) podían permitir la existencia o desaparición del lago, lo anterior dependía fundamentalmente de la interacción entre el régimen de lluvias y la evaporación y transpiración. Cuando uno de los anteriores superaba al otro (hablando en tiempo geológico) el lago se formaba o disminuía su volumen, incluso hasta desaparecer. A este fenómeno se le denomina en Geología transgresiones o regresiones lacustres; la consecuencia final de este proceso es la formación de suelos o depósitos arcillosos.

Con toda la información vulcanológica, paleoclimática y geológica disponible, los investigadores en la materia (Zeevaert en 1953 y Mooser en 1985) han elaborado interpretaciones de las secuencias estratigráficas, que nos permiten comprender la relación que guardan el clima, la actividad volcánica y la Geología, con la estratigrafía de los depósitos del lago. En la figura 3.1 se muestra un resumen de la interpretación hecha por F. Mooser de la estratigrafía de dicha zona.

*b) Depósitos de transición.*

Al irse alejando de los depósitos del lago, y acercando a los depósitos de las Lomas, se va presentando una intercalación de estratos representativa de la zona de transición: estratos arcillosos lacustres se intercalan con diferentes materiales como limos; arenas, gravas y boleos de origen fluvial; la figura 3.2 muestra la estratigrafía de la zona de transición.



c) Depósitos de las Lomas.

La zona de las Lomas está compuesta por las serranías ubicadas al norte (sierra de Guadalupe) y poniente (Sierra de las Cruces) de la cuenca; incluida también la zona del pedregal del Xitle. Dentro de esta formación es posible observar los siguientes fenómenos geológicos:

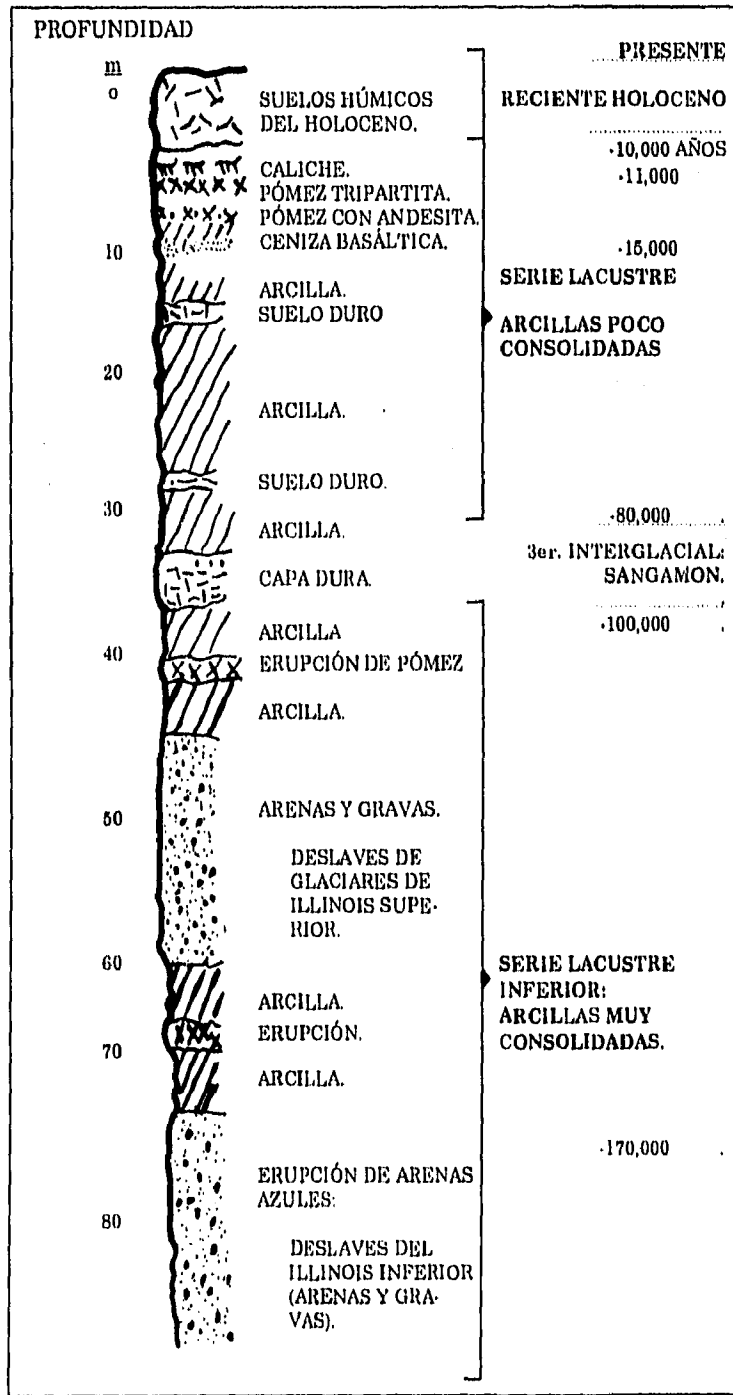


Figura 3.1.- Estratigrafía de la zona del lago.

- Depósitos de grandes espesores acumulados, consecuencia de erupciones volcánicas de tipo explosivo.

- Erosión de los depósitos (por la acción glacial) dando como resultado la formación de barrancas profundas.
- Depósitos formados por rocas, ramas, troncos y otros materiales arrastrados por la acción del glaciér (morrenas), en las barrancas.
- Relleno de las barrancas en forma parcial, con material producto de erupciones volcánicas.

La figura 3.3 muestra un perfil estratigráfico representativo de esta zona.

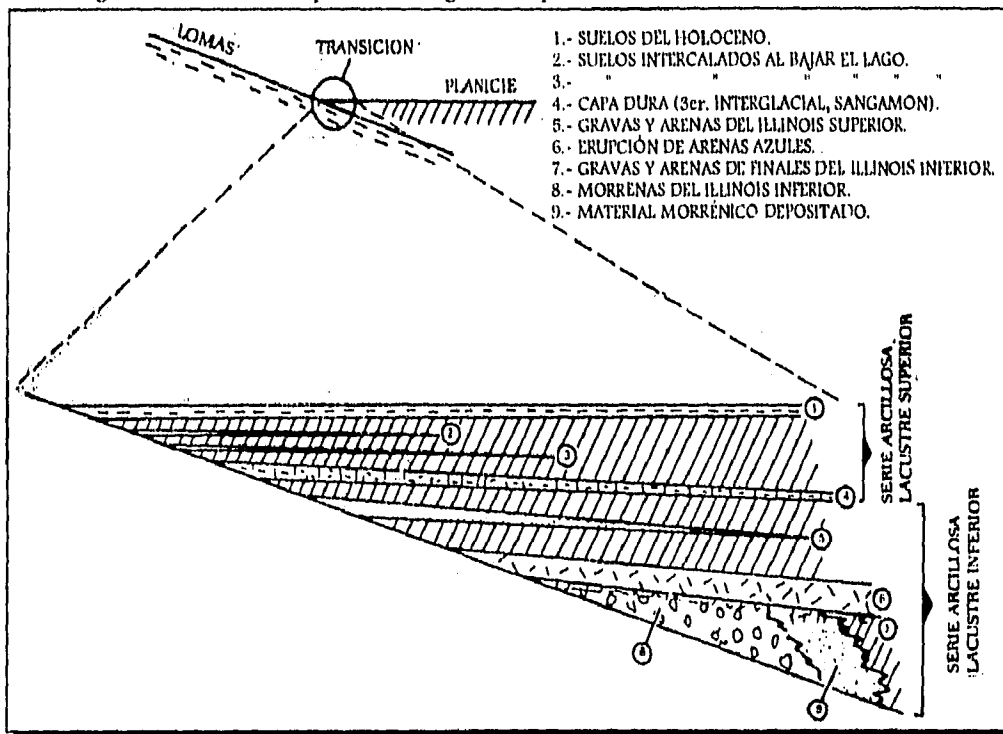


Figura 3.2.- Estratigrafía de la zona de transición.

### 3.2.- DEPÓSITOS DEL LAGO.

#### 3.2.1.- Proceso de formación.

La presencia de suelos arcillosos blandos dentro de la zona del lago es, como ya se mencionó, el resultado del proceso de depositación y alteración fisicoquímica de los materiales volcánicos (cenizas) y de aluvión dentro del ambiente lacustre. La presencia de climas semiáridos ocasionaron el secado del lago y la consecuente formación de costras de material arcilloso, endurecido por la deshidratación o el secado del sol; diferentes periodos de violenta actividad volcánica, produjeron capas de arenas basálticas o pumíticas que cubrieron con diferentes espesores la cuenca. Esta intensa actividad geológica fue formando diferentes estratos con una secuencia ordenada: estratos blandos arcillosos, separados por costras secas endurecidas, mantos de arenas basálticas o pumíticas y lentes duros de limos arcillo-arenosos.

El espesor de la costra seca es variable; mientras que en las inmediaciones del lago el espesor es mayor, en el centro del mismo es muy pequeño y en ocasiones llega a desaparecer, situación que se presenta en el vaso del antiguo lago de Texcoco.

#### 3.2.2.- Evolución de las propiedades mecánicas.

La evolución de las propiedades mecánicas de estos depósitos las podemos dividir en dos etapas que dependen de la influencia directa de los asentamientos humanos en la zona; así podemos hablar de una consolidación natural y de una consolidación inducida. (referencias 3 y 5).

Se le llama consolidación natural porque no existieron otro tipo de cargas significativas, más que las resultantes del propio peso de los estratos, que produjeran la consolidación de los mismos. Esta consolidación se presentó solamente en los estratos blandos, ya que las costras duras presentaban una preconsolidación como consecuencia del secado solar o deshidratación. Por lo anterior es válido suponer una variación lineal con respecto a la profundidad en la resistencia al corte.

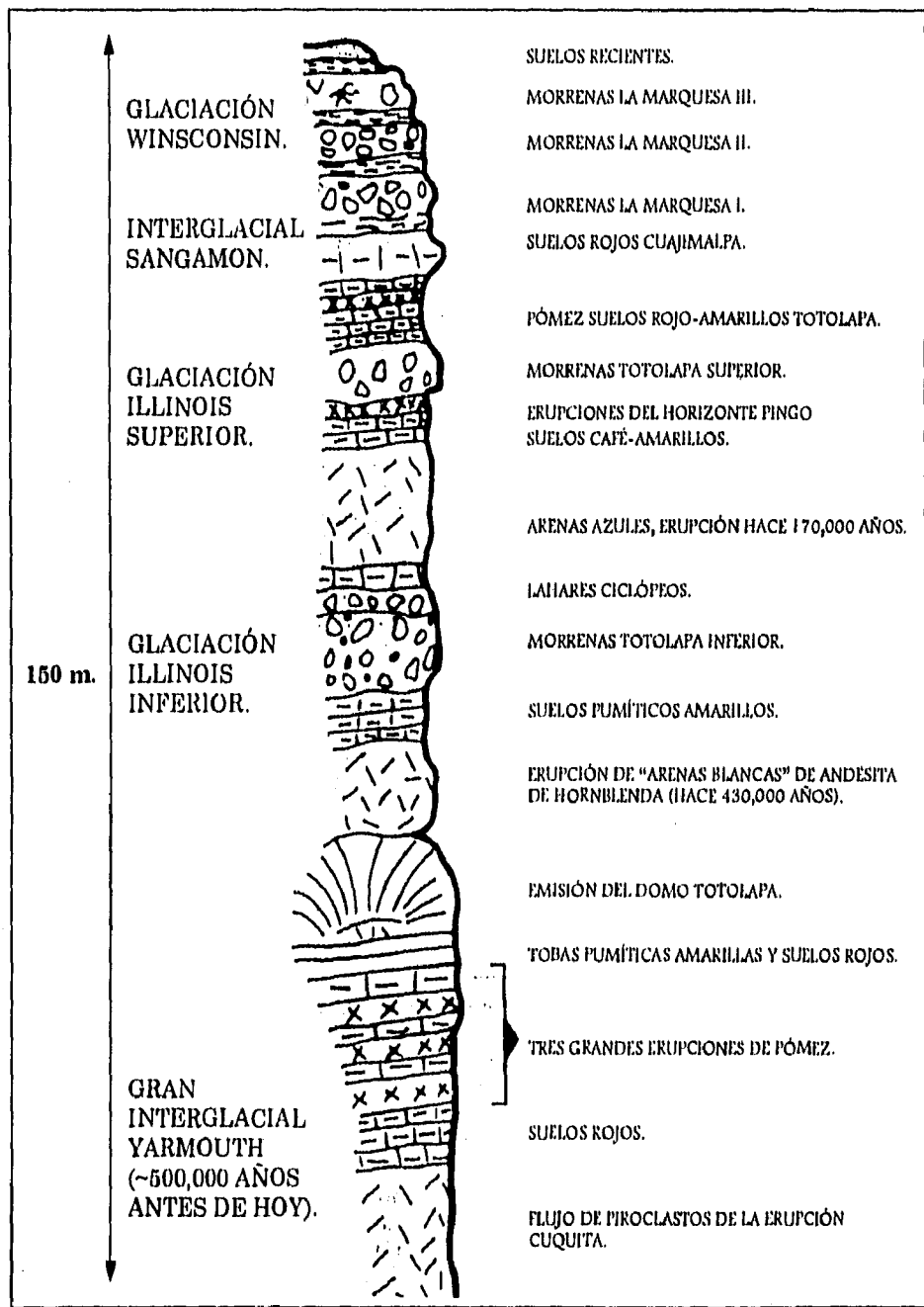


Figura 3.3.- Estratigrafía de la zona de Lomas.

Como consecuencia de los asentamientos humanos en la zona (desde épocas prehispánicas hasta nuestros días), se provocó una consolidación denominada consolidación inducida; este fenómeno se debe a una compleja interacción de ciertos factores que se enlistan a continuación:

- Los rellenos efectuados sobre el lago desde épocas prehispánicas para la construcción de pirámides, así como para la obtención de terrenos de cultivo.
- El abatimiento del nivel freático por la apertura de tajos y túneles para el drenaje de aguas tanto pluviales como negras; ocasionando una consolidación de los estratos arcillosos superficiales.
- El bombeo profundo que ha consolidado los estratos arcillosos tanto profundos como superficiales.
- El incremento de las cargas sobre la superficie como consecuencia de la urbanización.

En la figura 3.4 se muestra una secuencia de las variaciones de la resistencia al corte contra la profundidad.

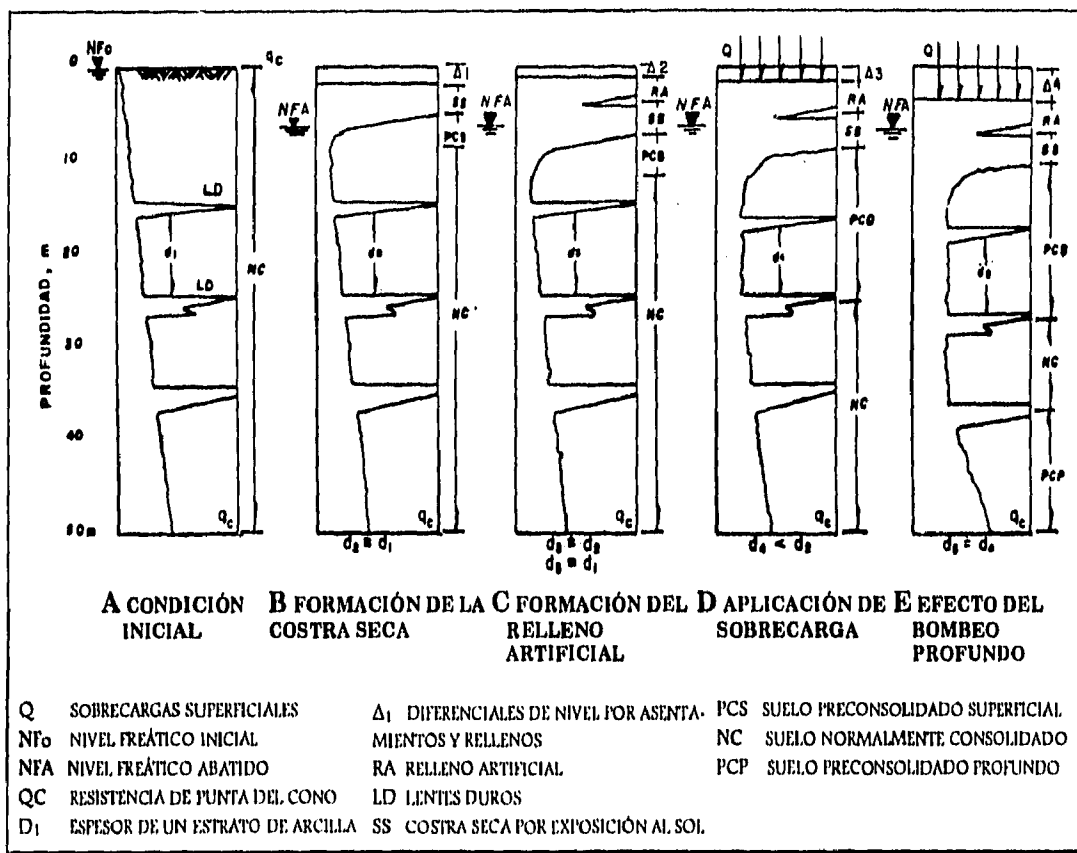


Figura 3.4.- Evolución en la variación de la resistencia al corte.

### 3.2.3.- Estratigrafía.

La zona de lago posee una serie de estratos con ciertas características, lo cual hace posible diferenciarlos y agruparlos, en base a la profundidad a la que se encuentran; serie arcillosa lacustre superior, capa dura, serie arcillosa lacustre inferior y depósitos profundos, (referencias 3 y 5).

#### a) Serie arcillosa lacustre superior.

Dentro de la serie arcillosa lacustre superior podemos distinguir una serie de estratos, que se pueden clasificar dentro de dos categorías: estratos principales y secundarios; los primeros se diferencian por su origen geológico, así como por su nivel actual de consolidación; y los segundos por su origen geológico, sirviendo como delimitadores de los estratos principales; en la figura 3.5 se muestra un cuadro

sinóptico, donde se resume lo anterior. En el párrafo siguiente se da una breve explicación de cada uno de los estratos que componen esta serie arcillosa.

ESTRATIGRAFÍA ENTRE LA SUPERFICIE Y LA CAPA DURA

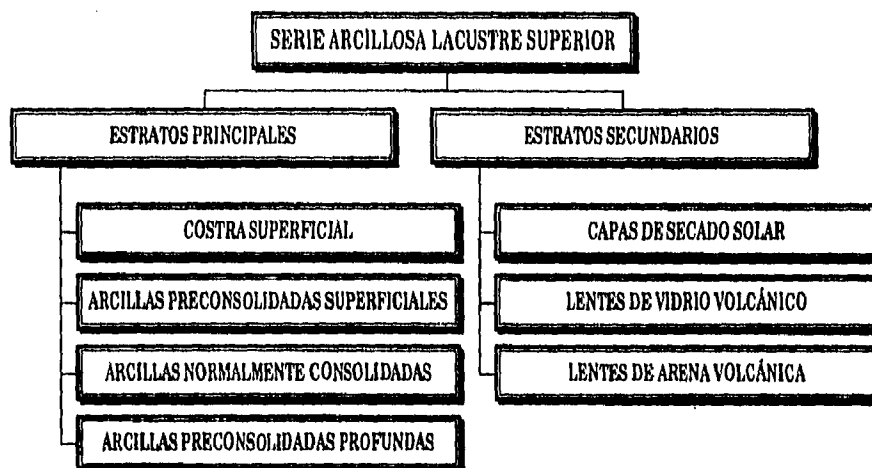


Figura 3.5.- Estratigrafía entre la superficie y la capa dura.

- Costra superficial (CS).- Esta conformado por tres subestratos:
  - Relleno artificial (RA).- Su composición es heterogénea y está constituido por rellenos artificiales arqueológicos y restos de construcciones antiguas.
  - Suelo blando (SB).- Está constituido por depósitos de material aluvial blando, intercalados con lentes de material eólico.
  - Costra seca (SS).- Producto del secado solar por la disminución del nivel del lago.
- Arcillas preconsolidadas superficiales (PCS).- Lo componen suelos arcillosos que se encontraban normalmente consolidados bajo su propio peso, pero el incremento de sobrecargas y rellenos produjo en dicho estrato una consolidación adicional.
- Arcillas normalmente consolidadas (NC).- Este estrato se localiza entre el estrato preconsolidado superficial y el preconsolidado profundo. La diferencia entre este estrato y los preconsolidados estriba en el grado de consolidación, ya que se encuentra entre los límites de influencia de ambos estratos, más sin embargo, esto no quiere decir que no haya experimentado una preconsolidación (de menor grado) por las sobrecargas actuales.
- Arcillas preconsolidadas profundas (PCP).- La causa de esta preconsolidación profunda se debe a el bombeo efectuado para abastecer de agua a la ciudad.
- Costras y lentes duras (LD).- Intercalados dentro de los anteriores estratos se encuentran, como producto del vulcanismo, los lentes de arena y vidrio volcánico; y por efecto del secado solar, las costras duras.

Para esquematizar lo anterior, en la figura 3.6 se muestra un perfil de suelos de la zona del lago, correspondiente a la serie arcillosa lacustre superior, exceptuando el estrato preconsolidado profundo.

b) Capa dura.

Formada durante el Sangamon, este estrato se compone principalmente de limos arenosos, con poca arcilla y en algunos casos grava, sin llegar a tener una cementación uniforme; su espesor oscila

desde casi cero hasta los cinco metros, valores que corresponden al centro y a las orillas del lago.

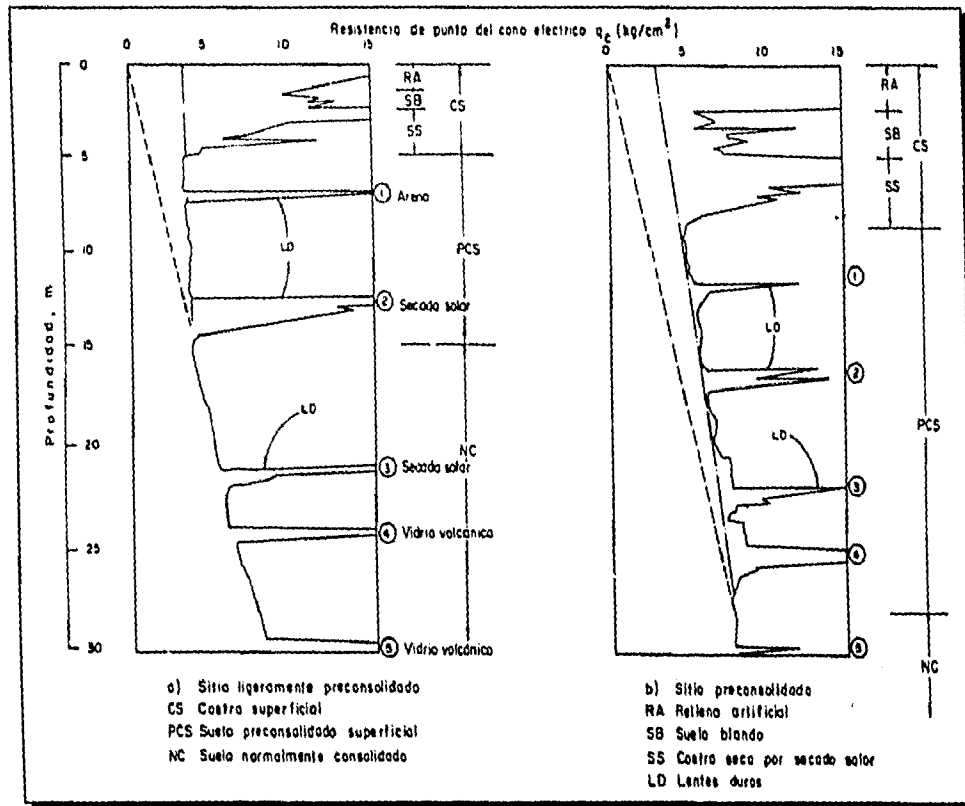


Figura 3.6.- Perfil tipo de los suelos de la zona del lago.

c) Serie arcillosa lacustre inferior.

En su composición es muy similar a la serie lacustre superior, pero con la diferencia de que el espesor va desde casi cero hasta quince metros, cifras que corresponden a las orillas y centro del lago. Es de destacar que la información sobre este estrato no es muy amplia en comparación con las anteriores.

d) Depósitos profundos.

Se componen de una serie de materiales, arenas y gravas limosas de origen aluvial, que se encuentran cementadas con arcillas duras y carbonatos de calcio. En su parte superior, que alcanza un espesor de 5 metros, los depósitos se encuentran más endurecidos, en comparación con su parte inferior, que se encuentran menos cementados y hasta con presencia de arcillas preconsolidadas.

3.3.- ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA DEL VALLE DE MÉXICO.

La primera zonificación geotécnica efectuada en la Ciudad de México se hizo partiendo de estudios realizados sobre cimentaciones de diferentes estructuras, con lo cual se obtuvo información de las características estratigráficas y mecánicas del subsuelo; los sondeos empleados para conocer dichas características se realizaron en su mayoría a profundidades de 50 m. o menores, llegando en algunos sondeos hasta los 100 m. de profundidad (Marsal y Mazari 1959, referencia 2).

En épocas posteriores se realizaron trabajos tendientes a precisar y detallar la zonificación del Valle de México, mediante un análisis de los diversos trabajos de investigación del subsuelo, realizados en el transcurso de la construcción de líneas del Metro y de diferentes obras viales realizadas en la Ciudad de México. Estudios previos a estos trabajos que fueron realizados por la Sociedad Mexicana de

Mecánica de Suelos, la Comisión de Aguas del Valle de México, así como por diferentes investigadores en la materia; sirvieron de base para elaborar diferentes propuestas de zonificación, (referencia 1).

Conforme ha ido creciendo la red de líneas del Metro, se ha seguido obteniendo nueva información del subsuelo; con lo cual, se han logrado elaborar nuevas correlaciones estratigráficas que han conducido a una mayor precisión en las interpretaciones geológicas existentes hasta 1987.

Podemos definir la zonificación como: "la delimitación de las áreas, en donde los materiales que conforman el subsuelo presentan propiedades semejantes de compresibilidad y resistencia", (ref. 1). La actual zonificación geotécnica contempla una estratigrafía que se basa en tres aspectos generales:

- 1) Las características físicas.
- 2) Las propiedades índice.
- 3) Las propiedades mecánicas que presentan los estratos del subsuelo.

A continuación se muestra en forma resumida mediante un cuadro sinóptico (figura 3.7) y en forma más explícita mediante un plano (figura 3.8), la zonificación geotécnica elaborada por COVITUR (ref. 3 y 5) en 1986 misma que parte de las bases planteadas por Marsal y Mazari en 1959:

### ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA DE LA CIUDAD DE MÉXICO

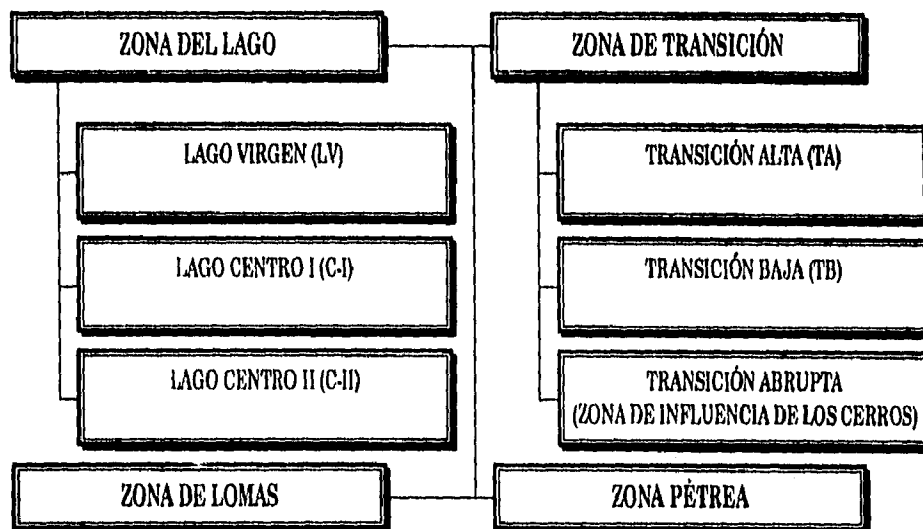


Figura 3.7.-Zonificación geotécnica de la Ciudad de México, (referencias 1, 3 y 5).

a) Zona pétrea.

Representada por afloramientos rocosos (montañas y derrames de basalto).

b) Zona de lomas.

Se ubica en las cercanías de la Sierra de las Cruces al poniente de la ciudad, en donde es posible encontrar diversas formaciones producto de la acción glacial o de derrames de lava; sin embargo la característica más importante es la ausencia de estratos arcillosos compresibles como los que se encuentran en la zona del lago.

c) Zona de transición.

Se ubica entre las zonas del lago y lomas incluyendo parte de lo que fueron las márgenes del antiguo lago; se divide en las subzonas alta, baja y abrupta. Las subzonas están definidas por su vecindad a

la zona de lomas (transición alta), o a la zona de lago (transición baja) o a cerros aislados (transición abrupta). La zona de transición se distingue por el presentar un menor espesor de sus estratos compresibles, así como por presentar intercalaciones de estratos arenosos o limosos de origen aluvial con depósitos arcillosos.

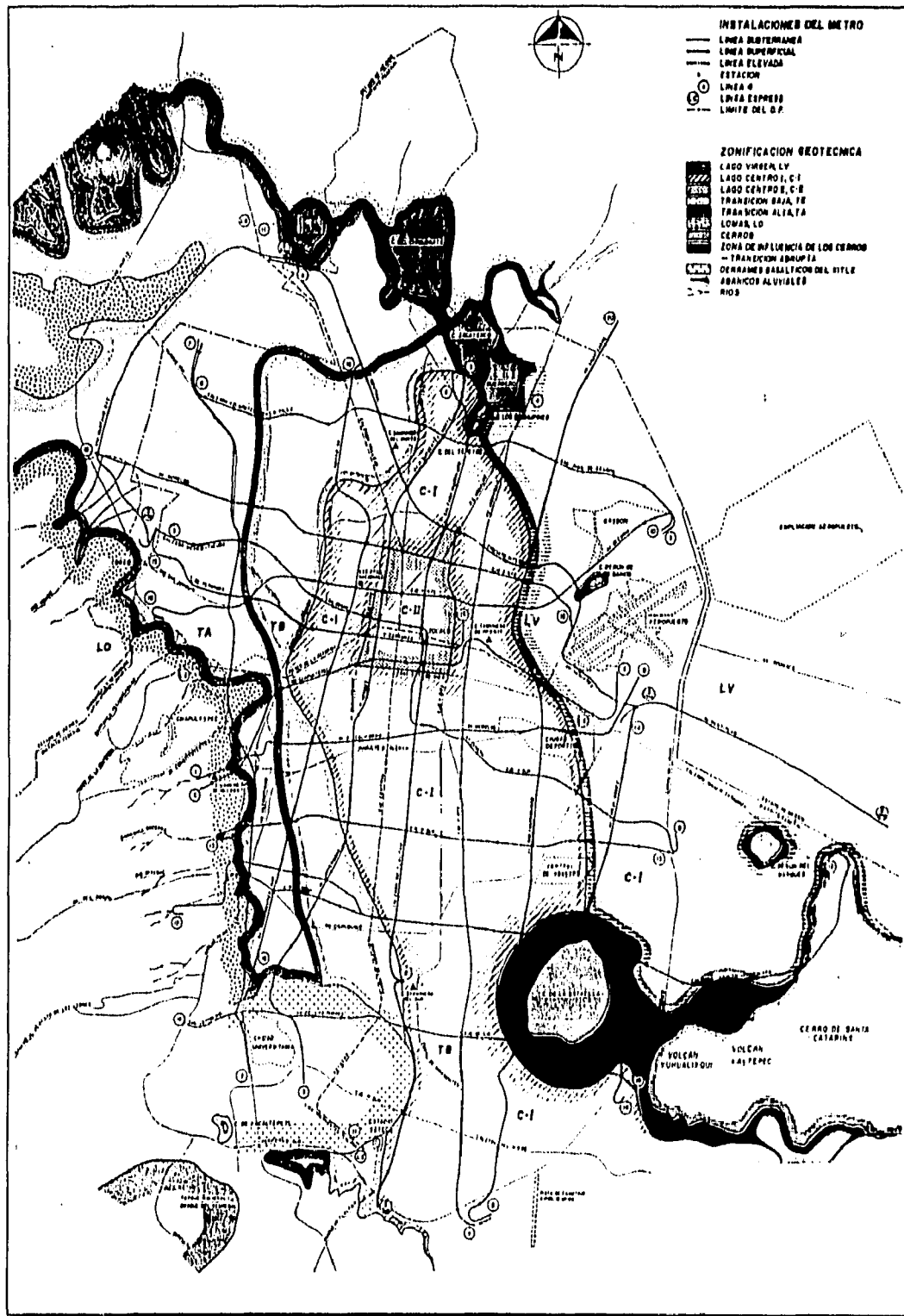


Figura 3.8.- Zonificación geotécnica de la Ciudad de México.



d) Zona del lago.

Se ubica en el área ocupada por el antiguo lago y se caracteriza por presentar grandes espesores de estratos arcillosos compresibles que se encuentran depositados sobre una costra endurecida superficial que varía su espesor de un sitio a otro, lo cual depende de la ubicación e historia de cargas. En consecuencia, a la zona del lago se le ha dividido en tres subzonas atendiendo al valor relativo que pudiesen tener los siguientes factores: a) el espesor y propiedades presentes en la costra superficial, y b) la consolidación producida en cada lugar. Dadas las condiciones del presente trabajo, nos enfocaremos más a conocer las características que presenta cada una de las subzonas de la zona del lago:

- Lago virgen.- Se ubica en su mayor parte al oriente de la ciudad, y la caracteriza más importante del subsuelo es que no presenta alteraciones significativas en sus propiedades mecánicas desde su formación, es decir, no presenta una historia de cargas como la de las otras dos subzonas por ser una zona de escaso desarrollo, aunque actualmente el crecimiento de la ciudad ha ocupado ya dicha zona. En la figura 3.9, se presenta un sondeo de cono típico de dicha zona y; en la tabla 3.2 se presentan las propiedades promedio de los estratos.

LAGO VIRGEN.				
Estrato.*	Espesor (m)	$\gamma$ (t/m <sup>3</sup> )	c (t/m <sup>2</sup> )	$\phi$ (°)
Costra superficial.	1.0 a 2.5	1.4	1.0	20
Serie arcillosa superior.	38 a 40	1.15	0.5 a 1.0	—
Capa dura.	1 a 2	—	0 a 10	25 a 36
Serie arcillosa inferior.	15 a 30	1.25	3 a 4	—

Tabla 3.2. Lago Virgen. Estratigrafía y propiedades.

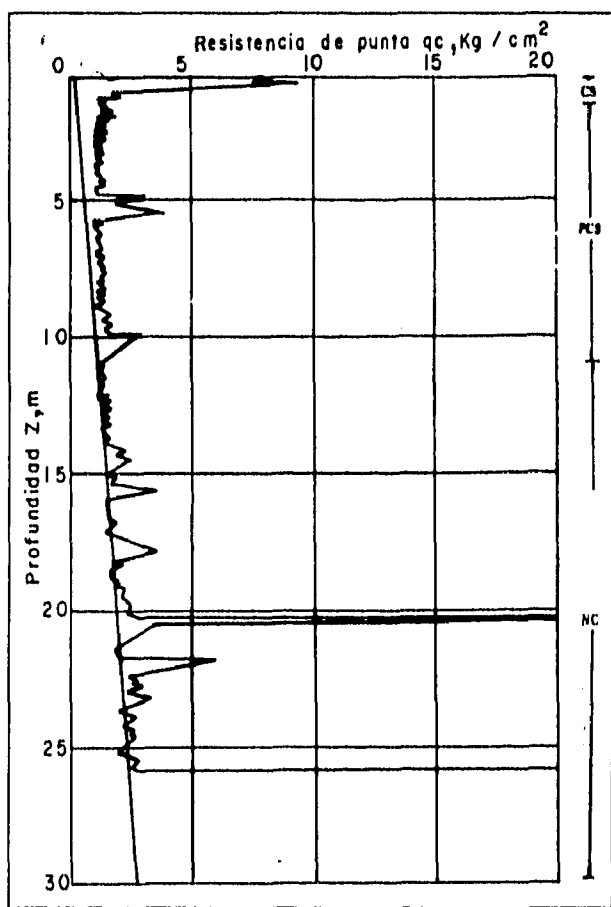


Figura 3.9.- Sondeo de cono eléctrico en la subzona lago Virgen.

- Lago centro I.- Abarca ciertas áreas de la ciudad que ha principios del presente siglo conformaban la periferia de la misma lo cual significa que las sobrecargas presentes en dicha zona han sido moderadas, debidas fundamentalmente a pequeñas construcciones. En la figura 3.10, se presenta un sondeo de cono típico de dicha zona y; en la tabla 3.3 se presentan las propiedades promedio de los estratos.

LAGO CENTRO I.				
Estrato.*	Espesor (m)	$\gamma$ (t/m <sup>3</sup> )	c (t/m <sup>2</sup> )	$\phi$ (°)
Costra superficial.	4 a 6	1.6	4	25
Serie arcillosa superior.	20 a 30	1.2	1 a 2	—
Capa dura.	3 a 5	1.5 a 1.6	0 a 10	25 a 26
Serie arcillosa inferior.	8 a 10	1.3 a 1.35	5 a 8	—

Tabla 3.3.- Lago Centro I. Estratigrafía y propiedades.

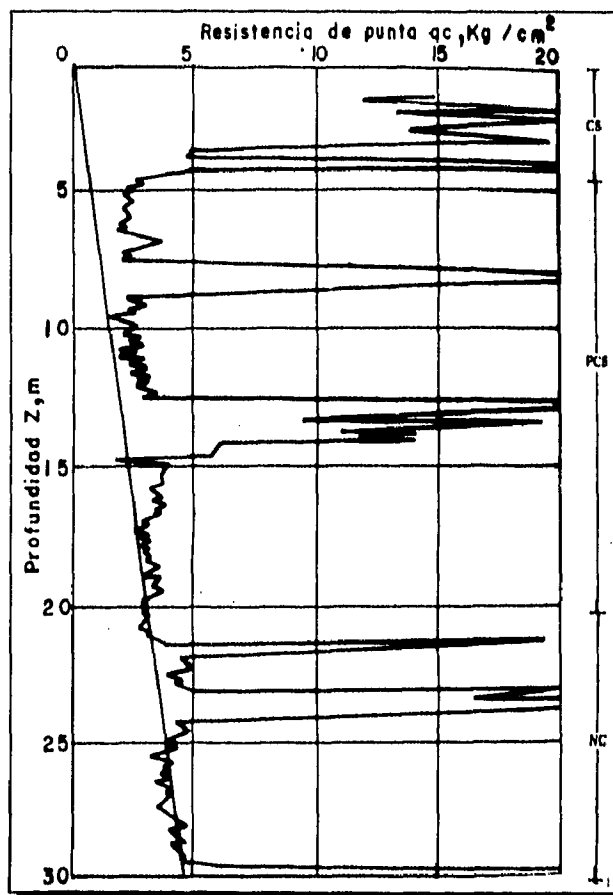


Figura 3.10.- Sondeo de cono eléctrico en la subzona de lago centro I.

- Lago centro II.- Toda el área que conformaba la antigua traza de la ciudad corresponde a esta subzona, lo cual da como resultado una historia de cargas con ciertos rasgos sobresalientes:
  - La presencia de estratos arcillosos fuertemente consolidados debido a rellenos y construcciones tanto coloniales como prehispánicas.
  - Estratos arcillosos blandos (con poca consolidación), esto en lugares que han ocupado plazas y jardines durante muchos años.
  - Estratos arcillosos muy blandos (con muy poca consolidación) donde alguna vez existieron canales.
  - Y más actualmente, los efectos del bombeo intenso se pueden observar en el incremento en la resistencia de los estratos arcillosos al producirse una consolidación por el drenado.

En la figura 3.11, se presenta un sondeo de cono típico de dicha zona y; en la tabla 3.4 se presentan las propiedades promedio de los estratos.

