

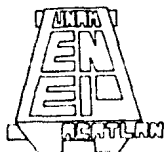


9
2 y
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES
"ACATLAN"

"PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO DEL
TUNEL LINEA 9 DEL METRO TRAMO
PATRIOTISMO - TACUBAYA"

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO CIVIL
P R E S E N T A N
JOSE LUIS DELGADO CONDE
FELIPE GRIMALDI LUGO



DIRECTOR DE TESIS:

Ing. Oscar E. Martínez Jurado

México, D. F.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

1991



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

I N D I C E

	Página
INTRODUCCION	1
I.- GENERALIDADES	4
A.- Reseña histórica de construcción de Túneles.	4
B.- Reseña histórica de construcción de las Líneas del Metro en la Ciudad de México	27
II.- CARACTERISTICAS DEL SUBSUELO DE LA CIUDAD DE MEXICO	44
A.- Zona de Lomas.	46
B.- Zona de Transición	51
C.- Zona de Lago	59
D.- Descripción de la Línea 9 del Metro.	75
III.-PROCEDIMIENTOS CONVENCIONALES DE EXCAVACION DE TUNELES	82
A.- Método Inglés.	84
B.- Método Belga	87
C.- Método Austriaco	92
D.- Método Alemán.	94
E.- Método Italiano.	95
F.- Revestimiento provisional o primario	99
G.- Revestimiento definitivo	110
IV.- TECNICA UTILIZADA EN LA EXCAVACION DEL TUNEL TRAMO PATRIOTISMO-TACUBAYA.	113
A.- Reseña histórica de escudos.	115
B.- Ventajas en la excavación de túneles con escudo	131
C.- Aportaciones del país en la construcción de escudos	137

	Página
Y.- PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO DEL TUNEL . . .	145
A.- Descripción del procedimiento de excavación.	146
B.- Construcción de lumbreras	156
C.- Instalaciones exteriores e interiores.	168
D.- Control topográfico del túnel	173
E.- Revestimiento.	183
CONCLUSIONES.	193
BIBLIOGRAFIA.	196

INTRODUCCION

La construcción de túneles es una actividad que tiene su origen en la explotación de los yacimientos mineros y carboníferos. Actualmente, son la mejor solución a los problemas de las grandes ciudades, como son: el deshacerse del agua excedente, el aprovisionarse del agua potable, la construcción de vías de comunicación e incluso obras de índole militar.

Los grandes proyectos hidroeléctricos y de riego que se han realizado en el país, han permitido aumentar notablemente las experiencias tuneleras con obras de desvío, vertedores, conductores de presión y cavernas subterráneas para alojar las grandes centrales eléctricas.

En la Ciudad de México son numerosas las obras subterráneas que actualmente existen y que prestan un servicio seguro. Su realización se llevó a cabo dentro de una geología volcánica muy compleja que abarca desde las rocas duras hasta las arcillas blandas. Este es el resultado de una experiencia técnica bien asimilada, que proviene de la tradición constructora y minera de México en condiciones y terrenos difíciles.

En los próximos años el inminente crecimiento de la población en el Distrito Federal, obligará a considerar cada vez con mayor frecuencia la colocación bajo tierra de aquellas vialidades, servicios públicos y almacenamientos cuya construcción y operación interfieran con la actividad diaria. Hoy en día, la ingeniería mexicana, cuenta ya con una extensa serie de técnicas y procedimientos suficientes para dominar, dentro de rangos razonables de costo y tiempo, la excavación y soporte de los principales terrenos hasta ahora conocidos.

El futuro de la construcción de túneles en la Ciudad de México es sumamente importante, por lo que obligará a la ingeniería mexicana a implementar nuevas o mejores técnicas para su ejecución. Pero alcanzar esa capacidad técnica no es tarea sencilla. El presente trabajo pretende dar a conocer a través de la descripción del procedimiento constructivo del túnel de la Línea 9 del Metro; lo más avanzado de la construcción de túneles en la Ciudad de México.

El trabajo lo organizamos en cinco capítulos, los cuales describimos brevemente a continuación:

El capítulo I trata en forma general del desarrollo histórico que han tenido las técnicas de construcción de túneles, particularmente en nuestro país y en la Ciudad de México, y paralelamente se habla de la evolución de los procesos constructivos empleados hasta ahora en la construcción del Sistema de Transporte Colectivo Metro.

En el capítulo II se describen los tipos de suelos que existen en la Ciudad de México, de acuerdo a las tres zonas en que se divide según el Reglamento de Construcciones del D.F., se detallan las características del subsuelo y en particular por donde pasa el trazo de la Línea 9 del Metro.

En el capítulo III se plantea en forma teórica los procedimientos convencionales empleados en la excavación de túneles en el país, para así sensibilizar a los futuros lectores de este trabajo y puedan tomar una decisión de acuerdo a la problemática que se presente.

El capítulo IV trata de la técnica empleada en la excavación y construcción del túnel tramo Patriotismo-Tacubaya de la Línea 9 del Metro, centrándose en la evolución del uso de máquinas perforadoras (escudos) en este tipo de obras y resaltando las ventajas de ahorro de mano de obra y de tiempos de avance, y comentando las aportaciones que ha hecho nuestro país en el uso y construcción de esta tecnología.

En el capítulo V se describe el procedimiento constructivo total empleado en la construcción del tramo en cuestión, desde la excavación hasta su revestimiento final, resaltando la participación de la Ingeniería Civil en cada una de sus etapas.

Finalmente se expone una serie de comentarios y conclusiones que resumen los puntos más importantes de esta tesis.

1. GENERALIDADES

El grave problema de la sobrepoblación nos obliga a crear una mayor infraestructura y a mejorar los medios de vida de que gozamos como son: vías de comunicación terrestre (carreteras y ferrocarriles), enlaces de comunicación (terminales aéreas, terminales marítimas, sistemas multimodales, etc), abastecimiento de agua potable, servicios de alcantarillado, transporte urbano, entre otros.

Es por ello que a través del presente capítulo exponemos un breve panorama del uso de túneles, como técnica constructiva, en la creación de infraestructura a nivel mundial, haciendo énfasis en los más sobresalientes tanto por el avance tecnológico utilizado como por el objetivo para el cual fueron construidos.

También se hace mención de la evolución que han tenido los métodos de excavación en la construcción de las líneas del Metro de la Ciudad de México.

A.- Reseña histórica de construcción de túneles.

La construcción de túneles, como un arte, tiene sus orígenes en el pasado remoto. Su relación con la minería es muy estrecha, pero hay que establecer importantes diferencias. El objetivo primordial de la minería es la extracción de minerales: después de que se hayan agotado éstos, los pasajes de acceso y otros espacios vacíos no tienen ya utilidad y, en éste sentido, todo tipo de trabajos para la explotación minera resulta temporal. Por el contrario, el objetivo fundamental de la construcción de

túneles para Infraestructura, es el de adecuar un pasaje u otro espacio para su uso permanente y se le pueda seguir utilizando de manera segura con este fin por tiempo indefinido. Además de proporcionar pasajes para hombres y materiales, los túneles se han construido para almacenamiento, instalación de plantas y, a través del tiempo, para el ataque y la defensa.

Los primeros túneles, en el sentido más estricto, - dejando fuera la minería, pueden haber sido para abastecer de agua las ciudades y otras comunidades. Como es el caso de los extensos canales que se construyeron en épocas pasadas en la Fértil Media Luna (Egipto, Palestina, Siria, Iraq). Un canal tiene que seguir un curso con una suave pendiente y la necesidad de atravesar una sierra trae como consecuencia el tener que hacer una larga desviación rodeando el extremo de la sierra, o hacer un corte profundo, o realizar un túnel que atravesase a ésta. A veces el túnel es la única solución posible si el agua de una montaña debe llevarse a una ciudad en la llanura.

Uno de los primeros ejemplos, lo constituye la obra de Eupalinos de Megara, siendo un túnel a través de una serranía, realizada en Grecia en el año 687 a.C., en la isla de Samos. El túnel que estaba revestido, tenía cerca de 1000 metros de largo y llevaba el agua por tuberías de barro colocadas en una zanja excavada en el piso.

Los "qanaats" de Irán y las áreas aledañas son pequeños túneles subterráneos que llevaban el agua desde las fuentes en las colinas, hasta los pueblos y aldeas. Se excavan normalmente con tiros separados unos 50 m.,

su recorrido a través del desierto está marcado por los montículos de desperdicios en los tiros.

El túnel de Siloam en Jerusalén constituye un ejemplo típico de los antiguos acueductos estratégicos; fue excavado alrededor del año 700 a.C. por el rey Ezequías, cuando se esperaba un sitio por los asirios.

Son numerosos los ejemplos de túneles construidos en el período clásico de Grecia y Roma, siendo en su mayoría para acueductos. En Roma, el abastecimiento de agua se llevaba a la ciudad desde las fuentes en las colinas circundantes; durante el período de 312 a.C. hasta el inicio de esta era, se construyeron 52 acueductos con un total de 250 km. casi todos en forma de túneles; el sistema estaba basado en el flujo por gravedad.

Los romanos utilizaron también los túneles para drenaje y como un medio para hacer útiles los pantanos y, ocasionalmente, para carreteras, siendo un ejemplo notable el túnel de Pausilippo construido en el año 36 a.C. entre la ciudad de Nápoles y Pozzuoli, éste túnel tenía 8.0 m. de ancho por 10.0 m. de altura y con una longitud de 1740 metros.