LAGO CENTRO II.				
Estrato.*	Espesor (m)	$\gamma$ (t/m <sup>3</sup> )	c (t/m <sup>2</sup> )	$\phi$ (°)
Costra superficial.	6 a 10	1.7	4	25
Serie arcillosa superior.	20 a 25	1.3	3	—
Capa dura.	3 a 5	1.5 a 1.6	0 a 10	25 a 36
Serie arcillosa inferior.	6 a 8	1.3 a 1.4	6 a 12	—

Tabla 3.4.- Lago Centro II. Estratigrafía y propiedades.

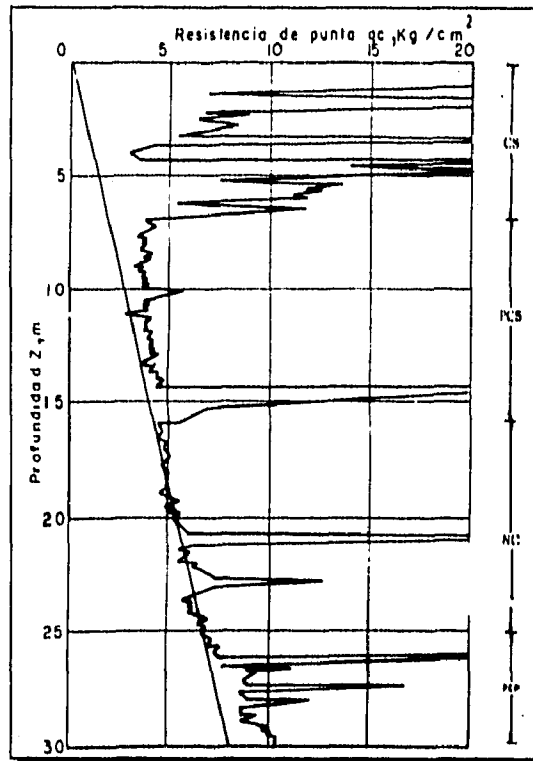


Figura 3.11.- Sondeo de cono eléctrico en la subzona de lago centro II.

Finalmente, lo anteriormente expuesto en relación a la zona del lago lo podemos corroborar con los sondeos que se muestran en las figuras 3.9, 3.10 y 3.11; así como también con las tablas 3.2, 3.3 y 3.4 de propiedades mecánicas y estratigrafía.

#### 3.4.- ESTUDIO GEOTÉCNICO EMPLEADO PARA LA SOLUCIÓN EN CAJÓN EN LA ZONA DEL LAGO, (ref. 5).

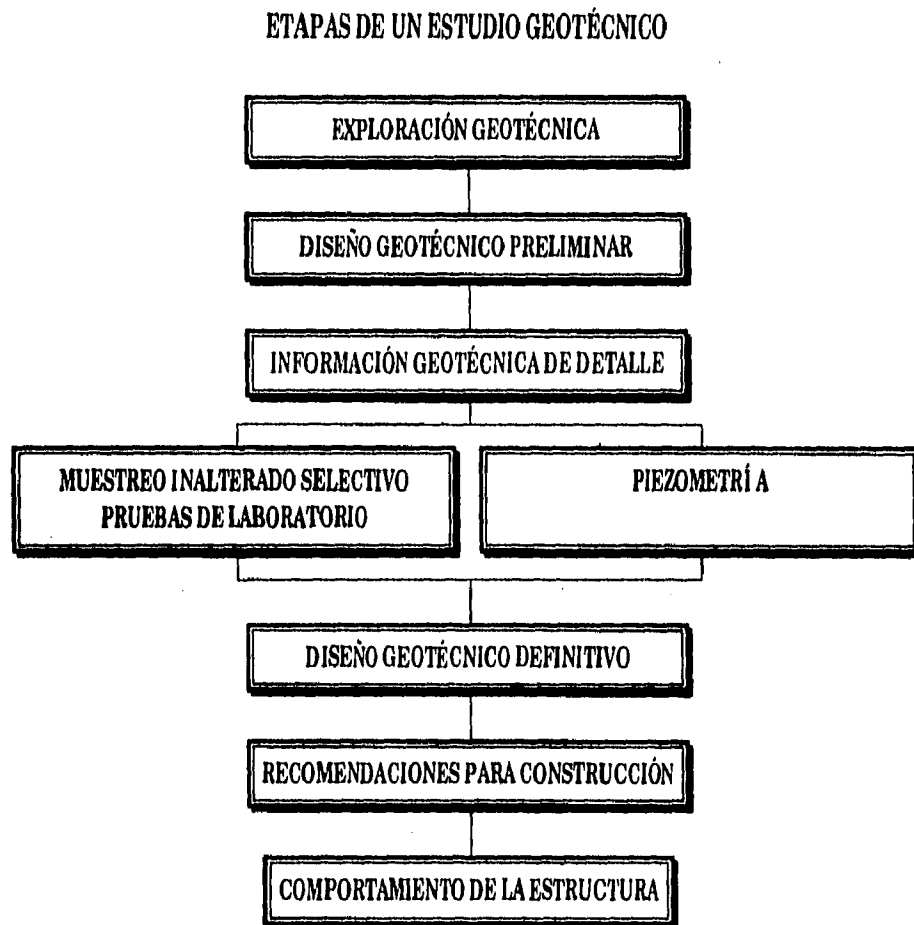
El tener conocimiento de las propiedades mecánicas así como de la estratigrafía del subsuelo en el cual se va alojar a futuro el eje de trazo de una cierta línea del Metro, permite confirmar la decisión tomada, respecto al tipo de solución a emplear en la estructuración de la línea.

Lo anterior se logra mediante la realización de un estudio geotécnico, en el cual se ejecutan sondeos exploratorios, se extraen muestras tanto alteradas como inalteradas del subsuelo y se realizan pruebas de laboratorio con las muestras obtenidas.

La Comisión de Vialidad y Transporte Urbano tiene la obligación de proporcionar cierta información técnica básica a la proyectista, para que esta última pueda planear el estudio geotécnico; dicha información debe de incluir:

- Información geotécnica disponible y comentarios sobre el comportamiento de líneas en condiciones similares.
- Alternativas de ubicación de la línea.
- Soluciones estructurales admisibles.
- Perfil preliminar de operación.
- Ubicación de estaciones.
- Procedimientos de construcción factibles.

En la figura 3.12 se muestra un cuadro sinóptico en el cual se resumen los pasos a seguir para realizar un estudio geotécnico, cuando se pretende emplear la solución en cajón. Esta secuencia se sigue con ciertas variaciones en su aplicación, dependiendo principalmente de la zona (lago, transición o lomas) en la que se vaya a realizar el sondeo. En este caso, nos enfocaremos a explicar lo más brevemente posible cada uno de los pasos o etapas del cuadro enfocados a la zona del lago, que es la zona sobre la cual se aloja el eje de trazo de la línea B.



**Figura 3.12.- Etapas de un estudio geotécnico para la solución en cajón.**

- Exploración geotécnica.

En esta etapa, se persiguen tres objetivos principales que son: 1) la determinación en forma precisa de la estratigrafía a lo largo del eje de trazo de la línea, 2) el conocimiento del estado de presiones del agua en el subsuelo y, 3) estimar en forma aproximada las propiedades mecánicas de los estratos.

Todo esto con el fin de obtener la información básica de partida para realizar el diseño geotécnico preliminar y con esto poder determinar los alcances de la siguiente etapa de muestreo.

Esta exploración se inicia con un reconocimiento de la línea, con el fin de realizar una adecuada programación de sondeos con el cono eléctrico (mismo que detallaremos en párrafos posteriores), indicando en dicha programación el número y la profundidad de cada uno de los sondeos, basándose para ello en la tabla 3.5 que propone el número y profundidad de los sondeos dependiendo de la situación o caso específico a considerar.

<b>SONDEOS DE EXPLORACIÓN PARA LA ZONA DEL LAGO</b>		
<b>CASO.</b>	<b>NÚMERO MÍNIMO DE SONDEOS.</b>	<b>PROFUNDIDAD.</b>
A lo largo de la línea	Un sondeo principal a cada 500 m. Donde se justifique, se harán intermedios de verificación.	En sondeos principales, 4 veces el ancho del cajón.** En sondeos intermedios de verificación, 2½ veces el ancho del cajón.**
Cruce con antiguos canales.	1	Hasta donde la estructura del Metro modifique significativamente el estado de esfuerzos en el subsuelo.
En cada estación.	1	
Próximo a estructuras importantes.*	1 a 2	
Cruce con otras líneas del Metro.	1	

\* Edificios, drenajes y líneas de alta tensión.

\*\*O hasta encontrar la primera capa dura, si esta profundidad es menor.

**Tabla 3.5.- Número y profundidad de los sondeos de exploración en la zona del lago.**

Además del sondeo con cono eléctrico, se puede aplicar la técnica de penetración estándar, para determinar el contenido de agua y los límites de consistencia, mientras que el estado de presiones prevalecientes en el subsuelo, se pueden determinar mediante el empleo de piezómetros abiertos, cuyo grado de confiabilidad es aceptable.

Dentro de esta etapa de exploración, es necesario hacer investigaciones del tipo de cimentación y características de aquellas estructuras que se encuentren cerca del eje de trazo de la línea, restos de antiguas cimentaciones y pozos de extracción del agua freática, para determinar que tanto pueden afectar el diseño, construcción y comportamiento de la línea.

- Diseño geotécnico preliminar.

Tomando como punto de partida la información obtenida en la etapa anterior (estratigrafía, estimación de propiedades mecánicas y condiciones de presión del agua), se procederá a realizar un análisis de tipo preliminar para seleccionar las alternativas posibles de acción con respecto a el tipo de cajón por seleccionar (esto partiendo de los dos tipos principales de estructuraciones, que son la tablestaca de acompañamiento y la tablestaca estructural), tomando en cuenta los siguientes puntos:

- La estabilidad de la excavación en general.
- La magnitud de los empujes horizontales que se presentarán sobre los muros Milán.
- La magnitud de los movimientos verticales (asentamientos y/o expansiones).
- El abatimiento del nivel de aguas freáticas.

Las conclusiones que se obtengan del anterior análisis, permitirán sentar las bases, así como detallar cada uno de los aspectos de la siguiente etapa.

- Información geotécnica de detalle.

En esta etapa se precisarán las propiedades mecánicas del suelo, así como la variación de las presiones efectivas, mediante el muestreo inalterado y la instalación de estaciones piezométricas.

- Muestreo inalterado selectivo.

Por medio de la información estratigráfica, el ingeniero encargado del diseño determinará el programa de muestreo definitivo indicando el número y profundidad de las muestras a obtener, así como el tipo de muestreador. A las muestras obtenidas se les realizarán pruebas de resistencia y compresibilidad, para obtener los parámetros de resistencia al esfuerzo cortante y deformación, mismos que se emplearán en el diseño geotécnico definitivo.

- Piezometría.

La instalación de estaciones piezométricas permite conocer la variación de esfuerzos efectivos en el subsuelo con respecto a la profundidad; los elementos constitutivos de estas estaciones serán: un tubo de observación del nivel de aguas freáticas y un número mínimo de tres piezómetros que pueden ser del tipo abierto o neumático, siendo este último más complejo en su instalación y operación. En la tabla 3.6 se definen el número y profundidad de los instrumentos.

<b>ESTACIONES PIEZOMÉTRICAS PARA LA ZONA DEL LAGO.</b>		
<b>CASO.</b>	<b>NÚMERO MÍNIMO DE ESTACIONES PIEZOMÉTRICAS.</b>	<b>PROFUNDIDAD DE INSTRUMENTACIÓN.</b>
A lo largo de la línea	Uno en cada estación de la línea. Donde se requiera se instalarán estaciones piezométricas de verificación.	Se instalarán piezómetros hasta una profundidad igual a 4 veces el ancho del cajón.*
Cruce con antiguos canales. Próximo a estructuras importantes.**	1  1	Hasta donde la estructura del Metro modifique significativamente el estado de esfuerzos en el subsuelo.

\*El tipo de piezómetros y profundidad de instalación se definirán después de haber realizado los sondeos de exploración.

\*\*Edificios, drenajes y líneas de alta tensión.

**Tabla 3.6.- Número y profundidad de instrumentos de las estaciones piezométricas en la zona del lago.**

- Diseño geotécnico definitivo.

En esta se conjunta la información obtenida, tanto de la etapa de exploración geotécnica, como de la etapa de información geotécnica de detalle. Lo anterior es para poder elaborar un corte geotécnico (en forma de resumen) a lo largo del tramo en cuestión y conteniendo la siguiente información:

- El tipo de muestreador empleado y las profundidades alcanzadas.
- La clasificación geotécnica de los suelos.
- Los resultados obtenidos en los sondeos con el cono eléctrico.
- Las propiedades mecánicas de las muestras de suelo obtenidas, señalando la profundidad a la cual fue obtenida y el tipo de prueba a la que fue sometida dicha muestra.
- El estado de las presiones piezométricas.

Obtenido este corte geotécnico, se procede a realizar el diseño definitivo del tipo de cajón que se presente como el más adecuado. El diseño está integrado por los siguientes aspectos:

- La determinación de los empujes horizontales sobre muros tablestaca (Milán).- Esto durante la etapa de construcción y durante su vida útil, verificando las situaciones más críticas de trabajo a las que se verán sometidos.
- La estabilidad de la excavación.- En este inciso se estiman los factores de seguridad contra la posible falla de la excavación durante el proceso constructivo, considerando los siguientes tipos de falla:

- 1) Falla general por el fondo de la excavación.
- 2) Falla del fondo por subpresión ejercida por estratos de arena profundos.
- 3) Falla por el empotramiento de la pata del muro tablestaca (pateo).
- 4) Falla del talud de avance o cabecero.

En la tabla 3.7 se muestran los factores de seguridad mínimos contra falla de la excavación.

FACTORES DE SEGURIDAD CONTRA FALLA DE LA EXCAVACIÓN		
MECANISMOS DE FALLA.	FACTORES MÍNIMOS DE SEGURIDAD: (FS)	
1) Falla general de fondo.	$(FS)_f \geq 1.7$	Cuando existan edificios susceptibles de sufrir daños por asentamientos, en una distancia igual al ancho de la excavación.
	$(FS)_f \geq 1.5$	En los otros casos.
2) Falla del fondo por subpresión.	$(FS)_s \geq 1.3$	
3) Falla por empotramiento del muro tablestaca.	$(FS)_p \geq 1.5$	
4) Falla del talud de avance o cabecero.	$(FS)_t \geq 1.5$	Si el ciclo de excavación-colado de losa es menor de 48 horas.
	$(FS)_t \geq 1.7$	Si el ciclo de excavación-colado de losa es mayor de 48 horas.
	$(FS)_t \geq 1.3$	Si en el análisis de estabilidad se considera la pérdida gradual de resistencia de las arcillas con el tiempo y el efecto tridimensional.

Tabla 3.7.- Factores mínimos de seguridad contra falla de la excavación zonas del lago y transición baja.

Además, se indican las dimensiones de los muros; las etapas del procedimiento de excavación, señalando: el nivel máximo de excavación, las condiciones de abatimiento del nivel freático, la longitud máxima en el avance de la excavación, el talud del frente de avance, número de niveles de troquelamiento y la precarga para cada troquel.

- c) Análisis de la sobrecompensación y de la flotación.- La solución en cajón, da como resultado una estructura sobrecompensada, es decir, una estructura en la cual el suelo tiende a expandirse por la diferencia entre los pesos de la masa de suelo original (antes de la excavación) y el cajón (después de la excavación), lo que hace necesario definir las presiones de sobrecompensación, así como las de flotación, ésta última producto de la presión hidrostática al nivel del fondo de la excavación. Esto se hace con el fin de verificar que las expansiones, a largo plazo, no vayan a afectar tanto al cajón como a la superficie. Los niveles permisibles de presiones de sobrecompensación se muestran en la tabla 3.8, mientras que la presión hidrostática al nivel del fondo de excavación no deberá de exceder al 70% de la presión media transmitida por el cajón y sus rellenos a ese nivel.

PRESIÓN DE SOBRECOPENSACION	
SUBZONA	P. máx, en ton/m <sup>2</sup> .
Lago virgen.	1.5
Lago centro I.	2.0
Lago centro II.	2.5

Tabla 3.8.- Valores admisibles de la presión de sobrecompensación, P.

- d) Análisis de expansiones y asentamientos.- El objetivo que se persigue con este análisis es el de estimar las expansiones y asentamientos que se puedan presentar durante las diferentes etapas de construcción, así como durante la vida útil del cajón; para verificar que no se presenten daños en las instalaciones tanto municipales como de la misma línea, por lo general esto se consigue cuando la expansión inicial y la diferida son relativamente iguales, y no exceden más de 20 cm.

El desarrollo de las deformaciones producidas por la construcción del cajón se muestran en la figura 3.13 y la explicación es la siguiente: el proceso comienza con un asentamiento por consolidación ( $\lambda_b$ ) producto de el bombeo previo a la excavación, en seguida, durante la excavación y colado de la plantilla se presenta una expansión inicial ( $\lambda_{ei}$ ), para después pasar a una etapa de asentamiento ( $\lambda_r$ ) producto del proceso natural de recuperación del suelo al verse nuevamente cargado por la estructura del cajón y sus rellenos; además de que al suspenderse el bombeo, el suelo de tipo arcilloso comienza a expandirse por la absorción de agua, llegando con lo anterior a su valor final ( $\lambda_f$ ). El punto r indica la etapa de restitución del pavimento, y es a partir de este punto que la expansión neta ( $\lambda_n$ ) comienza a manifestarse, siendo estos los únicos efectos perceptibles después de la construcción.

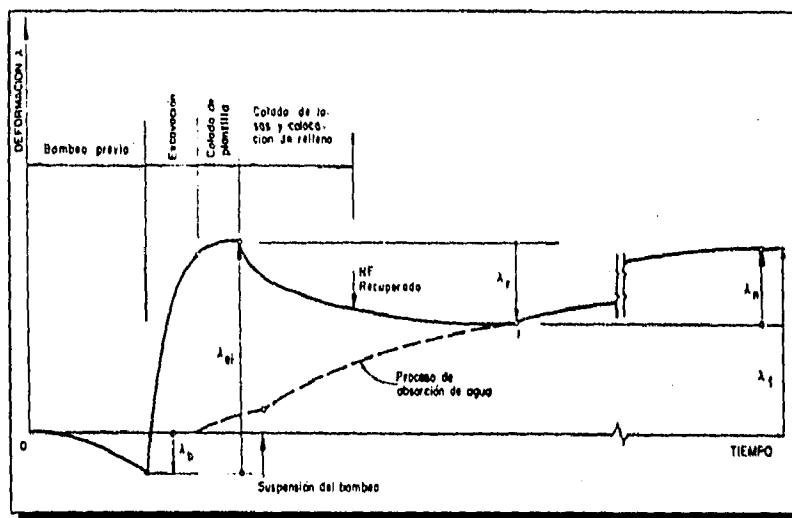


Figura 3.13.- Proceso de deformación asociado a la construcción del Metro en cajón.

● Recomendaciones para construcción.

Dichas recomendaciones están enfocadas a los procedimientos constructivos, teniendo como base los análisis realizados en la etapa de diseño definitivo. Estas recomendaciones abarcan los siguientes puntos:

- a) Trabajos preliminares.- Se entiende por trabajos preliminares todas aquellas labores previas a la construcción de la estructura del cajón, tales como: obras inducidas (capítulo 4), protección de estructuras vecinas, construcción de los brocales (capítulo 5) y la estabilización de rellenos superficiales que se encuentren sueltos.
- b) Instrumentación para el control de la excavación.- Las recomendaciones comprenden el tipo y distribución de los instrumentos, los cuales medirán la evolución del nivel piezométrico, y los movimientos horizontales y verticales, tanto de la excavación como de las estructuras vecinas (capítulo 6).
- c) Abatimiento del nivel de aguas freáticas.- Comprende la elaboración de especificaciones, en las cuales se indicará el tipo de bombeo a emplear (gravedad, electrosmótico o de achique), la distribución, la profundidad de los pozos o electrodos, instalación, tiempo mínimo de bombeo así como el tipo de bombas y su instalación (capítulo 5).
- d) Procedimiento de excavación.- Comprende la elaboración de especificaciones relativas al avance en la excavación, colocación de troqueles, colado y colocación de lastres o rellenos (capítulo 5).



- Comportamiento de la estructura.

Esta es la última etapa del estudio geotécnico, y se refiere a la observación durante y en la puesta en operación, de los asentamientos, expansiones, deformaciones horizontales y las variaciones de la presión en el agua intersticial. Y a largo plazo se vigilará la apertura de excavaciones cercanas a la línea, cimentaciones nuevas, así como la instalación de sistemas de abatimiento del nivel de aguas freáticas.

### 3.5.- SONDEO CON EL CONO ELÉCTRICO.

De acuerdo al programa de obras civiles que el Departamento del Distrito Federal llevó a cabo durante el periodo administrativo de 1982 a 1988, se planteó la necesidad de realizar un número considerable de estudios geotécnicos para conocer las características del subsuelo. Por lo anterior se hizo necesario implementar una técnica de exploración confiable, eficiente y que proporcionara mayor información con un mínimo de costo; una de estas técnicas fue la del cono eléctrico aplicada principalmente en la zona del lago de la Ciudad de México.

El empleo del cono eléctrico en México hasta hace algunos años, era ocasional (por ejemplo, algunas campañas de sondeos para el interceptor central del drenaje profundo) y su empleo no estaba tan difundido. En cambio, se empleaba (en forma indiscriminada) la prueba dinámica de penetración estándar, que es muy importante para algunos suelos (granulares), pero para otros (cohesivos blandos) es poco confiable. COVITUR adoptó el cono eléctrico como una técnica muy confiable de exploración al emplearlo en sondeos de las líneas 4, 8 y 9 del Metro, lo cual sirvió de punto de partida para su difusión y empleo en forma más amplia, (referencia 1).

#### 3.5.1.- Desarrollo de la prueba, (ref. 4).

En los siguientes párrafos se hará una descripción general de la prueba de cono eléctrico, el equipo necesario, realización de la prueba y un resumen de los problemas más comunes y su solución; sin llegar a profundizar en el tema, por quedar fuera de los alcances de este trabajo de tesis.

##### 3.5.1.1.- Descripción del equipo necesario.

El equipo a utilizar puede ser clasificado como sigue:

- 1) *Sistema o equipo electrónico.*- Conformado por el cono y la consola de lecturas. El cono consta de una celda que va instrumentada con dos deformómetros eléctricos del tipo "Strain gages" que constituyen la parte sensible del aparato; su capacidad de carga es de 2 ton. con una resolución de  $\pm 1$  kg. para el caso de suelos blandos. En la figura 3.14 se muestran los componentes del cono. Como se puede observar, la fuerza desarrollada por la punta (1) y por la funda de fricción (3) son registradas en el elemento sensible de bronce (b), el cual manda la señal por medio de un cable conductor blindado de 8 hilos (9) hasta la consola, la cual transforma esta señal en lecturas digitales.
- 2) *Equipo de hincado.*- El cono puede ser hincado con una perforadora equipada con un gato hidráulico y un manómetro para medir las presiones ejercidas durante el hincado. La penetración tiene que hacerse a velocidad constante, y en caso de presentarse lentes duros que impidan la penetración, se recomiendan perforadoras rotatorias.
- 3) *Piezas de conexión.*- Son todos aquellos accesorios cuya función es unir la máquina perforadora con el cono (barras y coples); las barras huecas de acero son necesarias para el empuje y extracción del cono, así como para asegurar la verticalidad en la penetración. Las experiencias en la Cd. de México han demostrado que las barras de diámetro externo de 3.6 cm. y un metro de longitud representan una solución adecuada.

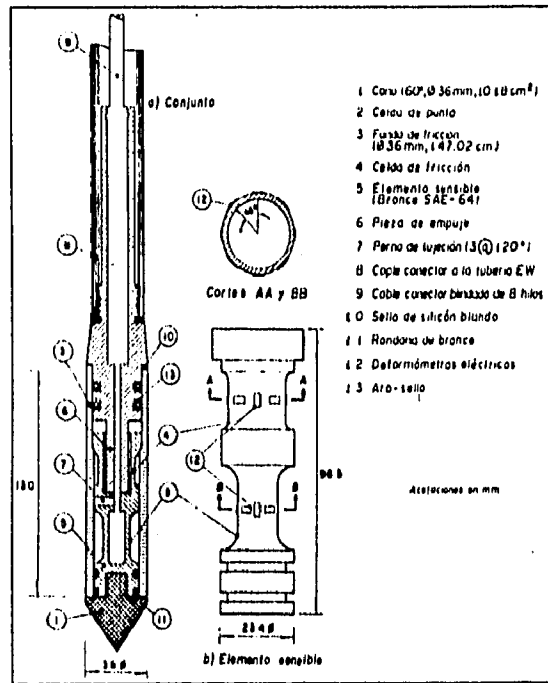


Figura 3.14.- Corte transversal del cono eléctrico.

### 3.5.1.2.- Realización de la prueba.

Para poder iniciar la prueba es necesario realizar ciertos trabajos previos para asegurar las operaciones:

- Instalar la máquina en la posición (vertical de las barras) y sitio adecuados para realizar la prueba, y en caso de ser necesario lastrar o anclar la máquina con lo cual se asegura que no vaya a haber movimientos indeseables de la misma.
- Comprobar el buen estado de las barras (rectitud y cuerdas de acople), rechazando cualquier barra que no cumpla los requisitos.
- Se deben disponer las barras, paralelas, sobre una superficie horizontal (mesa), ordenándolas de tal forma que las cuerdas interior y exterior queden alternadas, para que haya continuidad al momento de introducir el cable dentro de las barras, mismas que se deberán numerar, (figura 3.15).
- El cono debe ser limpiado, principalmente en sus juntas externas, para después conectarlo a la consola de lecturas (misma que deberá protegerse de la radiación solar y lluvia), y verificar el buen funcionamiento del sistema.
- El cable debe ser introducido protegiendo con cinta aislante su extremo (correspondiente al de la consola).
- La consola debe ser observada un mínimo de 10 minutos hasta verificar la estabilización de las lecturas, para después ajustar la lectura a cero, verificando su estabilización y permitiendo una oscilación máxima en las lecturas de 1 kg.
- El cono se ensambla con la primera barra y se verifica el funcionamiento del sistema con consola, apoyando el cono sobre una superficie rígida asegurándose de que la lectura registra-

da sea la correspondiente a la del peso del cono más el peso de la barra, repitiendo en varias ocasiones este procedimiento, (figura 3.16).

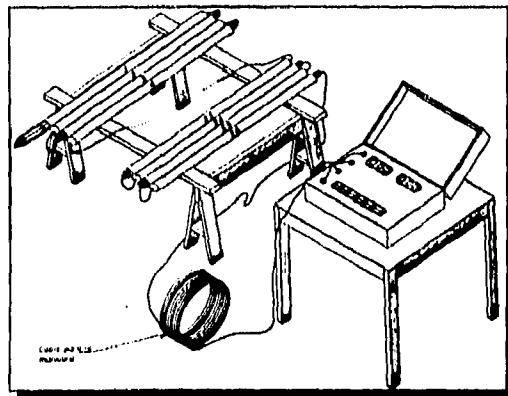


Figura 3.15.- Preparación de barras y cables.

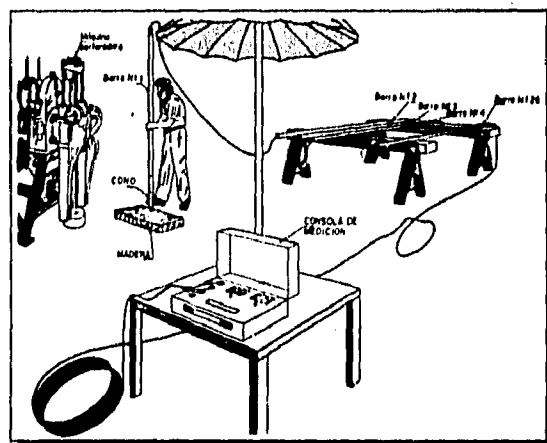


Figura 3.16.- Revisión del funcionamiento del cono.

- h) Por último se regula la velocidad de hincado a 1 cm/seg. (estándar impuesto para las arcillas de la Cd. de México).

Una vez efectuados los trabajos previos se procede a la ejecución de la prueba, consistente en empujar las barras para que penetre el cono con la velocidad antes mencionada. El intervalo de medición adoptado en México es a cada 10 cm. de avance.

Durante la prueba es necesario tener un control de la misma, para obtener un sondeo de calidad:

- Se debe asegurar la verticalidad en la penetración de las barras.
- La profundidad registrada del sondeo debe corresponder con el número de barras.
- Las resistencias registradas deben estar dentro de los márgenes establecidos por otros sondeos cercanos o por la experiencia y conocimientos existentes.
- No se deben permitir lecturas negativas del cono durante su penetración.
- El cable debe de permanecer "intacto", es decir, no debe ser tensado, pisado, humedecido, etc.
- La verificación de la velocidad de hincado se debe efectuar con un cronómetro, repitiéndose cada tres minutos como mínimo.
- Las cargas registradas no deben de pasar por arriba del 90% de la capacidad de la punta.
- La fuerza de hincado debe ser menor que la fuerza necesaria para producir pandeo en las barras.

Como un último comentario, es importante resaltar la capacidad técnica tanto de la persona que

ejecuta la prueba (operador) como del ingeniero encargado, para obtener una prueba con calidad.

**3.5.1.3.- Recomendaciones para corregir los errores más comunes en la prueba de cono.**

En la siguiente tabla se muestra un resumen de los errores más comunes al efectuar la prueba, así como sus causas probables y posibles soluciones.

<b>ERRORES COMUNES EN LA PRUEBA DE CONO</b>				
<b>N°</b>	<b>ERROR</b>	<b>ORIGEN</b>	<b>CAUSA PROBABLE</b>	<b>MEDIDAS CORRECTIVAS</b>
1	Pérdida de verticalidad	Operación	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Posición incorrecta de la máquina de perforación.</li> <li>• Desviación por lentes duros.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Utilizar conos implementados con inclinómetro.</li> <li>• Corregir la profundidad con base en informaciones confiables.</li> <li>• Repetir el sondeo.</li> </ul>
2	Mala calibración o desajuste electrónico de la celda.	Operación	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mala calibración o mal funcionamiento del cono.</li> <li>• Aplicar fuerzas cercanas o mayores de la capacidad del cono.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verificar la reacción del conjunto cono-consola antes del sondeo.</li> <li>• Corregir la resistencia con la lectura final.</li> <li>• Repetir la parte incierta del sondeo.</li> </ul>
3	Velocidad de hincado incorrecta.	Operación	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Desajuste de la velocidad de la máquina perforadora.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verificación de la velocidad de hincado cada 3 metros de avance.</li> <li>• Reajuste de la velocidad durante la ejecución del sondeo.</li> <li>• Anotar la velocidad equivocada y el tramo correspondiente para que lo tomen en cuenta en la interpretación o repetir el tramo correspondiente.</li> </ul>
4	Pérdida total o parcial de resistencia.	Operación	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Suciedad en la juntas del cono.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Buena limpieza del cono antes de introducirlo al subsuelo.</li> <li>• Extraer el cono y limpiarlo.</li> <li>• Repetir el sondeo.</li> </ul>
5	Lecturas inestables.	Sistema electrónico	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Daños en los cables.</li> <li>• Humedad en el cono.</li> <li>• Fallas de la consola.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Confirmar que el conjunto electrónico está en buenas condiciones antes de iniciar el sondeo, observando la estabilización de las lecturas.</li> <li>• Cuidado y protección de los cables durante la ejecución.</li> <li>• Revisión de los cables, cono y consola si el problema sucede durante el sondeo.</li> <li>• Sustituir o reparar los elementos dañados o fallados.</li> </ul>
6	Picos mínimos.	Operación	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fenómeno normal al atravesar un lente duro.</li> <li>• Fenómeno normal al interceptar una fisura.</li> <li>• Fenómeno normal durante la extracción del cono.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Continuar el sondeo normalmente e interpretar correctamente la resistencia registrada.</li> </ul>

**Tabla 3.9.- Errores con el cono eléctrico.**

**3.5.2.- Alcances y beneficios, (ref. 5).**

Es conveniente resaltar la importancia de esta herramienta de exploración empleada "recientemente" en suelos blandos y arenas poco compactas, ya que su utilidad se ha ido incrementando, debido a que nos permite definir las variaciones con respecto a la profundidad de las resistencias opues-

tas a la penetración de la punta cónica y de la fricción desarrollada sobre las paredes del cono; logrando con esto definir diferentes parámetros del subsuelo:

- Cuando se emplea como índice la variación de la resistencia de punta del cono, es posible determinar con precisión los cambios en la estratigrafía para elaborar un perfil estratigráfico confiable, (figura 3.6).
- Nos permite identificar los tipos de suelos en forma indirecta, haciendo uso de correlaciones empíricas como las elaboradas por Sanglerat y Schmertmann (figuras 3.17 a y b). Es conveniente resaltar que la identificación de suelos en la zona del lago se puede llevar a cabo comparando la variación de la resistencia de punta del cono con la estratigrafía definida mediante sondeos con muestreo inalterado de tipo continuo como pueden ser el tubo Shelby y el barril Denison.
- Es posible obtener la resistencia al corte en suelos cohesivos bajo condiciones no drenadas en forma aproximada empleando la siguiente fórmula:

$$c_{un} = \frac{q_c}{N_k}$$

$c_{un}$  = resistencia al corte no drenada ( $t/m^2$ ).  
 $q_c$  = resistencia de punta del cono ( $kg/cm^2$ ).  
 $N_k$  = coeficiente de correlación.

En la tabla 3.10 se muestran los coeficientes de correlación  $N_k$ .

- Mediante la correlación entre la resistencia de punta y la compacidad relativa de arenas finas se puede determinar el valor del ángulo de fricción interna  $\phi'$  (figura 3.18).
- La presión de poro así como la velocidad de propagación de ondas (esta última en forma indirecta).

TIPO DE SUELO	$q_c$ Resist. de punta $kg/cm^2$ .	PRUEBA		TORCÓMETRO		PENETRÓMETRO DE BOLSILLO.
		TRIAXI AL UU	COMPRESIÓN SIMPLE	LAB.	CAMPO	
Costra seca	$5 < q_c < 10$	$q_c / 14$	$q_c / 20$	.	.	.
Arcillas blandas	$q_c > 5$	$q_c / 13$	$q_c / 16$	$q_c / 12$	$q_c / 14$	.
Limos arcillosos duros	$q_c > 10$	$q_c / 24$	$q_c / 54$	.	.	$q_c / 29$

Tabla 3.10.- Valores del coeficiente de correlación  $N_k$  para la Ciudad de México.

En cuanto a los beneficios, se puede decir que han sido de dos tipos: técnicos y económicos, (referencia 1).

- 1) *Beneficios técnicos.*- Los datos obtenidos de resistencias tienen un alto grado de confiabilidad ya que se trata de una prueba "in situ" en la que no se presenta alteración del subsuelo como ocurriría con un muestreador; solamente es necesario extraer muestras del subsuelo a ciertas profundidades determinadas por los resultados de la prueba de cono eléctrico empleando un criterio selectivo, para poder obtener parámetros de compresibilidad del subsuelo y valores de resistencia que permitan la verificación de los factores de correlación del cono (en caso de ser necesario).

2) *Beneficios económicos.*- Baste decir que el costo de las exploraciones efectuadas se reduce hasta en una quinta parte en comparación con las técnicas tradicionales.

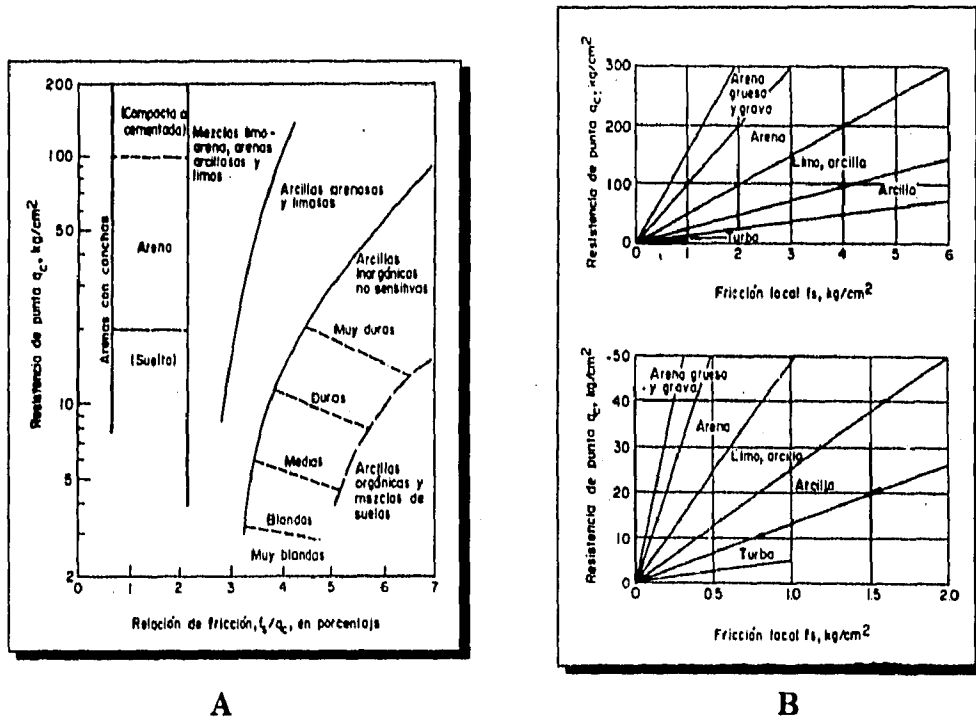


Figura 3.17 a y b.- Clasificación de suelos con el cono eléctrico.