Después de la caída del imperio romano, pasaron varios siglos sin que se emprendieran obras importantes. La construcción de túneles en los tiempos medievales se convirtió en el arte de los zapadores para lograr románticos pasajes subterráneos que existían en muchos castillos y monasterios. La ingeniería civil estuvo mucho tiempo inactiva hasta que se vio motivada por las necesidades de los constructores de canales.

El túnel que inició la Era de los Canales fue construido en el Canal du Midi, por los años de 1666 a 1681 con el fin de unir el Océano Atlántico con el Mar Mediterráneo y evitarse los largos, costosos y peligrosos viajes alrededor de la Península Ibérica y a través del Estrecho de Gibraltar. Se trataba de una importante obra ya que se tenían que realizar 240 km. de canal con más de cien esclusas y con un nivel superior de cerca de 200 m. sobre el nivel del mar. El agua necesaria la proporcionaban depósitos construidos en las Montagnes Noires a unos 20 km. de distancia. El túnel no estaba en el nivel superior, sino bajo un cerro a más de 100 km al este, cerca de Béziers. Las dimensiones del túnel eran 6.5 m. de ancho por 8.0 m de altura y con una longitud de 157 m., se construyó en los años de 1679 a 1681, y se dejó sin revestimiento hasta el año de 1691.

Se utilizó la pólvora en su construcción, es el primer uso que se registra en el caso de excavación de un túnel. Antes del advenimiento de la Era de la Pólvora lo que más se acercaba a los explosivos era la aplicación del fuego. Se calentaba la roca quemando leña sobre la misma, y luego se apagaba el fuego con agua fría; formándose así grietas y luego se partía en pedazos. Parece ser que este método ya se usaba en el antiguo Egipto.

En Inglaterra los primeros túneles para canales se hallaban en el canal Worsley-Manchester y fueron construidos por Brindley para el Duque de Bridgewater con el propósito de llevar directamente el carbón de las minas de Worsley, a unas seis millas al oeste de Manchester, hasta la ciudad. El canal pasaba por un túnel construido en la arenisca de la mina, aproximadamente a una

milla, donde se construyeron más tarde unas cuarenta millas de túneles a varios niveles. Pasaba sobre el río Irwell por un acueducto a 12 m. sobre el río y terminaba en un túnel y un tiro vertical bajo Castle Hill, en Manchester.

El túnel Harecastle fue una obra importante; de 2090 metros de longitud, que llevaba el canal en su parte superior a través de las serranías al norte de Stoke-Upont-Trent. Había otros cuatro túneles en la ruta, uno de 1135 m. en Preston-on-the-Hill, cerca de Runcorn; en dicho lugar este canal se unía al del Duke de Bridgewater que llevaba hasta el Mersey mediante una serie de esclusas. El túnel Harecastle resultó ser una obra difícil. Se perforó utilizando pólvora; se encontraron mantos que inundaron la obra, y fue necesario realizar un frente de drenaje delante de la obra. En contraste con los otros cuatro túneles que tenían las dimensiones siguientes 4.1 m. de ancho por 5.3 m. de alto, el túnel Harecastle tenía solamente 2.2 m. de ancho por 3.6 m. de alto, y fue necesario idear un sistema operativo de una sola vía, haciendo pasar las barcazas con los pies. Para empujarlas, los hombres se tendían de espaldas sobre la cubierta de las barcazas y la empujaban apoyando sus pies contra el techo del túnel. El canal tardó 11 años en construirse, debido principalmente a éste túnel. El canal tuvo mucho éxito, ya que redujo los costos de transporte entre la ciudad de Liverpool y las potteries, pero este túnel de un solo carril, constituyó un cuello de botella y no se volvió a hacer una obra semejante hasta que Telford realizó un nuevo proyecto, también de una sola vía pero con dimensiones mayores 4.3 m. de ancho por 4.9 m. de alto, incluyendo un camino de remolque de 1.6 m. Se perforaron quince tiros para la

construcción y dieciseis frentes transversales para el túnel viejo. En éste túnel nuevamente se presentaron dificultades con las arenas movedizas y una arenisca -- extremadamente dura llamada Hillstone Grit (Piedra de Molino); en esta ocasión la obra se terminó en tres años, incluyendo el revestimiento con ladrillos, y sin pérdidas de vidas. El túnel continúa abierto, pero principalmente con fines recreativos; en el año de 1974 fue necesario efectuar una amplia reparación que incluyó revestimiento de concreto e instalación de pernos de anclaje.

Hubo un importante túnel en Standedge a unas cinco millas al suroeste de Huddersfield, donde la Cordillera Pennina había sido perforada por un túnel de 5000 m. de largo y una altura de 194 metros sobre el nivel del mar. La obra se inició en el año de 1794, perforando tiros, uno de los cuales tenía 70 m. de profundidad; el túnel tenía 3.0 m. de ancho x 5.5 m. de alto y contaba con cuatro ensanchamientos dentro de su longitud cuyo objetivo era tener lugares de paso. Gran parte de la excavación se realizó en arenisca dura del tipo de Piedra de Molino, la duración de esta obra fue de 17 años, inaugurándose en el año de 1811, fue una obra muy accidentada ya que se perdieron muchas vidas.

En el Continente Europeo, la construcción de canales también necesita túneles. El canal de St. Quentin, construido por orden de Napoleón, tenía tres túneles principales en su longitud de 100 km. El túnel de Tronquoy, de 1075 m. de longitud y 8.0 m. de ancho, fue excavado en un material de grava arenosa, construyendo el arco de la drillo en una secuencia de frentes ascendentes antes de retirar el banco. Esta técnica se desarrolló posteriormente para constituir el "Sistema Alemán". El túnel de

Riqueval, de 5550 m. de longitud, se construyó simultáneamente en un terreno cuyo material presentó menos dificultades para la excavación. Una sección del canal se inauguró en el año de 1810, haciéndose una ampliación en el año de 1822 con la perforación del túnel de Noirieu, de 12 km. de largo. El canal de Borgoña, que se inició en 1775 y se terminó en 1825, tiene 245 km. de longitud e incluye un túnel de 3 km.

En Bélgica, en el año de 1828, se construyó el túnel para el canal de Charleroi a través de una colina con arenas movedizas, para el que se desarrolló el "Sistema Belga", el cual se describe en el inciso B del capítulo III.

Después del advenimiento de los ferrocarriles, fueron pocos los túneles para canal que se construyeron, pero uno de los últimos y mayores es el túnel de Rove, que une Marsella y el Ródano. Es una de las perforaciones más grandes que se han excavado en caliza y con dimensiones de 22.0 m. de ancho por 15.0 m. de altura y 7.3 km. de largo. Se inició en el año de 1911, pero se retrasó su construcción debido a la Primera Guerra Mundial, terminándose e inaugurándose en el año de 1928.

La construcción de ferrocarriles trajo como consecuencia el que se tuvieron que construir túneles desde el mismo comienzo. Uno de los primeros fue el túnel de Wapping para el tráfico de mercancías, que descendía 1930 m. con un gradiente de 1 en 48 hasta los muelles. Este túnel tenía una sección de 6.7 m. x 4.9 m. Poco después de haber sido abierto al tráfico, el ferrocarril se amplió en forma de túnel desde Edge Hill hasta su terminal actual en Lime Street, con una longitud de 1852m. y una

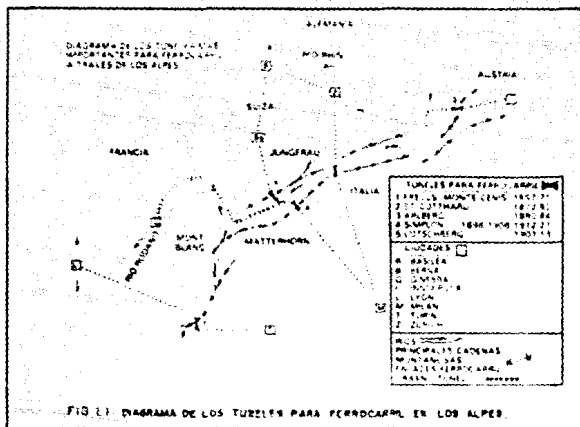
pendiente descendiente de 1 en 97. La mayoría de los túneles se excavaron en arenisca del Triásico, que resistió bien, requiriendo solamente apoyos en algunas partes de su longitud.

Otro de los primeros túneles para ferrocarril fue el de Woodhead de 4828 m. a través de los montes Peninos en la parte superior de la línea de Manchester. Este túnel se construyó en 4 años y se presentaron desprendimientos de roca durante su construcción.

Otros dos túneles subacuáticos para ferrocarril se construyeron casi al mismo tiempo; el primero fue el túnel de Mersey de 1879 a 1886 y el segundo el túnel de Severn, de mayor longitud y dificultad de construcción. El túnel de Mersey, atravesaba la arenisca Bunter del Período Triásico, bajo el Río Mersey, que está sometido a la acción de las mareas. Se excavó desde tiros en cada lado, de 52 m. de profundidad y con una separación de 1618 m.; esto permitió excavar frentes de drenaje con un gradiente ascendente hasta la mitad del río. La maquinaria utilizada cortaba un agujero circular de 2.2 m. de diámetro. Se utilizó también para las galerías de ventilación en el lado de Liverpool. El túnel principal era de 8.0 m. de ancho por 7.0 m. de alto, revestido con albañilería de un espesor de 0.70 m. Fue necesario bombear mucha agua de éste túnel, operación que todavía se realiza.

El otro túnel el Severn cruza este río de marea un poco más al sur del moderno puente de suspensión. El objetivo era eliminar el transporte por barco de los pasajeros y acortar el viaje desde Londres o Bristol a Newport o Cardiff en Gales del sur.

La barrera que formaban los Alpes entre la Europa del norte e Italia, constituía un reto para los constructores de ferrocarriles del siglo XIX, reto al que sólo se le podía hacer frente mediante la construcción de túneles. Los principales túneles cuya construcción se inició en dicho siglo fueron los siguientes: el de Frejus (Mont Cenis), St. Gotthard, Arlberg, Simplon, seguido en 1907 por el Totschberg. Del otro lado del Atlántico, el túnel de Hoosac en Massachussetts, cuya construcción duró veintiún años, sirvió de terreno de prueba para valiosas mejoras - en el uso de barrenos de aire comprimido para perforar rocas, figura 1.1.



Cada túnel podía ser de una de las dos formas siguientes: corto a un nivel elevado al que se llegara por fuertes pendientes y curvas cerradas y, además, vulnerable a las nieves invernales; o un túnel mucho más largo a un nivel inferior.

Estos túneles implicaban nuevos avances en los equipos de barrenado y explosivos, y los constructores tuvieron que hacer frente a problemas casi insolubles de ventilación de las obras, aumentadas por las altas temperaturas de las rocas y de las fuentes termales, que alcanzaban hasta 60°C.

El túnel del paso de Frejus, o de Monte Cenís, para el ferrocarril desde Francia hasta Turín, fue el primero de los grandes túneles de los Alpes, a 1340 pies sobre el nivel del mar. Su longitud de perforación parece haber sido de 12.23 km., pero se registra hoy en día como de 13.7 km. Se utilizaron los torrentes de montaña para comprimir el aire que servía para que funcionaran los barrenos y proporcionar ventilación.

La tabla I.1. muestra las fechas de los túneles para los ferrocarriles británicos que tienen por lo general más de una milla de longitud (1.609 m) y también los principales túneles a través de los Alpes para ferrocarril, así como los túneles norteamericanos de Hoosac y del río Hudson.

La excavación de túneles en roca depende considerablemente de tres elementos: máquinas perforadoras de rocas, brocas perforadoras y explosivos. La pólvora cedió su puesto a la nitroglicerina, mucho más poderosa, seguida prontamente por la dinamita, introducida por Nobel en el año 1867, y la gelinita, las cuales son mucho más seguras de almacenar, manipular y usar.

Fecha	Nombre	Long. Anillos	Fecha	Nombre	Long. m	Notas
1. 1842. 41	Tunnel del James	459	25. 1887. 01	Parry	1851	Sul de Londres
2. 1842. 44	Strove	2130	28. 1888. 01	Lytton	2188	Cerca de Dover
3. 1842. 48	Wapping	2047	27. 1880. 82	Greenock	1830	Étrea e
4. 1842. 52	Waterloo	1833	28. 1880. 83	Dove holes	2729	De Derby a Manchester
5. 1842. 56	St. Pancras	1452	29. 1884. 68	Seve hills	3157	De Londres a la costa meridional
6. 1842. 58	Richmond	1081	30. 1884. 68	Princes	2387	De Londres a la costa meridional
7. 1842. 62	Waterloo	1620	31. 1885. 88	Clare	2083	Gales
8. 1842. 66	Richmond	1081	32. 1888. 71	Coventry	1167	Shrewsbury
9. 1842. 72	Waterloo	1620	33. 1887. 70	Stratford	2404	De Stratford a Canine
10. 1842. 80	Waterloo	2038	34. 1871. 75	Old Moor	1872	De Bath a Templecombe
11. 1842. 84	Waterloo	1620	35. 1872. 74	Canine Down		9 túneles en 28 millas
12. 1842. 88	Waterloo	1620	36. 1873. 86	Severn	7012	Subcubicos. Construídos T. H. Walker
13. 1842. 92	Waterloo	2037	37. 1878. 78	Fleeting	3928	Gales
14. 1842. 96	Waterloo	2037	38. 1877. 78	Thamesbury	2281	Bradford. Hacia 18 túneles en 18 millas
15. 1842. 100	Waterloo	2038	39. 1877. 78	Little	1781	De Epping a Northampton
16. 1842. 104	Waterloo	2068	40. 1877. 78	Clifton	1688	10 túneles en 40 millas
17. 1842. 108	Waterloo	2037	41. 1881. 80	Marley Rowley		Subcubicos. Se. Francis. Rio
18. 1842. 112	Waterloo	2037	42. 1881. 85	Drewton	1833	Hull - Barnaby. Construídos en 1855
19. 1842. 116	Waterloo	2037	43. 1887. 80	Whorston Valley	3148	Gales
20. 1842. 120	Waterloo	2037	44. 1847. 90	Sharnbrook	1701	Leicester - Bradford
21. 1842. 124	Waterloo	2037	45. 1848. 93	Totter	6897	Sharnbrook - Manchester
22. 1842. 128	Waterloo	2037	46. 1848. 92	Claxton	3285	
23. 1842. 132	Waterloo	2037	47. 1891. 86	Worville	1317	Portsmouth
24. 1842. 136	Waterloo	2037	48. 1893. 97	Calverly	2743	A. que de Rugby
25. 1842. 140	Waterloo	2037	49. 1898. 00	Canterbury	2131	Leeds
26. 1842. 144	Waterloo	2037	50. 1898. 01	Gloucs.	3538	Widford
27. 1842. 148	Waterloo	2037	51. 1900. 03	Chillingworth	4083	Cerca de Bristol
28. 1842. 152	Waterloo	2037	52. 1911. 08	Boston	2400	Chatterley - Lincoln
29. 1842. 156	Waterloo	2037	53. 1913. 7	Langstone	1788	Gales
30. 1842. 160	Waterloo	2037	54. 1918. 20	Penryn	2454	A. que de Londres
TÚNELES ALFOMBAS PARA FERROCARRIL						
31. 1842. 164	Waterloo	2037	A1. 1857. 70	Fries	12.2 km	
32. 1842. 168	Waterloo	2037	A2. 1872. 82	St. Gifford	14.9 km	
33. 1842. 172	Waterloo	2037	A3. 1878. 84	Alders	10.5 km	
34. 1842. 176	Waterloo	2037	A4. 1898. 08	Sutton	18.8 km	
35. 1842. 180	Waterloo	2037	A5. 1907. 13	Willingham	14.8 km	
TÚNELES CLÁSICOS PARA FERROCARRIL EN EL UU						
36. 1842. 184	Waterloo	2037	U1. 1855. 78	Michigan	7.8 km	
37. 1842. 188	Waterloo	2037	U2. 1875. 05	Ill. Indiana		

TABLA 11 UN SIGLO DE TUNELES PARA FERROCARRIL.

Se le aplicó mucho ingenio al diseño de los compresores; el gran problema con las mismas brocas dependió de su carácter autodestructor, con su martilleo, ellas mismas se hacían pedazos. Los túneles Alpinos y quizá más, el túnel de Hoosac, fueron la cuna de dichos avances, aprovechando con el tiempo cualquier mejora en la tecnología del acero. Uno de los grandes avances, apenas en la década de los años cincuenta, fue el desarrollo de la broca de carburotungsteno.

A la fecha las técnicas de construcción de túneles - se han sofisticado lo que permite un avance de construcción bastante considerable (usando escudos se tiene un rendimiento promedio de 5 m. lineales por día en arcillas).

Estas técnicas modernas y los retos de comunicar países "aislados" han originado la ejecución de grandes proyectos tuneleros como es el caso de integrar las principales islas japonesas y a Inglaterra con el Continente Europeo. En el primer caso se unieron por tierra dos de las cuatro principales islas del archipiélago nipón, para la cual fue necesario construir un túnel abajo de la base marina en el Estrecho Tsugaru, con una longitud de 53.9 km., por ahora la de mayor dimensión en el mundo.

La perforación fue concluida en el año de 1985, y a partir de ese momento, las islas de Hokkaido y Honshu quedaron conectadas por tierra, cien metros abajo de la base marina, y a 240 metros del nivel de las aguas.

El túnel fue excavado simultáneamente desde los extremos de Honshu y Hokkaido, y unidos hacia la mitad del recorrido bajo la plataforma marina. La parte estructu-

ral comprendió tres tipos de túneles: los pilotos de investigación y comprobación de suelos; el de operación y servicios; y el principal, con una longitud combinada de más de 200 km. fig. 1.2.

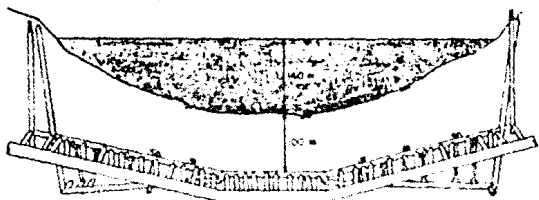


FIG. 1.2. EL TUNEL SEIRAN (SECCION SUBMARINA).

Se hicieron, también, túneles auxiliares, para hacer más flexible la excavación del túnel principal, manejándolo en segmentos y perforando desde las cabeceras de los extremos al mismo tiempo, con el objeto de reducir los períodos de construcción y los riesgos.

Tanto los túneles pilotos como el de operación serán usados para mantenimiento y emergencias del túnel principal. A todo el conjunto de obras y operaciones se le llamó, por su magnitud, el Proyecto Mamut.

En el segundo caso se trata del túnel para comunicar a la Europa Continental con el Reino Unido por vía terrestre bajo el mar. La orden para iniciar la construcción fue dada en mayo de 1986, si las estimaciones se cumplen, para fines de 1993 se terminará con la construcción de éste proyecto.

La obra comprende la construcción de tres túneles, dos de circulación para trenes eléctricos de cercanías y convoyes ferroviarios, y uno de servicio para mantenimiento y emergencias. Fig. 1.3.