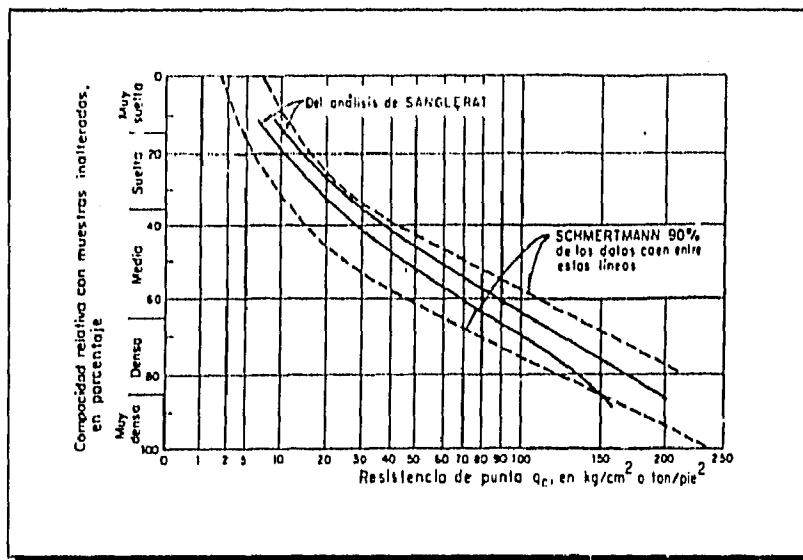











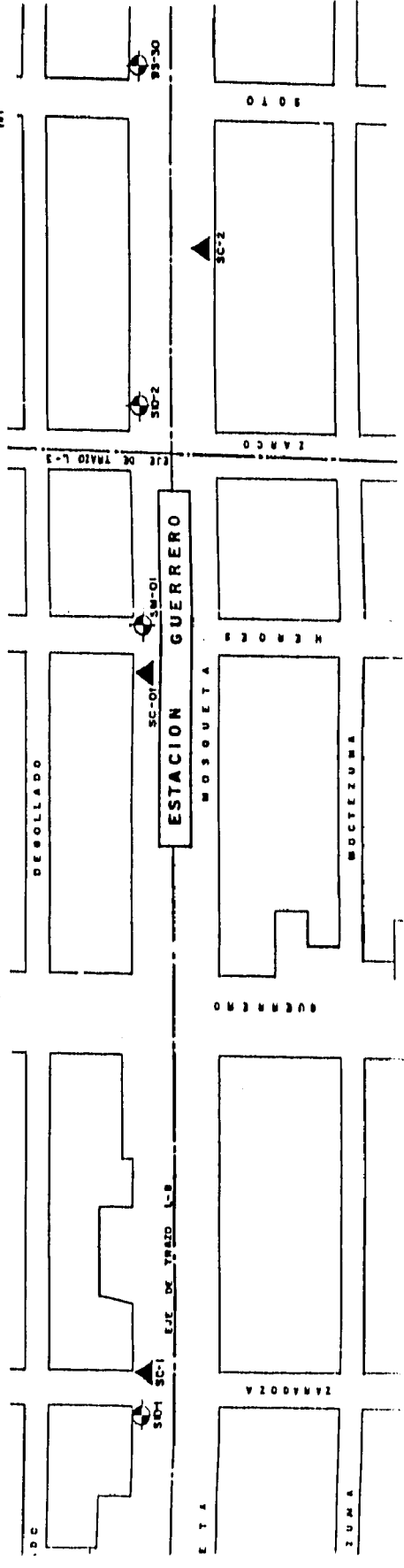
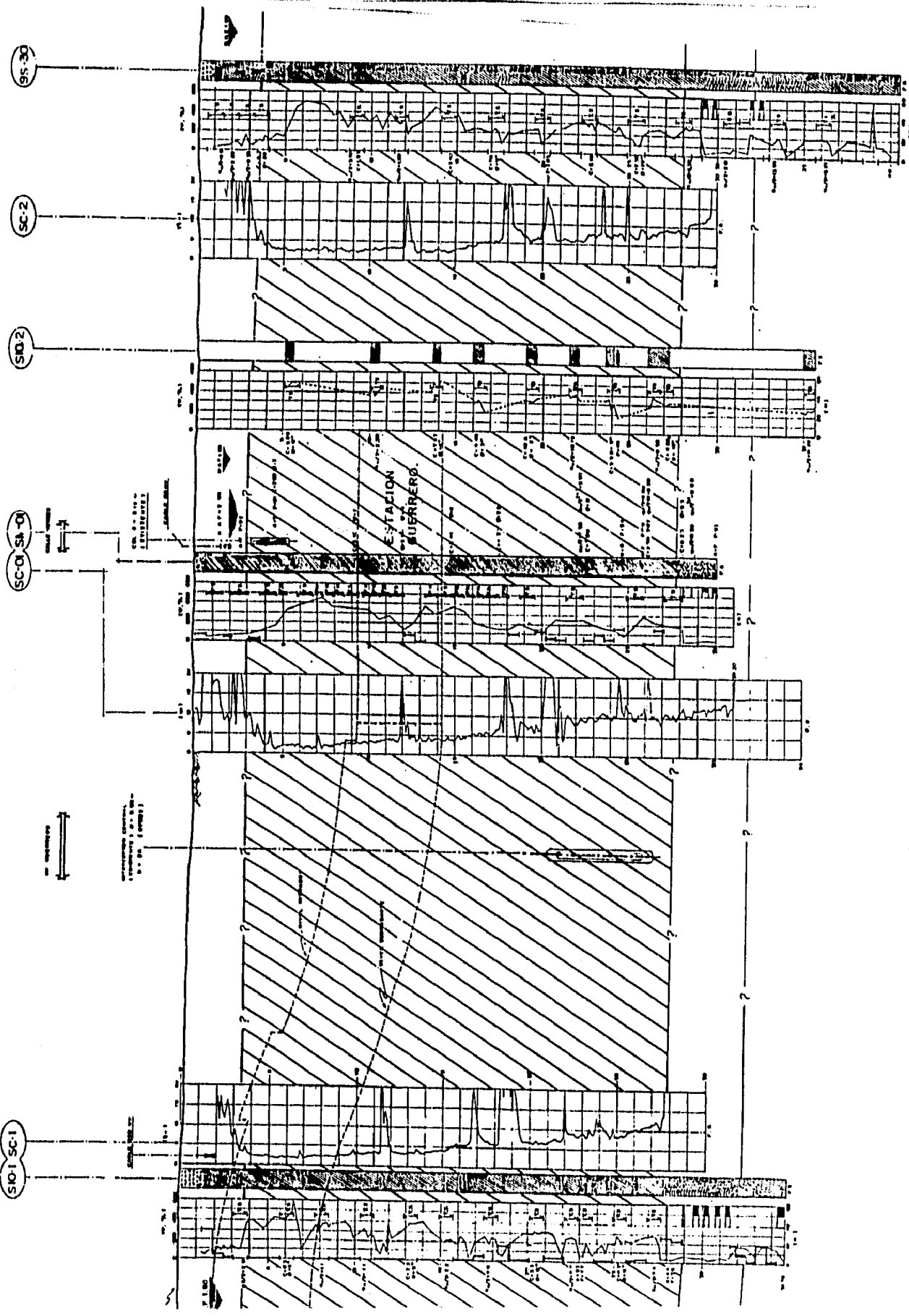
Figura 3.18.- Correlación entre la resistencia de punta y la compacidad relativa de arenas finas.

3.6.- PERFIL ESTRATIGRÁFICO DEL TRAMO BUENAVISTA-GUERRERO.

SIMBOLOGÍA	
	RELLENO.
	ARCILLA.
	LIMO.
	ARENA.
	GRAVA.
	FÓSILES.
	VIDRIO VOLCÁNICO.
<b>W</b>	CONTENIDO DE AGUA DEL SUELO, EN %.
<b>N</b>	NÚMERO DE GOLPES, EN PENETRACIÓN ESTÁNDAR.
<b>F.S.</b>	FIN DE SONDEO.
<b>N.A.F.</b>	NIVEL DE AGUAS FREÁTICAS, EN METROS.
<b>T.S.</b>	MUESTREO CON TUBO SHELBY.
<b>B.D.</b>	MUESTREO CON BARRIL DENISON.
	MÁS DE 60 GOLPES.
<b>C</b>	COHESIÓN DE PRUEBA TRIAXIAL, EN Ton/m <sup>2</sup> .
<b>q<sub>u</sub>/2</b>	COHESIÓN DE PRUEBA DE COMPRESIÓN SIMPLE, EN Ton/m <sup>2</sup> .
<b>φ</b>	ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA DEL MATERIAL.
<b>q<sub>c</sub></b>	RESISTENCIA EN LA PUNTA DEL CONO, Kg/cm <sup>2</sup> .
	SONDEO DE EXPLORACIÓN.
	SONDEO DE CONO ELÉCTRICO.
<b>A</b>	PORCENTAJE DE ARENA.
<b>F</b>	PORCENTAJE DE FINOS.
<b>q<sub>u</sub>/2<sup>(*)</sup></b>	COHESIÓN DE PRUEBA DE COMPRESIÓN SIMPLE INCLUYENDO CARGA Y DESCARGA, EN Ton/m <sup>2</sup> .







## REFERENCIAS.

- 1.- D.D.F., COVITUR, Secretaría General de Obras. Nuevos caminos para el metro (Avances tecnológicos y optimización de recursos en la construcción 1982-1988). Editorial Colinas de Buen. 81 páginas.
- 2.- Marsal, J. Raúl y Mazari Marcos. El subsuelo de la Ciudad de México. U.N.A.M. Facultad de Ingeniería. 2ª edición, Febrero de 1962. México D.F. 614 páginas.
- 3.- Mooser, F. Támez, E. Santoyo, E. Holguín, E. y Gutiérrez C. E. Características geológicas y geotécnicas del Valle de México. Editor M. Roberto Ocampo Franco COVITUR. 1ª reimpresión. 1990. México D.F. 39 páginas.
- 4.- Santoyo, E. Lin Xue, R. Ovand, E. El cono en la exploración geotécnica. Editor Carlos E. Gutiérrez. TGC Geotécnia S.A. 1989. 323 páginas.
- 5.- Támez, E. Santoyo, E. Mooser, F. y Gutiérrez C. E. Manual de diseño geotécnico. Volumen 1. (Estudios geotécnicos y diseño del metro en cajón). COVITUR. Agosto de 1987. México D.F. 190 páginas.

## CAPÍTULO 4

### “OBRAS INDUCIDAS”

*Objetivo específico.* - Plantear la problemática generada para la construcción del cajón, por las principales instalaciones municipales, así como la solución de las mismas.

- 4.1. **LAS OBRAS INDUCIDAS.**
  - 4.1.1. **Definición y aspectos que señalan a una instalación como obra inducida.**
  - 4.1.2. **Solución y repercusión de las obras inducidas.**
  
- 4.2. **PRINCIPALES OBRAS INDUCIDAS EN EL TRAMO BUENAVISTA-GUERRERO.**
  - 4.2.1. **Ductos de alta tensión (230 KV) de C.L.F.**
  - 4.2.2. **Alcantarillado.**
  - 4.2.3. **Tuberías de agua potable.**
  
- 4.3. **PRINCIPALES OBRAS INDUCIDAS EN LA ZONA DEL TUNELEO FALSO.**
  - 4.3.1. **Localización de instalaciones.**
  - 4.3.2. **Alcantarillado.**
    - 4.3.2.1. **Atarjea de Ø 45 cm.**
    - 4.3.2.2. **Paso sobre el túnel interceptor Central.**
  - 4.3.3. **Solución a la tubería de agua potable de Ø 12".**

**REFERENCIAS.**

#### 4.1.- LAS OBRAS INDUCIDAS.

##### 4.1.1.- Definición y aspectos que señalan a una instalación como obra inducida.

Una obra inducida la podemos definir como: "Conjunto de actividades programadas, relativas a dar solución a todas aquellas interferencias que se presentan para llevar a cabo la construcción de una obra determinada, en este caso el Metro, las cuales se pueden desarrollar en forma independiente o paralela a la obra".

Dentro de las instalaciones que en un momento dado pueden considerarse como interferencias podemos mencionar: " postes de alumbrado, semáforos, energía eléctrica, teléfonos, trolebuses, con sus respectivos cables para dar servicio; vías de tranvía o ferrocarril; especies vegetales como árboles o palmeras; cables subterráneos de alumbrado, de semáforos, de energía eléctrica, de teléfonos, de cablevisión; tuberías subterráneas para la conducción de gas propano, petróleo, agua potable, drenaje; predios de propiedad particular, federal, o ejidal; etc."

Es durante la etapa de anteproyecto de una línea, cuando se identifican las instalaciones que pueden llegar a interferir con la obra; para ello se realizan recorridos y se acude con los diferentes organismos o dependencias correspondientes para que proporcionen toda su información en base a los planos de trazo de la línea. Con esta información se efectúa una evaluación de la ruta elegida y del impacto económico de las obras inducidas, para realizar las modificaciones que se consideren pertinentes.

Esta información provee al proyectista de elementos para elaborar el diseño de la línea (determinando el tipo de sección) con todo lo que esto implica (especificaciones, planos, etc.), y es en esta etapa del proyecto, donde se determina el grado de interferencia de una instalación, es decir, si es o no una obra inducida, determinado fundamentalmente por el tipo de sección (túnel, cajón, etc.) y sistemas constructivos seleccionados.

##### 4.1.2.- Solución y repercusión de las obras inducidas.

Cuando se ha desarrollado el proyecto definitivo para la construcción de una línea del Metro, (que incluye trazo, estaciones, puestos de rectificación de energía eléctrica, paraderos, estacionamientos, puentes o pasos a desnivel y estacionamientos, entre otros) se procede a realizar una verificación de lo realizado durante la etapa de anteproyecto, mediante reuniones con los organismos que controlan o intervienen directamente en la solución de las interferencias que se nos puedan presentar, y también mediante recorridos de campo, obteniéndose con esto, un panorama más claro y preciso de aquellos elementos que nos involucrarán una obra inducida. En resumen el procedimiento que se sigue con las dependencias y organismos que interfieren, es el siguiente:

Una vez que se conoce el proyecto definitivo para la construcción del Metro, se detectan las interferencias a lo largo del trazo, estaciones, puestos de rectificación, etc. y se solicita a cada uno de los organismos la elaboración del proyecto respectivo, para solucionar la interferencia. Para el caso de los predios afectados, se procede a realizar el levantamiento topográfico respectivo, marcando en ellos el área requerida, actuándose según sean predios de propiedad particular, ejidal o federal, como se explica en los siguientes párrafos:

###### a) Propiedades particulares.

En este caso, se envían los requerimientos a las autoridades de las delegaciones del Departamento del Distrito Federal o de los municipios del estado de México según sea el caso, para que efectúen la adquisición del inmueble.

###### b) Propiedades ejidales.

Por la situación jurídica que presentan estos predios es necesario proceder mediante una solicitud de expropiación ante la Secretaría de la Reforma Agraria, efectuando además el pago de cosechas

construcciones y terrenos, según se dictamine por la autoridad correspondiente.

c) *Propiedades federales.*

Para el caso de propiedades federales como son las pertenecientes a instituciones como el I.M.S.S., C.F.E., etc., se procede mediante la realización de acuerdos, en los que se llega a ciertos convenios con las instituciones o se realiza alguna permuta por otros predios pertenecientes al D.D.F.

En base a lo anterior podemos señalar que las obras inducidas repercuten directa o indirectamente en diferentes aspectos tanto de la obra Metro como de la misma ciudadanía.

Dentro de la obra Metro las repercusiones se dan a nivel económico, técnico y de programa; ya que el mover una serie de instalaciones obliga a considerar tiempos probables de liberación de las mismas. Lo anterior obliga a tener diferentes frentes de trabajo (como consecuencia de una reprogramación de actividades), cuando dichos tiempos no son compatibles con los de la ejecución de la obra, o en su defecto, modificar los procedimientos constructivos y en ocasiones se debe contemplar también la posible ampliación de los sistemas existentes.

Todo esto influye directamente en el presupuesto, por lo cual es necesario realizar balances para determinar que porcentaje ocupa la obra inducida dentro de la obra Metro.

De igual forma, la ciudadanía se ve afectada, ya sea por desvíos de tránsito y peatonales, suspensión de ciertos servicios para realizar los desvíos y en el peor de los casos la afectación es directa al perder parcial o totalmente su inmueble; de ahí que el realizar cualquier trabajo de este tipo requiera una base que sea justificable para ello.

4.2.- PRINCIPALES OBRAS INDUCIDAS EN EL TRAMO BUENAVISTA-GUERRERO.

Las principales interferencias dentro del tramo estuvieron dadas por ductos de alta tensión de la Compañía de Luz y Fuerza del Centro, atarjeas, tuberías de agua potable y el túnel interceptor central;

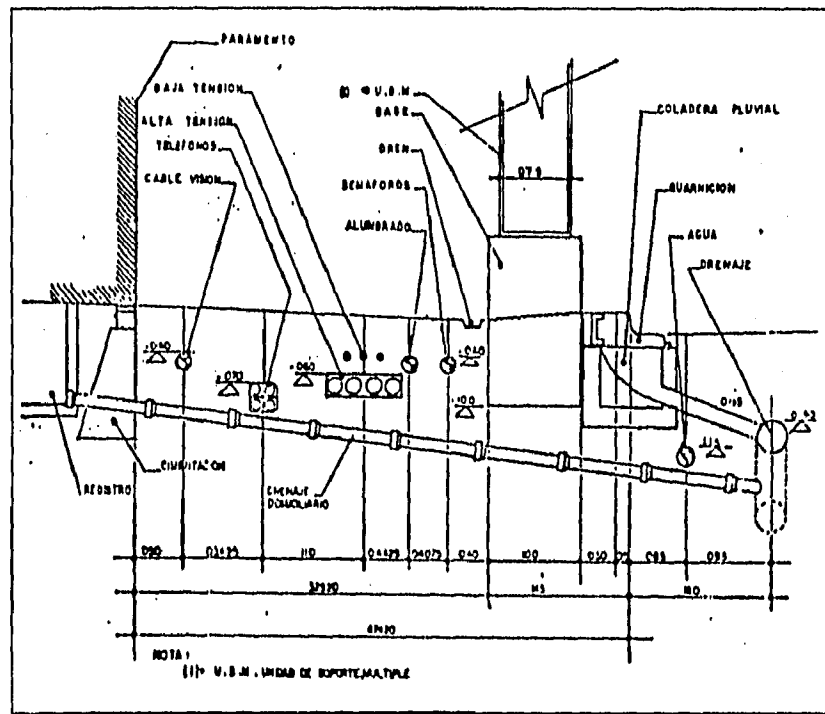
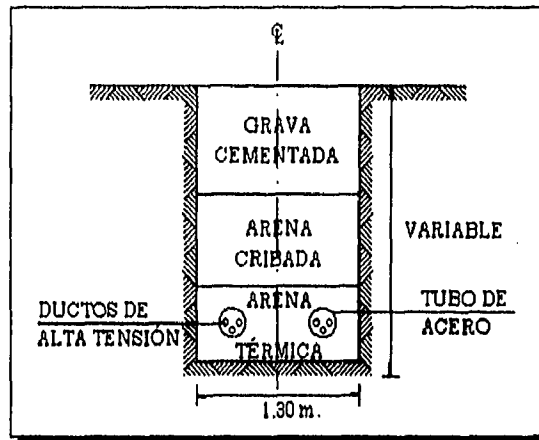


Figura 4.1.- Instalaciones subterráneas, sección tipo (referencia 1).

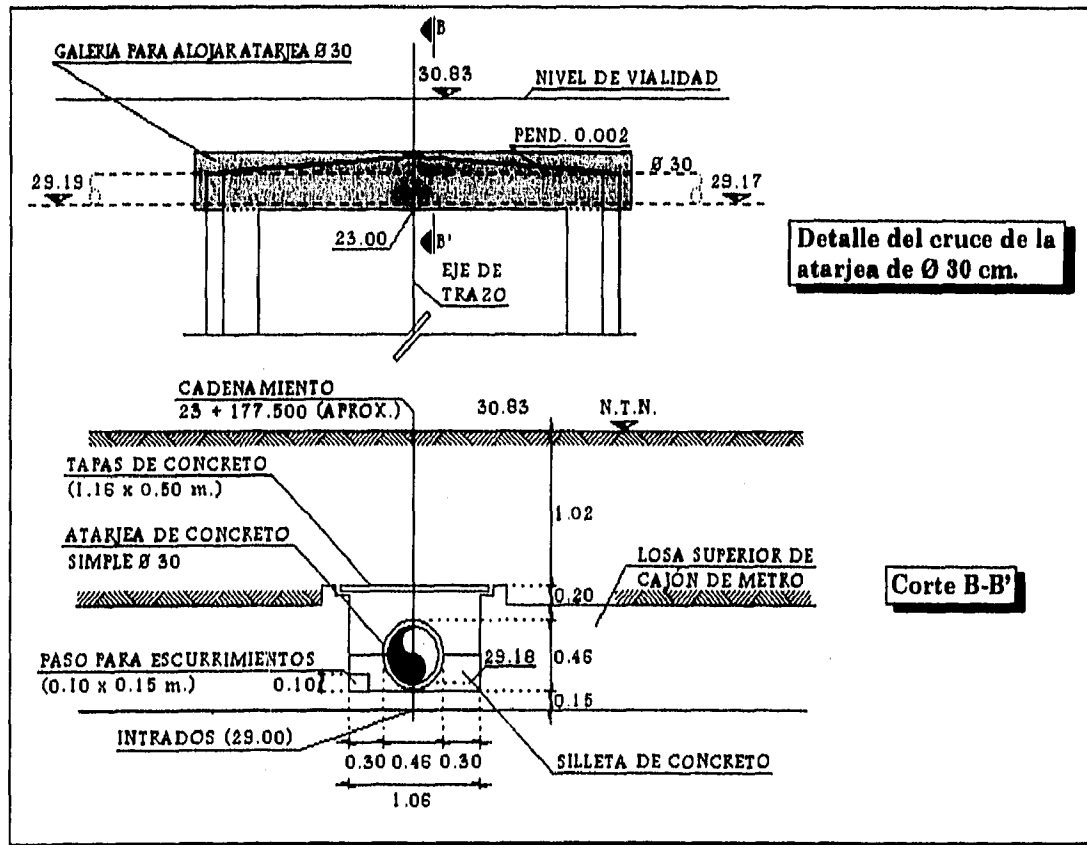
mismas que se describen en párrafos posteriores. Además de las anteriores, se presentaron instalaciones "menores" tales como ductos de TELMEX, unidades de soporte múltiple (U.S.M.), coladeras pluviales, ductos de semaforización, entre otras (fig. 4.1); encontrándose su descripción fuera de los alcances de este trabajo.

**4.2.1.- Ductos de alta tensión (230 KV) de C.L.F (ref. 5).**

En el tramo se presentaron ductos de alta tensión de 230 KV, ubicados en las calles de Zaragoza y Aldama, los cuales cruzaban de manera transversal al cajón del Metro por encima de la losa de techo y de las tablestacas. Una sección típica de ésta instalación se muestra en la figura 4.2 (referencia 1).



**Figura 4.2.- Sección típica de ductos de 230 KV de C.L.F.**



**Figura 4.3.- Detalle y corte del cruce de la atarjea de Ø 30 con cajón, cad. 23 + 177.500**

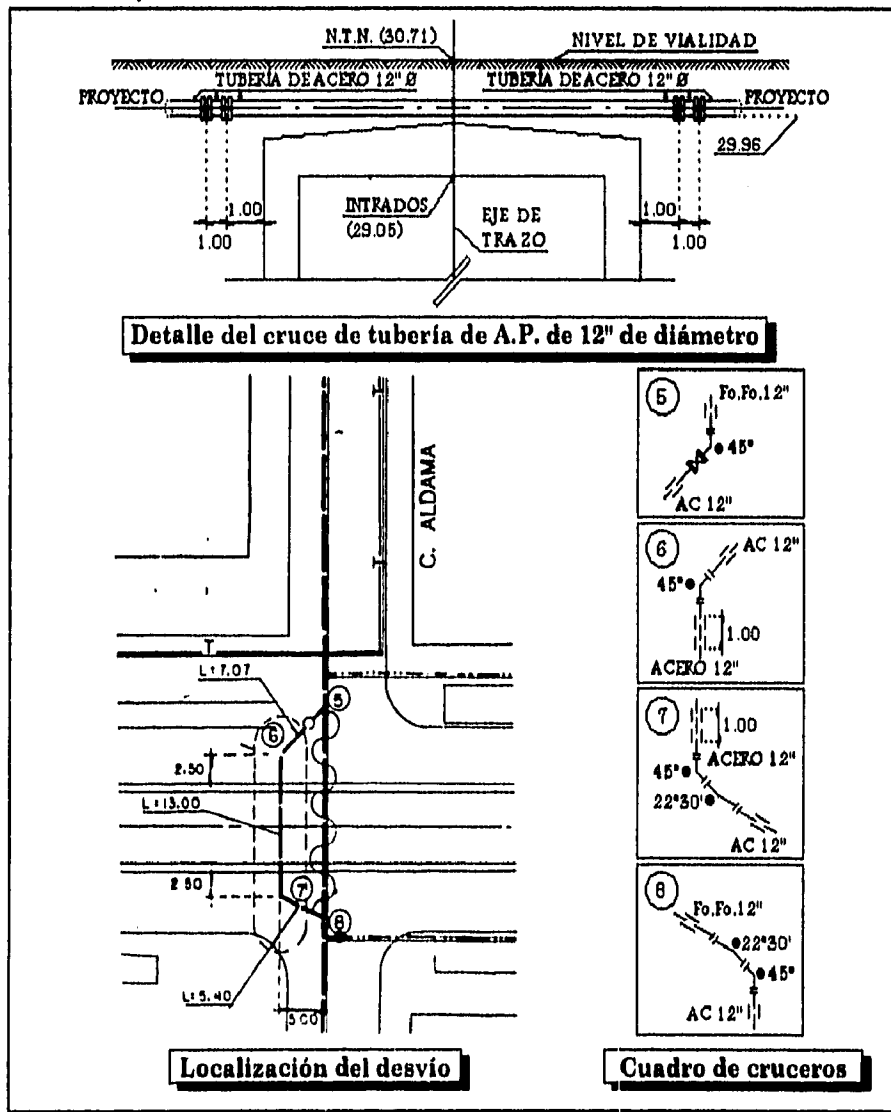
**4.2.2.- Alcantarillado.**

Dentro del tramo en cuestión, las principales interferencias en cuanto a obras de alcantarillado se refiere, fueron las concernientes a atarjeas de 30 y 38 cm. de diámetro, además de coladeras pluviales.

En la figura 4.3 se muestra la atarjea de 30 cm. de diámetro correspondiente al cadenamamiento 23+177.500, la cual por su localización tuvo que ser protegida, mediante la construcción de una galería de concreto reforzado, según se muestra. Las demás atarjeas no requirieron la construcción de galerías, por la profundidad del cajón (subterráneo profundo), de ahí que se alojaran sobre los rellenos del cajón.

**4.2.3.- Tuberías de agua potable.**

Dentro del tramo se presentaron solamente dos tuberías de agua potable, cruzando transversalmente al cajón; una de 12" (30.48 cm.) ubicada en la calle de Aldama y la otra de 6" (15.2 cm.) en la calle de Zaragoza, ambas de acero. En la figura 4.4 se muestra un detalle de la tubería de 12", siendo ésta la más próxima al cajón. La simbología de los cruceos, se muestra en la figura 4.4, quedando fuera de los alcances de éste trabajo los detalles de los desvíos.



**Figura 4.4.- Relocalización de la tubería de 12" y detalle de cruceos.**

4.3.- PRINCIPALES OBRAS INDUCIDAS EN LA ZONA DEL TUNELEO FALSO.

4.3.1.- Localización de instalaciones (ref. 5).

En la figura 4.5 se muestran las instalaciones municipales, correspondientes a la zona del tuneleo

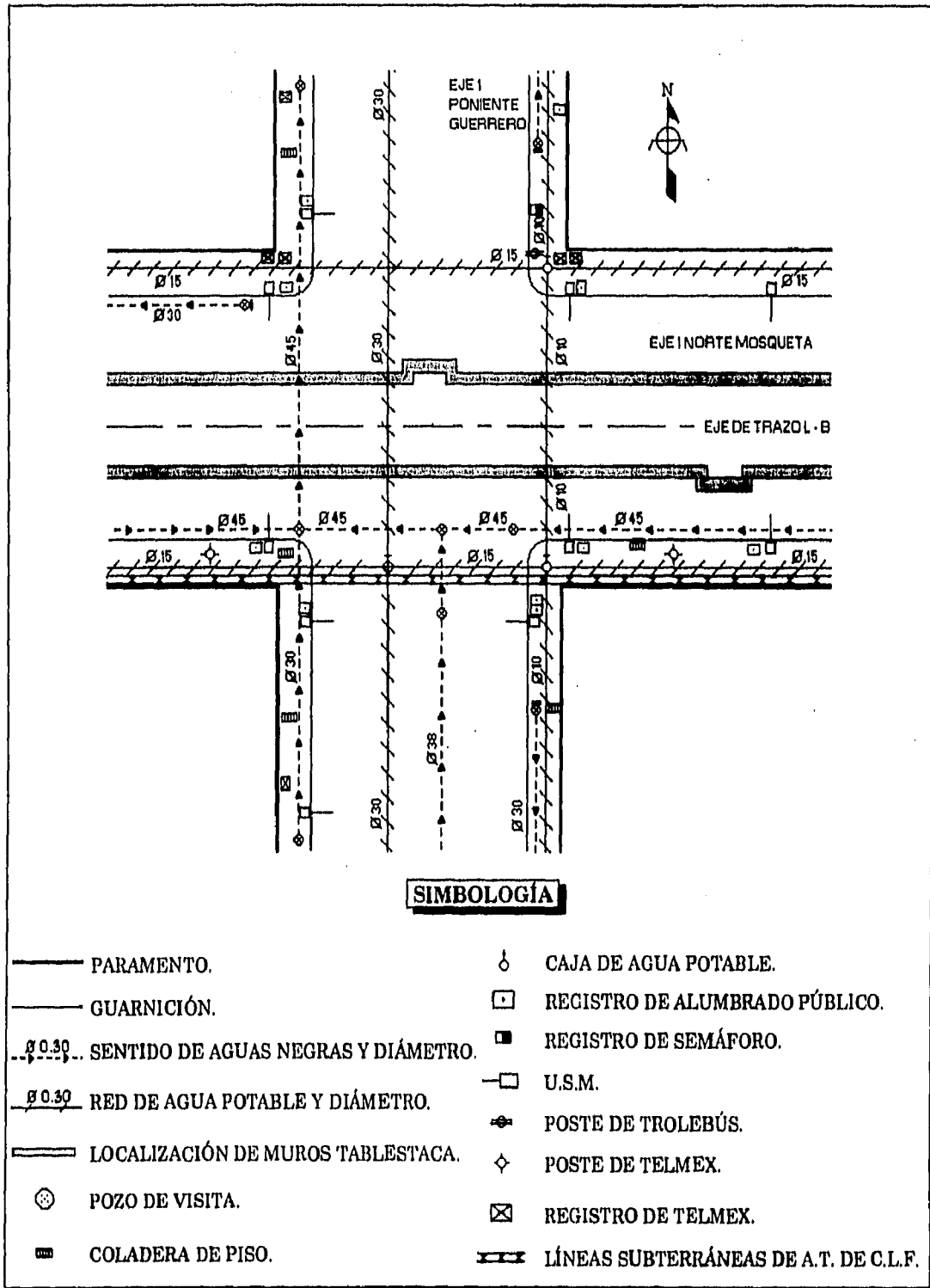
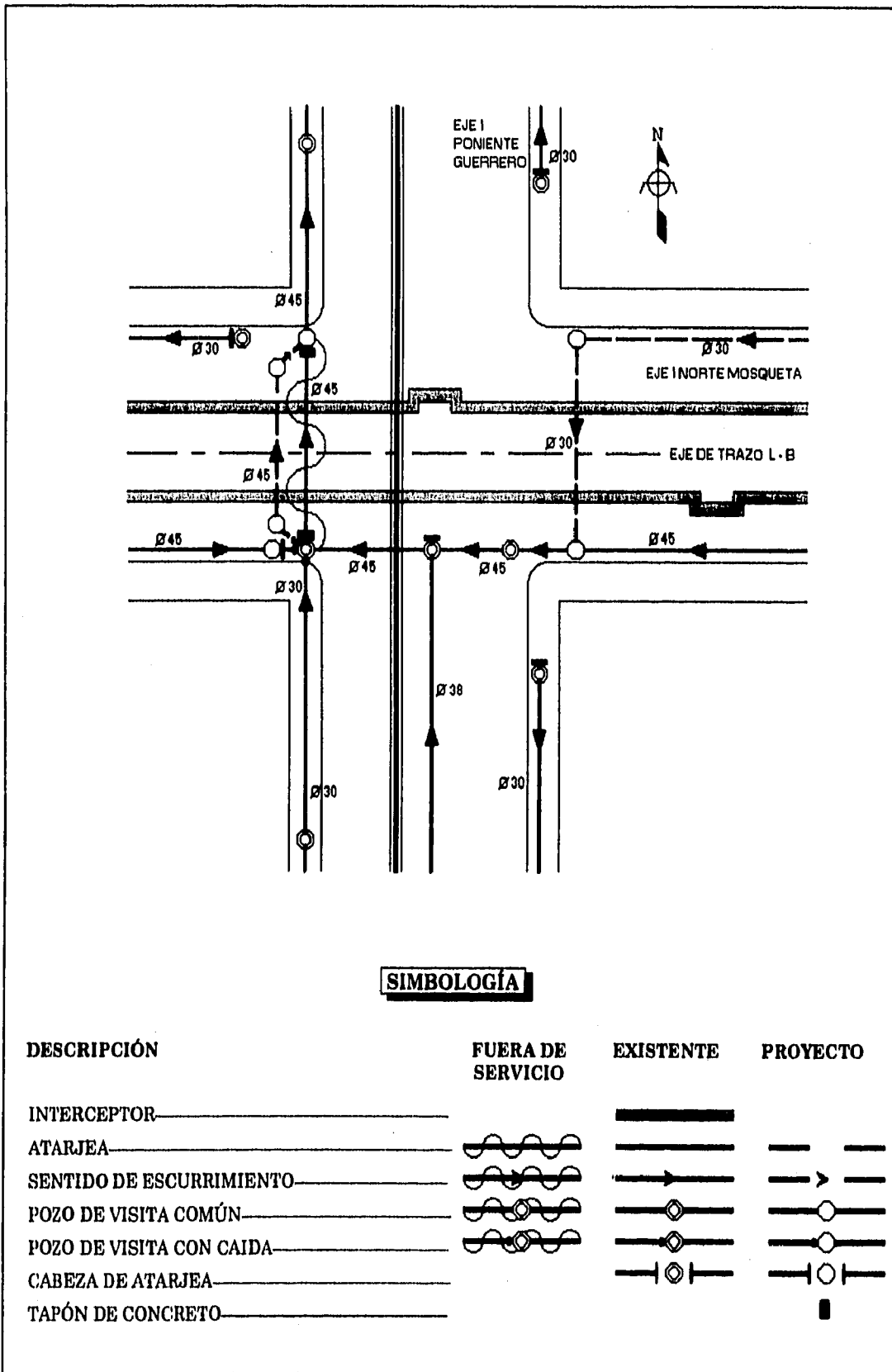


Figura 4.5.- Localización de instalaciones municipales en la zona del tuneleo.





**SIMBOLOGÍA**

DESCRIPCIÓN	FUERA DE SERVICIO	EXISTENTE	PROYECTO
INTERCEPTOR	—	▬	▬
ATARJEA	⌒	▬	▬
SENTIDO DE ESCURRIMIENTO	⌒	▬	▬
POZO DE VISITA COMÚN	⊙	⊙	⊙
POZO DE VISITA CON CAIDA	⊙	⊙	⊙
CABEZA DE ATARJEA	⊙	⊙	⊙
TAPÓN DE CONCRETO	—	—	■

Figura 4.6-Relocalización de la atarjea de Ø 45 cm., en la zona de tuneleo falso.

falso, con excepción del túnel interceptor central. De las instalaciones mostradas en la figura, solamente las que cruzan transversalmente al cajón (TELMEX, agua potable y atarjeas), fueron removidas durante la construcción de la losa de cubierta del tuneleo (capítulo 5); la reubicación y protección de las mismas se describe en los siguientes párrafos.

**4.3.2.- Alcantarillado.**

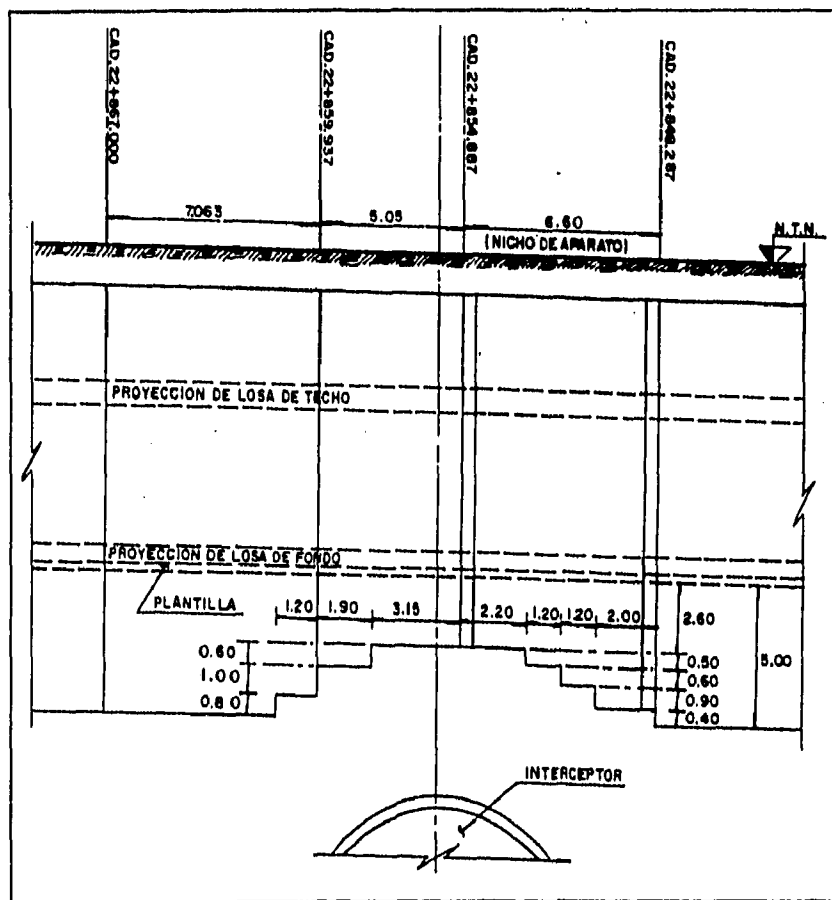
**4.3.2.1.- Atarjea de Ø 45 cm.**

Esta atarjea de concreto simple, cruza transversalmente el cajón y por encima del mismo, como se observa en la figura 4.6, por lo cual fue taponeada y retirada durante la construcción de la losa de cubierta del tuneleo, para después ser reinstalada durante la colocación de los rellenos.

**4.3.2.2.- Paso sobre el túnel Interceptor Central.**

El túnel Interceptor Central forma parte del Sistema de Drenaje Profundo de la ciudad, el cual se encuentra conformado por una serie de colectores semiprofundos, interceptores y un emisor central; éste interceptor tiene actualmente una longitud de 16 km, mismos que van desde el cruce de las avenidas Dr. Vértiz y Obrero Mundial, hasta la lumbrera 0 del Emisor Central en Cuauhtepac; posee un diámetro interior de 5m., una capacidad de conducción de 90 m<sup>3</sup>/seg, una pendiente de 0.5 m./km. y una profundidad mínima de 22 m. y máxima de 41 m.

Sus funciones son las de aliviar al Río de la Piedad, captar las descargas de los colectores Tabasco, 5 de Mayo, Héroes, Río Consulado, Cuitláhuac, Fortuna y Moyobamba; además de contar con obras de toma de los ríos Remedios, Tlalnepantla, San Javier y Cuauhtepac (referencias 3 y 4).



**Figura 4.7.- Zona de cruce de línea B sobre el túnel Interceptor Central**

El interceptor corre a lo largo del eje 1 poniente Guerrero a una profundidad aproximada de 22 m., mientras que en esta zona, las tablestacas del cajón del Metro tienen una profundidad aproximada de 20 m., medidos a partir del nivel de terreno natural en el cadenamiento 22 + 861.137; cadenamiento que se ubica a una distancia aproximada de 5.69 m. del eje de proyecto del interceptor.

Ante tal situación, los muros tablestaca ubicados por encima del interceptor tuvieron que ser modificados para pasar de un espacio de 2 m. a 4m. entre desplante de muros y lomo del interceptor; para evitar un posible asentamiento del cajón del Metro sobre el interceptor, con la consecuente falla en este último; debido al hundimiento experimentado en la ciudad, sobre todo en la zona del lago; en la figura 4.7 se muestra un detalle de lo anterior.

Para corroborar la ubicación del interceptor, durante la etapa de construcción de los muros tablestaca (y en las noches para no afectar la vialidad) se efectuaron diferentes sondeos de exploración en perforaciones de 4" de diámetro. En un inicio se proyectaron 6 barrenos (del 1 al 6) separados entre sí 2 m. longitudinalmente, pero al no existir rebote de la broca en el sondeo número 2, se propusieron 4 barrenos adicionales (A a D) separados entre sí 2.5 m. longitudinalmente, con los cuales se logró detectar el interceptor, como se observa en la figura 4.8.

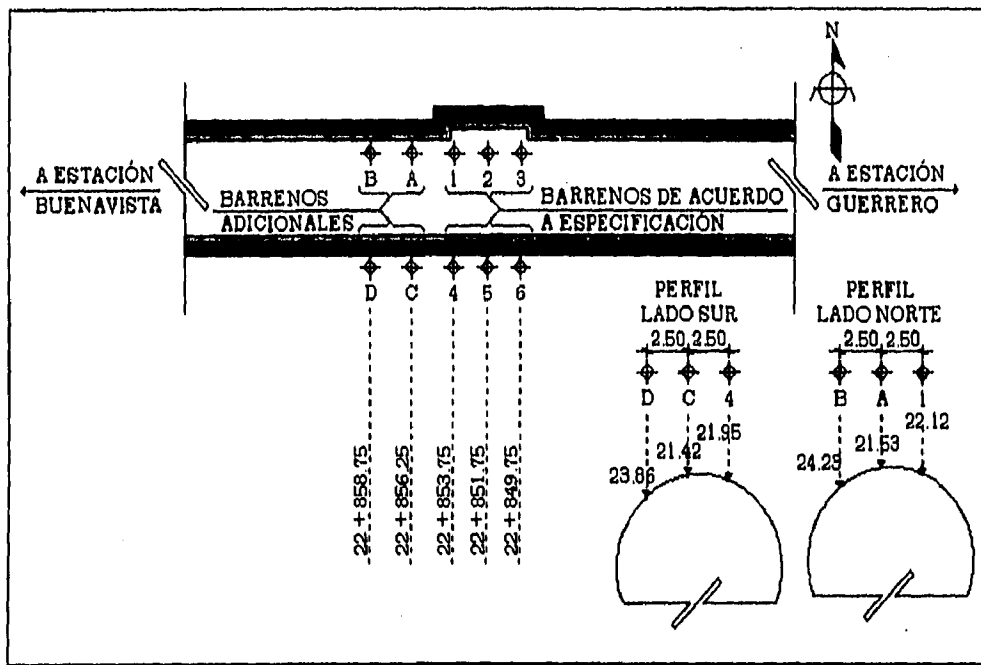


Figura 4.8.- Detalle de los sondeos para localizar el interceptor Central (ref. 6).

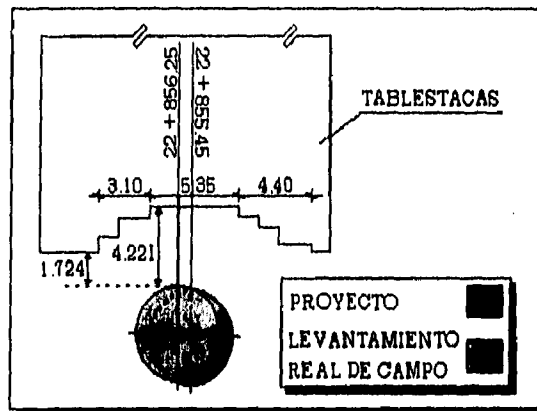
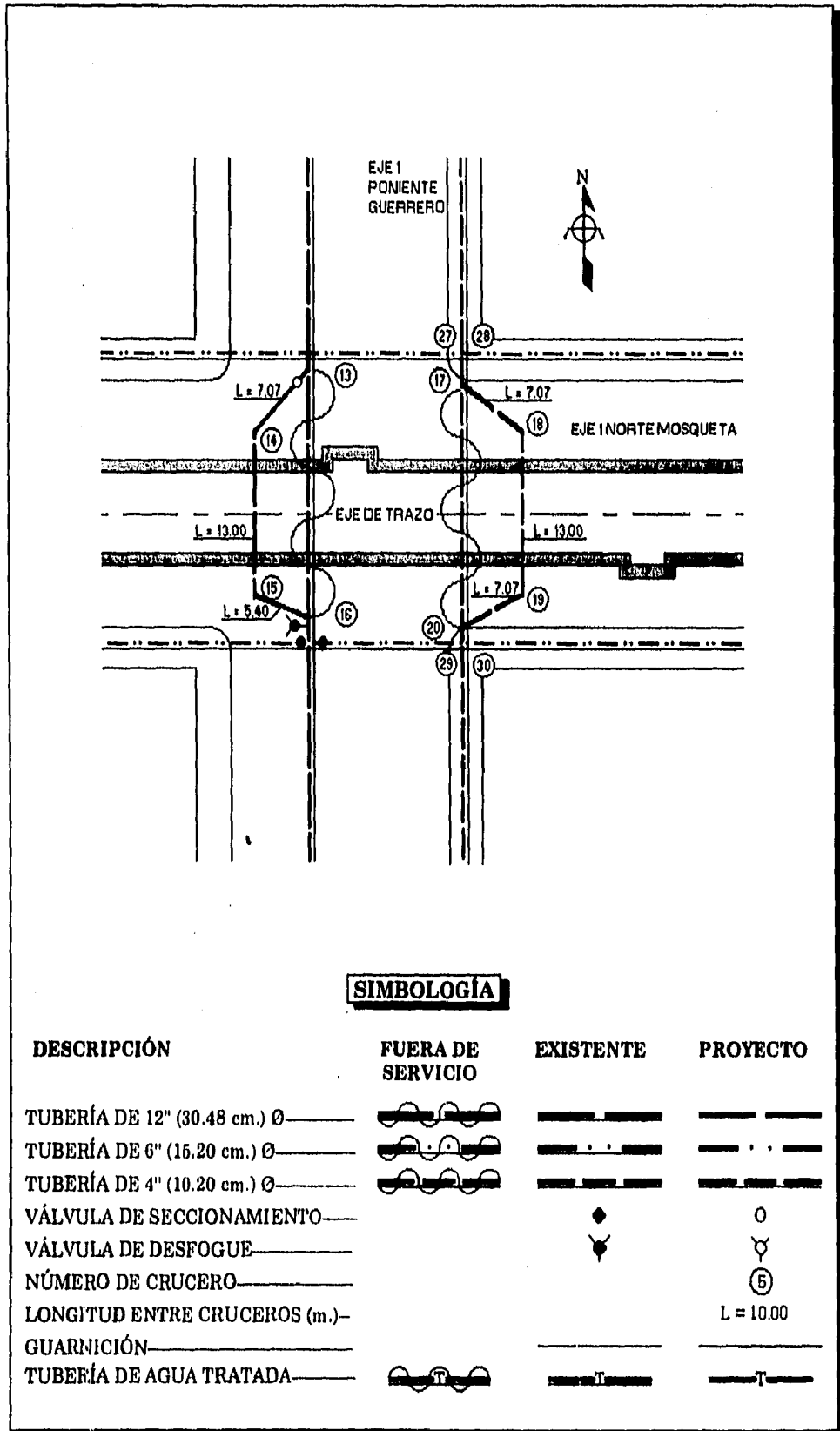


Figura 4.9.- Localización real y de proyecto del interceptor bajo muros tablestaca (ref. 6).



**SIMBOLOGÍA**

DESCRIPCIÓN	FUERA DE SERVICIO	EXISTENTE	PROYECTO
TUBERÍA DE 12" (30.48 cm.) Ø			
TUBERÍA DE 6" (15.20 cm.) Ø			
TUBERÍA DE 4" (10.20 cm.) Ø			
VÁLVULA DE SECCIONAMIENTO			
VÁLVULA DE DESFOGUE			
NÚMERO DE CRUCERO			
LONGITUD ENTRE CRUCEROS (m.)			L = 10.00
GUARNICIÓN			
TUBERÍA DE AGUA TRATADA			

Figura 4.10.-Relocalización de la tubería de A.P. de Ø 12".

Los resultados de las exploraciones, se compararon con los datos de proyecto, ubicándose el eje del interceptor en el cadenamiento 22 + 856.250, lo cual representa una variación de 0.80 m. con el de proyecto, en la figura 4.9 se muestra el levantamiento real de campo en comparación con el de proyecto.

**4.3.3.- Solución a la tubería de agua potable de Ø 12".**

Aproximadamente al centro del eje 1 poniente Guerrero, se localizaba la tubería de A.P. de 12" de diámetro, siendo removida para poder construir la losa de cubierta del tuneleo, así como los muretes de confinamiento (capítulo 5). Para proteger a la tubería en su cruce con la losa de cubierta, se construyó una galería de concreto. En la figura 4.10 se muestra el desvío y en la figura 4.11 se muestran detalles de los cruceros señalados en la figura 4.10.

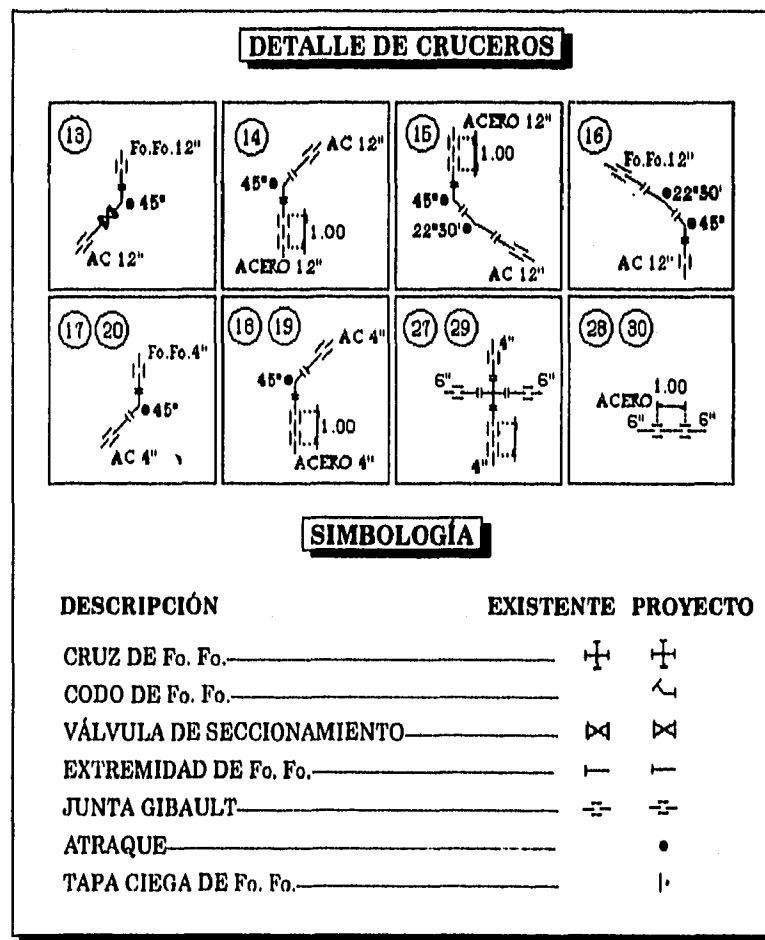


Figura 4.11.- Detalle de cruceros para la tubería de acero de A.P.

## REFERENCIAS.

- 1.- Arriaga Ortega, Juan José. Vías preferenciales de la Ciudad de México. Tesis profesional. Facultad de Ingeniería, U.N.A.M. 1980. 147 páginas.
- 2.- COVITUR. Especificaciones para el proyecto y construcción de las líneas del metro de la Ciudad de México. Volumen 2. (Construcción e instalaciones). Enero de 1987. México D.F.
- 3.- D.D.F. Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica. El Sistema de Drenaje Profundo de la Ciudad de México. 2ª edición. Noviembre de 1990. México D.F.
- 4.- D.D.F. Dirección General de Obras Hidráulicas. Interceptores profundos y el emisor central. (Un nuevo sistema de drenaje para el Distrito Federal). Agosto de 1969. México D.F. 56 páginas.
- 5.- ICA. Especificaciones y planos de para el metropolitano línea B.
- 6.- O.P.S.A. Obra: Metropolitano línea B. Conciliación de campo. (Sondeos para localizar el interceptor central) Febrero de 1995.
- 7.- Trejo Caballero, Carlos Enrique. Principales interferencias hidráulicas causadas por la construcción de la línea 8 del metro. Tesis profesional. Facultad de Ingeniería, U.N.A.M. 1993. 107 páginas.
- 8.- Valencia Rodríguez, Carlos. Las Obras Inducidas en la Construcción del Metro. Revista *Ingeniería*. Volumen LII. Número 1. Año 1982. Páginas 186-190. Facultad de Ingeniería U.N.A.M. México D.F.

7

## **CAPÍTULO 5**

### **“ETAPAS DEL PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO”**

*Objetivo específico.* - Analizar en forma integral cada una de las etapas del procedimiento constructivo.

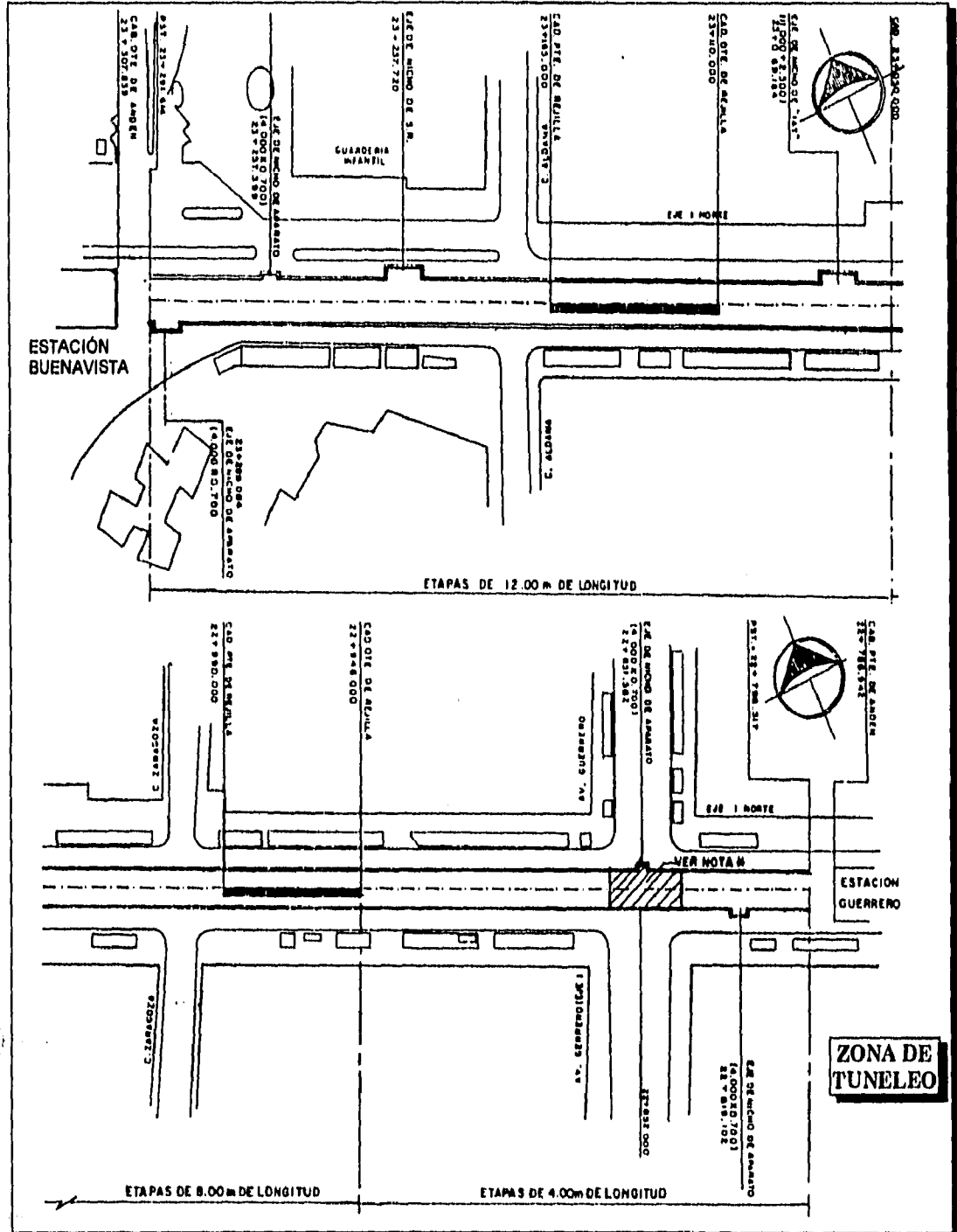
- 5.1. TRAMO SUBTERRÁNEO GUERRERO - BUENAVISTA.**
  - 5.1.1. Localización y gálibo.**
  - 5.1.2. Perfil.**
  
- 5.2. BROCALES.**
  
- 5.3. MUROS TABLESTACA.**
  - 5.3.1. Excavación, estabilización y limpieza de la zanja.**
    - 5.3.1.1. Equipo guiado de excavación.**
    - 5.3.1.2. Lodo estabilizador.**
  - 5.3.2. Cimbrado, armado y colado de tablestacas.**
  
- 5.4. PRIMERA FASE DEL TUNELEO.**
  - 5.4.1. Excavación y colado de la losa de cubierta.**
  - 5.4.2. Restauración del pavimento.**
  
- 5.5. SEGUNDA FASE DEL TUNELEO.**
  - 5.5.1. Abatimiento del N.A.F. por gravedad empleando bombas eyectoras.**
  - 5.5.2. Excavación entre muros tablestaca y troquelamiento.**
    - 5.5.2.1. Filtraciones en muros tablestaca.**
  - 5.5.3. Estructuración del cajón.**
  - 5.5.4. Rellenos sobre el cajón.**

**REFERENCIAS.**

**5.1.- TRAMO SUBTERRÁNEO GUERRERO - BUENAVISTA.**

**5.1.1.- Localización y gálibo.**

Dicho tramo se encuentra ubicado entre los cadenamientos 22 + 796.517 y el 23 + 291.614, siendo el origen de los cadenamientos el correspondiente al P0 = 21 + 770.000 localizado a 16.599 m. de la esquina nor-poniente formada por el eje 1 Norte, la calle de Allende y la intersección con el eje de trazo



**Figura 5.1.- Croquis de localización del tramo Buenavista - Guerrero.**



sobre dicho eje vial. Todos los cadenamientos están referidos al eje de trazo. En la figura 5.1, se muestra un croquis de localización del tramo, en el cual se señalan diferentes cadenamientos correspondientes a obras adicionales para albergar equipos electromecánicos: nichos de seguridad, de acometida de cables, de subestaciones de rectificación y rejillas de ventilación (cuya descripción queda fuera de los alcances del presente trabajo); se señalan también los cadenamientos correspondientes a las cabeceras de cada estación: 23 + 307.839 en la cabecera oriente de la estación Buenavista y 22 + 786.942 en la cabecera poniente de la estación Guerrero. Algo notorio en este punto, es que los cadenamientos que limitan al tramo, no corresponden a los cadenamientos de las cabeceras de las estaciones; esto debido a que el límite entre los tramos y las estaciones está definido por las juntas constructivas que se dejan entre ambos, con la finalidad de absorber los posibles hundimientos diferenciales (figura 5.2). En los inicios del sistema, se había previsto dejar las juntas a cada 20 o 24 m., pero estudios posteriores revelaron que las estructuras subterráneas tenían la suficiente flexibilidad para absorber los hundimientos sin la necesidad de juntas constructivas, de ahí que actualmente las juntas se dejen solamente entre los tramos y estaciones, así como en los cambios de sección, (ref. 2).

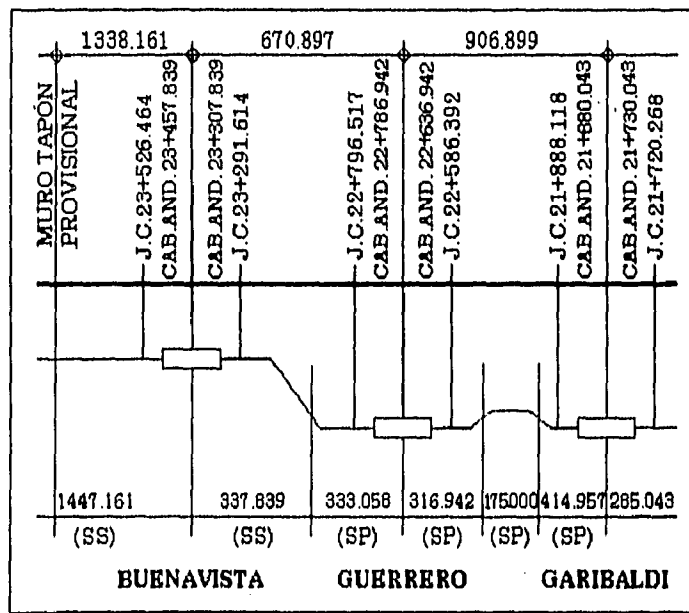


Figura 5.2.- Perfil esquemático: juntas constructivas y cabeceras de estaciones.

El gálibo se refiere en forma general a las dimensiones mínimas que en sección transversal debe tener el cajón para albergar los carros, el tipo de vía, etc., para cumplir con las especificaciones de trazo.

En las figuras 5.3 y 5.4, junto con las tablas 5.1 y 5.2 respectivamente, se muestran según los cadenamientos, las dimensiones del cajón y sus elementos correspondiente al tramo en cuestión, (ref. 5).

### 5.1.2.- Perfil.

La profundidad a la cual se encuentra el cajón es otro aspecto importante dentro de esta obra, ya que como se observa en el perfil esquemático de la figura 5.2 (y con más detalle en la tabla 1.6 del capítulo 1), aproximadamente un 27% del tramo subterráneo de línea B está construido con sección subterránea profunda, lo cual implica tener en las estaciones Guerrero, Garibaldi, así como en los tramos aledaños, profundidades de desplante en tablestacas cercanas a los 20 metros, y en losa inferior a los 15 metros medidos a partir del nivel de terreno natural.

En párrafos posteriores se hace referencia sobre las diferentes profundidades de excavación y de desplantes alcanzados.

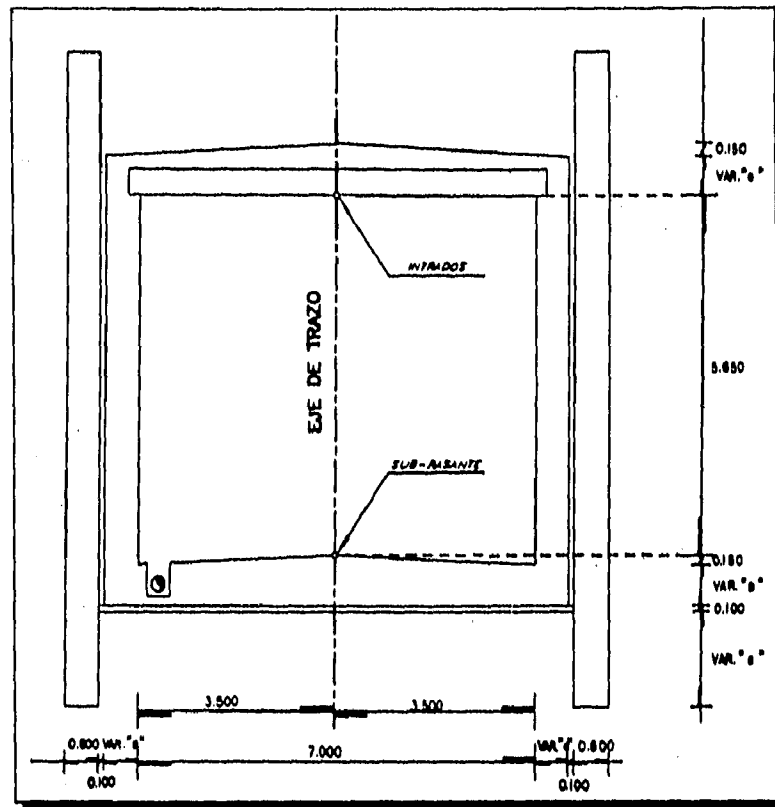


Figura 5.3.- Sección transversal del cajón.

CADENAMIENTOS.	a	b	c	d
22 + 796.517 - 22 + 892.000	0.75	0.75	5.00	0.60
22 + 892.000 - 22 + 946.000	0.75	0.75	4.00	0.60
22 + 990.000 - 23 + 025.000	0.40	0.55	3.00	0.55
23 + 025.000 - 23 + 110.000	0.40	0.55	2.50	0.55
23 + 165.000 - 23 + 291.614	0.40	0.55	2.50	0.55

a: espesor de losa superior (sin bombeo).  
 b: espesor de losa inferior (sin bombeo).  
 c: pata de la tablestaca (empotramiento).  
 d: espesor de muro estructural.

Tabla 5.1.- Elementos del cajón según cadenamientos.

5.2.- BROCALES.

Una vez localizado en el terreno el eje de trazo de la línea, se procede al inicio propiamente dicho de la construcción, iniciándose ésta con la construcción de los brocales. Los brocales se pueden definir como "...piezas en forma de ángulo recto que tienen la finalidad de retener los rellenos sueltos superficiales y de servir de guía a las herramientas de excavación, utilizadas en la construcción de las zanjas que alojarán a los muros". (ref. 4). Los brocales pueden ser metálicos, de concreto precolado o de concreto colados en el lugar, siendo esta última opción la utilizada en la línea B. El proceso a seguir para su construcción se enlista a continuación, (refs. 4 y 5):

- 1) La construcción del brocal se inicia definiendo el trazo y posición de las zanjas con marcas en el terreno, dejando un espacio libre entre brocales de 65 cm. ya que se emplean muros de 60 cm. de espesor. En la figura 5.5 se muestran dos secciones de brocal, con sus dimensiones.

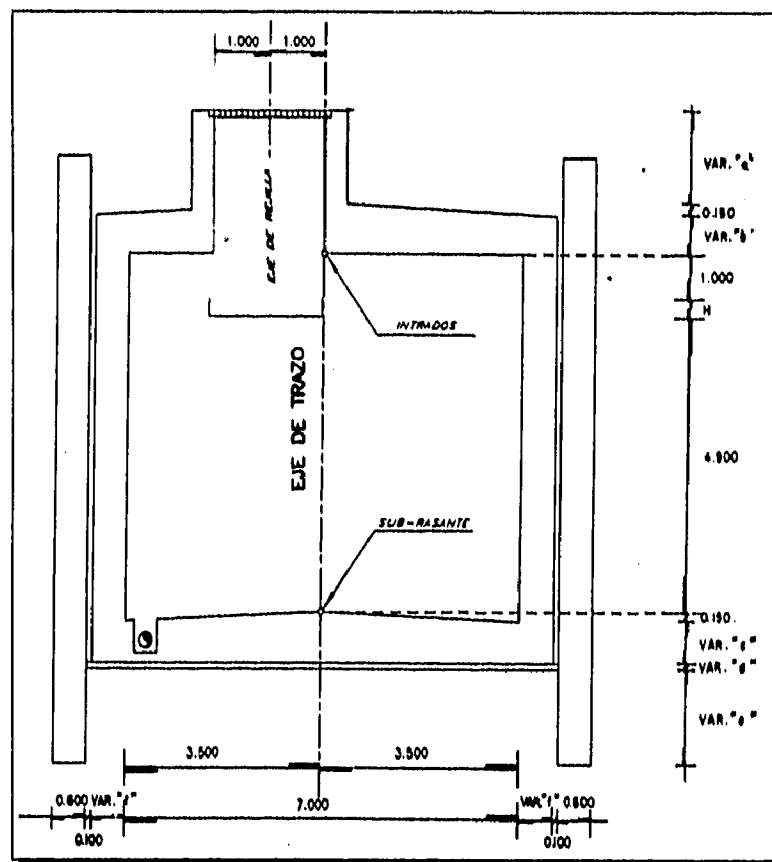


Figura 5.4.- Sección transversal del cajón.

TABLA DE VARIABLES						
CADENAMIENTOS.	a	b	c	d	e	f
22 + 946.000 - 22 + 990.000	1.18 - 2.02	0.55	0.70	0.10	4.00	0.60
23 + 110.000 - 23 + 165.000	0.51 - 0.55	0.40	0.55	0.60	2.50	0.55

- a: muro de la rejilla de ventilación.
- b: espesor de losa superior (sin bombeo).
- c: espesor de losa inferior (sin bombeo).
- d: espesor de plantilla.
- e: pata de la tablestaca (empotramiento).
- f: espesor de muro estructural.

Tabla 5.2.- Elementos del cajón según cadenamientos.

- 2) La excavación para la construcción del brocal se efectúa a cielo abierto, hasta alcanzar la profundidad de proyecto especificada (figura 5.5), misma que depende del espesor de los rellenos. Esta excavación se efectúa a mano o con maquinaria del tipo retroexcavadora, realizándola con ciertas precauciones, debido a que dentro de los dos primeros metros bajo el terreno, se encuentran la mayoría de las instalaciones (tuberías, ductos, etc.).
- 3) Para el caso en que se presentan filtraciones durante el proceso de excavación de la zanja, la especificación recomienda controlarlas mediante la instalación a lo largo del eje longitudinal de la excavación de pequeños cárcamos de bombeo (rellenos con grava para evitar con esto el arrastre de finos), para extraer el agua mediante un bombeo de achique; la dimensión de los cárcamos es de 0.30 x 0.30 x 0.30 m. construidos a cada 10 m., con un número suficiente de bombas para mantener estanco el fondo de la excavación.

- 4) Una vez terminada la excavación, se coloca el armado y la cimbra para colar las ramas verticales o faldones del brocal. La cimbra de un brocal se apoya contra la del otro brocal por medio de puntales de madera con sección de 10 x 10 cm., colocando 2 o 3 niveles de puntales según la altura, la colocación en el sentido horizontal es a cada 2.0 m. Las características más importantes del concreto empleado en los brocales se muestran en la tabla 5.3.

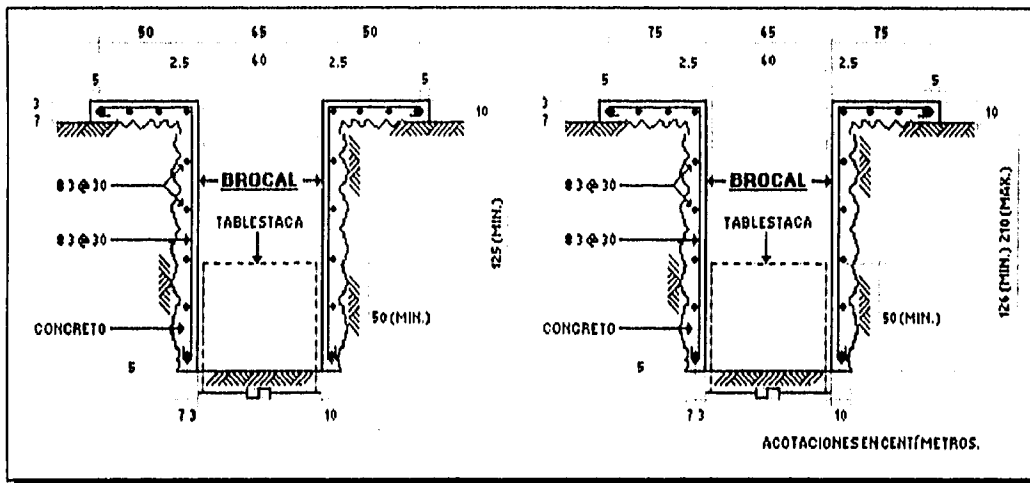


Figura 5.5.- Brocal para guía de máquina excavadora.

Para no afectar el flujo vehicular en el cruce del eje 1 poniente Guerrero, por la construcción de brocales, se tomaron las siguientes medidas:

- La construcción se realizó durante las noches cerrando parcialmente la vialidad, restaurando el flujo vehicular por las mañanas, mediante la colocación de placas metálicas sobre las trincheras; siendo estas últimas sustituidas (una vez colado el brocal) por material de relleno tipo "tepetate".
- Las ramas horizontales de los brocales no se colaron sobre la carpeta, si no al ras de la misma.

PROPIEDADES DEL CONCRETO EN BROCALES	
CARACTERÍSTICAS.	VALORES
Revenimiento.	16 cm.
Tolerancia.	± 2 cm.
Resistencia a la compresión (28 días).	150 kg/cm <sup>2</sup> .
Tipo de cemento.	Portland II.
T.M.A.	3/4 "
Clase de concreto.	2.

Tabla 5.3.- Propiedades del concreto empleado en brocales.

### 5.3.- MUROS TABLESTACA.

#### 5.3.1.- Excavación, estabilización y limpieza de la excavación.

Una vez que se ha retirado la cimbra de los brocales y éstos han alcanzado su resistencia, se procede a la excavación de las zanjas para la construcción de los muros tablestaca, empleando el equipo guiado, (del cual se habla en posteriores párrafos).

Los trabajos comienzan con la colocación de compuertas que pueden ser de madera o de acero entre los brocales, con el fin de aislar tramos de zanja de longitud igual a la del tablero (muro tablestaca) por construir. La longitud de los tableros empleados en el tramo es variable, empleándose tableros de 7.20 m. en gran parte del tramo, con excepción de los tableros construidos para los nichos de aparato, los de I.A.T. (instalaciones de alta tensión) y de S.R. (subestaciones de rectificación), los cuales presentan

longitudes de 6.60 y 6.50 m. para los nichos de aparato y de 7.95 m. para los de I.A.T. y S.R. En la zona de tuneleo se tienen tableros de 7.20, 5.05 m. y un tablero correspondiente a un nicho de aparato.

Una vez que se encuentra aislada la zanja, se procede a llenarla con lodo estabilizador (del cual se habla en posteriores párrafos), hasta quedar un metro por debajo del nivel del terreno, manteniéndose este nivel durante el proceso de excavación y colado, ya que de verificarse un abatimiento en el nivel del lodo, se podrían originar succiones y gradientes en el manto freático, mismos que favorecerían la desintegración y el derrumbe en las paredes de la excavación.

El proceso a seguir para la excavación de los muros se describe a continuación, (refs. 4 y 5):

- Las excavaciones de las zanjas se efectúan en forma alternada, evitándose la excavación de tableros contiguos en forma simultánea; de la misma forma, queda restringida la excavación de tableros cuando el concreto de los muros contiguos no haya alcanzado el fraguado inicial.
- La secuencia para excavar el material se realiza en un número impar de franjas, es decir, se comienza la excavación en un extremo del muro y una vez terminada, se mueve el equipo al otro extremo, concluyendo la excavación del muro cortando el prisma central; debiéndose nivelar y alinear el equipo al trasladarse de un lado a otro.
- Para poder iniciar el proceso de excavación, es necesario que la maquinaria sea colocada en posición fija y con la correcta alineación, sin moverse de esta posición hasta haber terminado la excavación de la franja.
- La excavación en cada franja se realiza deslizando lentamente la almeja, tanto al entrar como al salir de la zanja, para evitar el choque o caída libre de la almeja contra el lodo o las paredes de la zanja, así como efectos de émbolo en el lodo, previniendo además posibles caídos o desprendimientos del material dentro de la zanja.
- El corte del material debe hacerse firmemente, sin dejar caer la almeja, hincándola a presión con las mandíbulas o valvas totalmente abiertas, para después proceder a cerrarlas en un solo movimiento.
- Al momento de salir la almeja con el material de excavación, se suspende un momento sobre la zanja con las valvas ligeramente abiertas, para permitir que escurra libremente el lodo y se reintegre a la zanja; descargando finalmente el material en los camiones.
- Cualquier movimiento brusco de la almeja como chicoteos, caídas repentinas, movimientos de arrastre, sacudidas, etc. quedan prohibidos.

El cumplimiento de los puntos anteriores, aunado a una buena calidad en los lodos empleados, permite obtener buenos resultados en los trabajos, al evitarse caídos y deslaves en la zanja, así como posibles movimientos en las paredes y fondo de la misma que ocasionarían desplazamientos en las zonas aledañas a la zanja.

Por otra parte, la profundidad de excavación de los muros es variable a lo largo del tramo, presentándose profundidades que van de aproximadamente 10.5 m. en el cadenamiento 23 + 280.000 (10 m. antes de llegar a la cabecera de la estación Buenavista), hasta los 20.5 m. en el cadenamiento 22 + 800.000 (14 m. antes de llegar a la cabecera de la estación Guerrero); medidas estas profundidades a partir del nivel de terreno natural. Para la zona de tuneleo, las profundidades estuvieron comprendidas entre los 19.50 y 20.00 m.

Debido a que la herramienta empleada en la excavación realiza un corte curvo en el terreno al cerrar sus valvas, la especificación indica que la profundidad de excavación debe ser efectuada conforme

a proyecto más 20 cm.

Cuando la excavación es concluida, se procede a verificar la profundidad de la misma, para después realizar la limpieza del fondo de dicha excavación, así como la verificación de las propiedades del lodo para su posterior reutilización.

La secuencia para la limpieza del fondo se enlista a continuación, (refs. 4 y 5):

- Primeramente, el fondo de la excavación es repasado con la herramienta de corte, con el fin de levantar la mayor cantidad de azolve grueso que se encuentra depositado, aprovechando esta maniobra para nivelar el fondo de tal forma que se obtenga un plano horizontal.
- El siguiente paso consiste en recolectar el azolve, mediante el empleo de tubos eyectores o con el mismo equipo empleado en la excavación.
- El material extraído (básicamente lodo), debe ser repuesto mediante la adición de lodo nuevo, para mantener el nivel del mismo en la zanja.
- Terminado lo anterior se verifica que el fondo de la zanja tienda hacia un plano horizontal y libre de azolves; auxiliándose para ello de una sonda.
- Al finalizar la limpieza, se verifican las propiedades del lodo estabilizador, ya que si dichas propiedades no se encuentran dentro de tolerancia, la siguiente fase que corresponde al colado se suspenderá, hasta que el lodo sea reemplazado por uno nuevo, realizándose dicho cambio sin alterar el nivel especificado del lodo en la zanja.
- Se efectúan dos pruebas por tablero para confirmar que las propiedades de los lodos se encuentran dentro de los límites establecidos; la primera se realiza al vaciar el lodo en la zanja y la segunda antes de introducir la parrilla de refuerzo.

Por último, es necesario resaltar que el tiempo desde que se inicia la excavación, hasta el inicio del colado, no debe de superar las 24 horas, además de que no deben de transcurrir más de 6 horas entre el momento en que se alcanza la máxima profundidad de excavación y el inicio del colado, (ref. 5).

Para la zona de tuneleo, la construcción de tablestacas (desde la excavación hasta el colado), se efectuó durante la noche para no alterar el flujo vehicular en las horas de mayor afluencia sobre el eje 1 poniente Guerrero, cubriendo las zanjas como en el caso de los brocales visto anteriormente.

#### **5.3.1.1.- Equipo guiado de excavación, (ref. 9).**

Para realizar la excavación de las zanjas, las especificaciones indican que el equipo o maquinaria a emplear, debe tener una herramienta de corte guiada, para así poder garantizar la verticalidad, alineamiento e integridad de las paredes de la zanja, además del alcance (profundidad de excavación) requerido. Las características detalladas del equipo, funcionamiento y mantenimiento quedan fuera de los alcances del presente trabajo.

Lo anterior se consigue con el empleo de dragas montadas sobre orugas las cuales se equipan con una barra de guiado bastante larga denominada "Kelly", misma a la que se fija rigidamente en su extremo el cucharón de almeja del tipo "Benoto", "Gallia", "Keller" u algún otro, figura 5.6.

La barra Kelly empleada es un equipo telescópico, lo cual le permite profundizar el cucharón hasta el nivel requerido para excavar la zanja. El guiado que proporciona es bastante bueno, más sin embargo la flexibilidad de la barra y de la misma superestructura portante no evitan en su totalidad pequeñas desviaciones que pueden ser corregidas por el operador; otra ventaja de la barra guiada es la au-

sencia de oscilaciones cuando sale de la zanja para descargar el material ahorrando cierto tiempo en cada ciclo, además de que el peso propio de la barra y el cucharón aumentan la capacidad de ataque sobre el terreno.

Los cucharones de almeja empleados tienen por lo general sus bordes de ataque rectangulares, aunque en ciertos casos se emplean con los bordes de ataque semicirculares. Las almejas son equipadas con dientes lo que facilita el corte y penetración en el material excavado, y en otros casos los bordes de las valvas son dentados, acoplándose cuando se cierra la almeja. A menudo los cucharones cuentan con perforaciones o agujeros que permiten la salida del lodo de perforación parcialmente; sin llegar a tener pérdidas apreciables en el material excavado a consecuencia de dichas perforaciones.

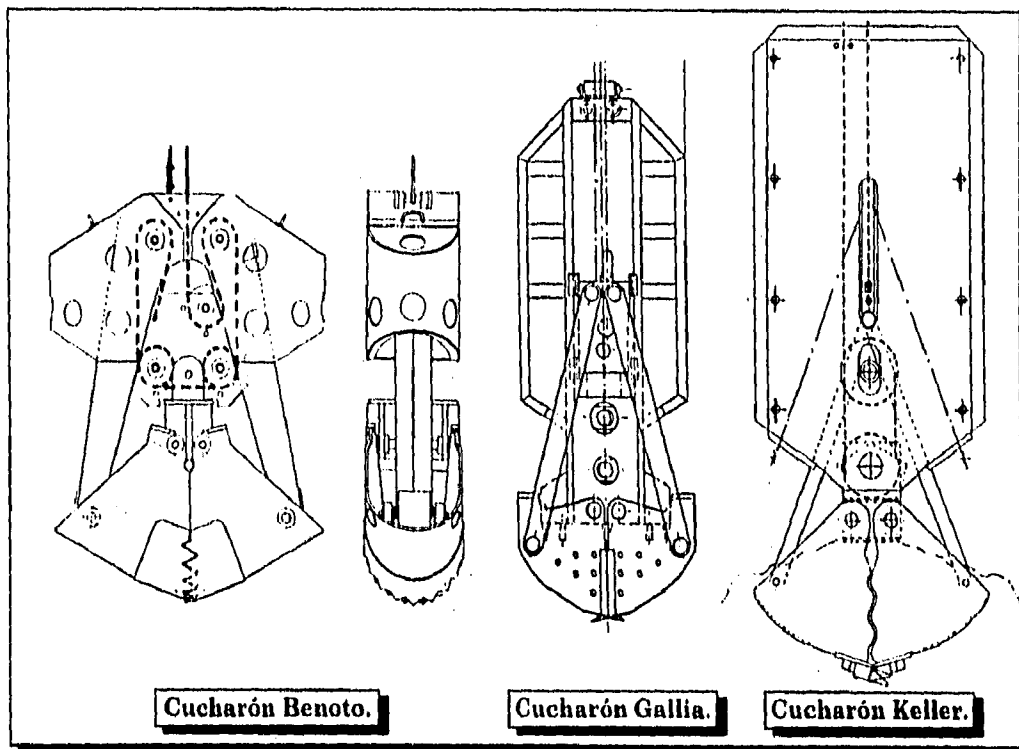


Figura 5.6.- Ejemplos de cucharones de almeja para excavaciones en zanja.