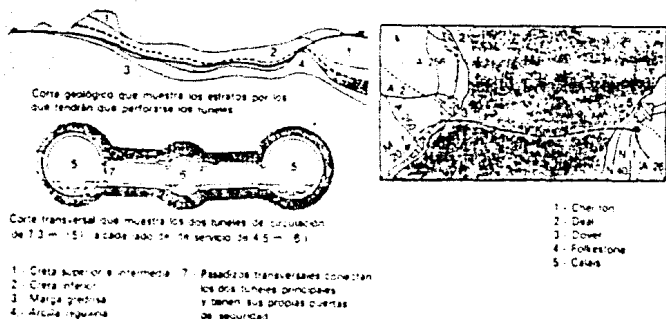


FIG. 1.3. TUNEL PARA UNIR FRANCIA CON GRAN BRETAÑA

Para la construcción de los túneles, que se estima irán entre 60 y 130 pies abajo de la base de la cuenca marina del Canal de la Mancha, se emplearán métodos convencionales combinados con la más moderna tecnología y, por supuesto, con las técnicas más probadas en materia tunelera. La geología en la ruta propuesta es buena y, en general, provee un excelente medio para la perforación.

En Norteamérica la construcción de canales se desarrolló a fines del siglo XVIII. El primer túnel se perforó en el año de 1818, en el canal de Schuylkill, siendo sus dimensiones de 6.0 m. de ancho por 5.5 m. de alto y 137 m. de longitud. Se inauguró en el año de 1855. El segundo túnel para canal en Norteamérica fue el de Bebanon como el tope del canal de la Unión, excavado en los años 1824-1826 con unas dimensiones de 5.5 m. de ancho por 4.6 m. de alto y 220 m. de longitud.

Particularmente en nuestro país la historia de construcción de túneles importantes se reduce a los siguientes:

El más antiguo que se emprendió fue el que se conoce como Socavón de Enrico Martínez, en honor de su creador, quien fue cosmógrafo, geógrafo y fungió como Director de las Obras de Drenaje del Valle a principios del siglo -- XVII. Su obra constituyó el primer desahogo de las aguas del Valle, (hacia el norte), en el año de 1606. Fig. I.4.

Actualmente la obra que existe en esa zona es un tajo, el Tajo de Nochistongo, que es de hecho la primera salida artificial de la Cuenca. Convertir el socavón en tajo fue decisión que tomó siglo y medio en verse realizado, por motivo de innumerables escollos administrativos. El tajo se inauguró en el año 1789.

En estas mismas tobas arcillosas, calcáreas, de la Serie Nochistongo, al norte de la Cuenca, se excavaron también los conocidos como túneles de Tequisquitac. El -- más antiguo se excavó en largo período de la segunda mitad del siglo pasado, y el otro se excavó en los años 40 de este siglo.

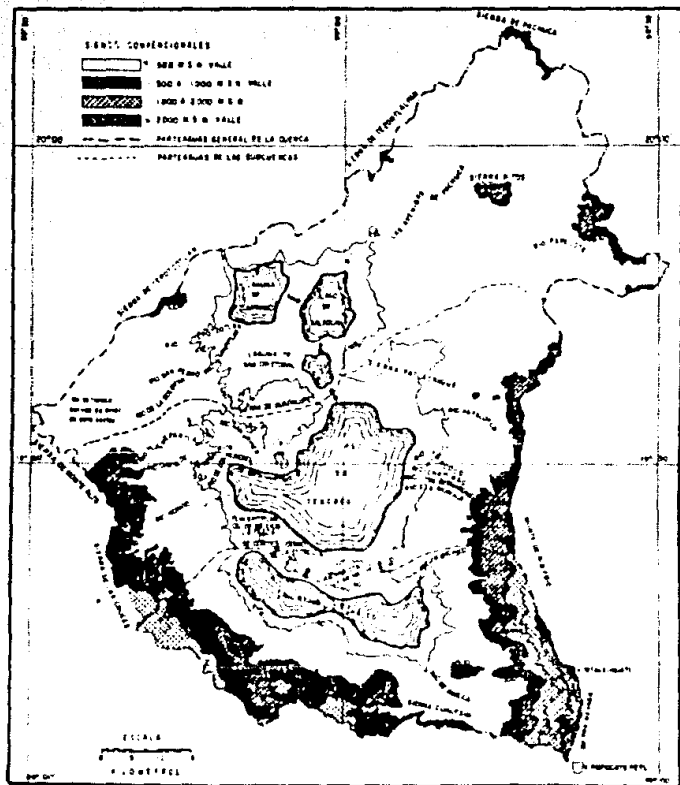
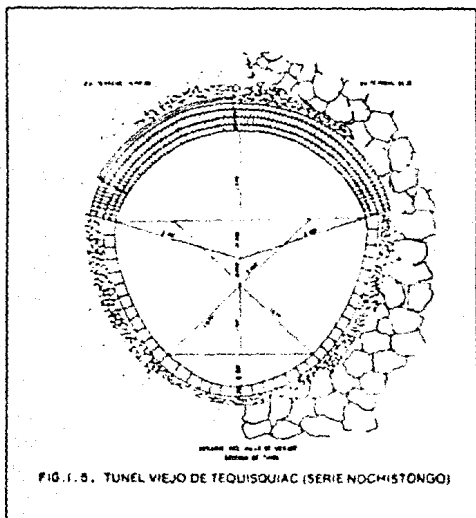


FIG. 14. ANTIGUO FUNCIONAMIENTO HIDROLOGICO DE LA CUENCA DEL VALLE DE MEXICO

El Túnel Viejo de Tequisquiác es un túnel que tiene un claro interior de 4.90 m. Su revestimiento, en la parte inferior, está constituido por dovelas de cemento portland de quince centímetros de espesor, y, en la parte superior, está formado por enladrillado en varias capas. En terreno acuífero lleva varios drenes o lloraderos a través del mismo enladrillado. Fig. 1.5



A raíz de los problemas surgidos con el "Hundimiento General del Valle de México", se tomaron medidas para solucionarlos. Es así como, a principios de la segunda mitad del siglo veinte, la Dirección General de Obras Hidráulicas del D.D.F. formuló el "Plan General para Resolver los Problemas del Hundimiento, las Inundaciones y el Abastecimiento de Agua Potable de la Ciudad de México". Ante la conveniencia de desalojar las aguas por gravedad ha sido necesario construir túneles a profundidad suficiente para que el efecto de la consolidación de las arcillas blandas no los alcance. Así, se cuenta con túneles de pequeño diámetro para los colectores Central, Atlaco, Prolongación Sur del Gran Canal, la rectificación del colector Cinco, y otros de menor longitud. Recientemente se construyó el Sistema de Drenaje Profundo, con diámetros de 5 a 6.5 m., constituido en su primera etapa por el Emisor Central y los Interceptores Poniente (puesto en operación en 1960), Central y Oriente, con una longitud conjunta de alrededor de 68 km.

Las etapas subsecuentes del programa de construcción del Drenaje Profundo contempla:

Prolongar el Interceptor Central hasta la zona de pedregales al sur de la ciudad.

Prolongar el Interceptor Centro-Poniente hasta la esquina de Revolución y Río Mixcoac.

Prolongar el Interceptor Oriente hasta el Canal Nacional.

Construir el Interceptor Oriente-Sur a lo largo de la Calzada Ignacio Zaragoza y Canal de San Juan hasta Canal

de Garay.

Construir el Interceptor Centro-Poniente para conectar los interceptores Oriente y Central, a fin de aumentar la flexibilidad en la operación del sistema.

En los años de 1969 y 1970 se construyeron dos túneles del Sistema Metropolitano de Transporte Colectivo (Metro), el primero de 327 m. de longitud que se inició sobre la calle de Antonio Maceo, y terminó en la estación Tacubaya. El segundo se inició en la lumbrera ubicada en el Antiguo Camino a Belén a 811 metros al sur poniente de la misma estación Tacubaya. La longitud total de ambos túneles fue de 1138 m. Fig. 1.6.

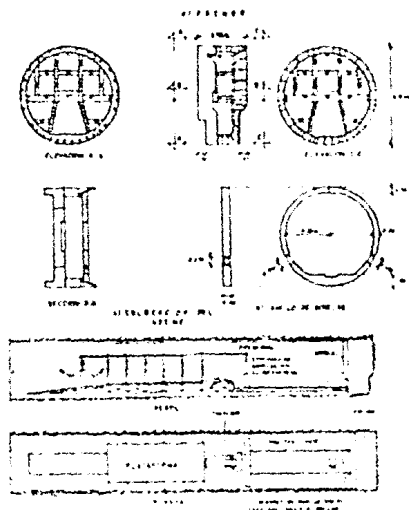


FIG. 1.6. EXCAVACION DEL TUNEL TACUBAYA METRO LINEA 1

De acuerdo con el trazo requerido por el diseño de la operación del Metro, 1138 m. del extremo sur poniente de la línea #1, se debería ejecutar un túnel para salvar los siguientes obstáculos: Av. Parque Lira, el Anillo Periférico, el Interceptor del Poniente, el Ferrocarril México-Cuernavaca, dos manzanas de zona habitacional, colectores líneas primarias de agua potable y gasoductos. El trazo de los túneles formado en un 67% por tramos curvos, tanto vertical como horizontalmente con pendientes variables entre 0.8 y 7% con radios de curvatura mínimos de 200 m. Fig. I.7.