#### 5.3.1.2.- Lodo estabilizador.

Debido a que las paredes de los tableros excavados para construir los muros tablestaca no son autoestables, aún manteniendo un tirante de agua igual o mayor al del nivel freático en la zona; se requiere la incorporación de un lodo estabilizador en las zanjas excavadas, para mantener estables las paredes y evitar derrumbes durante el proceso, (ref. 5).

Para tal efecto, son empleados lodos bentoníticos, los cuales podemos definir como suspensiones acuosas estables de una arcilla montmorillonítica (llamada bentonita) en agua. La bentonita en sí, es un mineral arcilloso con partículas de tamaño coloidal (menores a 0.2 micras), descubierto por primera vez en 1888 en un lugar llamado Fort Benton en el estado norteamericano de Wyoming, (refs. 1 y 3). Dentro de las bentonitas se distinguen dos tipos, (ref. 1):

- 1) Las sódicas, que presentan la propiedad de expansión en presencia de agua, y
- 2) Las cálcicas, carentes de dicha propiedad.

La cantidad de bentonita sódica empleada está en función del diseño del lodo, tal que permita mantener los valores de las propiedades en los rangos especificados. Por lo general la proporción agua-bentonita varía entre 12:1 y 15:1, (ref. 5).

5.3.2.- Cimbrado, armado y colado de tablestacas.

El siguiente paso dentro de la construcción de los muros tablestaca, es el cimbrado de los mismos mediante la introducción de un par de tubos metálicos huecos denominados tubos - junta o guías metálicas de tablestacas.

En la figura 5.7a. se muestra un detalle en planta del cimbrado, en el cual se puede apreciar la forma macho y hembra de los tubos - junta, misma que permite un cierto "ensamblaje" de los muros construidos. Las figuras 5.7 b y c. muestran las características geométricas de ambos tubos, los cuales se encuentran huecos y cerrados en sus extremos, contando con una caja metálica en su extremo inferior en forma de cuña, la cual es hincada y asentada firmemente en el fondo de la zanja con el fin de evitar movimientos o deformaciones durante el colado.

Antes de ser introducidos en el lodo, los tubos son lastrados y preparados con una película de grasa, en la cara del tubo que queda en contacto con el concreto, facilitando después su extracción mediante una grúa, 2 o 4 horas después de realizado el colado, (refs. 4 y 5).

Concluido el cimbrado, se procede a la introducción dentro de la zanja con lodo, de la parrilla de armado. En la parrilla es colocada, una banda de poliestireno como se muestra en la figura 5.7a, la cual tiene como finalidad la eliminación de filtraciones como se menciona en el inciso 5.5.2.1 correspondiente a las filtraciones en muros tablestaca.

Para asegurar el recubrimiento de los muros, son colocados "roles" de concreto (que semejan cilindros con sección de corona circular) de 5" de diámetro, fijados a la parrilla a manera de "ruedas". Se distribuyen por ambas caras de la parrilla, en tres niveles equidistantes en el sentido vertical, con cuatro roles por cada nivel, también equidistantes, (ref. 4).

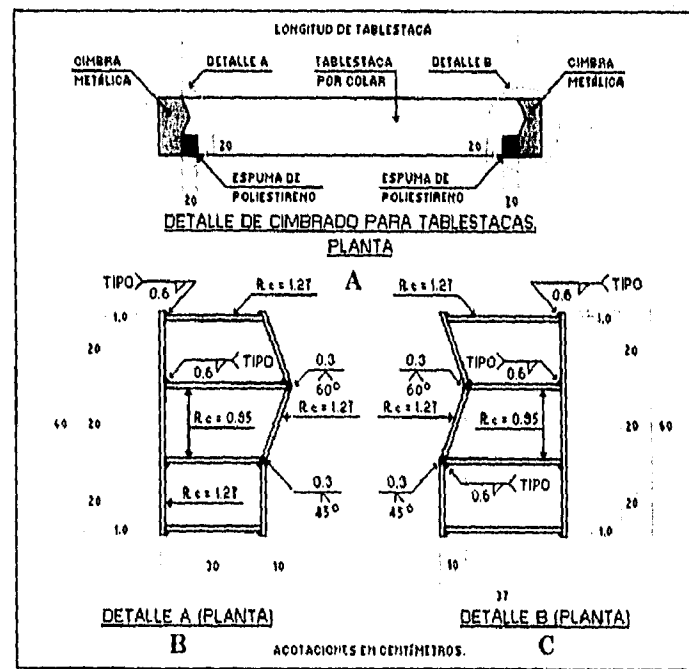


Figura 5.7.- Guía metálica de tablestacas.

Las parrillas son armadas en obra, empleando varillas con diámetros de 1/2" (#4), 3/4" (#6) y de 1" (#8), uniéndolas mediante amarres. A las parrillas se les colocan "izadores" para que las grúas puedan manejarlas e introducir las en las zanjas; estos izadores son varillas del # 5, mismas que van soldadas, (ref. 5).



Debido a que las parrillas presentan longitudes entre los 12 y 18 m. aproximadamente, dentro de los cadenamientos 22 + 937.000 y 22 + 796.517, mismos que comprenden la zona de tuneleo; la introducción de las parrillas se realiza en tres etapas, según se explica a continuación, (ref. 5):

- 1) En la primera etapa se introduce la parte inferior de la parrilla, hasta que los izadores quedan al nivel del brocal, para sujetarla por medio de apoyos transversales colocados sobre los brocales. Los apoyos transversales están formados por 4 varillas del # 12 por cada izador.
- 2) Durante la segunda etapa se coloca la parte superior de la parrilla, traslapando las varillas 110 cm. si son del # 6 y 195 cm. para las del # 8, efectuándose los amarres y soldaduras necesarias.
- 3) Por último, la parrilla se hace descender, fijándola contra el brocal para impedir movimientos; respetando la profundidad, alineamiento y verticalidad de la misma en la zanja.

Para evitar que la adherencia del concreto con el acero se vea disminuida, el tiempo máximo considerado entre la introducción de la parrilla y el inicio del colado es de cuatro horas.

Terminada la introducción de la parrilla, se comienza con la última etapa en la construcción del muro; el colado del concreto. Para poder colar en el lodo, se requiere introducir dentro del mismo un equipo de colado denominado tubo embudo, trompa de colado o tubo tremie. El equipo tremie consta de una serie de tubos de acero, un embudo y un tapón. Los tubos tienen diámetros no mayores de 30 cm. con tramos de 2 m. de longitud como máximo, que se van acoplando herméticamente (hasta alcanzar el fondo de la zanja), para evitar succiones del lodo o aire cuando el concreto es introducido a través del tubo. Este largo tubo es conectado en su parte superior a un embudo o tolva para recibir el concreto de los camiones revolvedora ("ollas"), siendo suspendido con la ayuda de una grúa o draga. El tapón constituido de látex y con forma esférica, se introduce entre la tolva y el tubo cuando estos se encuentran en su posición, dentro de la zanja; su función es la de evitar la contaminación y segregación del concreto por contacto directo de éste con el lodo, cuando el concreto es descargado en la tolva, (refs. 4 y 6).

Este equipo permite que el concreto sea depositado directamente en el fondo de la zanja (evitando la mezcla del lodo con el concreto) y por diferencia de densidades, el concreto desciende al fondo y empuja el lodo hacia arriba.

El proceso para efectuar el colado se describe a continuación, (ref. 4):

- La tubería es introducida dentro del lodo, hasta que el extremo inferior de la misma queda apoyada en el fondo de la zanja. La especificación señala el empleo de dos tubos para tableros mayores de 3.5 m. de longitud, así como el de evitar movimientos laterales del tubo dentro del tablero.
- En seguida, se vierte el concreto en la tolva levantando el tubo 30 cm. para iniciar el flujo del concreto, el cual es vaciado de tal forma que se alcanza un flujo suave y continuo, evitando recesos mayores de 15 minutos.
- A medida que el nivel del concreto en la zanja asciende, se dificulta su colocación; para tal efecto, el tubo es desplazado con movimientos ascendentes y descendentes, para ayudar a fluir al concreto, además de que se hace necesaria la extracción y desacoplamiento de los tramos del tubo, debiendo permanecer dicho tubo ahogado en el concreto no menos de 1.5 m.
- Durante el periodo que dura el colado, se efectúa un control riguroso de los volúmenes de concreto que entran y de lodo que salen para evitar fugas o contaminaciones en el concreto.

Para lograr lo anterior, el concreto debe poseer ciertas características siendo la más importante su alta plasticidad, para obtener una colocación adecuada, sin efectuar vibrado, ya que este mezclaría el concreto con el lodo; esto se logra diseñando mezclas apropiadas y mediante el empleo de aditivos fluidificantes. Otra característica es el tiempo de fraguado, el cual debe de ser "lento" para mantener manejable al concreto durante el colado, lográndolo mediante el empleo de un aditivo retardante; la impermeabilidad y cierta resistencia moderada a los sulfatos es también importante, para lo cual se emplea cemento del tipo II.

Un resumen de las características del concreto para muros tablestaca se muestra en la tabla 5.4.

<b>PROPIEDADES DEL CONCRETO EN TABLESTACAS</b>	
<b>CARACTERÍSTICAS.</b>	<b>VALORES</b>
Revenimiento.	16 cm.
Tolerancia.	± 2 cm.
Resistencia a la compresión (28 días).	150 kg/cm <sup>2</sup> .
Tipo de cemento.	Portland II.
T.M.A.	3/4 "
Clase de concreto.	2.

Tabla 5.4.- Propiedades del concreto empleado en tablestacas.

**5.4.- PRIMERA FASE DEL TUNELEO.**

La primera fase del tuneleo consiste en la realización de la excavación a cielo abierto en dos etapas como se observa en la figura 5.8, entre los cadenamientos 22+834.582 y 22+868.582, para construir la losa de cubierta, rellenar y restaurar la superficie del pavimento, correspondiente a la avenida Guerrero, teniendo en cuenta que los desvíos de instalaciones (capítulo 4) fueron efectuados previamente como en el caso de la tubería de agua potable, mientras que las atarjeas fueron reinstaladas durante la etapa de rellenos.

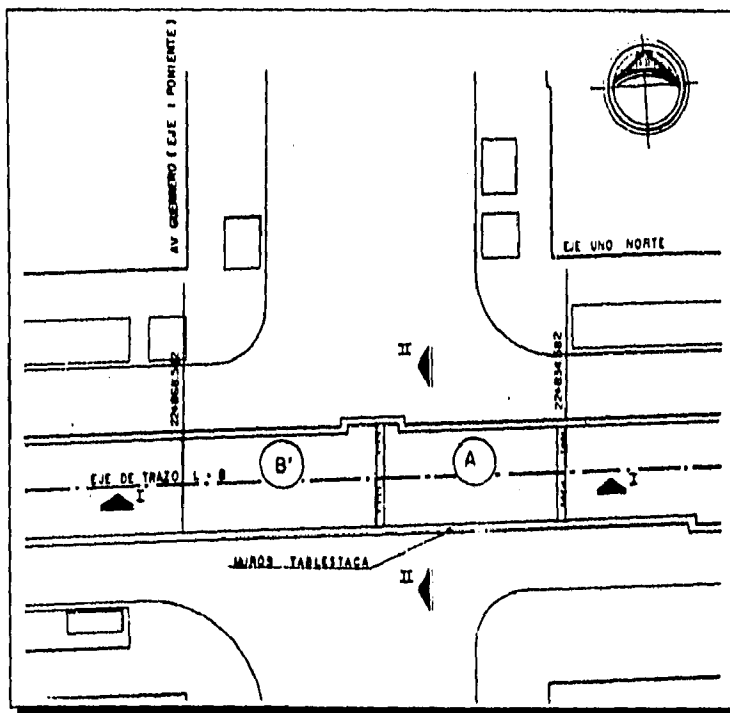


Figura 5.8.- Planta de etapas de excavación, correspondiente a la 1ª fase del tuneleo.

**5.4.1.- Excavación y colado de la losa de cubierta.**

Para poder efectuar la excavación (una vez terminados los muros tablestaca correspondientes), fue necesario realizar el "bando" del tránsito, en principio, por la zona "A" de la figura 5.8, disminuyendo el arroyo vial a sólo tres carriles.

La excavación a cielo abierto se inició a partir del nivel de terreno natural y dejando taludes con inclinación 0.5:1, para lo cual se empleó una retroexcavadora Caterpillar 235B; suspendiéndose la excavación al alcanzarse 10 cm. por abajo del nivel inferior de la losa de cubierta y eliminando los encharcamientos mediante el empleo de una bomba sumergible.

Al concluirse la excavación, se procedió a colocar una plantilla de grava de aproximadamente 10 cm. de espesor y se inició con la demolición de la parte superior de las tablestacas, con el fin de descubrir el armado de la misma y hacer la liga estructural con la losa de cubierta. En forma simultánea a la colocación del armado, se colocaron los siguientes dispositivos (por cada etapa):

- Dos tubos circulares de acero de 12" de diámetro (32.4 cm.), apoyados sobre la plantilla y de altura cercana a los 2.0 m., localizados a una distancia aproximada de 1.0 m. (hacia el sur) con respecto al eje de trazo, para servir como guías durante la posterior instalación del sistema de abatimiento del nivel freático.
- Una fila de placas de acero de 30×20×¼" las cuales quedaron estructuralmente unidas al concreto como se observa en la figura 5.13; las placas se colocaron sobre la plantilla de grava y al centro de la losa "siguiendo" el eje de trazo; con la finalidad de soldar posteriormente la trabe carril a éstas placas y colocar el polipasto en dicha trabe.

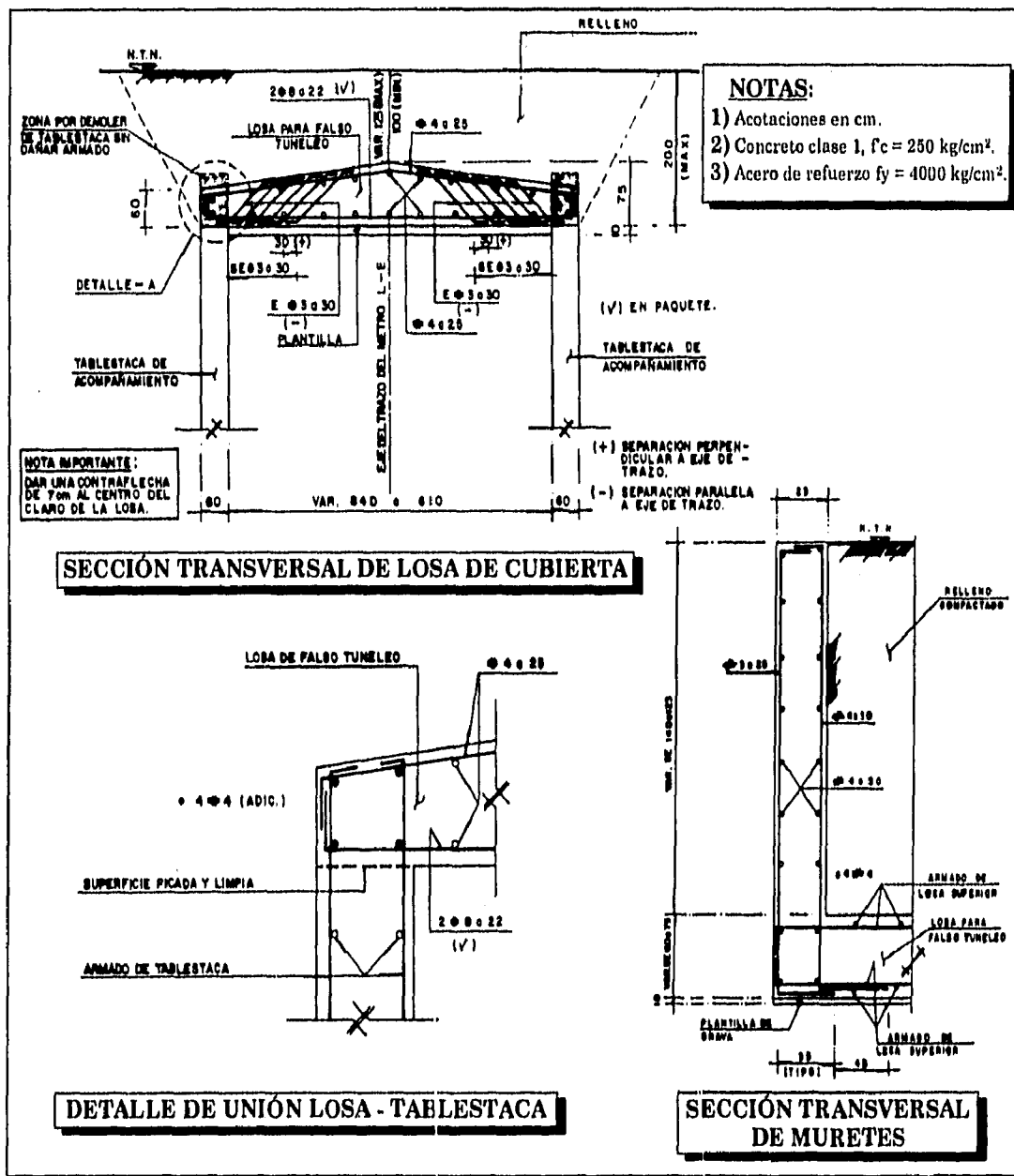


Figura 5.9.- Losa de cubierta y muretes para tuneleo falso.



Etapa "B". (poniente)



Etapa "A". (ociente)

Figura 5.10. Colado de losa de cubierta, etapas "B" y "A".

- Cinco tubos de PVC de 4" de diámetro para facilitar los procesos de inyección bajo la losa en cuestión, una vez finalizados los rellenos.

Terminada la colocación del armado y los diferentes dispositivos, se procedió al colado de la losa, mediante el empleo de una banda transportadora portátil durante la etapa "B" (figura 5.8), y con canaletas durante la etapa "A". Una vez terminado el colado y fraguado el concreto de la losa, se armaron, cimbraron y colaron los muretes perpendiculares al eje de trazo (2 durante la etapa "B" y uno en la etapa "A"), para el confinamiento de los rellenos durante los trabajos de excavación del núcleo correspondientes a la 2ª fase del tuelleo. En las figs. 5.9 y 5.10 se muestran detalles de la losa y muretes, así como del colado de la losa en sus dos etapas y en la tabla 5.5 se resumen las propiedades del concreto empleado.

<b>PROPIEDADES DEL CONCRETO EN LOSA DE CUBIERTA Y MURETES</b>	
<b>CARACTERÍSTICAS.</b>	<b>VALORES</b>
Revenimiento.	7.5 cm.
Tolerancia.	± 2.5 cm.
Resistencia a la compresión (28 días).	250 kg/cm <sup>2</sup> .
Tipo de cemento.	Portland II.
T.M.A.	1½"
Clase de concreto.	1.

Tabla 5.5.- Propiedades del concreto empleado en losa de cubierta y muretes.

**5.4.2.- Restauración del pavimento, (ref. 5).**

Una vez que la losa de cubierta alcanzó el 70% de su resistencia especificada en proyecto, misma que se alcanzó cinco días después de iniciado el colado, se procedió a la colocación del material de relleno cuyas principales características se mencionan a continuación:

- Tipo areno-limoso conocido como "tepetate", libre de toda materia orgánica en cantidades visibles, cascajo, materiales extraños y piedras mayores de 7.5 cm. de diámetro.
- Contracción lineal máxima admisible de 3.0% y límite líquido máximo del material del 60%.
- V.R.S. mínimo de 15%.
- Porcentaje máximo de partículas que pasen la malla No. 200, menor al 30%.

El espesor del relleno fue de 60 cm. colocado en dos capas de 30 cm., hasta alcanzarse el 90% de su P.V.S.M., obtenido mediante la norma AASHTO T99-74 (American Association of State Highway and Transportation Officials) para después recibir la estructura del pavimento.

Para efectuar la compactación tanto del relleno como de la estructura del pavimento (en la etapa "B"), se empleó un rodillo liso vibratorio Dynapac CA25 de 10 toneladas de peso, mismo que por sus dimensiones (5.38 × 2.50 m.) resultó poco efectivo para un área pequeña; razón por la cual, se cambió durante la etapa "A" a un rodillo liso vibratorio en tándem Ingersoll Rand DD-65 de 6 toneladas y con mayor maniobrabilidad en áreas pequeñas por sus dimensiones (4.0 × 1.5 m.).

Finalizada la compactación de los rellenos, se comenzó con la construcción de la estructura del pavimento, el cual quedó constituido por una capa de sub-rasante, una de sub-base y una de base como se describe a continuación.

a) Capa de sub-rasante.

La capa de sub-rasante se colocó en dos capas de 15 cm. para totalizar un espesor de 30 cm., alcanzándose el 95% de su P.V.S.M. obtenido mediante la norma AASHTO T99-74; empleando material areno-limoso tipo "tepetate", con las siguientes características:

- Expansión máxima, 3.0%.

- Límite líquido máximo del material, 50%.
- Límite plástico máximo del material, 25%.
- Porcentaje máximo de partículas que pasen la malla No. 200, menor al 35%.
- Tamaño máximo de partículas, 7.6 cm. (3").
- V.R.S. mínimo, 15%.

b) *Capa de sub-base.*

Sobre la capa de sub-rasante, se colocó la sub-base en una sola capa de 15 cm. de espesor, compactándola hasta el 95% de su P.V.S.M. obtenido mediante la norma AASHTO T 180-74, variante "D"; quedando la curva granulométrica del material, comprendida entre el límite inferior de la zona 1 y el límite superior de la zona 3, de la curva mostrada en la figura 5.11.

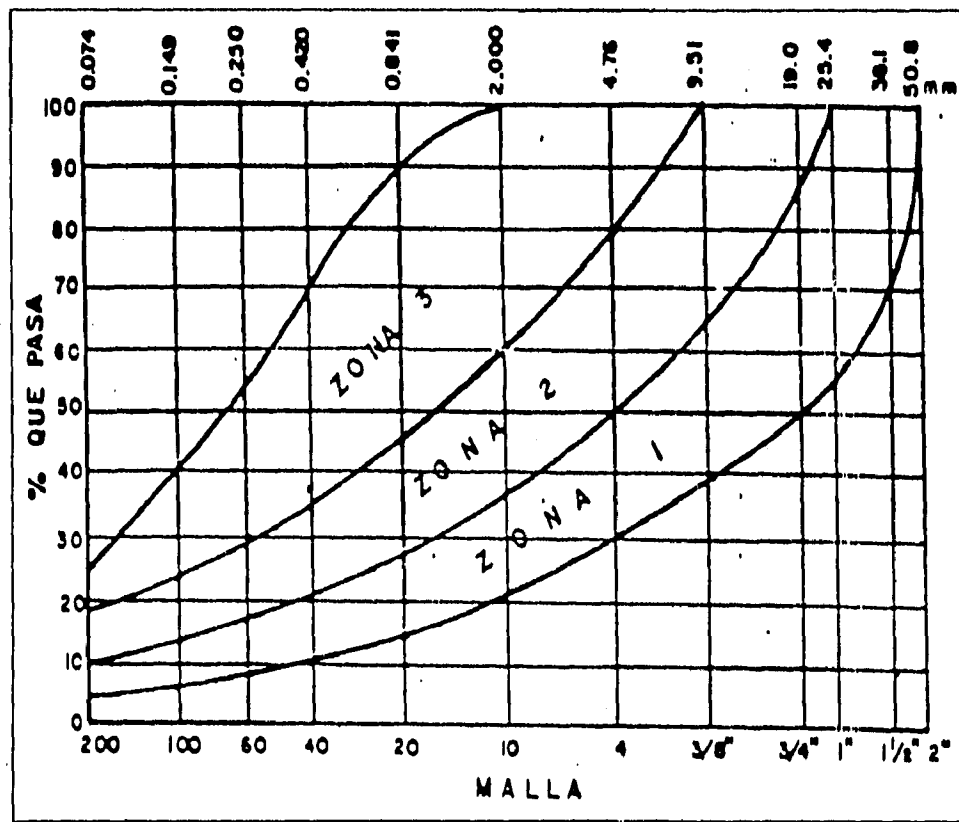


Figura 5.11.- Gráfica de composición granulométrica de materiales para sub-bases y bases.

Las principales características del material se resumen a continuación:

- Contracción lineal máxima, 6%.
- Equivalente de arena mínimo, 30%.
- Límite líquido máximo del material, 30%.
- Porcentaje máximo de partículas que pasan la malla No. 200, menor al 25%, y la relación entre el porcentaje que pasa la malla No. 200 y el porcentaje de material que pasa la malla No. 40, menor de sesenta y cinco centésimos (0.65).
- V.R.S. mínimo, 80%.
- Valor cementante mínimo, 3.5 kg/cm<sup>2</sup>.

c) Capa de base.

Sobre la capa de sub-base, se colocó la base en una sola capa de 15 cm. de espesor, compactándola hasta el 100% de su P.V.S.M. obtenido mediante la norma AASHTO T 180-74; quedando la curva granulométrica del material, comprendida entre el límite inferior de la zona 1 y el límite superior de la zona 2, de la curva mostrada en la figura 5.11.

Las principales características del material se resumen a continuación:

- Equivalente de arena mínimo, 40%.
- Límite líquido máximo del material, 25%.
- Porcentaje máximo de partículas que pasan la malla No. 200, menor al 15%, y la relación entre el porcentaje que pasa la malla No. 200 y el porcentaje de material que pasa la malla No. 40, menor de sesenta y cinco centésimos (0.65).
- Tamaño máximo de partículas, 50.8 mm. (2").
- V.R.S. mínimo, 100%.
- Valor cementante mínimo, 3.5 kg/cm<sup>2</sup>.

La tolerancia de niveles tanto para la base como para la sub-base se manejó de  $\pm 1.0$  cm.

d) Riego y carpeta asfáltica.

Sobre la base hidráulica, se efectuó un riego de liga a base de un asfalto rebajado de fraguado rápido (FR-3), a razón de 1.5 a 1.8 lt/m<sup>2</sup> seguido inmediatamente por la colocación del concreto asfáltico elaborado a base de cemento asfáltico del No. 6 y material pétreo triturado con tamaño máximo de 25.4 mm. (1"), compactado al 95% de su peso volumétrico, determinado mediante la prueba Marshall en especímenes compactados a 75 golpes por cara, y tendido a una temperatura de 110°C. Inmediatamente después del tendido se efectuó la compactación con los rodillos antes mencionados, obteniéndose un espesor de carpeta de 7.5 cm., y una vez que la temperatura de la carpeta descendió hasta alcanzar la del ambiente, se efectuó el riego de sello con cemento Portland tipo I a razón de 0.75 kg/m<sup>2</sup> y en seco, tallándose enérgicamente mediante cepillos para obtener una mejor penetración en la carpeta y adicionando finalmente agua a razón de 1 a 1.5 lt/m<sup>2</sup>. Después de 24 horas, la zona "B" fue reabierto a la circulación, para bandear el tránsito por la zona "A" y repetir el proceso de excavación, colado de la losa de cubierta y murete, así como el de restauración del pavimento, ahora en la zona "B", para finalmente restablecer la vialidad del eje 1 poniente Guerrero, y continuar con la 2ª fase del tuneleo bajo la vialidad.

**5.5.- SEGUNDA FASE DEL TUNELEO.**

La segunda fase del tuneleo comprende: el abatimiento del nivel freático por gravedad empleando bombas eyectoras, en el prisma formado por los muros tablestaca; la instalación en el lecho inferior de la losa de cubierta de la trabe carril y el polipasto, para efectuar las labores de excavación del núcleo así como el troquelamiento (progresivo y regresivo) bajo la protección de la estructura formada por los muros tablestaca y la citada losa; el tratamiento de filtraciones en los muros tablestaca, así como la estructuración del cajón subterráneo profundo; la colocación de rellenos aligerados entre el lecho superior (nivel extrados) de la losa de techo y el lecho inferior (nivel intrados) de la losa de cubierta, y finalmente, la colocación de la carpeta asfáltica definitiva en las zonas alledañas al cruce de las avenidas Guerrero y Mosqueta (eje 1 poniente y 1 norte respectivamente).

**5.5.1.- Abatimiento del N.A.F. por gravedad empleando bombas eyectoras.**

Los objetivos que se persiguen con la instalación de un sistema para el abatimiento del nivel freático por gravedad empleando bombas eyectoras, durante la etapa de excavación del núcleo, son:

- Evitar la falla del fondo de la excavación por efecto de la subpresión.

- Mantener las expansiones del fondo de la excavación, dentro de los límites tolerables durante la construcción.
- Controlar las fuerzas de filtración.
- Mantener la estabilidad de los taludes.
- Controlar el agua libre para facilitar los trabajos de extracción del material.
- Incrementar en cierta forma, la resistencia del suelo al disminuir el contenido de agua, realizando la excavación "en seco", para la construcción adecuada del cajón, (refs. 5 y 10).

Los pozos perforados en la vialidad se efectuaron durante la noche, teniendo a los tubos de 12" de diámetro (colocados en la primera etapa) como guías para la perforación, misma que se efectuó con broca de aletas y agua a presión, los detalles de los pozos se muestran en la figura 5.12.

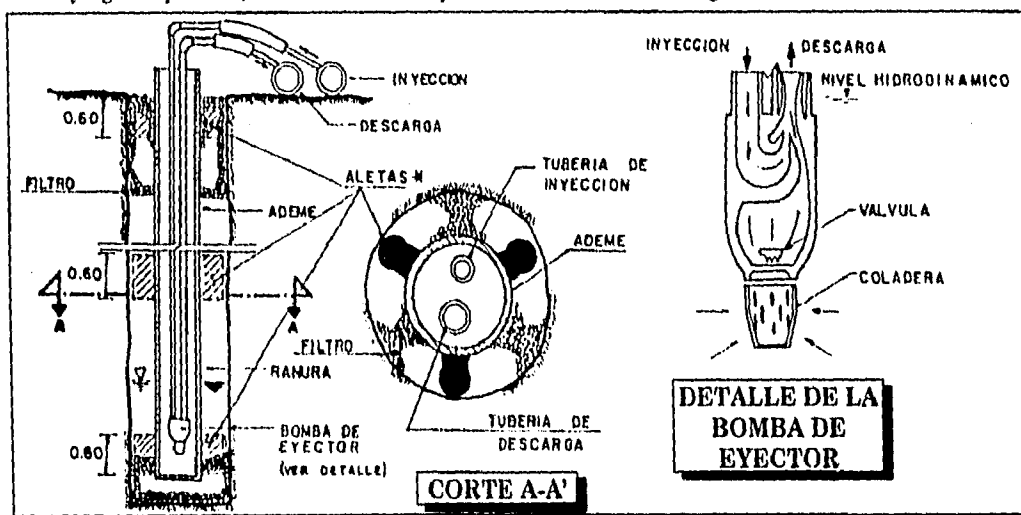


Figura 5.12.- Características de la instalación de un pozo de bombeo.

La localización de los pozos, el gasto promedio extraído, así como la profundidad de desplante de los mismos se indican en las tablas 5.6 y 5.7.

LOCALIZACIÓN Y GASTO EXTRAÍDO DE POZOS DE BOMBEO		
CADENAMIENTO	DISTANCIA ENTRE POZOS CON CENTRO EN EL EJE DE TRAZO (m)	GASTO EXTRAÍDO (lt/min)
22+796.517 - 23+035.000	9.00	5.50
23+035.000 - 23+291.614	12.00	10.50

Tabla 5.6.- Separación entre pozos del tramo Buenavista-Guerrero.

PROFUNDIDAD DE LOS POZOS DE BOMBEO		
CADENAMIENTO	PROFUNDIDAD DE DESPLANTE (m)	PROFUNDIDAD DEL NIVEL DE SUCCIÓN (m)
22+796.517 - 22+892.000	2.00	1.50
22+892.000 - 22+970.000	2.50	2.00
22+970.000 - 23+035.000	2.00	1.50
23+035.000 - 23+291.614	1.50	1.00

Tabla 5.7.- Profundidades en pozos de bombeo referidos al nivel máximo de excavación.

Para poder iniciar el bombeo de cualquier etapa, era necesario que los muros tablestaca estuvieran colados en una longitud no menor a 30 m. a partir del hombro del talud. Cumplido este requisito, el bombeo se iniciaba siempre 24 horas previas a la excavación de cualquier etapa, en todos y cada uno de los pozos contenidos en dicha etapa, en el cuerpo del talud mismo y en los localizados dentro de una dis-



tancia de 10.0 m. medidos a partir del hombro del talud, entendiéndose por hombro del talud, a la intersección del talud único o de la berma superior en el talud compuesto con el terreno natural, (ref. 5).

La causa de este bombeo previo, es la falta de estabilidad del fondo de la excavación; razón por la cual, las presiones de poro en la masa arcillosa tienen que ser abatidas para evitar la pérdida parcial de resistencia al corte por efecto de la expansión acompañada de la absorción de agua. Y cuando este bombeo no resulta suficiente para abatir las presiones de poro, se recurre entonces al bombeo electrosmótico, el cual no se implementó (refs. 7 y 10).

El bombeo una vez iniciado, se suspendía en cada pozo después de colada la plantilla de la etapa correspondiente, retirando el ademe del pozo previo al inicio del citado colado.

### 5.5.2.- Excavación entre muros tablestaca y troquelamiento.

Una vez que el concreto de la losa de cubierta alcanzó su resistencia de proyecto, se dio inicio a la excavación en la zona de tuneleo (previo bombeo), partiendo desde el nivel intrados de la losa de cubierta y atacando al mismo tiempo desde las etapas adyacentes al tuneleo (oriente y poniente), formando una "coyotera" a todo lo largo y ancho del tuneleo con una altura aproximada de 1.80 m.; empleando mano de obra para retirar el material ubicado bajo la losa de cubierta, depositándolo en las zonas adyacentes al tuneleo, para posteriormente extraerlo por medio de dragas equipadas con almejas, depositándolo en camiones para su transporte fuera de la obra.

Al mismo tiempo que se fue abriendo la "coyotera", se soldó la trabe carril a las placas embebidas en el nivel intrados de la losa de cubierta, para recibir después el polipasto eléctrico de cadenas de 5 H.P. de potencia, con capacidad de carga de 5 toneladas, empleado para transportar, colocar y retirar los troqueles, así como para extraer por medio de una "canastilla" el material de rezaga. En la figura 5.13 se observa un corte de la trabe carril, colocada al centro de la losa y concordante con el eje de trazo.

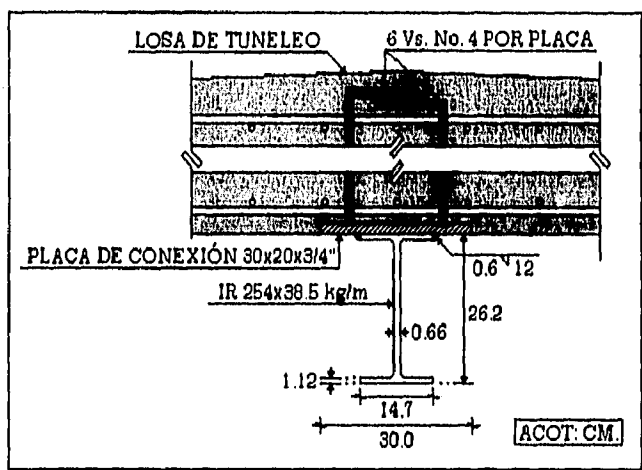


Figura 5.13.- Trabe carril para polipasto, en losa de cubierta.

Durante la realización de los trabajos de excavación, troquelamiento y estructuración del cajón, fue necesario dejar sin construir un tramo de 5.0 m. de la losa de techo, comprendidos entre el cajón construido en el lado poniente de la zona de tuneleo, y el cadenamiento 22+868.582 correspondiente al murete limitante de la losa de cubierta, con la finalidad de permitir el acceso a los cucharones de almeja, para extraer el material de rezaga durante el proceso de tuneleo.

Finalizada la colocación del polipasto, se dio propiamente inicio a la excavación del núcleo; realizando ésta, en forma similar a la "coyotera" (empleando mano de obra). En el sentido de avance de la excavación se conformaron taludes con inclinación 1:1, simples y compuestos según el cadenamiento. En la tabla 5.9 y la figura 5.14, se muestran las características geométricas de los taludes, así como las etapas de excavación (figura 5.1); reiterando que la excavación se atacó por ambos costados del tuneleo y no por

un solo frente (poniente - oriente) como en el caso generalizado del tramo. Conforme se iban realizando los trabajos de excavación, se fueron colocando los diferentes niveles de troquelamiento temporal de las tablestacas. Cada vez que el nivel de excavación llegaba a 30 cm. por debajo de los niveles de troquelamiento, se procedía a colocar en su elevación correspondiente cada uno de los troqueles, los cuales, eran transferidos por medio de dragas al polipasto, siendo éste el encargado de transportarlos hasta el cadenamamiento indicado y hacerlos descender hasta el nivel correspondiente para su colocación.

CADENAMIENTO	BERMAS		
	No.	ALTURA (m.)	LONGITUD (m.)
23+291.614 al 23+050.000	0	0.0	0.0
23+050.000 al 22+946.000	1	5.0	5.0
22+946.000 al 22+796.517	2	5.0	10.0

Tabla 5.9.- Geometría de taludes para el tramo.

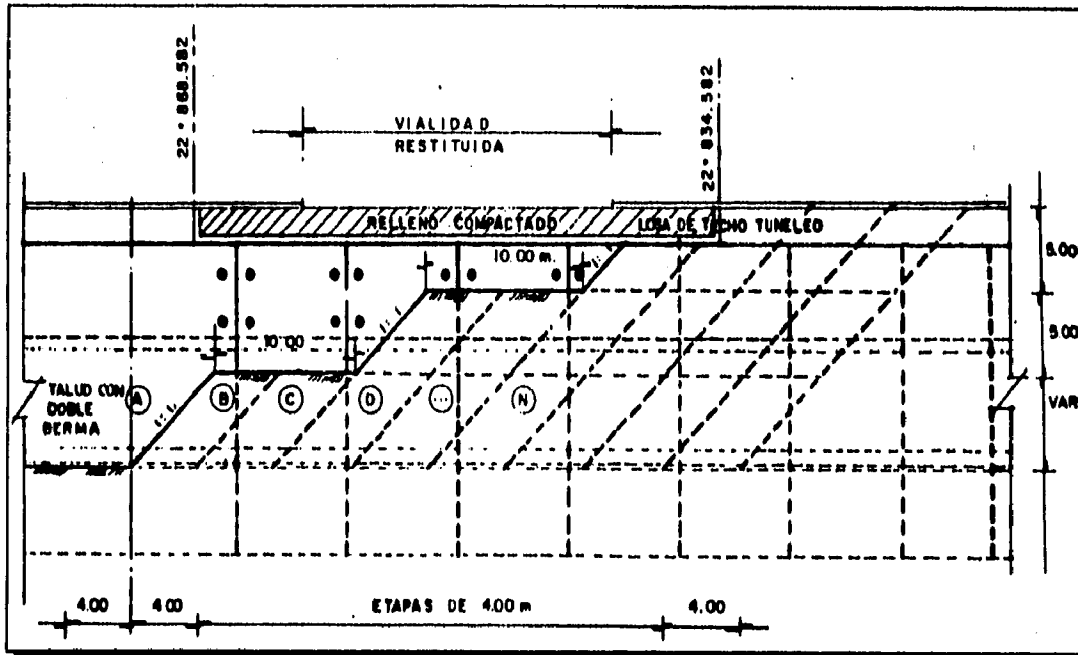


Figura 5.14.- Etapas de excavación y geometría de taludes

A diferencia del tramo, donde se manejaron hasta 5 niveles de troquelamiento; en el túnel se emplearon 4 niveles, ya que la losa de cubierta, venía a sustituir al primer nivel de troquelamiento. En la tabla 5.9 se marcan los diferentes niveles y tipos de troqueles empleados y, en la figura 5.15 a y b, se muestran dichos niveles empleados tanto en los cadenamamientos cercanos al túnel como en este último.