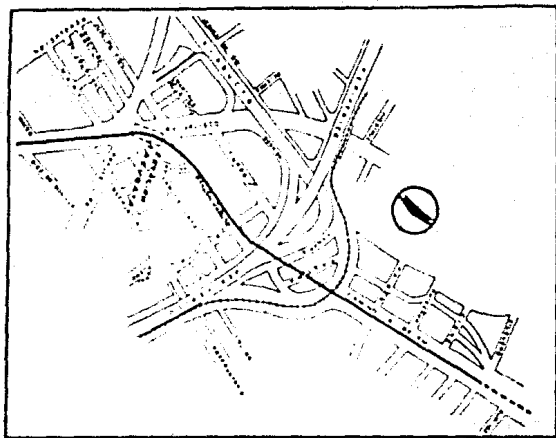


FIG I.7. TRAZO DEL TUNEL TACUBAYA METRO LINEA I .

A trece años de distancia, y con la experiencia acumulada en la excavación del Emisor Central, en la que se empleó el concreto lanzado y los criterios de NMAT (Nuevo Método Austriaco de Tünelo) en grandes longitudes del túnel, se ha generalizado su uso en nuestro país, principalmente en las obras subterráneas en el Valle de México. Como ejemplo se pueden citar el Interceptor Centro-Poniente, el Túnel Analco-San José, del Sistema Cutzamala, y los ramales norte y sur, en construcción, de este mismo sistema. Los túneles del Metro, en la tercera etapa de la Línea 3 (Sur) y en la Línea 7, construídos enteramente bajo la superficie con objeto de reducir a un mínimo las interferencias con el tráfico y con los servicios municipales, han adoptado lo más relevante de estas técnicas y estos conceptos de túnelo moderno.

A continuación presentamos una serie de tablas con las más importantes obras de este tipo en el Valle de México. (Tablas I.2).

O B P A	LONGITUD (m)	S E C C I O N		GEOLOGIA PREDOMINANTE
		EXCAVADA (m)	REVESTIDA (m)	
TUNEL DEL CERMA MES (Acapulquillo) 1948-1952	14,336		50 (circular)	Andesitas, Trasfandinitas, Brechas y Tóbas (Formación Las Encinas)
SISTEMA CUTZAMALA MES Túnel Analco-San José 1979	15,660	5.3 ancho 4.8 altura		Andesitas, Trasfandinitas, Brechas y Tóbas (Formación Las Encinas)
Túnel Agua Escorrida	2,900	4.8 ancho 4.8 altura (herradura)		Tóbas Arcillosas, Basaltos y Andesitas
Ramal Norte 1980	12,000		43 (herradura)	Andesitas y Agfirmeradas
Ramal Sur 1981	11,000			

TUNELES DE DESAGUE

O B R A	LONGITUD (m)	S E C C I O N		GEOLOGIA PREDOMINANTE (m)
		EXCAVADA (m)	REVESTIDA (m)	
TUNEL VIEJO DE TEQUIL- QUIAC 1866-1900	10,021		4.9	Margas (tobas arcillosas) Tobas limo arenosas (Serie Nockistongh)
TUNEL NUEVO DE TEQUIL- QUIAC 1930-1954	11,300			Margas (tobas arci- llosas, Tobas limo arenosas (Serie Nockistongh)
INTERCEPTOR PONIENTE D.F. 1950-1960	16,625	4.9 (herradura)	4.0 (circular)	Tobas limo-arenosas y gravas mal cren- tadas (Zona de Lomas)
EMISOR CENTRAL 1966-1975	50,000	8.0 (herradura)	6.5 (circular)	Basaltos, Andesitas, Dacitas, Riolitas, Brechas, Conglomo- rados, Aglomerados y Tobas
INTERCEPTOR ORIENTE (excavado con escudo en los materiales fluvio-lacustres)	10,000	6.5 (herradura)	5.0 (circular)	Tobas, Brechas, Derrames íbicos. En el último tramo materiales fluvio lacustres.
INTERCEPTOR CENTRAL (excavado todo con escudo) 1969-1975	8,000	6.2 (circular)	5.0 (circular)	Arena y Limos Arcillas compres- tibles del Valle de México. (Zonas de transi- ción y del Lago).
INTERCEPTOR CENTRO-PONIENTE 1961-1963	16,139	4.9 (herradura y portal)	4.0	Limos, arenas y grávillas compactas (Zonas de transición y de Lomas)
COLECTORES EN LA CIUDAD DE MÉXICO (excavados con escudos)				
Calle Playa Roqueta 1962-1964	2,050	50 (circular)	40 (circular)	
Prolongación Sur Tramo D + 750 a 2 + 500 1967-1964	1,750	50 (circular)	40 (circular)	
Colector 4 1965	1,820	35 (circular)	22 (circular)	Arcillas compac- tibles Valle de México (Zona del Lago)
Central Tramo Rosales-Academta 1958	2,482	40 (circular)	30 (circular)	
Merdes Tramo La Raza 1979	0,520	30 (circular)	22 (circular)	
Río Coahuila Tramo La Raza	0,600	40 (circular)	36 (circular)	

TUNELES PARA TRANSPORTE URBANO

O B R A	LONGITUD (m)	S E C C I O N		GEOLOGIA PREDOMINANTE
		EXCAVADA (m)	REVESTIDA (m)	
METRO LINEA 1 Chapultepec-Tecubaya 1970-1971	1 136	9.2 (circular)	8.6 (circular)	Abiticos aluviales (Zona de Lomas)
METRO LINEA 3 SUR II 1981-1983 Yiveros M.A. Quevedo (Túneles gemelos de una vía)	2 440	6.7 ancho 6.5 altura (herradura)	6.0 ancho 5.4 altura (herradura)	Limos y arenas compactas Pómez y derrames Basálticos (sobre derrames) están sobre el techo en tramos aislados (Zona de Transición)
2 Estaciones en Túneles Separados	2x2x150m	Área de sección recta de cada túnel 60 m ²		
M.A. Quevedo - C.U. (Túnel de dos vías)	2 110	9.8 ancho 8.3 altura (herradura)	8.6 ancho 8.9 altura (herradura)	
METRO LINEA 7 1981-1984 Lumbrera 3 - Lumbrera 4	250	8.2 (circular)	8.6 (circular)	Limos y arenas compactas y Arenas de pómez (Zonas de Transi- ción y de Lomas)
Lumbrera 4 - Lumbrera 11	9 093	8.8 ancho 8.3 altura (herradura)	8.6 ancho 6.9 altura (herradura)	
7 estaciones de bóveda doble con apoyo inter- medio	7 x 150m	Área de sección recta 124 m ²		
2 estaciones bóveda simple sin apoyo inter- medio	2 x 150m	Área de la sección recta 146 m ²		

B.- Reseña histórica de construcción de las líneas del Metro en la Ciudad de México.

Las características de la Ciudad de México desde su fundación, a través de su historia, llevaron a este asentamiento humano a tener en el año de 1965 una gran población, viviendo en una ciudad cuyas limitaciones geográficas, políticas e históricas, condicionaban en gran medida la satisfacción de las necesidades más elementales de sus habitantes.

La traza urbana de la Ciudad de México, obligada por la solución de diferentes problemas, por las dimensiones de la zona metropolitana y la forma anárquica en que se desarrolló el crecimiento de la Ciudad, hicieron que el problema del transporte se convirtiera en uno de los principales obstáculos tanto para la satisfacción de las necesidades de los pobladores de la Ciudad como para el avance eficiente de las actividades y de la vida de la misma Ciudad.

El problema del congestionamiento de tráfico en el centro de la Ciudad, provocaba que en esta zona la velocidad de circulación de autobuses y transportes eléctricos (tranvías), fuera en no pocas horas menor a la normal de una persona caminando.

La experiencia mundial y la situación de la Ciudad de México, hacían obligatorio pensar en un sistema de ferrocarril metropolitano con vía libre o Metro.

Haciéndose un análisis de factibilidad técnica de construcción y de beneficio costo; analizando interferencias con las instalaciones municipales, etc. se llegó a

la determinación de un Plan Maestro del Metro con horizontes a los años 1988, 1994 y 2010, consistente en 15 líneas con una extensión de 315 kms. y 274 estaciones, para atender una demanda pronosticada de 13.23 millones de viajes-persona-día.

El Plan Maestro del Metro como parte del Plan Rector de Vialidad y Transporte, elaborado por el D.D.F., viene a constituir lo que se ha llamado la columna vertebral del sistema de transporte colectivo de la Ciudad de México.

Cabe aquí mencionar los objetivos del Plan Maestro del Metro.

- 1.- Definir una política de ampliación de las líneas que induzca a la utilización del transporte masivo.
- 2.- Definir las reservas territoriales, destinadas a las edificaciones necesarias para una adecuada operación del Sistema y preservar los derechos de vía.
- 3.- Propiciar la reestructuración urbana y el ordenamiento del uso del suelo.
- 4.- Disminuir la contaminación ambiental.
- 5.- Crear más opciones de traslado a los centros de trabajo, recreación y servicio.
- 6.- Impulsar el desarrollo de la tecnología y de la industria nacional, relacionadas con la operación del sistema a fin de sustituir importaciones y generar empleos.

7.- El propósito del Plan Maestro del Metro, es tener una base de ordenación del área urbana, que sea el punto de partida del desarrollo ininterrumpido que resuelva por una parte, la deficiente transportación actual, y por otra plantee acciones a mediano y largo plazo, adaptándolos a la dinámica de una urbe que se perfila como la más grande del mundo en razón de su crecimiento demográfico, económico y social.

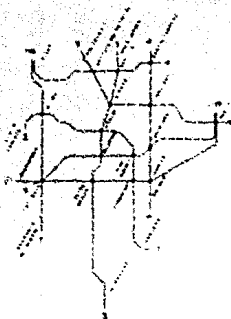
Fue en el año de 1965 cuando se tomó la decisión de construir el Metro de la Ciudad de México, partiendo de estudios iniciados en 1958.

No fue sino hasta el año de 1967, después de muchos estudios cuando se inició la primera etapa de construcción del Metro.

El 29 de abril de 1967 se crea el Sistema de Transporte Colectivo Metro, para construir, operar y explotar un tren eléctrico subterráneo y superficial, para el transporte colectivo en el Distrito Federal.

El 19 de junio de 1967 se inician las obras del Metro de la Ciudad de México en la Avenida Chapultepec, lo que sería la Línea 1, con un recorrido de oriente a poniente va desde la Calzada Ignacio Zaragoza hasta la Av. Observatorio en Tacubaya, con una extensión de 17 kms. Esta Línea con excepción de la Terminal Observatorio es subterránea, por medio de cajón subterráneo con excavación a cielo abierto y cuenta con 19 estaciones. Fig. 1.9.

La Línea 2, con una proyección poniente-oriente conecta Tacuba con el Zócalo para continuar al sur hasta Tasqueña. Tiene una extensión de 19 kms. de los cuales



LINEA	ESTACIONES	LONGITUD (KM)	ANILLO (KM)	RAMALES (KM)	TOTAL (KM)	ESTACIONES
1	10	10.00	0.00	0.00	10.00	10
2	10	10.00	0.00	0.00	10.00	10
3	10	10.00	0.00	0.00	10.00	10
4	10	10.00	0.00	0.00	10.00	10
5	10	10.00	0.00	0.00	10.00	10
6	10	10.00	0.00	0.00	10.00	10
7	10	10.00	0.00	0.00	10.00	10
8	10	10.00	0.00	0.00	10.00	10
9	10	10.00	0.00	0.00	10.00	10
10	10	10.00	0.00	0.00	10.00	10
TOTAL	100	100.00	0.00	0.00	100.00	100

FIG 1.8

SISTEMA DE TRANSPORTE COLECTIVO METRO
RED DEL SISTEMA A 1988

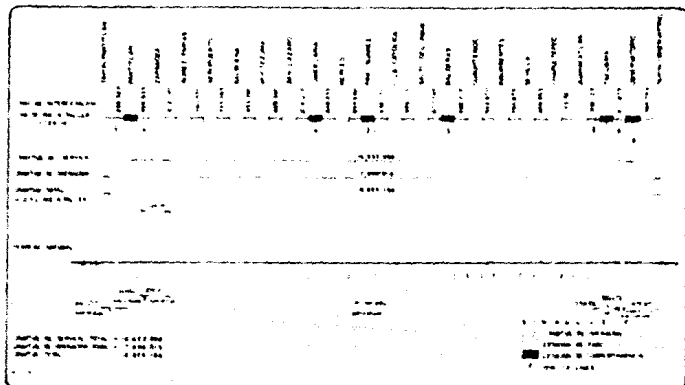


FIG 1.9

LONGITUDES
DE LAS LINEAS DEL METRO

9 son de vía superficial y el resto es con cajón subterráneo y excavación a cielo abierto, cuenta con 22 estaciones. Fig. I.10.

La Línea 3, con trazo de norte a sur va del conjunto habitacional Tlatelolco a Hospital General, con 6 kms. de extensión subterránea por medio de cajón y cuenta con 7 estaciones. Fig. I.11.

El 5 de septiembre de 1969 se inaugura la Línea 1 en el tramo Zaragoza a Chapultepec.

El 11 de abril de 1970 se inaugura el tramo Chapultepec-Juanacatlán de la Línea 1.

En los meses de mayo-junio de 1970, se da servicio de Pino Suárez a Tasqueña en la Línea 2, sin paradas intermedias con motivo del X Campeonato Mundial de Fútbol.

El 1^o de Agosto de 1970, se pone en marcha el tramo Pino Suárez-Tasqueña de la Línea 2.

El 20 de noviembre de 1970 se pone en funcionamiento el tramo Juanacatlán-Tacubaya de la Línea 1.

El 20 de noviembre de 1970 se inaugura la Línea 3 en el tramo de Tlatelolco a Hospital General.

El 10 de junio de 1972 se inaugura el tramo de Tacubaya a Observatorio de la Línea 1.

El 27 de agosto de 1977 se inicia la segunda etapa de construcción del Metro de la Ciudad de México en la

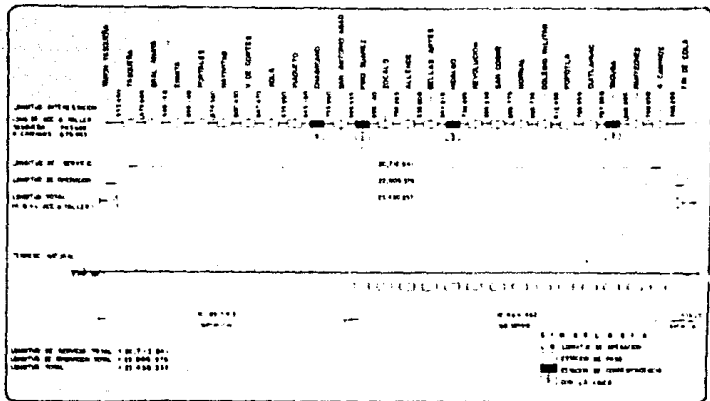


FIG. I. LONGITUDES DE LAS LINEAS DEL METRO

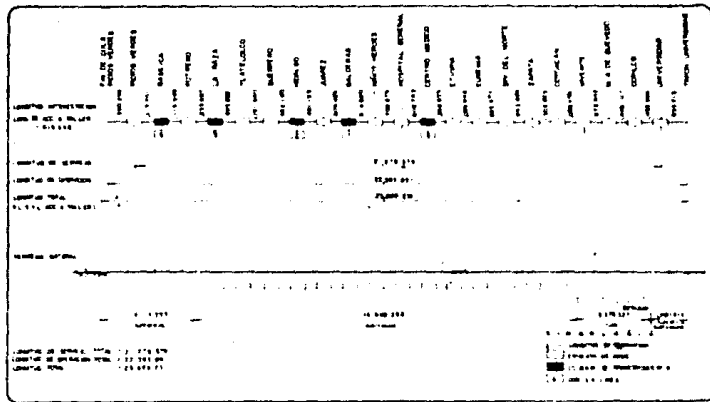


FIG. II. LONGITUDES DE LAS LINEAS DEL METRO

prolongación de Héroes esquina con San Simón correspondiente a la ampliación de la Línea 3 al norte que va de la estación Tlatelolco a los Indios Verdes, tiene cuatro estaciones, la estación subterránea La Raza con excavación en cajón a cielo abierto, y las estaciones superficiales Potrero, Basílica e Indios Verdes, en donde se construyeron los Talleres Ticomán de mantenimiento mayor y menor.

El 7 de septiembre de 1977 se crea la Comisión Técnica Ejecutiva del Metro (COTEME).

El 1º de Diciembre de 1977, por ampliar sus objetivos la (COTEME), cambia su denominación a Comisión de Vialidad y Transporte Urbano (COVITUR).

El 16 de enero de 1978 se inician las obras de construcción para la ampliación de la Línea 3 hacia el sur, en Av. Cuauhtémoc y Antonio M. Anza con una extensión de 5.3 kms. va de la estación Hospital General a la estación Zapata, donde se empleó la solución de cajón subterráneo para su excavación.

El 20 de marzo de 1978 se inician las obras de la Línea 4 en la Av. Inguarán y Talismán, con una extensión de 10.7 km. en dirección Norte-Sur de Martín Carrera a Santa Anita, con construcción superficial en las estaciones Martín Carrera y Candelaria y solución elevada en las restantes excepto en las estaciones Educación y Santa Ana que se empleó la solución subterránea por medio de cajón, Fig. 1.12.

El 29 de junio de 1978 se inician las obras correspondientes a la Línea 5 en la Av. Hangares y Economía.

Con una extensión total de 15 kilómetros de los cuales 5 son de vía subterránea y el resto con solución tipo superficial, tiene 12 estaciones y va desde Pantitlán al oriente hasta la terminal Politécnico al poniente Fig.1.13.

El 25 de Agosto de 1978 se pone en servicio el tramo Tlatelolco-La Raza de la ampliación de la Línea 3 al norte.

El 1º de Diciembre de 1978 se pone en servicio el tramo La Raza-Indios Verdes de la Línea 3.

El 7 de Junio de 1980 se pone en servicio el tramo Hospital General-Centro Médico de la Línea 3 al sur.

El 25 de Agosto de 1980 se pone en servicio el tramo Centro Médico-Zapata de la Línea 3 Sur.

El 25 de Agosto de 1980 se inician los trabajos de la tercera etapa de construcción del Metro, con la Línea 3 Sur de la estación Zapata a Universidad. Tendrá una longitud de 6.5 km. siendo subterránea con excepción de la estación Universidad que será en solución superficial, la solución subterránea a partir de la estación Coyoacán hasta antes de llegar a la estación Universidad será por medio de excavación en túnel.