CADENAMIENTO	NIVEL DE REFERENCIA					CARACTERÍSTICAS
	1	2	3	4	5	
22+821.802 - 22+834.582	+11.75	+9.30	+6.85	+4.05	+1.15	1º, 2º y 4º niveles (Ø = 14", ced. 40) 3º y 5º niveles (Ø = 20", ced. 30)
22+834.582 - 22+848.882	.	+9.30	+6.85	+4.05	+1.15	
22+848.882 - 22+854.182	.	+9.20	+6.85	+4.00	+1.15	
22+854.182 - 22+868.832	.	+9.20	+6.85	+4.00	+1.15	
22+868.832 - 22+892.000	+10.90	+8.85	+6.85	+4.00	+1.15	

Tabla 5.9.- Niveles de troquelamiento para la zona del túnel y cadenamamientos aledaños.

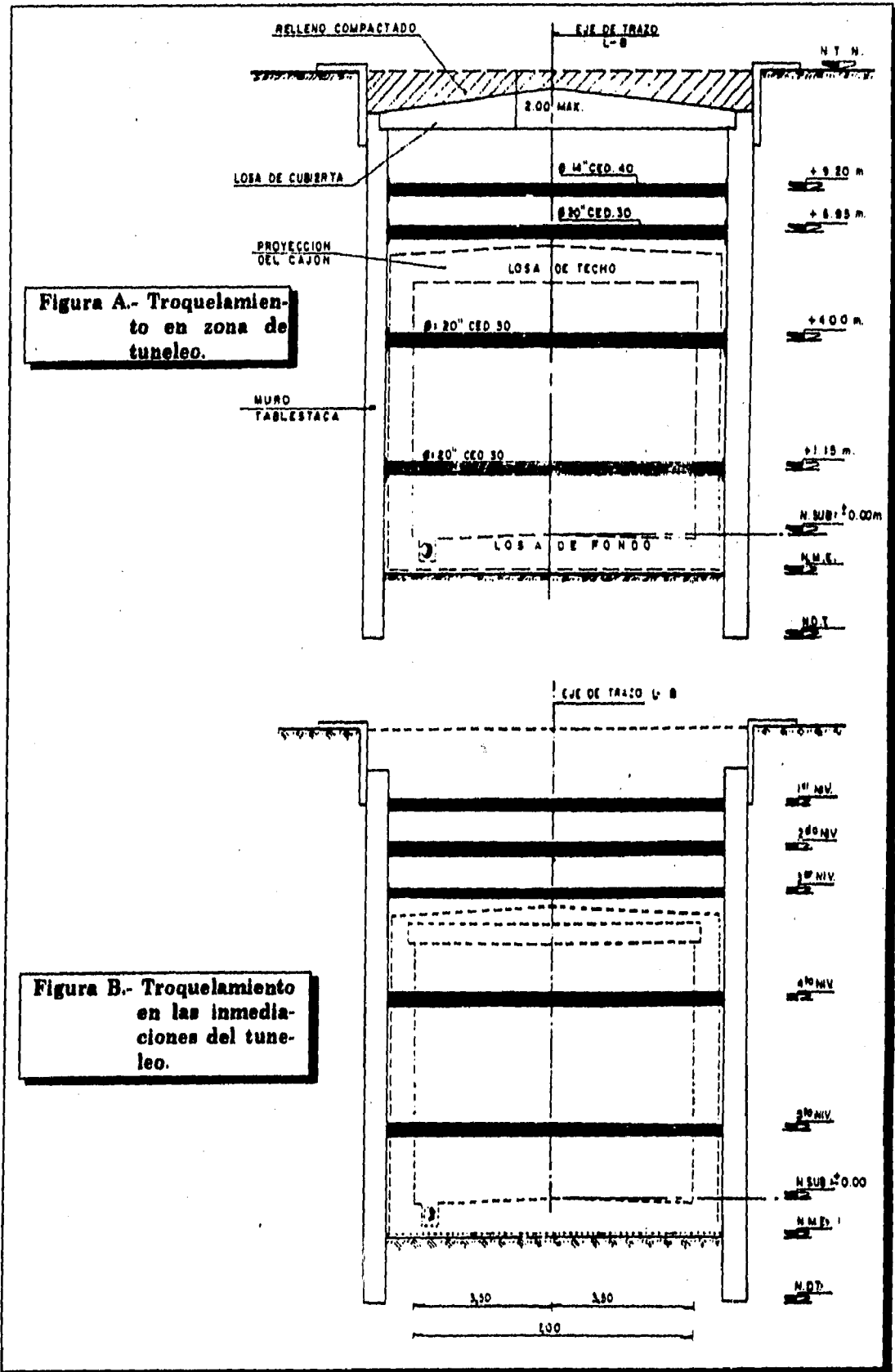


Figura 5.15.- Niveles de troquelamiento.

Los troqueles se colocaron por pares en cada tablero, según las restricciones mostradas en la figura 5.16 y en la tabla 5.10.

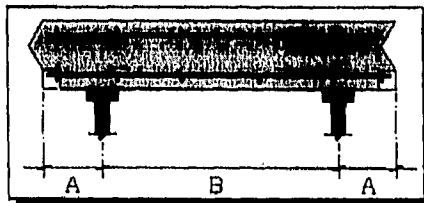


Figura 5.16.- Detalle de troquelamiento en tableros.

SEPARACIÓN DE TROQUELES		
CADENAMIENTO	A (m.)	B (m.)
22+796.517 al 22+816.402	1.50	4.20
22+816.402 al 22+821.802	0.30	6.00
22+821.802 al 22+848.882	1.50	4.20
22+848.882 al 22+854.282	0.30	6.00
22+854.282 al 22+867.150	1.50	4.20
22+867.150 al 22+892.000	1.50	4.20

Tabla 5.10.- Separación de troqueles por tablestaca.

Para efectuar la colocación de troqueles en su lugar definitivo, se empleó una celda hidráulica de carga (gato hidráulico), para definir con precisión la magnitud de proyecto especificada de la carga aplicada a cada troquel; la celda hidráulica era introducida en un extremo del troquel (caja), diseñado para ello, aplicada la carga y colocadas las cuñas de acero mismas que determinan la longitud fija del troquel, para después descargar y retirar la celda, en la figura 5.17 se muestra un detalle de lo anterior. Una vez aplicada la carga, los troqueles se aseguraron en cada uno de sus extremos mediante la colocación de estrobos (cables de acero), fijados al armado de la tablestaca; para el caso del tuneleo, se soldaron varillas entre el armado de tablestacas y los troqueles, ya que en esta zona el tránsito del personal fue mayor como consecuencia de los trabajos de excavación, (ref.10). En la tabla 5.11 se indican las diferentes presiones que se aplicaron a los troqueles.

CARGA APLICADA EN TROQUELES		
CADENAMIENTO	NIVEL DE TROQUELAMIENTO	CARGA (ton.)
23+291.614 al 22+990.000	1° y 2°	30.0
	3°	60.0
22+990.000 al 22+937.000	1° y 2°	60.0
	3° y 4°	80.0
22+937.000 al 22+796.517	1° al 5°	80.0

Tabla 5.11.- Cargas aplicadas a troqueles por nivel y cadenamiento.

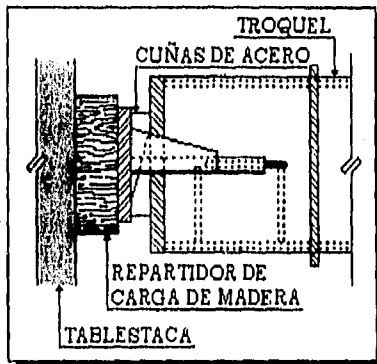


Figura 5.17.- Detalle de conexión, troquel - tablestaca.

La secuencia de colocación y retiro de troqueles se ilustra en la figura 5.18, resaltando lo siguiente:

- Colocado el segundo nivel de troqueles, se pudo haber retirado el primer nivel, sin embargo, este último se dejó en su posición para servir como "andamio" al operador del polipasto.
- Colocado el cuarto nivel, se retiró el tercero.
- El tiempo máximo especificado para la excavación y colocación de troqueles en cada etapa fue de 48 horas.

Alcanzado el nivel máximo de excavación (-1.0 m.), se procedió a colar la plantilla de concreto simple de 10 cm. de espesor, provista de un aditivo acelerante de fraguado, para pasar enseguida a la etapa de estructuración del cajón. En la tabla 5.12 se indican las propiedades del concreto empleado en la plantilla.

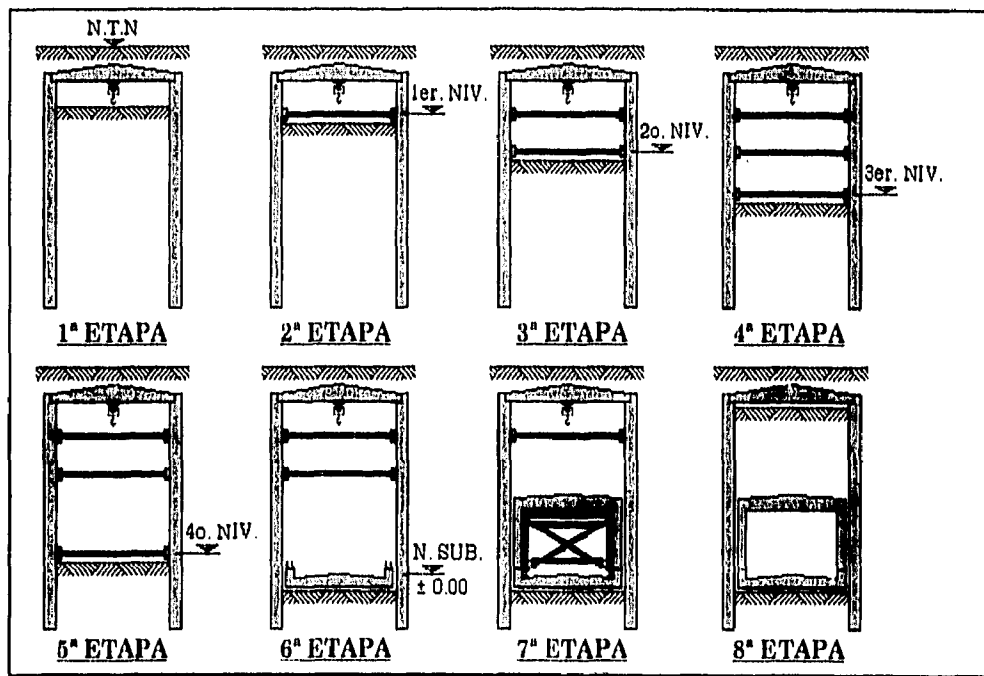


Figura 5.18.- Etapas del procedimiento constructivo en la segunda fase del tunelero falso.

PROPIEDADES DEL CONCRETO EN PLANTILLAS	
CARACTERÍSTICAS	VALORES
Revenimiento.	8 cm.
Tolerancia.	± 2.5 cm.
Resistencia a la compresión (28 días).	100 kg/cm <sup>2</sup> .
Tipo de cemento.	Portland I.
T.M.A.	3/4 "
Clase de concreto.	2.

Tabla 5.12.- Propiedades del concreto empleado en plantillas.

#### 5.5.2.1.- Filtraciones en muros tablestaca.

Como consecuencia de las juntas frías existentes entre los muros tablestaca, se presentaron diferentes niveles tanto de humedades como de filtraciones, tanto en las juntas como en el cuerpo del muro (siendo éstas últimas poco frecuentes), debido fundamentalmente a la contaminación del concreto durante el colado.

El tratamiento a seguir dependió de la ubicación del problema (juntas o cuerpo de los muros) y de la magnitud del mismo (humedad o filtración); teniéndose principalmente tres casos, mismos que a continuación se explican:

- 1) Para el caso de humedades pequeñas a ligeras en el cuerpo del muro, se procedió simplemente a aplicar un recubrimiento cementoso impermeable para solucionarlo.
- 2) Cuando la humedad era fuerte o la filtración pequeña y ubicada en el cuerpo del muro tablestaca, se procedía a realizar pequeños cortes en la zona afectada para rellenarlos después con un mortero hidráulico de fraguado instantáneo y expansivo al contacto con el agua; para finalmente aplicar el recubrimiento del caso anterior.
- 3) Por último, en el caso de filtraciones medias a fuertes se procedió de dos formas, dependiendo de la localización de la filtración:
  - a) *Juntas*.- En este caso, se retiró la caja de poliestireno existente (ver figura 5.16), para colocar las grapas necesarias (Vs. #4 @ 25 cm.) y colar la zona afectada con un aditivo estabilizador de volumen; pero, si la filtración persistía, se realizaban inyecciones (inciso b). Es necesario remarcar que la caja siempre fue retirada antes del colado de los muros estructurales para colar esa zona en conjunto con dichos muros.
  - b) *Cuerpo del muro*.- Primeramente, se aplicó un tratamiento similar al del primer caso; pero, si la filtración persistía, se dejaban entonces las preparaciones necesarias (tubos de PVC de 2" de diámetro) para efectuar las inyecciones una vez construido el muro estructural, con la finalidad de no interferir con el avance de la construcción.

El proceso se inició con la perforación, hasta penetrar en el terreno 0.50 m. medidos a partir del paño exterior de la tablestaca, siendo éstas perforaciones realizadas en "tresbolillo" separados un metro de distancia en los sentidos vertical y horizontal, cuando se efectuaron a partir de las tablestacas; para el caso contrario (partiendo de los muros estructurales), los barrenos se practicaron formando una cuadrícula con separaciones de 0.50 m. entre barrenos.

Posteriormente, se inyectó la mezcla con el siguiente proporcionamiento:

Agua - cemento	3:1 en peso
Bentonita	3% máximo en peso del cemento
Aditivo	2 a 4% en peso del cemento

Iniciada la inyección, ésta se suspendía al alcanzarse un volumen máximo especificado de 1m<sup>3</sup> o al alcanzarse una presión de 0.5 kg/cm<sup>2</sup> por barreno.

### 5.5.3.- Estructuración del cajón.

Finalizada la colocación de la plantilla (y si era el caso el sellado de las filtraciones), se procedía a efectuar tres horas después el armado y colado de la losa de fondo incluyendo un segmento de 0.85 m. de altura (medidos a partir del nivel de subrasante) del muro estructural, denominado "muñón"; dejando en ellos (losa y muñón) las preparaciones necesarias para ligarlos posteriormente con la altura restante de los muros, así como con la losa de fondo de la siguiente etapa; siendo de ocho horas (después del fraguado inicial de la plantilla), el tiempo máximo para armar y colar la losa.

Para evitar la filtración del agua hacia el interior del cajón, se colocaron en las juntas de colado bandas de PVC, así como bandas expansivas de sellado, como se muestra en la figura 5.19.

Veinticuatro horas después de colada la losa de fondo y el muñón, se retiró el cuarto nivel de puntales; realizándose el armado, cimbrado y colado de los muros estructurales así como de la losa de techo del cajón para obtener un colado monolítico, con el empleo de la cimbra deslizante; dejándose en es-

tos elementos las preparaciones necesarias para su liga posterior con la losa y muros de la siguiente etapa. En la tabla 5.13 se indican las propiedades del concreto empleado para el cajón.

PROPIEDADES DEL CONCRETO EN EL CAJÓN	
CARACTERÍSTICAS	VALORES
Revenimiento.	10 cm. (muros), 7.5 cm. (losas).
Tolerancia.	± 2.5 cm en ambos.
Resistencia a la compresión (28 días).	250 kg/cm <sup>2</sup> .
Tipo de cemento.	Portland II.
T.M.A.	1 1/2"
Clase de concreto.	1.

Tabla 5.13.- Propiedades del concreto empleado en losas y muros estructurales del cajón.

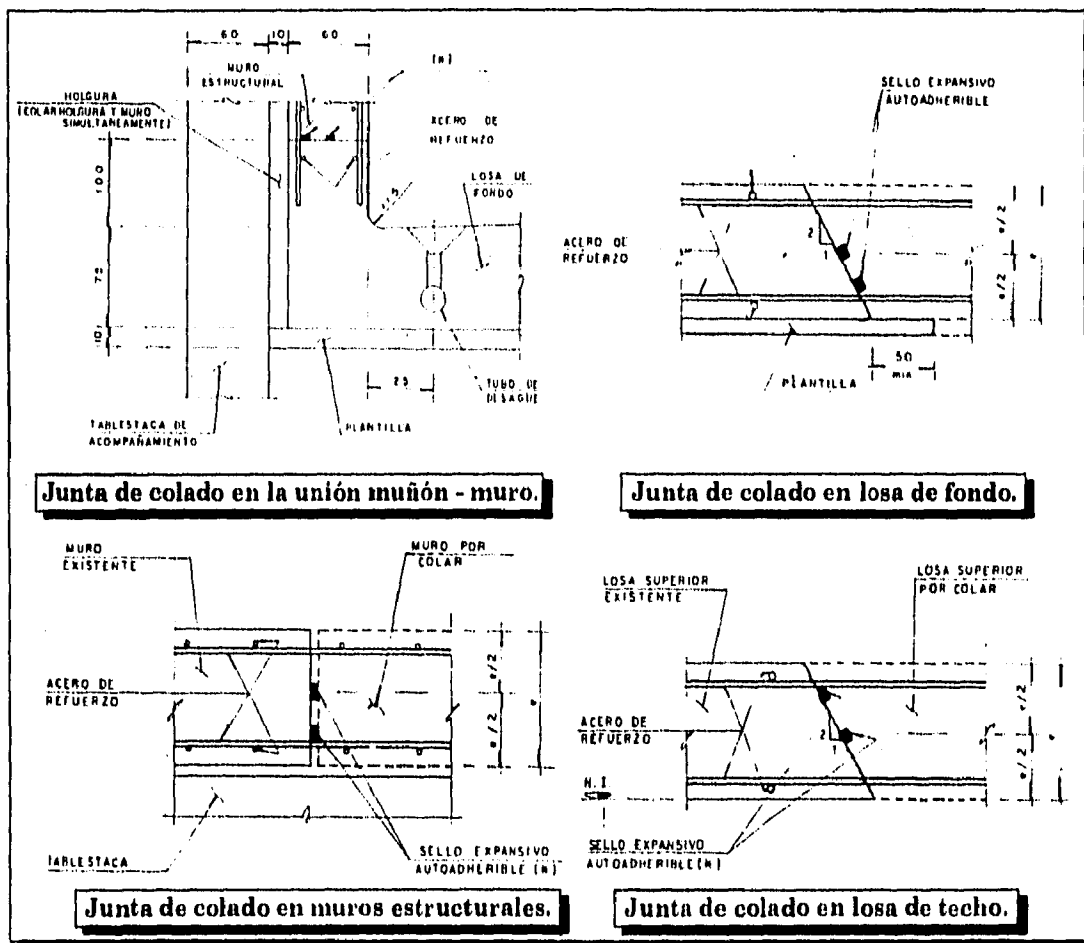


Figura 5.19.- Detalles de juntas de colado y sellado de las mismas.

Al alcanzar el concreto de muros estructurales y losa de techo, el 70% de su resistencia, se retiró la cimbra deslizante para su utilización en la siguiente etapa, y se retiró el segundo nivel de troqueles. Las juntas entre muros estructurales, se colaron de tal forma que no coincidieran con las de los muros tablestaca, quedando una distancia entre juntas de 2.0 m.

En el nivel extrados de las losas de fondo y de techo, se realizó el curado del concreto a base de membranas, mientras que en los muros estructurales la misma cimbra se empleó para curar el concreto; solamente cuando el avance en la estructuración se encontraba retrasado, se empleó curado a vapor para obtener en menos de un día el 70% de la resistencia del concreto.

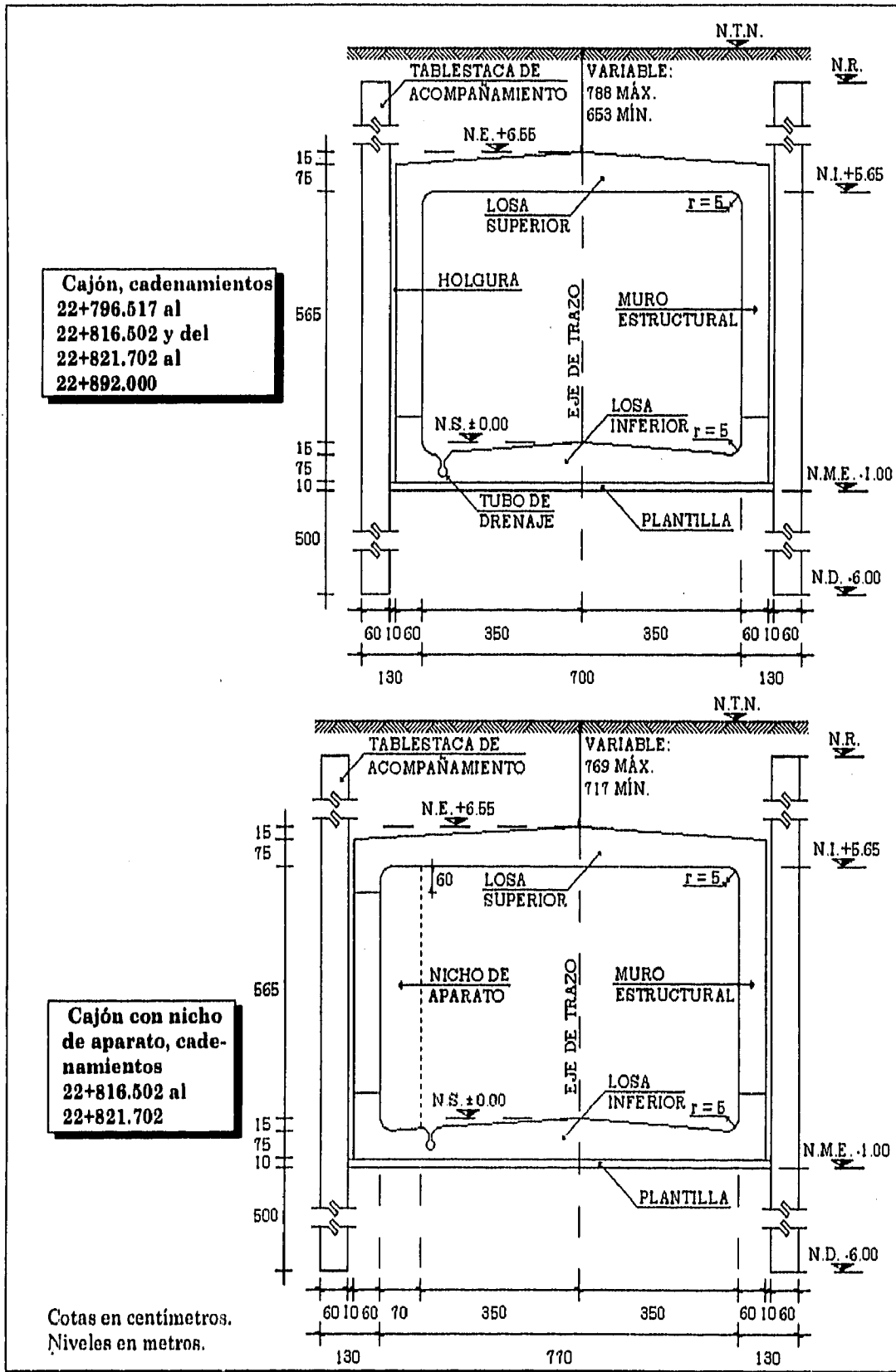


Figura 5.20.- Dimensiones generales del cajón en la zona de túneleo.



El proceso de estructuración, se siguió en etapas de 4.0 m. teniendo siempre una distancia entre la base del talud y el primer colado de la losa de fondo, también de 4.0 m.

En la figura 5.20 se muestran las secciones terminadas del cajón con las dimensiones de muros y losas; en los cadenamientos correspondientes al tuneleo y etapas aledañas.

**5.5.4.- Rellenos sobre el cajón.**

Una vez que el concreto del cajón alcanzó la resistencia de proyecto, se retiró el primer nivel de troqueles, así como la trabe carril y el polipasto, para proceder a colocar los rellenos sobre el cajón. En la figura 5.21 se muestra un corte longitudinal de la estructura de los rellenos para el cajón profundo.

Las propiedades de los materiales empleados se resumen a continuación:

**a) Tepetate.**

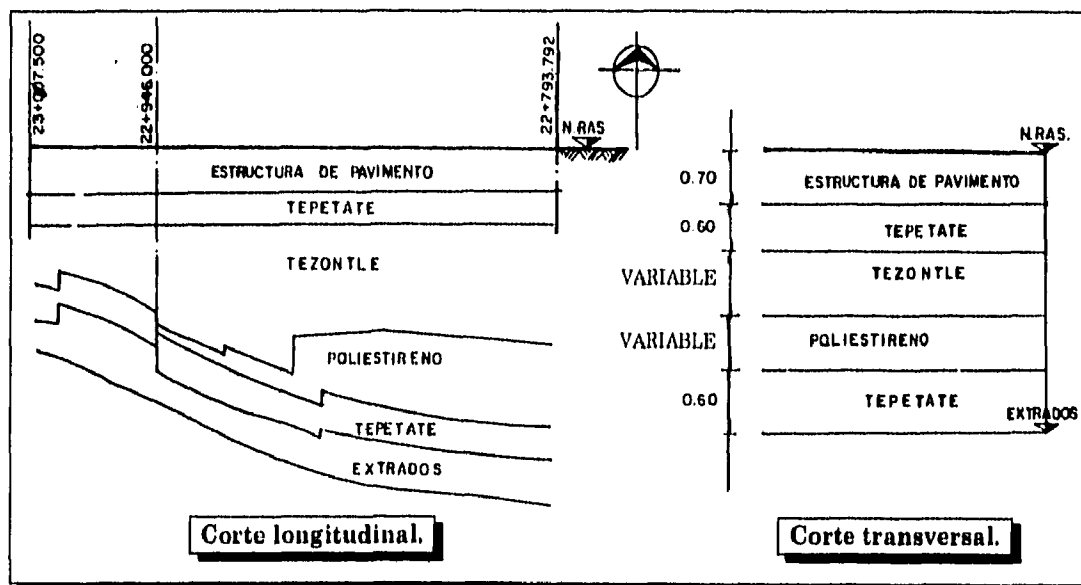
- Tipo areno-limoso conocido como "tepetate", libre de materia toda orgánica en cantidades visibles, cascajo, materiales extraños y piedras mayores de 7.5 cm. de diámetro.
- Contracción lineal máxima admisible de 3.0% y límite líquido máximo del material del 50%.
- V.R.S. mínimo de 15%.
- Porcentaje máximo de partículas que pasen la malla No. 200, menor al 30%.

**b) Tezontle.**

- Libre de materia toda orgánica en cantidades visibles, así como de materiales extraños.
- Tamaño máximo de los fragmentos de tezontle de 1 1/2".
- Peso volumétrico máximo saturado de 1.30 Ton/m<sup>3</sup>.

**c) Poliestireno.**

- Peso volumétrico del material de 0.017 Ton/m<sup>3</sup>.



**Figura 5.21.- Estructura de los rellenos sobre el cajón profundo.**

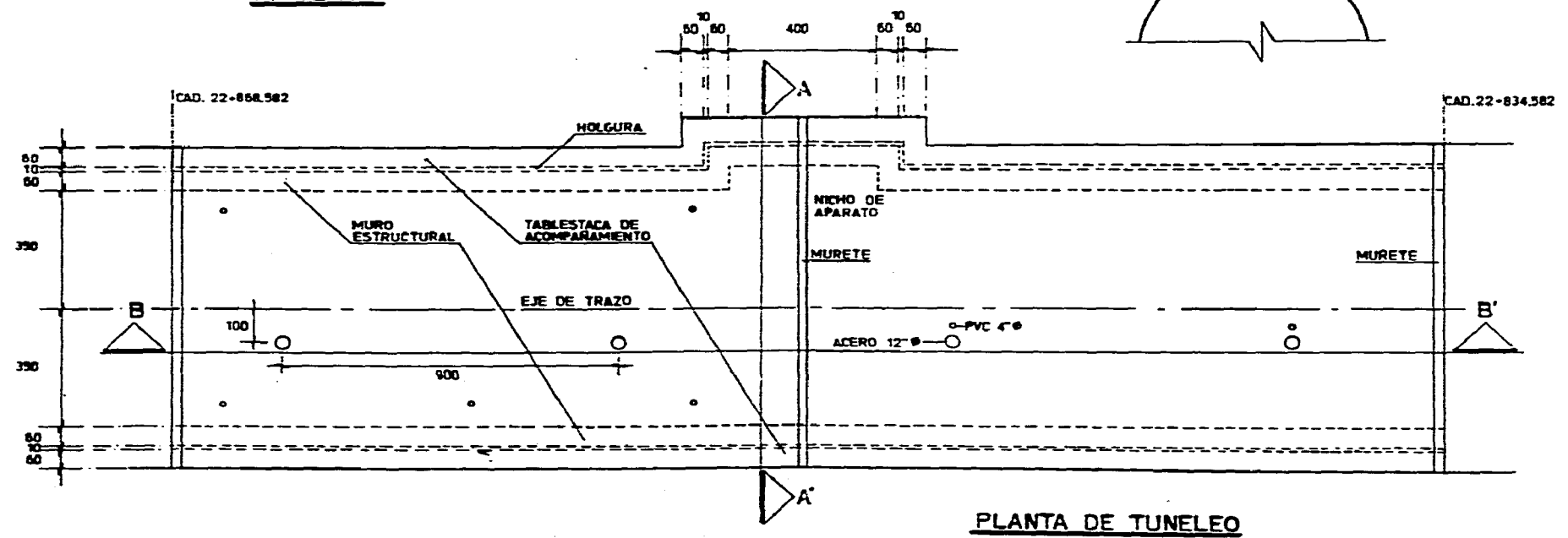
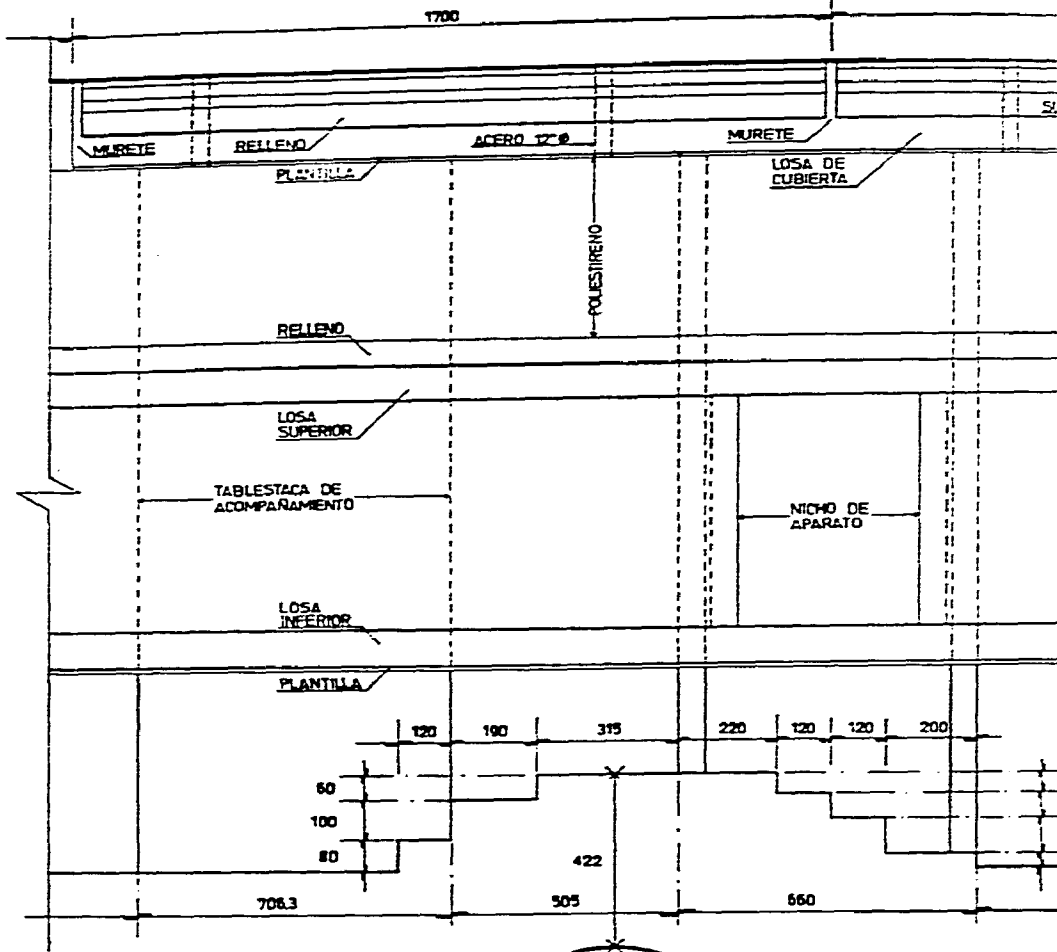
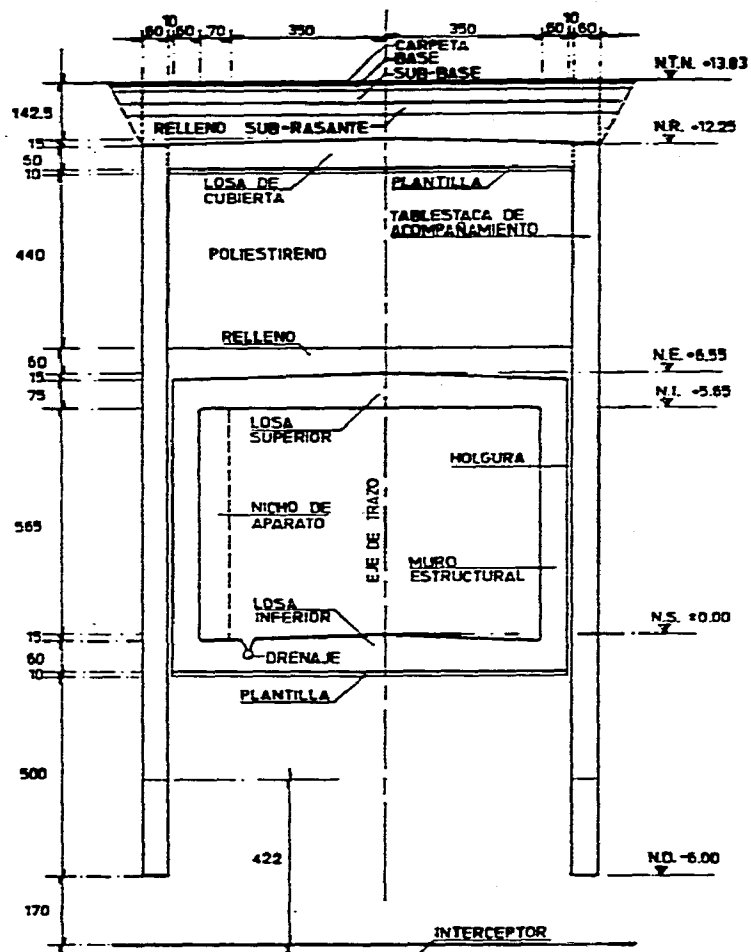
## CAPÍTULO 5

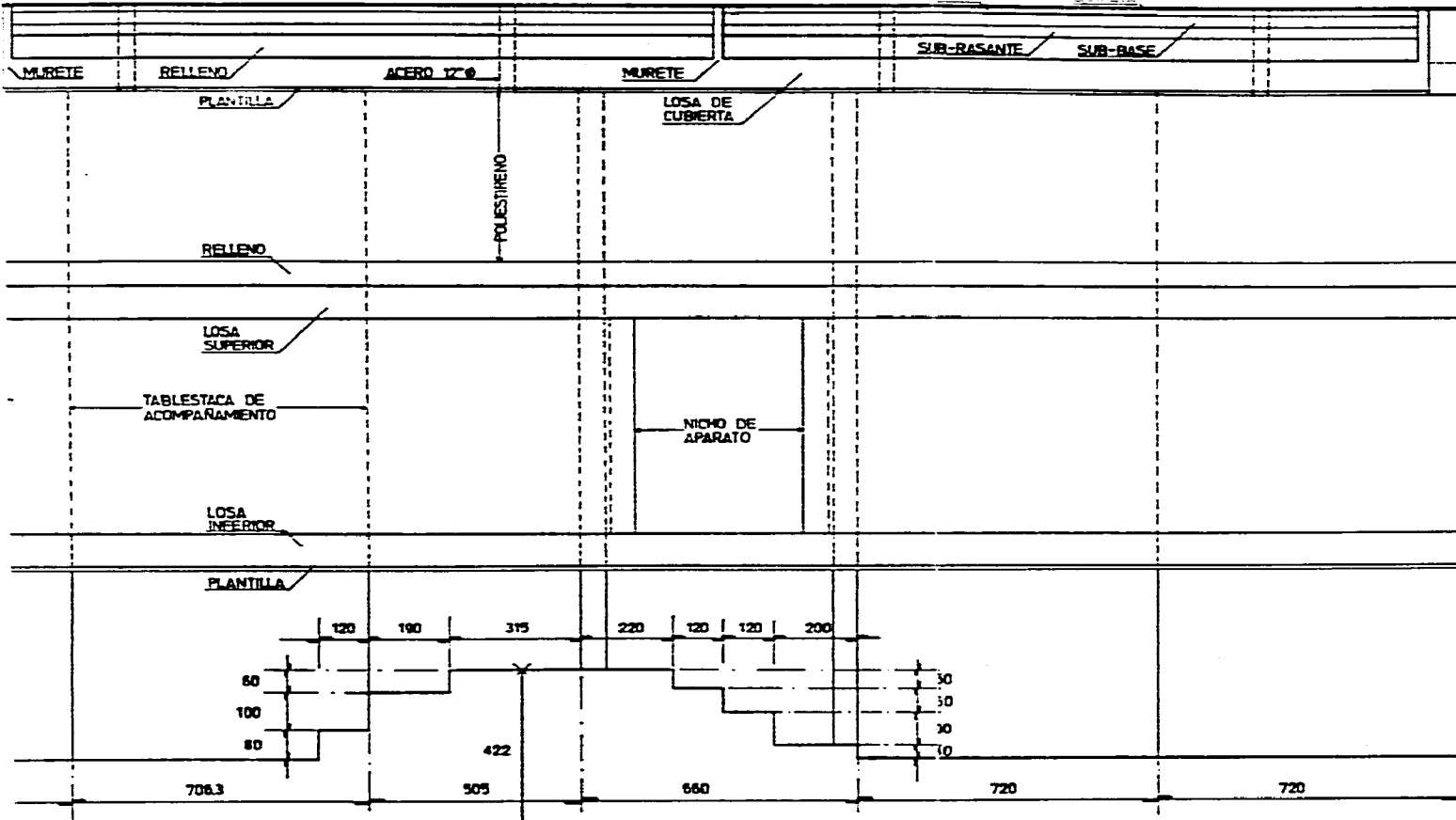
Desde el nivel extrados del cajón y hasta una altura de 0.60 m., se colocó una capa de material areno limoso (tepetate), compactada en capas de 0.30 m. de espesor, empleando un compactador en tándem de rodillo vibratorio, de 1.5 Ton. de peso, ya que la máxima presión especificada para estos equipos, no debía de pasar las 3 Ton/m<sup>2</sup>.

Alcanzado el 90% de su P.V.S.M. en la compactación, se procedió a colocar los bloques de poliestireno, hasta alcanzar un espesor de 4.30 m., rellenándose el hueco existente con una mezcla fluida de suelo-cemento en proporción 10:1 en peso del cemento.

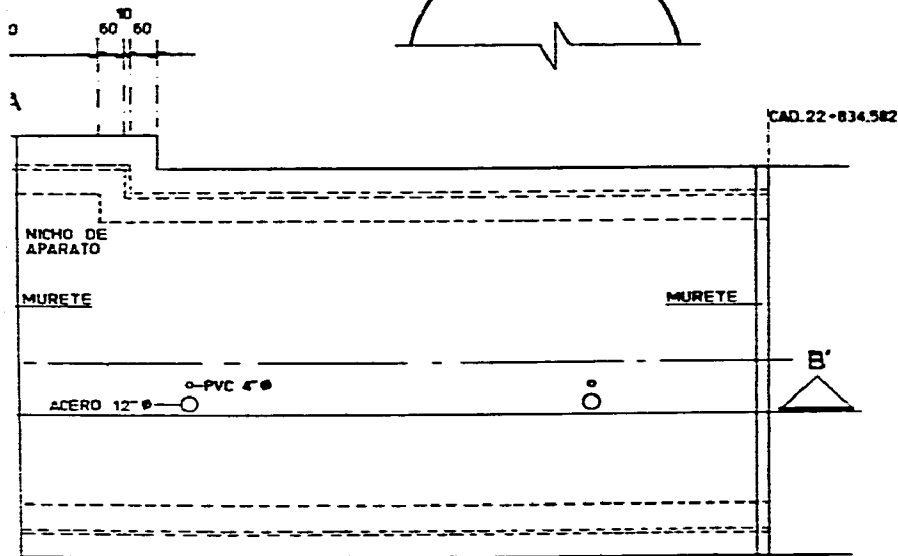
El tezontle se empleó fuera de la zona de tuneleo y en el área correspondiente al cajón profundo como se observa en el corte longitudinal de la figura 5.21, siendo compactado en capas de 50 cm. empleando el equipo antes mencionado.

En el siguiente plano, se muestra planta y cortes del tuneleo en su conjunto.



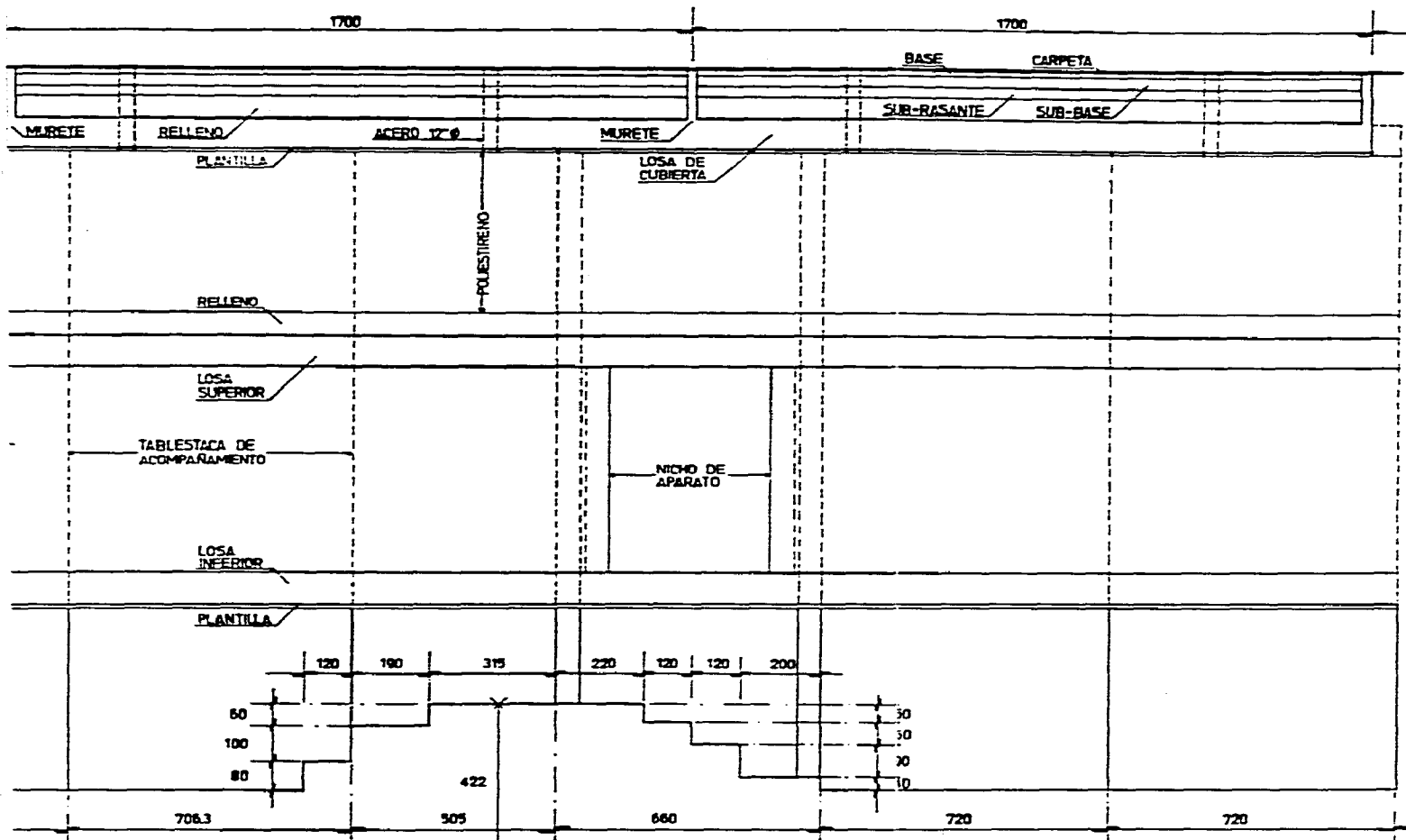


**CORTE B-B'**



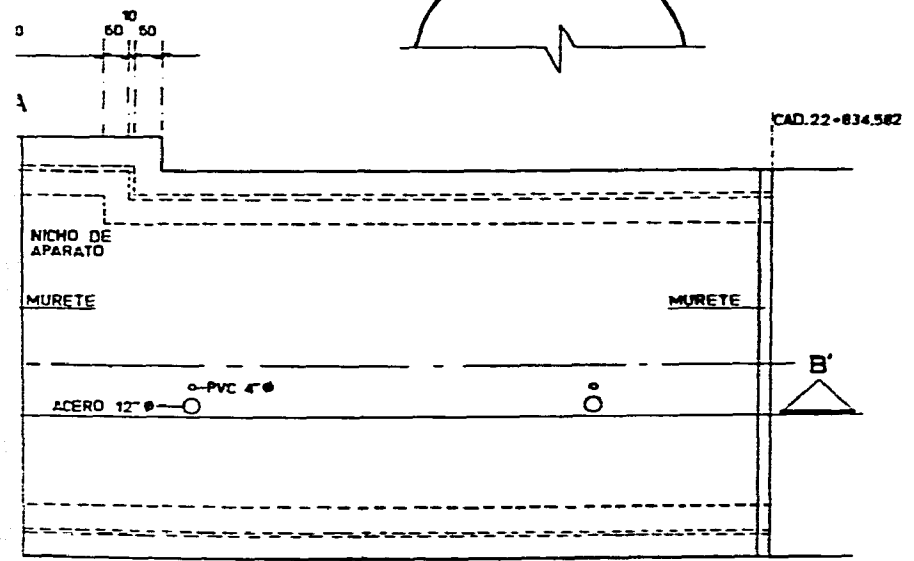
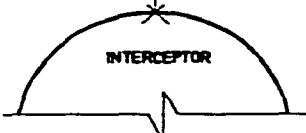
**PLANTA DE TUNELEO**

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO	
ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES "ACATLAN"	
INGENIERIA CIVIL	TUNELEO
TESIS PROFESIONAL	FALSO
GERARDO LARA GARCIA	COTAS: CMS NVELES: M



A ESTACION GUERRERO →

CORTE B-B'



PLANTA DE TUNELEO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO	
ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES "ACATLAN"	
INGENIERIA CIVIL	<u>TUNELEO</u>
TESIS PROFESIONAL	<u>FALSO</u>
GERARDO LARA GARCIA   COTAS: CMS   NIVELES: M	

## REFERENCIAS.

- 1.- Ávila Torres, Miguel Ángel Utilización de los lodos bentoníticos en la construcción. Tesis profesional. E.N.E.P. Acatlán. 1995. 95 páginas.
- 2.- Castañeda N., Carlos Enrique. El Proyecto de la Obra Civil del Metro. Revista *Ingeniería*. Volumen LII. Número 1. Año 1982. Páginas 127-149. Facultad de Ingeniería U.N.A.M. México D.F.
- 3.- COVITUR. Especificaciones para el proyecto y construcción de las líneas del metro de la Ciudad de México. Volumen 3. (Calidad de los materiales. Calidad de equipos y sistemas). Enero de 1987. México D.F.
- 4.- COVITUR. Especificaciones para el proyecto y construcción de las líneas del metro de la Ciudad de México. Volumen 2. (Construcción e instalaciones). Enero de 1987. México D.F.
- 5.- ICA. Especificaciones y planos para la construcción del Metropolitano línea B.
- 6.- Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto. A.C. Guía práctica para la colocación del concreto. (Guía para la medición, mezclado, transporte y colocación del concreto. Comité ACI - 304). 1ª edición. 1993. México. 77 páginas.
- 7.- Juárez Badillo, Eulalio y Rico Rodríguez, Alfonso. Mecánica de Suelos. Tomo III. Flujo de agua en suelos. Editorial LIMUSA S.A. 1ª edición. 10ª reimpresión. Enero de 1991. México D.F. 414 páginas.
- 8.- Reunión conjunta ADSC-SMMS. Cimientos profundos colados en sitio. Editorial LIMUSA S.A. de C.V. 1ª edición. Junio de 1976. México D.F. 174 páginas.
- 9.- Schneebeli, Georges. Muros pantalla. Técnicas de realización. Métodos de cálculo. Traducción del francés; Francisco Javier Calveras Marles. Editores técnicos asociados S.A. 1ª edición. 1974. Barcelona, España. 221 páginas.
- 10.- Tamez, E. Santoyo, E. Mooser, F. y Gutiérrez C. E. Manual de diseño geotécnico. Volumen 1. (Estudios geotécnicos y diseño del metro en cajón). COVITUR. Agosto de 1987. México D.F. 190 páginas.

## CAPÍTULO 6

### “INSTRUMENTACIÓN”

*Objetivo específico.* - Resaltar la importancia de la instrumentación como un elemento de control que permite la adecuada construcción.

- 6.1. **CONCEPTOS GENERALES SOBRE LA INSTRUMENTACIÓN EN TÚNELES.**
  - 6.1.1. **La instrumentación en las obras civiles.**
  - 6.1.2. **El comportamiento de los túneles.**
  - 6.1.3. **Objetivos y alcances de la instrumentación para la solución en cajón del Metro.**
  
- 6.2. **CONTROL TOPOGRÁFICO (PUNTOS DE CONTROL, “PALOMAS” Y PLOMOS).**
  - 6.2.1. **Descripción del control topográfico.**
  - 6.2.2. **Datos a obtener.**
  
- 6.3. **BANCOS DE NIVEL SEMIPROFUNDO.**
  - 6.3.1. **Descripción del dispositivo.**
  - 6.3.2. **Datos a obtener.**
  
- 6.4. **PIEZÓMETROS Y TUBOS DE OBSERVACIÓN DEL NIVEL FREÁTICO.**
  - 6.4.1. **Piezómetro abierto (tipo Casagrande).**
    - 6.4.1.1. **Estaciones piezométricas externas.**
    - 6.4.1.2. **Estaciones piezométricas internas.**
  - 6.4.2. **Tubo de observación del nivel freático.**
  - 6.4.3. **Datos a obtener.**
  
- 6.5. **INCLINÓMETROS.**
  - 6.5.1. **Descripción del dispositivo.**
  - 6.5.2. **Criterios de instalación.**
  - 6.5.3. **Datos a obtener.**
  
- 6.6. **VALORES MÁXIMOS ADMISIBLES DE DEFORMACIÓN.**
  
- 6.7. **LOCALIZACIÓN DE LA INSTRUMENTACIÓN EN EL TRAMO BUENAVISTA - GUERRERO.**

**REFERENCIAS.**

**6.1.- CONCEPTOS GENERALES SOBRE LA INSTRUMENTACIÓN EN TÚNELES.****6.1.1.- La instrumentación en las obras civiles, (ref. 4).**

Dentro de las ramas de la ingeniería civil, la Mecánica de Suelos Aplicada presenta diferencias importantes entre la teoría y la realidad; debido en gran medida a los problemas que plantea el suelo como material de construcción, y también, a que en muchas ocasiones no se cuenta con toda la información necesaria por efecto del costo y tiempo que esto representaría. De lo anterior se deriva un cierto grado de incertidumbre en cuanto al comportamiento de las obras realizadas.

Como consecuencia de lo anterior, la observación del comportamiento de las obras (tales como presas, carreteras, ferrocarriles, túneles, etc.) mediante la instrumentación, se ha convertido en un aspecto de vital importancia para el aseguramiento de las construcciones, antes, durante y a lo largo de la vida útil de las mismas. Mediante la instrumentación, es posible medir ciertos aspectos "esenciales" (deformaciones y presiones principalmente), que interpretados en forma correcta, nos permiten conocer y prever las condiciones de estabilidad de la estructura, incluyendo también la verificación general de los procedimientos empleados en la construcción, así como el grado de eficacia en las teorías empleadas en el proyecto, lográndose en algunos casos ajustes importantes en las mismas.

**6.1.2.- El comportamiento de los túneles, (ref. 4).**

El túnel es una estructura de construcción peligrosa e incierta, a pesar de los avances alcanzados en la materia en los últimos años. En general, la apertura de un túnel cambia las condiciones existentes de esfuerzos en el medio original, mismo que puede concebirse como una masa en equilibrio dentro de un campo gravitacional. Los cambios subsecuentes en esta masa originados por el túnel, se presentan en forma continua o por etapas, hasta que se alcanza una condición final en la masa, en cierta forma invariable, que es posible considerar como de equilibrio definitivo. La condición final alcanzada conlleva al establecimiento de nuevas condiciones hidráulicas en el subsuelo, así como al cese de las deformaciones y cambios de esfuerzo producidos en la masa de suelo producto de la excavación.

La gran mayoría de los túneles excavados en suelos son ademados en algún momento de su construcción; haciéndose necesario el análisis de las presiones de tierra sobre dichos ademes. Estos análisis tienen sus raíces en los estudios teóricos, mismos que ha su vez se ven modificados e influenciados por la intuición y la experiencia.

Existen soluciones teóricas sobre el problema que permiten calcular los esfuerzos y deformaciones de los túneles en materiales idealizados, cuyas propiedades no necesariamente son las mismas que las de los materiales reales, razón por la cual, el proyectista tiene que adaptar los cálculos a las propiedades de los materiales reales, mismas que rara vez se conocen en forma amplia y segura, ya que en pequeñas distancias se presentan grandes diferencias; en consecuencia, los conceptos presupuestos en las soluciones teóricas a menudo no son muy satisfactorios.

Por lo anterior, es muy común que se prefiera construir túneles sin realizar una verdadera perforación de los mismos, para lo cual se emplean métodos de excavación a cielo abierto, abriéndose zanjas en el terreno para después estructurar en el interior de la zanja el túnel propiamente dicho, sin embargo, con esto no se escapa del todo a los problemas planteados anteriormente, porque al final de cuentas, el medio original es alterado en su equilibrio.

Como consecuencia de todo lo anterior, se desprende la necesidad de investigar el comportamiento de los túneles mediante el empleo de la instrumentación, para verificar las hipótesis de diseño, asegurar los procesos de construcción y mejorar los métodos de análisis. En opinión de los especialistas, la combinación entre estudios teóricos y de conocimiento empírico (resultado estos últimos de las observaciones y mediciones del comportamiento de túneles reales obtenidos con la instrumentación), es el camino más favorable para lograr una mejora sustancial en los métodos de análisis de que hoy se dispone o para desarrollar otros nuevos o mejores.



En conclusión, lo que se pretende alcanzar es tener una estructura que satisfaga las necesidades para las cuales fue creada, es decir, un "túnel satisfactorio", el cual debe cumplir con los siguientes requisitos:

- 1) Su construcción se debe efectuar en forma segura, de manera que permanezca cumpliendo sus funciones por sí mismo o si es el caso, con la ayuda de un revestimiento.
- 2) La construcción no debe de causar daños a estructuras vecinas.
- 3) Debe ser capaz de permanecer durante toda su vida de servicio a cubierto de las solicitaciones a que pueda quedar sujeto, siendo la primera de éstas la presión de tierras, entre otros muchos accidentes o circunstancias (sismos, hundimientos, etc.).

### **6.1.3.- Objetivos y alcances de la instrumentación para la solución en cajón del Metro.**

Atendiendo a la definición que se da en la especificación general (referencia 1) para llevar a cabo la instalación, medición o levantamiento de información, interpretación, aplicación, seguimiento y elaboración de informes de la instrumentación de los tramos y estaciones del Metropolitano línea B; se puede decir que:

La instrumentación se define como la serie de dispositivos y referencias topográficas instalados dentro y fuera de la zona de obra, en el terreno natural y en las estructuras vecinas, incluyendo también a todos aquellos trabajos de campo y gabinete (para realizar la toma de lecturas, la interpretación, su aplicación y elaboración de informes); empleados para:

"Medir previamente, durante y después de la ejecución de la obra, los movimientos verticales y horizontales, y/o los esfuerzos que se generan en el suelo y edificaciones colindantes, como reflejo de las actividades y proceso de dicha obra, como lo son: construcción de muros tablestaca, bombeo previo del agua freática, excavación del núcleo, colocación y precarga de puntales, construcción propiamente del cajón y la restitución de la vialidad correspondiente, así como la evaluación final de la condición final de compensación." Alcanzándose con ésta información:

- a) El control de "...posibles daños a terceros, representados por las instalaciones municipales, las construcciones vecinas y a la propia obra. Esto implica estar en condiciones de tomar medidas preventivas y atacar los posibles problemas derivados de esfuerzos y/o deformaciones que se presenten, y que pudiesen generar posibles mecanismos de falla. De aquí se desprenden las acciones a tomar para cada caso en particular."
- b) La verificación del diseño empleado.
- c) Y la retroalimentación a partir de la información obtenida para llevar a cabo la calibración de las teorías empleadas en el diseño.

### **6.2.- CONTROL TOPOGRÁFICO (PUNTOS DE CONTROL, "PALOMAS" Y PLOMOS).**

Mediante el control topográfico (que incluye palomas y plomos) es posible medir los movimientos (verticales y horizontales respectivamente) antes, durante y después de la construcción del metropolitano que se presentan en las zonas y estructuras aledañas a la obra (superficie del terreno), para tener un control sobre la forma en que se ejecuta el proceso de excavación y estructuración, para así detectar en forma oportuna condiciones de inestabilidad, asegurando así un comportamiento dentro de los rangos de seguridad tanto a corto plazo como para la condición definitiva.

#### **6.2.1.- Descripción del control topográfico.**

Para poder detectar posibles movimientos que se pudieran presentar en algunos edificios aledaños al tramo en cuestión, se colocaron marcas de pintura (palomas) y puntos de desplome (plomos) en los

paramentos de éstos, tal y como se describe a continuación:

La ubicación de las palomas en las edificaciones se indica en la figura 6.1. Su instalación se realiza antes del comienzo de la excavación, empleando un nivel topográfico de precisión para definir su posición a una altura de 1.50 m., medido a partir del nivel de banqueta; se marca el eje horizontal de las palomas ayudándose con el nivel de precisión, referido siempre a un banco de nivel profundo, que en este caso, para el tramo en cuestión es el banco de nivel N° 5, cuyos datos se muestran en la tabla 6.1 y su localización en la figura 6.2. Por último se pinta la "paloma" de color rojo con forma de triángulo isósceles invertido cumpliendo con las especificaciones de geometría de COVITUR.

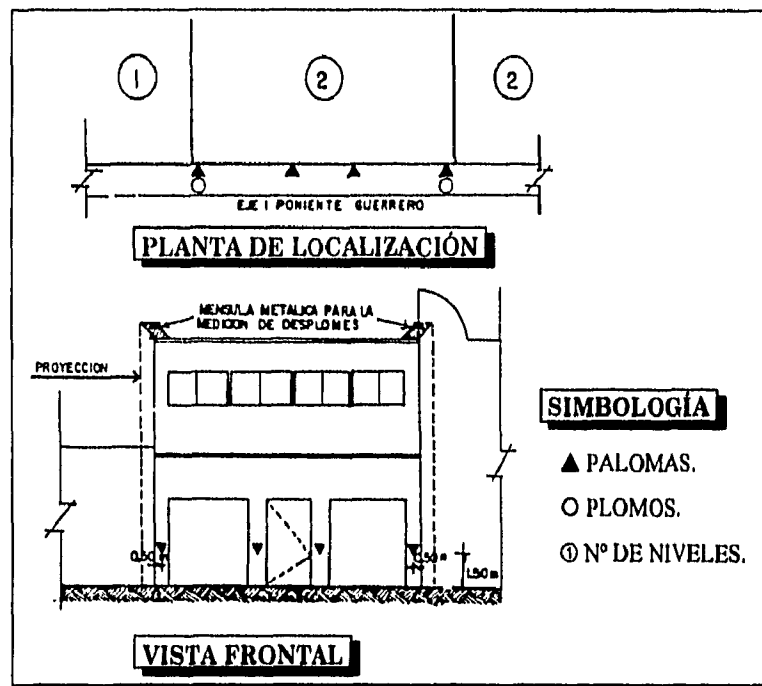


Figura 6.1.- Ubicación en edificaciones de "palomas" y plomos.

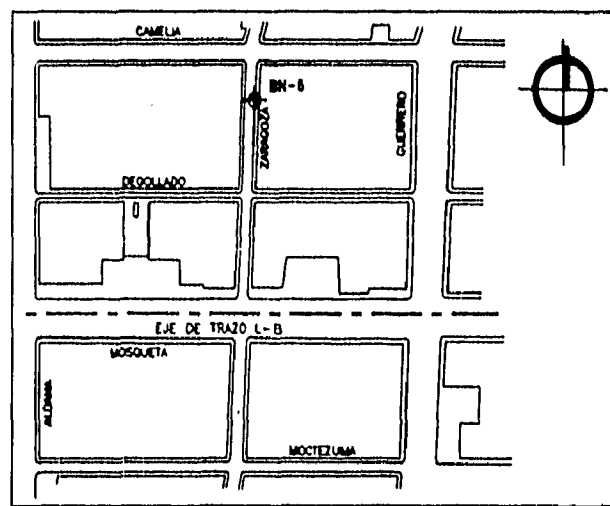


Figura 6.2.- Banco de nivel N° BN-5 para el tramo Buenavista - Guerrero.

Así mismo, la ubicación de los puntos de desplome en los edificios se indica en la figura 6.1. Para su instalación se utilizan los botaguas de las edificaciones o se fijan ménsulas o perfiles de hierro en las azoteas o donde lo permita la construcción.

BANCO DE PARTIDA		FECHA DE		ELEVACIÓN
Nº	FECHA	ELEVACIÓN	NIVELACIÓN	OBTENIDA
BNP- ATZACOALCO	FEB. 94	2245.008	FEB. 94.	2230.643

Tabla 6.1.- Información del banco de nivel N° BN-5 para el tramo Buenavista - Guerrero.

### 6.2.2.- Datos a obtener.

La especificación general (referencia 1) de instrumentación para los tramos y estaciones del metropolitano línea B, señala los datos o información mínima que se debe de registrar para cada aparato, en este caso, para el control topográfico la información mínima es la siguiente:

#### • Puntos de control:

- Fecha de la toma de lecturas.
- Croquis de ubicación.
- Gráfica de los movimientos verticales contra el tiempo, incluyendo eventos de obra.

#### • Palomas:

- Fecha de la toma de lecturas.
- Altura y tipo de la estructura en cuestión.
- Elevación del punto.
- Diferencia respecto a la lectura anterior.
- Deformación acumulada.
- Gráfica de la deformación contra el tiempo, incluyendo eventos de obra.

#### • Plomos:

- Fecha de la toma de lectura.
- Altura y tipo de la estructura en cuestión.
- Desplazamiento horizontal, incluyendo su dirección.
- Croquis de ubicación.
- Gráficas individuales del desplazamiento horizontal contra el tiempo, incluyendo eventos de obra.

### 6.3.- BANCOS DE NIVEL SEMIPROFUNDO.

Con este dispositivo, es posible determinar los movimientos verticales (expansiones y asentamientos) ocasionados por la excavación a cielo abierto, con el fin de verificar la magnitud de las etapas de excavación, los tiempos empleados en la estructuración y tomar medidas preventivas como la colocación de lastres, para asegurar un comportamiento dentro de los límites establecidos de seguridad.

#### 6.3.1.- Descripción del dispositivo.

Este aparato está conformado por cuatro partes principales, (figuras 6.3 y 6.4):

- Tubería del banco.- Es una tubería galvanizada de 1.0"Ø formada por tramos de 1.0 m. de longitud, que se van acoplando hasta la profundidad necesaria.
- Muerto de concreto.- Formado por un cilindro de concreto con un  $f_c = 100 \text{ kg/cm}^2$ , 4"Ø y una altura de 30.00 cm., que se coloca en la parte inferior de la tubería y en el fondo de la perforación.
- Coples de unión.- Tanto para unir los tramos de la tubería como para unir el muerto con la tubería.
- Tapón.- Que va en la parte superior del tubo para hacer las nivelaciones.

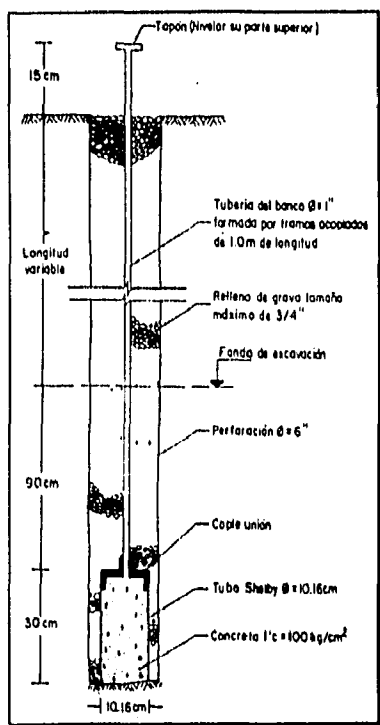


Figura 6.3.- Banco de nivel semiprofundo.

6.3.2.- Datos a obtener.

La especificación general de instrumentación (referencia 1) para los tramos y estaciones del metropolitano línea B, señala los datos o información mínima que se debe de registrar para cada aparato, en este caso, para los bancos de nivel semiprofundos la información mínima es la siguiente:

- Bancos de nivel semiprofundo:
  - a) Profundidad de desplante.
  - b) Fecha de la toma de lecturas.
  - c) Gráfica de movimiento contra tiempo, incluyendo eventos de obra.
  - d) Historia de los recortes del banco.
  - e) Fecha de cancelación.

6.4.- PIEZÓMETROS Y TUBOS DE OBSERVACIÓN DEL NIVEL FREÁTICO.

En forma general, los piezómetros son los dispositivos cuya función es medir la presión de poro en el suelo en un punto determinado, a una cierta profundidad. Estos aparatos se instalan en grupos de dos o tres aparatos, formando lo que se conoce como una estación piezométrica. Estas estaciones se dividen en dos, que son las estaciones piezométricas externas y las internas.

Los tubos de observación, sirven para determinar el nivel o posición del manto freático, así como las variaciones del mismo.

6.4.1.- Piezómetro abierto (tipo Casagrande).

Consiste en un tubo delgado de PVC de 1/2"Ø, y una celda permeable de PVC de 2"Ø colocada en su parte inferior, (figuras 6.5 y 6.6 respectivamente).

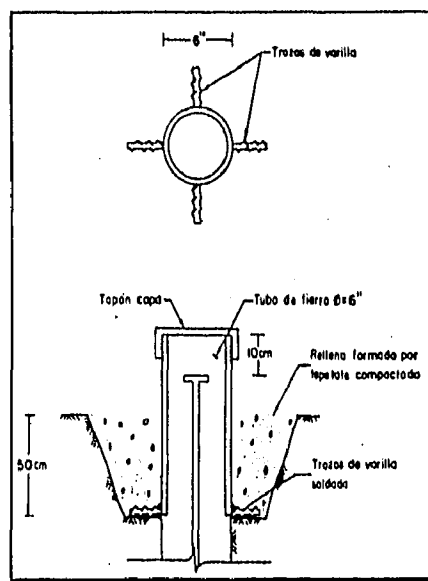


Figura 6.4.- Detalle de la protección del extremo superior de la tubería.

La celda permeable se encuentra perforada con diámetros que pueden ir de 1 a 10 mm. tanto en el sentido horizontal como en el vertical, para permitir el paso del agua. La celda es llenada con arena de diámetro mayor a 2 mm y protegida con un fieltro para confinar la arena dentro de la celda.

Para proteger la parte superior del piezómetro, se construye un registro de protección con su tapa, en cuyo interior se aloja la cabeza del tubo vertical (sobresaliendo 20 cm. sobre el nivel del terreno natural) con su etiqueta de identificación, indicando la profundidad de la celda y el nivel de referencia. En la figura 6.7 se ilustra muy brevemente la secuencia de instalación.

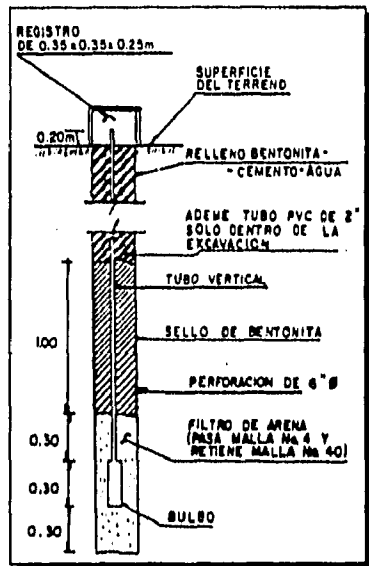


Figura 6.5.- Piezómetro abierto (tipo Casagrande).

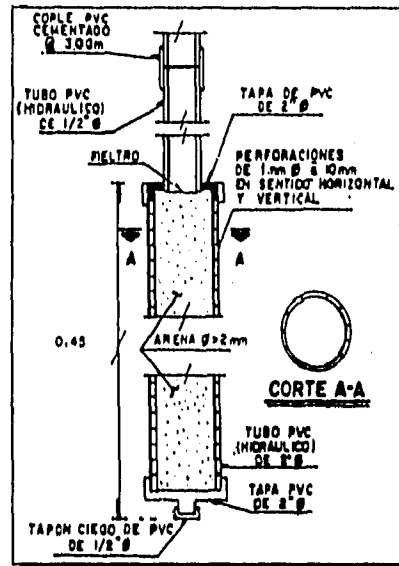
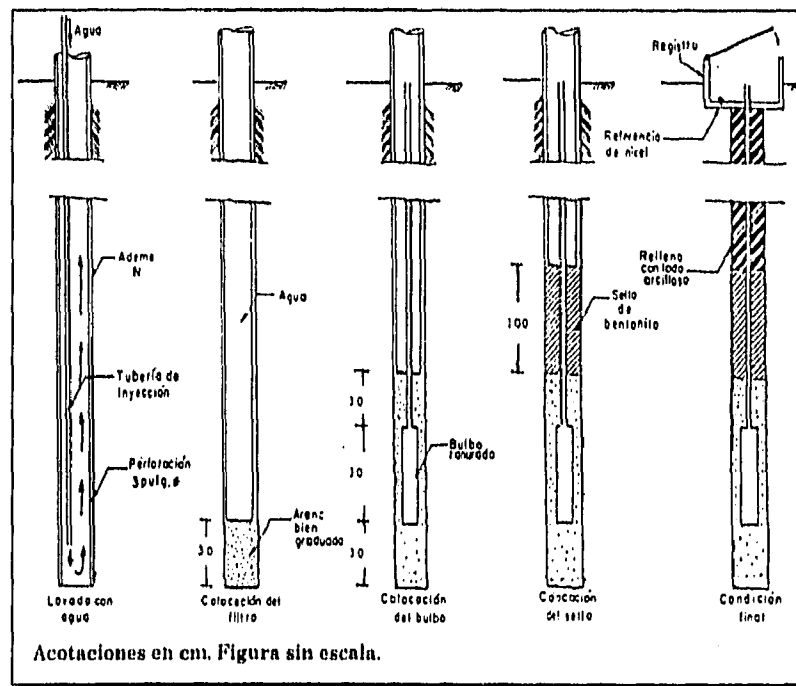


Figura 6.6.- Detalle de celda permeable (bulbo).



Acotaciones en cm. Figura sin escala.

Figura 6.7.- Instalación de piezómetros abiertos.

6.4.1.1.- Estaciones piezométricas externas.

Las estaciones piezométricas externas se instalan en el paño exterior de los muros tablestaca, y su función es la de medir el estado de esfuerzos inicial del sitio en cuestión, el flujo de agua y determinar el grado de influencia que ejerce el procedimiento constructivo sobre la presión de poro.

Estas estaciones están constituidas por dos piezómetros del tipo abierto y un tubo de observación, la profundidad de desplante de los piezómetros es de 11.50 m. y 17.00 m., debido a que a esa profundidad se encuentran los estratos permeables. Por su parte, el tubo de observación se desplanta a 5.00 m. de profundidad, (referidos estos niveles al nivel de terreno natural, N.T.N.).

6.4.1.2.- Estaciones piezométricas internas.

Las estaciones piezométricas internas se instalan en el paño interior de los muros tablestaca, como se muestra en figura 6.8, y su función es la de medir en el interior de la excavación, el radio de influencia de los pozos de bombeo y verificar el abatimiento piezométrico que generan los mismos.

Estas estaciones están constituidas por tres piezómetros del tipo abierto con profundidades de desplante de 3.00, 8.20 y 10.30 m. correspondientes a los estratos permeables.

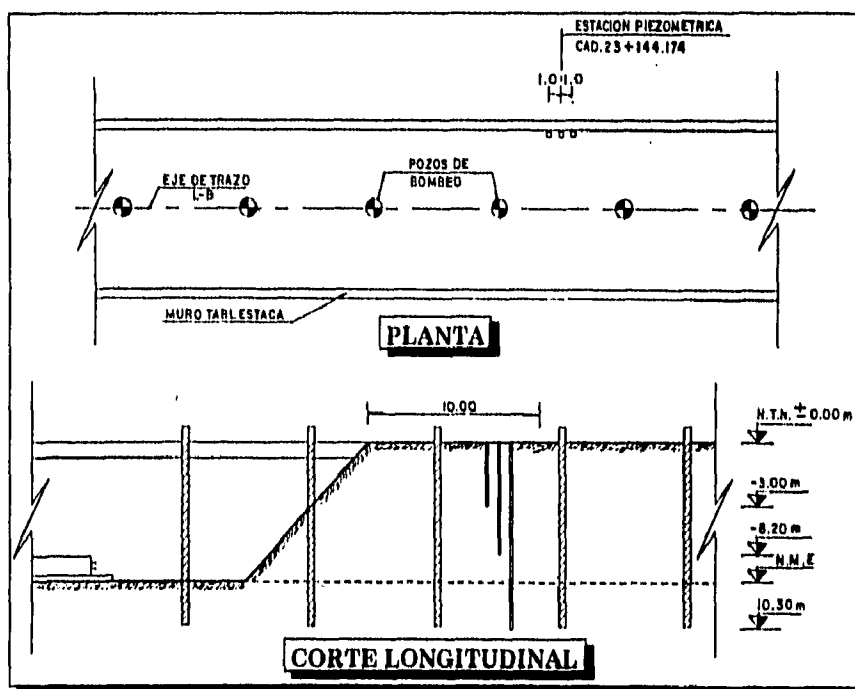


Figura 6.8.- Estación piezométrica interna.

6.4.2.- Tubo de observación del nivel freático.

El tubo de observación no es más que un ducto vertical de PVC desplantado a 5.00 m. de profundidad con un diámetro de 1" (esto en el caso de las estaciones piezométricas), protegido con un filtro geotextil, en la figura 6.9 se muestra el esquema con sus partes de un tubo de observación. En las perforaciones efectuadas para los pozos de bombeo, también es posible medir el nivel dinámico.

Para su instalación se requiere de una perforación de 5 a 10 cm. de diámetro, para después introducir el tubo protegido con una funda de polietileno o un tubo metálico para no ir a dañar el filtro; al llegar el tubo al fondo de la perforación, se retira la funda y se rellena la perforación con arena media y el último metro con bentonita.

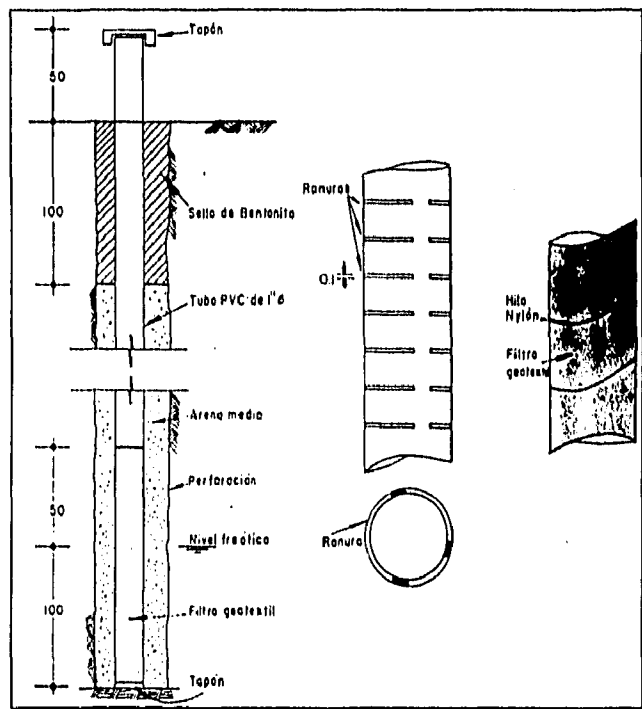


Figura 6.9.- Tubo de observación.

**6.4.3.- Datos a obtener.**

La especificación general de instrumentación (referencia 1) para los tramos y estaciones del metropolitano línea B, señala los datos o información mínima que se debe de registrar para cada aparato, en este caso, para los piezómetros y tubos de observación la información mínima es la siguiente:

• *Piezómetros:*

- a) Profundidad de desplante.
- b) Fecha de la toma de lecturas.
- c) Profundidad del N.A.F.
- d) Nivel piezométrico a la profundidad de desplante.
- e) Gráfica de profundidad del espejo de agua contra el tiempo, incluyendo eventos de obra.
- f) Fecha de instalación y de la primera lectura.
- g) Lecturas durante el periodo de estabilización de los dispositivos.

• *Tubos de observación:*

- a) Profundidad de desplante.
- b) Fecha de la toma de lecturas.
- c) Elevación del N.A.F.
- d) Gráfica del N.A.F. contra el tiempo, incluyendo eventos de obra.

**6.5.- INCLINÓMETROS.**

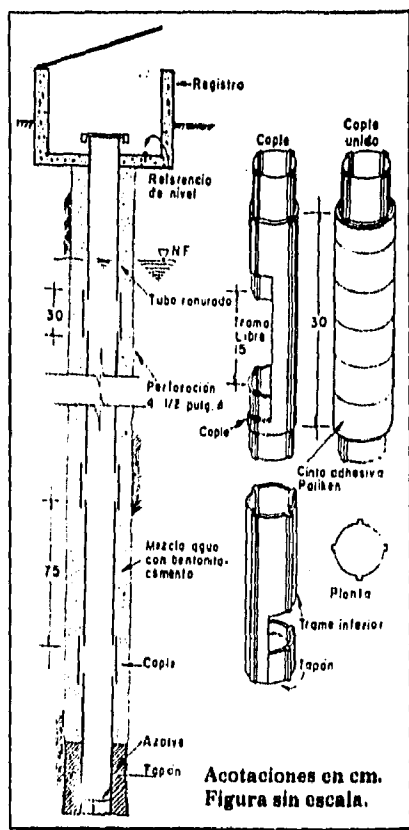
En forma general, el inclinómetro permite conocer la distribución con la profundidad de los desplazamientos horizontales que se presentan en la masa de suelo cercana a las excavaciones de la línea, y siendo más específicos lo anterior se puede ampliar diciendo que, el inclinómetro mide los movimientos transversales al eje de trazo (con una precisión de  $\pm 2$  mm. por cada 25 m. de profundidad), del subsuelo ubicado detrás de la estructura de contención (muros tablestaca) durante la excavación del núcleo y la

construcción del cajón de concreto, con el fin de verificar la oportunidad en la colocación del apuntalamiento respectivo, ratificando además, el número de niveles y/o la magnitud de las precargas de diseño, esto con referencia al troquelamiento, (referencia 5).