El 30 de Septiembre de 1980 se inician las obras de construcción de la Línea 6 Poniente en la calle de Tierra Colorada en Azcapotzalco, en su primer tramo de El Rosario al Instituto del Petróleo tiene una longitud de 8.3 km. con 7 estaciones. Su construcción se realizó con el procedimiento de cajón subterráneo y excavación a cielo abierto, utilizando muros de contención (milán y de acom-

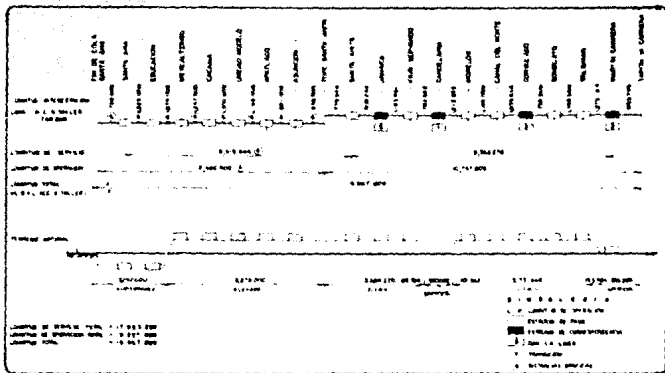


FIG.112

LONGITUDES
DE LAS LINEAS DEL METRO

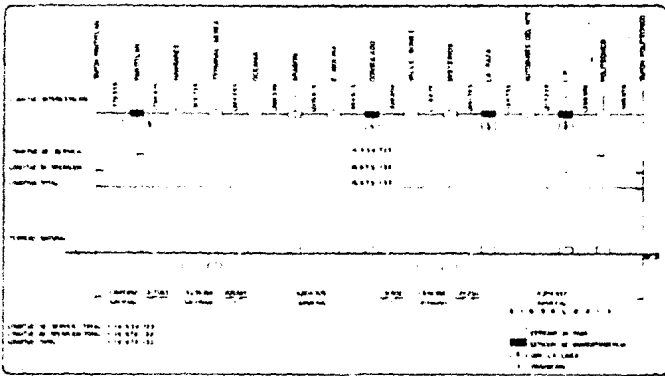
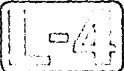


FIG.113

LONGITUDES
DE LAS LINEAS DEL METRO



pañamiento) se construyeron techos a base de tablaestacas prefabricadas. Fig. I.14.

El 29 de Noviembre de 1980 se inaugura la primera etapa de construcción de los Talleres Ticomán de la Línea 3 Norte.

En Febrero de 1981 se inician los trabajos de construcción de la Línea 7, en Lago Nabor y Lago Hielmar, tendrá una longitud de 12.6 km. en sentido norte-sur en la parte poniente de la Ciudad. Siendo subterránea en su totalidad en solución de túnel profundo. Partiría de la estación Tacuba de la Línea 2 a la estación provisional Barranca del Muerto. Fig. I.15.

En lo que respecta a las características técnicas de alta calidad en la obra, se puede decir que la técnica utilizada fue la del Método Austriaco, de tuneleo modificado, consiste en la excavación con recubrimiento a base de concreto lanzado con el fin de evitar pérdida de humedad y resistencia del material excavado, con lo que se logra mayor seguridad constructiva.

En Abril de 1981 se inician los trabajos de ampliación de la Línea 1, en la Av. Lic. López Mateos, Colonia Pantitlán con construcción subterránea por medio de cajón, partirá de la estación Zaragoza a la Terminal Pantitlán.

El 18 de Marzo de 1981 se inician los trabajos de ampliación de la Línea 2 en la Calzada México Tacuba y Lago Tarza. Con solución subterránea por medio de cajón y excavación a cielo abierto.

El 29 de Agosto de 1981 se inaugura la Línea 4 en el tramo que va de la estación Martín Carrera a la estación Candelaria.

El 19 de Diciembre de 1981 se pone en servicio la Línea 5 en su tramo Pantitlán a Consulado.

El 26 de Mayo de 1982 se pone en servicio el tramo sur de la Línea 4 que va de la estación Candelaria a Santa Anita.

El 26 de Mayo de 1982 se inaugura la segunda etapa de Los Talleres Ticomán.

El 1^o de Julio de 1982 se inaugura la Línea 5 del Metro en el tramo Consulado-La Raza.

El 30 de Agosto de 1982 es la inauguración del tramo de La Raza a la estación Politécnico de la Línea 5.

El 30 de Agosto de 1983 se inaugura el tramo Zapata-Universidad de la Línea 3, y la Nave de depósito Universidad.

En Septiembre de 1983 se inicia la construcción de la ampliación de la Línea 6 oriente (4a. etapa) en la calle de Ricarte en la colonia Lindavista por medio de solución subterránea a base de cajón.

El 22 de Noviembre de 1983 se inicia la obra de la Línea 8 Centro (4a. etapa del Metro) en el Zócalo de la Ciudad de México. La que posteriormente fue suspendida y con un 99% de probabilidad de no realizarse en su trazo original.

El 21 de Diciembre de 1983 se inaugura la Línea 6 Poniente de la Terminal El Rosario a Instituto del Petróleo, y los Talleres El Rosario.

El 1^o de Junio de 1984 se inician las obras de construcción de la Línea 9 de Pantitlán a Chabacano.

El 22 de Agosto de 1984 es la inauguración de las ampliaciones de la Línea 1 (Zaragoza a Pantitlán) y de la Línea 2 (Tacuba a Cuatro Caminos).

En Septiembre de 1984 dan inicio las obras del Tren Ligero del tramo Tasqueña-Huipulco.

El 20 de Diciembre de 1984 se inaugura el tramo Tacuba-Auditorio correspondiente a la Línea 7.

En Enero de 1985 se inicia en la calle de Tierra Nueva en la Delegación Azcapotzalco, la Línea 7 Norte de Tacuba al Rosario. En este tramo la solución empleada para su construcción fue subterránea en túnel, que se excavó por medio de un escudo de Frente abierto con un diámetro exterior de 9.14 metros.

El 23 de Agosto de 1985 se inaugura el tramo Auditorio-Tacubaya de la Línea 7.

El 19 de Diciembre de 1985 es la inauguración del tramo Tacubaya a Barranca del Muerto de la Línea 7.

El 19 de Enero de 1986 se da inicio a los trabajos de la Línea 9 Poniente del Metro en la Av. Benjamín Franklin y Calle Ciencias, Colonia Escandón. Que irá de Centro Médico a Tacubaya con una longitud de 3.8 km Fig.1.16.

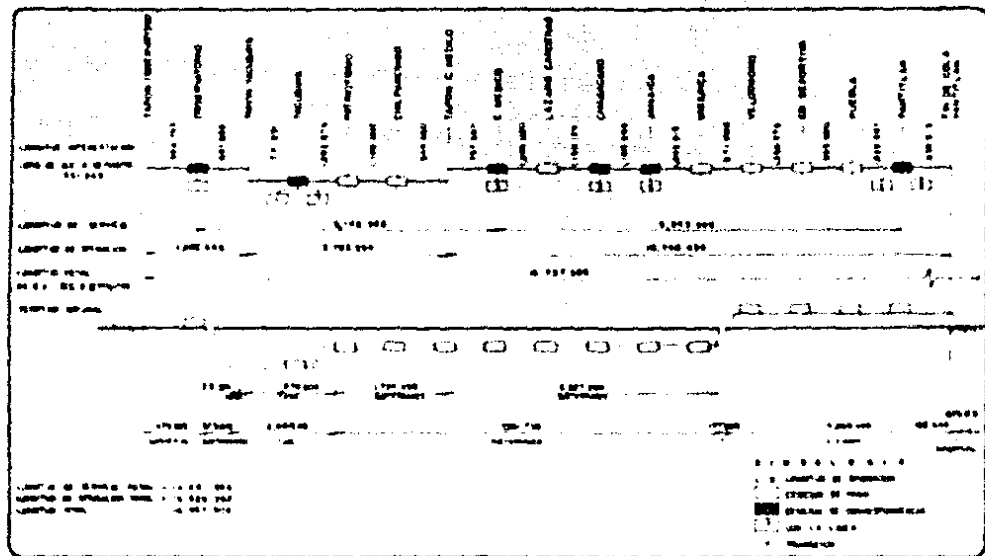


FIG. 1.16

LONGITUDES
DE LAS LINEAS DEL METRO



En este tramo la técnica utilizada es una de las más avanzadas para la excavación de túneles en el tipo de material que se atravesará. Se utilizará un escudo de frente abierto, que tendrá la función de contener la paredes de la excavación entre la sección de ataque y la sección ya revestida. En cuanto al ciclo de excavación normal del escudo las etapas son:

a) El escudo excava (0.80 m.) en toda la sección (9.14 m. de diámetro).

b) Con el impulso de sus 31 gatos de empuje avanza (0.80 m.).

c) Con el tren de apoyo, al escudo se le suministran las dovelas, las cuales constituyen el revestimiento definitivo del túnel y se colocan por medio del anillo erector.

d) Se realiza una inyección primaria con base en grava con el objeto de rellenar el hueco que queda entre la dovela y el suelo.

e) Se efectúa una inyección secundaria o de consolidación.

En marzo de 1986 se inician los trabajos del tramo Huipulco-Kochimilco del Tren Ligero.

El 8 de Julio de 1986 es la inauguración del tramo Instituto Mexicano del Petróleo a Martín Carrera de la Línea 6 Oriente.

La inauguración de la primera etapa del Tren Ligero

de Tasqueña al Estadio Azteca es el 1º de Agosto de 1986.

El 13 de Abril de 1987 se inician los trabajos del Metro Ligero Zaragoza, en la calle de Agua Caliente Pantitlán.

El 26 de Agosto de 1987 se inaugura la Línea 9 en el tramo Pantitlán-Centro Médico.

En Enero de 1988 se suspenden los trabajos del Metro Ligero, Zaragoza y Tren Ligero Xochimilco.

En Abril de 1988 se reanudan los trabajos de construcción del Tren Ligero Huipulco-Xochimilco.

El 29 de Agosto de 1988 se inaugura el tramo poniente de la Línea 9 del Metro que va de la estación Centro Médico a la estación Tacubaya.