**6.5.1.- Descripción del dispositivo, (refs. 1 y 5).**

En forma general el dispositivo está conformado por cuatro partes principales, que son:

- 1) Ademe.- El ademe es una tubería telescópica flexible en tramos de 75 cm. de longitud y 7.77 cm. de diámetro interior. Los tramos se unen por medio de coples para alcanzar así la profundidad de proyecto especificada, cuyas dimensiones son 30 cm. de longitud y 8.79 cm. de diámetro interior, con la característica que su sección es del tipo de media caña teniendo un traslape de 7.5 cm. con la tubería; los coples son envueltos con cinta adhesiva en toda su longitud. La tubería posee 4 ranuras en su longitud que se encuentran diametralmente opuestas, cuya función es la de servir como una guía a la sonda, cuando se efectúan las mediciones. El ademe es instalado en una perforación vertical, empotrando su parte inferior en el fondo, fuera de la influencia de la excavación.
- 2) Sonda.- Es el instrumento de medición que aloja a la unidad sensible, la cual manda la señal eléctrica en proporción a la inclinación de la tubería.
- 3) Cable eléctrico graduado.- Tiene dos funciones que son, la de transmitir la señal eléctrica de la sonda hacia la unidad de control y lectura; y la de servir como referencia para conocer la profundidad de medición de la sonda.



**Figura 6.10.- Tubería para inclinómetro, (ref. 5).**



- 4) Unidad de control y lectura.- Cuya función es la de transformar las señales eléctricas provenientes del cable eléctrico graduado, en lecturas digitales o analógicas para registrarlas e interpretarlas posteriormente. Además es la encargada de generar la suficiente energía para poder activar la sonda.

En la figura 6.10 se muestra un corte y secciones de la tubería empleada para inclinómetro.

### 6.5.2.- Criterios de instalación.

Los inclinómetros se instalan en los lugares donde los empujes horizontales de los muros tableros dan como resultado factores críticos de estabilidad, y donde existan estructuras de importancia o que puedan sufrir daños por asentamientos.

La profundidad de la tubería para el inclinómetro se determina mediante la estratigrafía y el análisis de las posibles superficies de falla, para asegurar así el empotramiento del ademe.

El material empleado para confinar el ademe se determina en base a el tipo de suelo existente (zonificación geotécnica), así tenemos que, para la zona del lago el material de relleno empleado consiste en una mezcla de bentonita-cemento-agua.

Por último, la instalación de los inclinómetros se verifica antes de la realización de excavaciones.

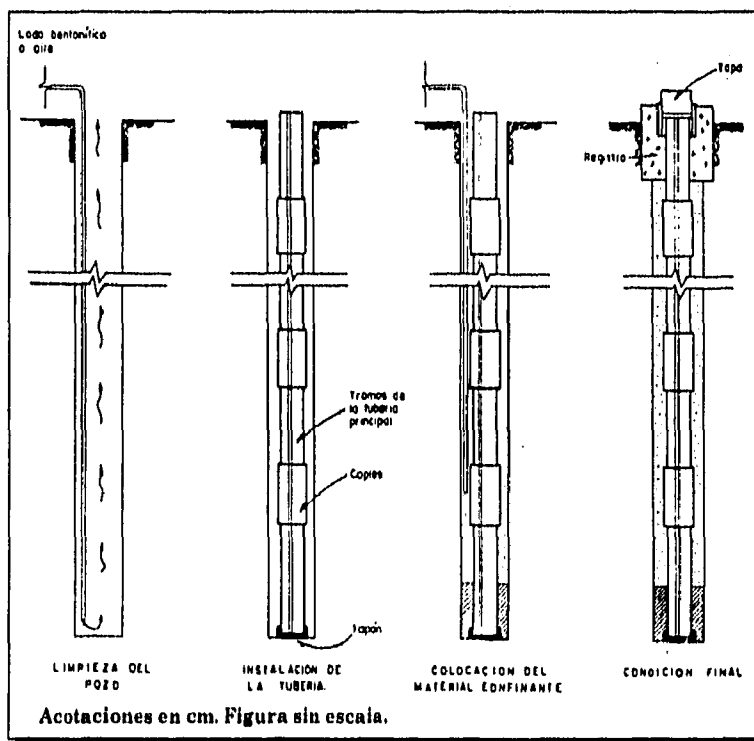


Figura 6.11.- Instalación de tubería para inclinómetros.

### 6.5.3.- Datos a obtener.

La especificación general de instrumentación (referencia 1) para los tramos y estaciones del metropolitano línea B, señala los datos o información mínima que se debe de registrar para cada aparato, en este caso, para los inclinómetros la información mínima es la siguiente:

- Fecha de la toma de lecturas.
- Fecha de instalación del dispositivo.

**CAPÍTULO 6**

c) Gráfica de la deformación horizontal contra la profundidad, incluyendo eventos de obra, tales como la excavación tanto del núcleo como de la zanjas para los muros, troquelamientos, estructuración del cajón, inyecciones, etc.

**6.6.- VALORES MÁXIMOS ADMISIBLES DE DEFORMACIÓN.**








Los valores teóricos máximos de deformación señalados en la especificación se indican en la tabla 6.2, aclarando que la finalidad de las lecturas en las estaciones piezométricas es la de verificar la ausencia de abatimiento del nivel freático en el exterior del cajón del metro, para en caso contrario, corregir tal situación.

INSTRUMENTO	CORTO PLAZO (Durante la excavación y estructuración del cajón)	LARGO PLAZO
<b>PALOMAS.</b>		
Del 22+796.517 al 23+025.000	- 2.0 cm.	- 2.0 cm.
Del 23+025.000 al 23+291.614	± 1.0 cm.	- 2.0 cm.
<b>INCLINÓMETRO.</b>	12.0 cm.	.....
<b>BANCO DE NIVEL.</b>	+ 15.0 cm.	.....

Tabla 6.2.- Valores teóricos máximos de deformación, (ref. 5).

**6.7.- LOCALIZACIÓN DE LA INSTRUMENTACIÓN EN EL TRAMO BUENAVISTA - GUERRERO.**

En la figura 6.12 se muestra el plano general de localización de la instrumentación para el presente tramo, (ref. 3).

SIMBOLOGÍA.	
	MURO TABLESTACA.
	POZO.
	PALOMAS.
	PLOMOS.
	INCLINÓMETRO.
	ESTACIÓN PIEZOMÉTRICA.
	BANCO DE NIVEL SEMI-PROFUNDO.

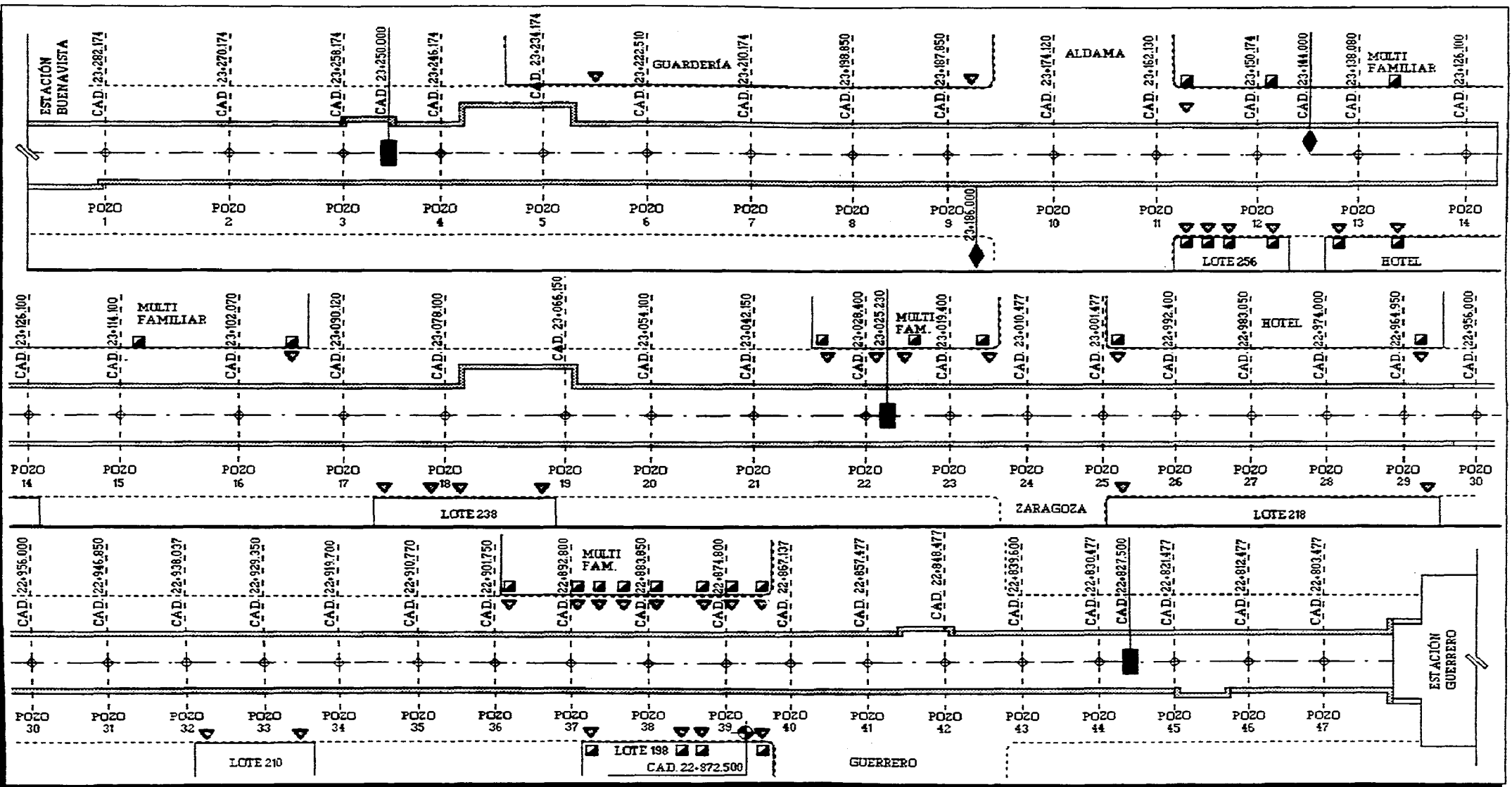


Figura 6.12.- Instrumentación del tramo Buenavista-Guerrero.

REFERENCIAS.

- 1.- ICA. Especificaciones de mecánica de suelos para el metropolitano línea B.
- 2.- Merritt, Frederick S. y Kurtz P.E., Max. Guía del ingeniero civil. Traducción del inglés: José E. De La Cera Alonso, Fernando Fournier Montiel y Luis Fernando Ulloa Vergara. Editorial McGraw-Hill. 1ª edición. Abril de 1989. México D.F.
- 3.- O.P.S.A. Boletines de instrumentación del tramo Buenavista-Garibaldi del Metropolitano línea B.
- 4.- Rico Rodríguez, Alfonso y Del Castillo Mejía, Hermilo. La Ingeniería de suelos en las vías terrestres. Volumen 2. (Carreteras, Ferrocarriles y Aeropistas). Editorial LIMUSA S.A. 1ª edición, 7ª reimpresión. Julio de 1992. México D.F. 643 páginas.
- 5.- Tamez, E. Santoyo, E. Mooser, F. y Gutiérrez C. E. Manual de diseño geotécnico. Volumen 1. (Estudios geotécnicos y diseño del metro en cajón). COVITUR. Agosto de 1987. México D.F. 190 páginas.

# CONCLUSIONES

Partiendo de la comparación de resultados entre la demanda de transporte y el número de unidades destinadas a tal efecto, se observa que existe una mala distribución en la demanda del transporte, ya que los sistemas de alta y mediana capacidad (como lo son el Metro, autobuses, microbuses, etc.) que representan aproximadamente una vigésima parte del parque vehicular, transportan a un porcentaje considerable de usuarios que abarcan casi a tres cuartas partes de la demanda; mientras que la cuarta parte restante de usuarios, se mueven en vehículos automotores que constituyen el 95% del parque vehicular de la ciudad.

Por consiguiente, es recomendable que los nuevos programas de transporte le den prioridad al transporte masivo sobre el individual, efectuando una reestructuración y viendo a este desde un contexto metropolitano que integre a las delegaciones del Distrito Federal y a los municipios conurbados del estado de México, fomentando a la vez, la creación de nuevas líneas de transportación masiva y en el caso del Metro revisar los programas de ampliación y construcción de nuevas líneas, así como efectuar la conclusión de aquellas que se encuentran incompletas.

En cuanto a las técnicas y procesos constructivos, éstas deben de ser revisadas y optimizadas, para mantener una tecnología adecuada en las diferentes ramas de la ingeniería de las que se auxilia la obra Metro, logrando además, una buena calidad en la obra terminada; valiéndose tanto de la investigación, como de las experiencias alcanzadas en la construcción de líneas anteriores, no sólo dentro de nuestra ciudad sino también de otras ciudades, que emplean procedimientos similares a los nuestros, por las características del terreno en el que se encuentran.

El conocimiento que sobre el subsuelo se debe tener cuando se realizan obras de esta magnitud, resulta de gran importancia para lograr un adecuado diseño del proyecto en cuestión; ya que de la información obtenida de los sondeos de exploración depende la magnitud de las etapas de excavación, los tiempos de bombeo, los niveles de troquelamiento, el diseño y dimensiones de la estructura, así como el programa de instrumentación. Es por eso, que dentro de las diferentes pruebas e instrumentos empleados para realizar los sondeos, el cono eléctrico en las arcillas del Valle de México ha demostrado su eficacia y precisión en los resultados obtenidos de la resistencia al esfuerzo cortante en dicha arcillas, de ahí que el empleo del cono se haga extensivo a lo largo de la línea B por localizarse su eje de trazo en la zona del Lago. Los resultados de estas pruebas proporcionan además información relevante para la actualización de la zonificación geotécnica del Valle de México, ya que la extracción de agua del subsuelo genera cierta consolidación de los estratos, misma que origina un cambio en la resistencia al corte de estos últimos.

El objetivo principal del tuneleo falso, que era el de no suspender la circulación en el eje 1 poniente Guerrero durante la excavación y construcción del cajón; se puede afirmar que se cumplió conforme a lo planeado. Si bien este procedimiento por un lado eleva los costos al efectuarse la construcción de una losa "extra", por el otro, el empleo de rellenos aligerados representa un pequeño ahorro. Pero los mayores beneficios son alcanzados en forma directa por la ciudadanía, ya que el mantener parcialmente abierta la vialidad en la primera fase del tuneleo y totalmente abierta en la segunda fase, permite ahorros sustanciales en los tiempos de transportación y de gastos en combustibles, con la consecuente disminución en las emisiones contaminantes, que en caso contrario se presentarían si la vialidad fuera cerrada en su totalidad.

Este procedimiento no se ha hecho extensivo a lo largo de la línea, entre otras cosas por la problemática que plantea realizarlo en la zona de estaciones y el incremento en los costos originado por la modificación de los procedimientos constructivos; ya que se pasaría de una excavación a cielo abierto a una de tuneleo, siendo ésta última complicada por el tipo de subsuelo existente en la Ciudad de México en la denominada zona del Lago, de ahí que sólo se le emplee en los cruceros importantes.

7

Por último, la instrumentación en este tipo de obras se plantea como un excelente medio para verificar el comportamiento de la estructura durante la etapa de construcción, pudiendo mantener los rangos de deformación dentro de los límites proyectados.

# GLOSARIO

**AASHTO.**- American Association of State Highway and Transportation Officials.

**Ademe.**- Elementos de soporte usados en excavaciones o perforaciones para garantizar la estabilidad de las paredes durante el tiempo necesario para la construcción. En ocasiones se denomina con este término al soporte que se proporciona por medio del lodo bentonítico a pozos y trincheras.

**Aditivo acelerante de fraguado.**- Adelanta el fraguado del concreto y el desarrollo de sus primeras resistencias.

**Aditivo fluidificante.**- Aumentan la trabajabilidad del concreto sin variar la relación agua-cemento.

**Aditivo para concreto.**- Material distinto al agua, agregados y cemento hidráulico, que se usa como ingrediente en concretos o morteros para modificar sus propiedades en tal forma que las hagan más adecuadas para las condiciones de trabajo que se requieran; se añaden antes o durante el mezclado

**Aditivo retardante.**- Produce retraso en el fraguado del concreto

**Almeja.**- Herramienta de excavación con la cual se equipa a dragas y retroexcavadoras, empleada para manejar materiales sueltos como tierra, grava, arena y piedra triturada; así como para excavar o sacar material de lumbreras, zanjas para ataguías, para muros Milán, etc.

**Aluvial.**- Depósitos formados por la acción de corrientes de agua.

**A.M.C.M.**- Área Metropolitana de la Ciudad de México, delimitación territorial elaborada por el I.N.E.G.I., que incluye a las 16 delegaciones del D.F. y a 27 municipios conurbados del estado de México; basándose en el criterio de continuidad urbana parcial o total de los municipios y delegaciones, así como en la proximidad y comunicación con la mancha urbana.

**Andén.**- Área de las estaciones cercana a las vías que está destinada al tránsito de los pasajeros para abordar o descender de los trenes.

**Asfalto rebajado.**- Mezclas de cemento asfáltico con disolventes de la destilación del petróleo, tales como gasolina, keroseno y aceites semivolátiles.

**Ataguía.**- Estructura de protección para resistir empujes de tierra. También, estructura hermética que permite, mediante bombeo, el abatimiento del agua para trabajar y construir en seco la obra.

**Atarjea.**- Conductos de servicio público que principalmente recogen agua del albañal.

**Atraque.**- Medios de anclaje entre la tubería, accesorios y pared de la zanja, construidos preferentemente de concreto para evitar el movimiento de la tubería por efecto del empuje generado por la presión existente en las líneas de agua potable.

**Banco de nivel.**- Punto fijo e inmóvil de referencia que sirve de punto de partida para efectuar nivelaciones superficiales.

**Bancos de nivel semiprofundo.**- Dispositivo que permite conocer los movimientos verticales causados por las expansiones y hundimientos generales en el fondo de las excavaciones a cielo abierto.

**Bandeo de tránsito.**- Desvío provisional del flujo vehicular.

**Barra Kelly.**- Equipo telescópico que se acopla a dragas, empleado para guiar y profundizar las almejas hasta el nivel requerido en las excavaciones de muros para ataguías, muros Milán, etc.

**Barril Denison.**- Herramienta para el muestreo relativamente inalterado de suelos arcillosos duros, limos compactos y limos cementados con pocas gravas.

**Base.**- Superficie encargada de soportar adecuadamente las cargas y distribuir los esfuerzos a las capas inferiores en forma adecuada.

**Bentonita.**- Arcilla montmorilonítica de alto poder de hidratación y consecuente expansión.

**Bombeo electrosmótico.**- Consiste en inducir una corriente eléctrica a el suelo por medio de un electrodo positivo al electrodo negativo (pozo de bombeo), lo cual provoca que el agua del subsuelo aumente su velocidad de migración del electrodo positivo al negativo; logrando extraer más rápido el agua mediante dispositivos de bombeo.

**Bombeo mediante pozos con bombas eyectoras.**- Sistema que permite abatir el nivel freático en suelos permeables, con pozos previamente perforados y bombas eyectoras que extraen el agua.

**Bombeo por gravedad.**- Sistema para abatir el nivel freático en suelos arcillo-arenosos, a base de canalizar el agua con la debida pendiente hacia cárcamos de bombeo.

**Brocal.**- Piezas en forma de ángulo recto que tienen la finalidad de retener los rellenos suelos superficiales y de servir de guía a las herramientas de excavación, utilizadas en la construcción de las zanjas que alojarán a los muros.

**Cadenamiento.**- Medida que tomada a partir de un punto fijo preestablecido, nos permite conocer las longitudes.

**Cajón con tablestaca de acompañamiento.**- Estructura en la cual los muros tablestaca funcionan como elementos estructurales temporales, siendo de utilidad en la etapa de excavación y como lastre durante la vida útil de la construcción.

**Cajón con tablestaca estructural.**- Formado por tablestacas unidas estructuralmente a las losa de fondo y techo del cajón.

**Cajón convencional.**- Se construye en excavaciones a cielo abierto con taludes longitudinales, sin el empleo de tablestacas.

**Cajón de Milán.**- Vea *tuneleo falso*.

**Cajón subterráneo profundo.**- Estructura en la cual la distancia existente entre el nivel de

sub-rasante y el de remate de tablestacas, es mayor de 7.50 m. aproximadamente.

**Cajón subterráneo superficial.**- Estructura en la cual la distancia existente entre el nivel de sub-rasante y el de remate de tablestacas, es menor de 7.50 m. aproximadamente.

**Cárcamo de bombeo.**- Depósito empleado para la recolección de aguas y su bombeo al sistema de alcantarillado.

**Carpeta asfáltica.**- La formada por riegos de material asfáltico, cuya función es la de proporcionar una superficie estable, uniforme y de textura apropiada.

**Cemento asfáltico.**- Residuos sólidos de la destilación del petróleo

**Cemento Portland.**- Conglomerado hidráulico que resulta de la pulverización del clínker frío, al cual durante la molienda se le agrega yeso para controlar el fraguado.

**Cimbra.**- Obra falsa que sirve para moldear y soportar el concreto fresco para proporcionar la forma indicada en el proyecto.

**Colector.**- Conducto troncal que da el sentido del escurrimiento y principalmente recoge las aguas de las atarjeas y de los subcolectores.

**Compactación.**- Operación mecánica para reducir el volumen de vacíos entre las partículas sólidas de un material, con el objeto de aumentar su peso volumétrico y su capacidad de carga.

**Concreto clase 1.**- Con características especiales que proporcionan mayor seguridad desde el punto de vista sísmico, su peso volumétrico mínimo es de 2200kg/m<sup>3</sup>.

**Concreto clase 2.**- De peso volumétrico superior a 1900 kg/m<sup>3</sup>.

**Concreto hidráulico.**- Mezcla y combinación del cemento Portland, agregados pétreos seleccionados, agua y adicionantes en su caso, en dosificación adecuada, que al fraguar adquiere características previamente fijadas.

**Cono eléctrico.**- Dispositivo sensible que permite conocer las variaciones con la profundidad, de las resistencias a la penetración de pun-



ta y fricción del cono; con lo cual se pueden estimar las resistencias al corte de los suelos.

**Consolidación.**- Reducción gradual en volumen de un suelo 100% saturado de baja permeabilidad, debido al drenaje del agua que se encuentra en los poros, como consecuencia del incremento de las cargas sobre el suelo.

**COVITUR.**- Comisión de Vialidad y Transporte Urbano, que a partir de septiembre de 1995 cambia a D.G.C.O.S.T.C., Dirección General de Construcción de Obras del Sistema de Transporte Colectivo.

**Curado.**- Aplicación a las superficies expuestas del concreto hidráulico, de agua, materiales húmedos o películas impermeables, para evitar que se evapore el agua interna de mezclado y lograr así la completa hidratación de los compuestos del cemento Portland.

**Delegación.**- Vea *Municipio*.

**Eje de trazo.**- Línea virtual que sirve de guía para dar posición a los ejes de construcción de la obra civil y electromecánica.

**Equipo Tremie.**- Consta de una serie de tubos de acero, un embudo y un tapón; que se emplean para efectuar colados bajo agua o lodos especiales como los bentoníticos.

**Especificación.**- Conjunto de disposiciones, requisitos e instrucciones particulares que se fijan o dictan para la ejecución de obras y que deben aplicarse ya sea para el estudio, para el proyecto y/o para la ejecución y equipamiento de una obra terminada, la puesta en servicio, su conservación o mantenimiento y la supervisión de estos trabajos.

**Estación de correspondencia.**- Permite a los pasajeros transbordar de una línea a otra.

**Estación.**- Conjunto de instalaciones que permiten al usuario ingresar al sistema para abordar los trenes.

**Estratigrafía.**- Determinación del espesor, características y origen de los estratos significativos del subsuelo.

**Estrato.**- Cada una de las capas del terreno.

**Estrobo.**- Cable de acero empleado para sujetar los troqueles al armado de las tablestacas.

**Estudio geotécnico.**- Secuencia ordenada de las etapas de trabajo, que incluye la exploración geotécnica, el diseño geotécnico preliminar, el muestreo inalterado selectivo, las pruebas de laboratorio, el diseño geotécnico definitivo y el comportamiento de la estructura; para determinar la solución o soluciones estructurales adecuadas para la construcción del Metro.

**Filtración.**- Paso de líquido a través de un material permeable.

**Galería.**- Elemento de concreto reforzado, empleado para la protección de tuberías y colectores que cruzan por encima del cajón del Metro.

**Gálibo.**- Dimensiones mínimas que en sección transversal debe tener el cajón del Metro para albergar los carros, el tipo de vía, etc.

**Geotécnia.**- Aplicación de los elementos básicos del suelo y de la ingeniería mecánica, para la evaluación del comportamiento de los materiales térreos, generalmente usados en la investigación, diseño y construcción.

**Glaciación.**- Periodo de multiplicación y extensión de los glaciares en ciertas regiones del globo.

**Glaciar.**- Masa de hielo de origen atmosférico.

**Granulometría.**- Separación del suelo en sus diferentes tamaños.

**Grúa.**- Máquina que sirve para levantar pesos y llevarlos de un punto a otro, dentro del círculo que su brazo describe o del movimiento que puede tener.

**I.N.E.G.I.**- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática.

**In situ.**- Locución latina que significa "En el lugar".

**Inclinómetro.**- Equipo de medición que permite conocer la distribución con respecto a la profundidad de los desplazamientos horizontales que se presentan en la masa de suelo cercana a las excavaciones.

**Instrumentación.**- Serie de dispositivos y referencias topográficas instaladas dentro y fuera de la zona de obra, en el terreno natural y en las estructuras vecinas, incluyendo también los trabajos de campo y gabinete, que se emplean para medir previamente, durante y después de la ejecución de la obra, los movimientos horizontales, verticales, los esfuerzos en el suelo y las estructuras aledañas, por efecto de la construcción, para evitar posibles daños y como retroalimentación.

**Interceptor.**- Conducto que capta en forma parcial o total el gasto de dos o más colectores.

**Junta Gibault.**- Pieza de fierro fundido que permite conectar por una de sus bocas una extremidad de fierro fundido y por la otra, una punta de tubería de asbesto-cemento.

**L.R.T.**- Light Railroad Transportation, también Transporte Férreo Ligero o más comúnmente, tren ligero.

**Límite líquido.**- Frontera entre los estados semilíquido y plástico. Corresponde a una resistencia al corte de 25 gr/cm<sup>2</sup> en un suelo.

**Límite plástico.**- Contenido de agua a partir del cual el suelo se empieza a agrietar y a desmoronar cuando se remoldea manualmente en forma de rollito de 3 mm. de diámetro.

**Línea del Metro.**- Conjunto formado por las vías y pistas para la circulación de los trenes, los accesorios de vía, los dispositivos de operación y control de trenes, su estructura de apoyo, las estaciones y demás instalaciones auxiliares.

**Lodo bentonítico.**- Suspensión estable de bentonita sódica con agua, de tipo tixotrópico por presentar resistencia al corte en reposo y no presentarla cuando está en movimiento.

**Lodo estabilizador.**- Mezcla acuosa cuya función es estabilizar las paredes de la excavación e impedir la entrada del agua freática, y de caídas por desprendimientos, deslaves y/o derrumbes en las paredes de la excavación.

**Mecánica de Suelos.**- Es la aplicación de las leyes de la Mecánica y de la Hidráulica a los problemas de ingeniería que tratan con sedimentos y otras acumulaciones no consolidadas de partículas sólidas, producidas por la descomposición mecánica o química de las rocas, inde-

pendientemente de que tengan o no contenido de materia orgánica.

**Metro.**- Contracción convencional de Metropolitano, con el que se designa al Sistema de Transporte Colectivo del tren metropolitano.

**Morrenas.**- Materiales arrastrados tales como árboles, piedras, entre otros; por la acción de los glaciares.

**Mortero.**- Mezcla de agregado fino, cemento y agua que endurece adquiriendo características de resistencia previamente establecidas, la cual puede emplearse como producto para inyectarse en el subsuelo.

**Municipio.**- Base de la división territorial y de la organización político-administrativa de las entidades federativas. En el caso del Distrito Federal la base de la división territorial y de la organización político-administrativa es la delegación política.

**Muro Milán.**- Vea *muro tablestaca*.

**Muro tablestaca.**- Muro de contención de concreto armado, colado "in situ", en una trinchera excavada mediante un cucharón de almeja y estabilizado con lodo bentonítico.

**N.A.F.**- Nivel de aguas freáticas, límite entre la zona de aireación y de saturación del suelo, abajo de dicho nivel los espacios entre las partículas de suelo están ocupadas totalmente por agua.

**N.D.**- Nivel de desplante.

**N.M.E.**- Nivel máximo de excavación.

**N.T.N.**- Nivel de terreno natural.

**Nicho de aparato.**- Espacio limitado ubicado en las orillas del cajón del Metro, para alojar los motores de cambio de vía.

**Nivel de extrados.**- Lecho superior de la losa de techo del cajón.

**Nivel de intrados.**- Lecho inferior de la losa de techo del cajón.

**Obras inducidas.**- Conjunto de actividades programadas, relativas a dar solución a todas aquellas interferencias que se presentan para

llevar a cabo la construcción de una obra determinada.

**P.V.S.M.-** Peso volumétrico seco máximo.

**Paleoclimático.-** Climas antiguos.

**Paleosuelos.-** Suelos antiguos.

**Paramento.-** Límite existente entre la vialidad y los predios adyacentes.

**Pasarela de correspondencia.-** Conducto para el paso de pasajeros de un andén a otro, en las estaciones de correspondencia.

**Pavimento.-** Estructura constituida por varias capas de materiales que tiene por objeto permitir el tránsito de vehículos en forma cómoda, segura y eficiente con un costo mínimo.

**Penetrómetro.-** Tubo de acero con un extremo afilado, que se hincan en el terreno con la finalidad de determinar el número de golpes necesarios para que un martinete de 63.5 kg. (140 lb.) que cae desde una altura de 76 cm. (30 pulg.), lo haga penetrar 30 cm. (1 pie); esto dentro de la prueba de penetración estándar.

**Perfil estratigráfico.-** Corte del terreno que muestra la sucesión y la forma de las capas geológicas.

**Permeabilidad.-** Capacidad de un suelo para dejar pasar el agua.

**Piezómetro abierto.-** Dispositivo empleado para determinar la presión de poro de un lugar a una cierta profundidad.

**Polipasto eléctrico.-** Aparato empleado para elevar y cargar.

**Pozo de visita.-** Estructuras hidráulico-sanitarias que se erigen para la inspección y limpieza de la red de alcantarillado.

**Presión de flotación.-** Presión hidrostática al nivel del fondo de excavación.

**Presión de poro.-** Presión existente en los poros del suelo, en exceso a la hidrostática.

**Prueba Marshall.-** Empleada para el control de mezclas asfálticas que emplean materiales pétreos con tamaño máximo de 25 mm.; consis-

tente en la elaboración de especímenes cilíndricos para determinarles su peso volumétrico, porcentaje de vacíos, estabilidad y deformación al alcanzarse la máxima resistencia del espécimen.

**Puenteo.-** Estructura que se coloca para salvar un claro, en forma parcial o definitiva.

**Puntal.-** Vea *troquel*.

**PVC.-** Cloruro de polivinilo.

**Relleno.-** Material proveniente de excavaciones o bancos de préstamo, empleado para tapar o llenar oquedades dejadas por excavaciones para estructuras, obras de drenaje, etc., para su protección.

**Revenimiento.-** Medida convencional de trabajabilidad del concreto.

**S.T.C.-** Sistema de Transporte Colectivo.

**Sobrecompensación.-** Descarga neta de la masa de suelo bajo el cajón, originada por la diferencia entre el peso de la tierra desplazada por la estructura y el peso propio de ésta, incluyendo plantilla de concreto, balasto y rellenos artificiales.

**Solución elevada.-** El apoyo de los elementos de circulación de los trenes es una estructura formada por zapatas de concreto reforzado, apoyadas sobre pilotes de fricción, una sola hilera de columnas coladas en sitio, y vigas de concreto postensado con un claro de 35 a 45 m.

**Solución en túnel.-** Estructura que aloja las instalaciones en túneles sencillos o dobles, excavados a una profundidad que permite realizar un procedimiento constructivo seguro.

**Solución subterránea.-** Estructura formada a base de un cajón rectangular de concreto reforzado, construido en excavaciones a cielo abierto y desplantado lo más cerca de la superficie.

**Solución superficial.-** Estructura construida a base de una losa de fondo de concreto reforzado apoyada sobre terreno previamente mejorado y dos muretes laterales de seguridad y confinamiento que se desplanta a una profundidad no mayor de 1.30 m., lo cual da como resultado que los trenes circulen aproximadamente al nivel del terreno.

**Sondeo.**- Exploración del subsuelo para su análisis.

**Sub-base.**- Superficie encargada de transmitir los esfuerzos a la capa sub-rasante, además de funcionar como elemento de transición entre la base y la sub-rasante, al reducir costos.

**Sub-rasante.**- Superficie que sirve de apoyo al pavimento.

**Subpresión.**- Presión ejercida por estratos profundos de suelo no cohesivo (arenas), sobre el fondo de la excavación, que puede llevar a levantar a ésta última por las fuerzas de filtración.

**Suelo.**- Agregado de partículas minerales, aire, agua y materia orgánica.

**Tablero.**- Ver *troquel*.

**Talud.**- Superficie inclinada o vertical de un corte, de un terraplén o de un muro.

**Torcómetro.**- Dispositivo provisto de un juego de navajas que sirve para estimar la resistencia al esfuerzo cortante de suelo arcillosos.

**Troquel.**- Elemento con resistencia a cargas de compresión longitudinal, con el cual se sostiene un muro, pared o parte de un edificio para asegurar su estabilidad temporalmente.

**Tubo de observación del nivel freático.**- Dispositivo empleado para determinar la posición del nivel freático y sus variaciones en los periodos de lluvia y sequía.

**Tubo embudo.**- Vea *equipo Tremie*.

**Tubo Shelby.**- Tubo de acero empleado para obtener muestras relativamente inalteradas de suelos blandos cohesivos como las arcillas.

**Tubos-junta.**- Tubos metálicos con sección macho y hembra empleados como cimbra para los muros tablestaca.

**Túnel falso.**- Procedimiento de construcción empleado en zonas de alta intensidad vehicular, en las cuales no es posible suspender el tránsito de vehículos en forma temporal, cuando se pretende construir estructuras subterráneas en cajón como pasos peatonales y vehiculares a desnivel, cajones del Metro, etc. Para lo cual se

bandeas el flujo por zonas muy próximas a donde se realizan los trabajos de excavación y construcción; disminuyendo las molestias a la población, ya que el pavimento se restituye en poco tiempo, afectando también en menor medida el aspecto urbano.

**Túnel.**- Pasaje construido por debajo del terreno o del agua, de forma esencialmente cilíndrica y cuya alineación axial no difiere mucho de la horizontal, con dimensiones suficientes para permitir el paso de maquinaria y vehículos, excavado y revestido desde el interior o por otros medios.

**U.S.M.**- Unidad de Soporte Múltiple, permite la integración de semáforos vehiculares y peatonales, señalización restrictiva, preventiva, informativa, servicios varios como son teléfonos públicos, buzones, basureros, mapas y luminarias, además de que soportan cables para trolebuses; todo esto en un solo elemento.

**V.R.S.**- Valor relativo de soporte, carga requerida para efectuar una penetración de 25.4 mm. referida a una carga de 1360 kg., se expresa en por ciento.

**Volumen vehicular.**- Cantidad de vehículos por hora que pasan por un punto determinado.

**Z.M.C.M.**- Zona Metropolitana de la Ciudad de México, delimitación territorial conformada por el D.F., 53 municipios mexiquenses y uno del estado de Hidalgo; para prevenir y orientar el crecimiento de la ciudad a largo plazo.

**Zonificación geotécnica.**- Delimitación de las áreas, en donde los materiales que conforman el subsuelo presentan propiedades semejantes de compresibilidad y resistencia.

# BIBLIOGRAFÍA

- 1.- Características geológicas y geotécnicas del Valle de México. Federico Mooser, Enrique Támez, Enrique Santoyo, Ernesto Holguín y Carlos E. Gutiérrez. Editor M. Roberto Ocampo Franco COVITUR. 1ª reimpresión. 1990. México D.F. 39 páginas.
- 2.- Crecimiento de puesta en operación de redes de ferrocarriles urbanos. M. Roberto Ocampo Franco. COVITUR. Abril 1993. México, D.F., 26 páginas y anexo.
- 3.- El cono en la exploración geotécnica. Enrique Santoyo, Riqing Lin Xue, Efraín Ovand. Editor Carlos E. Gutiérrez. TGC Geotécnica S.A. 1989. 323 páginas.
- 4.- EL METRO. Una solución al problema del transporte urbano. Jorge Espinoza Ulloa. Representaciones y Servicios de Ingeniería. S.A. 1ª edición. 28 de Noviembre de 1975. México, D.F. 143 páginas.
- 5.- El Proyecto de la Obra Civil del Metro. Ing. Carlos Enrique Castañeda N. Revista *Ingeniería*. Volumen LII. Número 1. Año 1982. Páginas 127-149. Facultad de Ingeniería U.N.A.M. México D.F.
- 6.- El subsuelo de la Ciudad de México. Raúl J. Marsal y Marcos Mazari. U.N.A.M. Facultad de Ingeniería. 2ª edición. Febrero de 1962. México D.F. 614 páginas.
- 7.- Especificaciones para el proyecto y construcción de las líneas del metro de la Ciudad de México. Volumen 2. (Construcción e instalaciones). Volumen 3. (Calidad de los materiales. Calidad de equipos y sistemas). COVITUR. Enero de 1987. México D.F.
- 8.- Especificaciones y planos para la construcción del Metropolitano línea B ICA.
- 9.- Hacia un plan rector de transporte para la zona metropolitana de la Ciudad de México. (Seminario), Memorias. Comisión de Vialidad y Tránsito Urbanos de la A.R.D.F. Secretaría de Transportes y Vialidad del D.D.F. Museo Tecnológico de la C.F.E. Ciudad de México 17, 18 y 19 de Mayo 1995. Julio 1995. México, D.F. 262 páginas.
- 10.- Importancia y descripción del proceso constructivo de las obras de ampliación de la estación Balderas del metro. Tesis profesional. Roberto Gómez Stauder. Facultad de Ingeniería, U.N.A.M. 1980. 149 páginas.
- 11.- La Ingeniería de suelos en las vías terrestres. Volumen 2. (Carreteras, Ferrocarriles y Aeropistas). Alfonso Rico Rodríguez y Hermilo Del Castillo Mejía. Editorial LIMUSA S.A. 1ª edición. 7ª reimpresión. Julio de 1992. México D.F. 643 páginas.
- 12.- Manual de diseño geotécnico. Volumen 1. (Estudios geotécnicos y diseño del metro en cajón). Enrique Támez, Enrique Santoyo, Federico Mooser, Carlos E. Gutiérrez. COVITUR. Agosto de 1987. México D.F. 190 páginas.
- 13.- Mecánica de Suelos. Tomo III. Flujo de agua en suelos. Eulalio Juárez Badillo y Alfonso Rico Rodríguez. Editorial LIMUSA S.A. 1ª edición. 10ª reimpresión. Enero de 1991. México D.F. 414 páginas.
- 14.- Muros pantalla. Técnicas de realización. Métodos de cálculo. Georges Schneebeli. Traducción del francés: Francisco Javier Calveras Marles. Editores técnicos asociados S.A. 1ª edición, 1974. Barcelona, España. 221 páginas.

- 7
- 15.-Nuevos caminos para el metro (Avances tecnológicos y optimización de recursos en la construcción 1982-1988). D.D.F., COVITUR, Secretaría General de Obras. Editorial Colinas de Buen. 81 páginas.
  - 16.-Plan Maestro del Metro. Ing. Francisco Noreña Casado, Ing. José Carreño Romani y Lic. Ernesto Negrete García. Revista *Ingeniería*. Volumen LII. Número 1. Año 1982. Páginas 115-126. Facultad de Ingeniería U.N.A.M. México D.F.
  - 17.-The art of tunnelling. Károly Széchy. Akadémiai Kiadó. 2ª edition. 1973. Budapest, Hungary. 1097 páginas.
  - 18.-Utilización de los lodos bentoníticos en la construcción. Tesis profesional. Miguel Ángel Ávila Torres. E.N.E.P. Acatlán. 1995. 95 páginas.