En Enero de 1990 se reanudan los trabajos de construcción de lo que sería el Metro Ligero, que correrá de la Estación Pantitlán a los Reyes La Paz, Estado de México. En la actualidad se le ha dado el nombre de Ferrometro, -- por su tren de rodamiento a base de llantas metálicas y no neumáticos como es característico de los Metros de la Ciudad de México.

Por último en la tabla 1.3. Se presenta en resumen, la relación de longitud y tipos de construcción del Metro.

	Total Kilómetros	T Superficial	I Subterráneo	P Elevado	O Túnel
A) Longitud de Kilómetros recibidos hasta 1970	35.939	10.189	25.750		
B) Longitud de kilómetros recibidos hasta 1981	63.069	18.463	36.747	6.489	1.370
C) Longitud en operación hasta el año 1985.	108.635	24.947	55.106	10.143	18.439
D) Longitud en operación hasta el año 1988.	134.714	25.312	66.829	15.494	27.080
E) Longitud de Tren Ligero Tasqueña-Huipulco 6.0 km. Huipulco-Xochimilco 7.0 km. Huipulco-San Fernando 1.0km.	14.0				

Tabla 1.3.- Longitud y Tipos de construcción del Metro.

II.- CARACTERÍSTICAS DEL SUBSUELO DE LA CIUDAD DE MEXICO.

El conocimiento de las características del subsuelo para la creación de nuevas estructuras, es necesario, ya que de ésta manera se optimizan recursos y nos permite asegurar una estabilidad adecuada.

El Reglamento de Construcciones del Distrito Federal en su capítulo VIII, artículo 219, menciona que para fines de diseño, el Distrito Federal, se divide en tres zonas, las cuales son: (figura II.1).

Zona I. Lomas.

Zona II. Transición.

Zona III. Lago.

El siguiente desarrollo hace mención de las características del subsuelo de la Ciudad de México en forma general, en base a lo propuesto por el Reglamento de Construcciones del Distrito Federal.

Algo de llamar la atención y que puede observarse en la Fig. II.1, es que no se marcan límites exactos en esta zonificación (calles por decir algo), sino que se enfoca como una especie de frontera entre ciertas áreas.

Asimismo y para particularizar, se hace una breve descripción de las características del subsuelo que forma parte en la ruta que sigue la Línea 9 del Metro de la Ciudad de México.

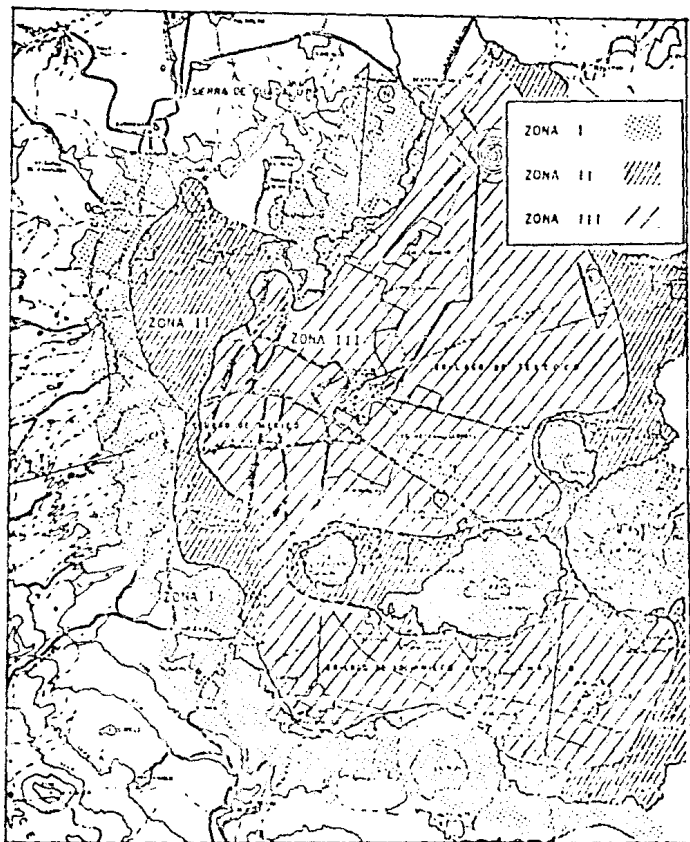


FIG. 11.1. ZONIFICACION GEOTECNICA DE LA CIUDAD DE MEXICO

A.- Zona de Lomas.

La Zona de las Lomas está formada por las serranías que limitan a la cuenca al poniente y al norte, además - de los derrames del Xitle al S S W; en las sierras predominan tobas compactas de cementación variable, depósitos de origen glacial y aluviones.

En la formación de las Lomas se observan los siguientes elementos litológicos, producto de las erupciones de grandes volcanes andesíticos estratificados de la Sierra de las Cruces.

Horizontes de cenizas volcánicas. De granulometría variable, producidos por erupciones violentas que formaron tobas cementadas depositadas a decenas de kilómetros de distancia del cráter.

Capas de erupciones pumíticas. Correspondientes a la actividad volcánica de mayor violencia y que se depositaron como lluvia, en capas de gran uniformidad hasta lugares muy distantes del cráter.

Lahares. Definidos como acumulaciones caóticas de material piroclástico arrastrado lentamente en corrientes lubricadas por agua, generadas por lluvia torrencial inmediatas a la erupción.

Lahares calientes. Correspondientes a corrientes impulsadas y lubricadas por gases calientes; son las menos frecuentes ya que están asociadas a erupciones paroxísmicas de extraordinaria violencia; las arenas y gravas azules son las más representativas de estos depósitos.

Depósitos glaciales. Caracterizados por grandes bloques angulosos en una matriz más fina, dispuestos en forma caótica; estos depósitos generalmente presentan un color rosa.

Depósitos fluyioglaciales. Producto de arrastre - del agua que se derrite y sale del glacial; se distinguen por su ligera estratificación.

Depósitos fluviales. Correlacionables con la formación clástica aluvial del relleno de la cuenca del Valle de México.

Suelos. Producto de la alteración de lahares y cenizas, de color rojo y gris asociados a climas húmedos y áridos, respectivamente.

A la zona cubierta por lavas, se le identifica como los pedregales de: San Angel, San Francisco, Santa Ursula, Carrasco y Padferna.

En la figura 11.2. se muestra la estratigrafía típica de la zona de Las Lomas, que se extiende sobre un intervalo que cubre el último medio millón de años.

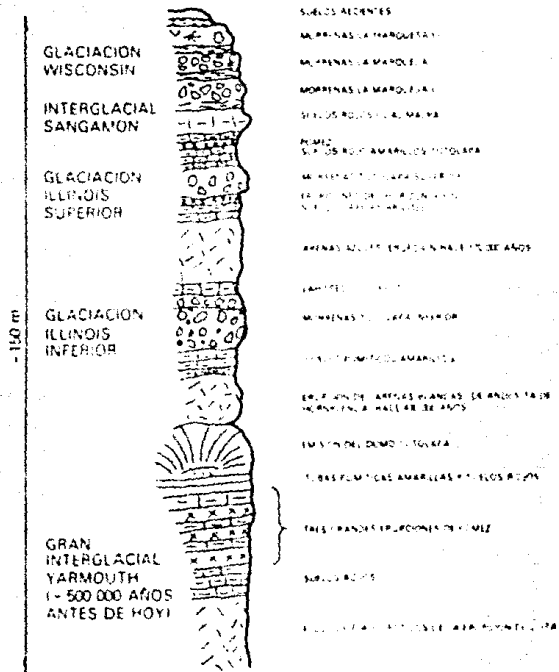


FIG. II 2 ESTRATIGRAFIA TIPICA DE LA ZONA DE LAS LOMAS

Lo anterior nos indica que para construir en este tipo de terreno, se deberán realizar estudios, que se iniciarán con un reconocimiento detallado del lugar donde se ubica el predio, así como de predios colindantes con el mismo, para investigar la existencia de bocas de antiguas minas o capas de arena, grava y materiales pumfíticos que hubieran podido ser objeto de explotación subterránea en el pasado. Se determinará en particular si el predio fue usado en el pasado como depósito de desechos o fue nivelado con rellenos colocados sin compactación. Asimismo, se prestará también atención a la posibilidad de erosión diferencial en taludes o cortes debido a variaciones del grado de cementación de los materiales que los constituyen. En las zonas de derrames basálticos, además de localizar los materiales volcánicos elásticos sueltos y las grietas superficiales que suelen estar asociadas a estas formaciones, se buscarán evidencias de oquedades subterráneas de grandes dimensiones dentro de la lava.

Las investigaciones mínimas del subsuelo a realizar según el Reglamento son las siguientes:

1.- Para construcciones ligeras o medianas de poca extensión y con excavaciones poco profundas.

- a) Hacer una detección por procedimientos directos, eventualmente apoyados en métodos indirectos, de rellenos sueltos, galerías de minas, grietas y otras oquedades.
- b) Realizar pozos a cielo abierto para determinar la estratigrafía y propiedades de los materiales y poder definir la profundidad de desplante de la cimentación.

- c) En caso de considerarse en el diseño del cimiento un incremento neto de presión mayor de 8 t/m^2 , el valor recomendado deberá justificarse a partir de resultados obtenidos de las pruebas realizadas en el laboratorio o en campo.

2.- Para construcciones pesadas, extensas o con excavaciones profundas.

- a) Realizar una detección, por procedimientos directos, eventualmente apoyados en métodos indirectos de rellenos sueltos, galerías de minas, grietas y otras oquedades.
- b) Realizar sondeos o pozos profundos a cielo abierto para determinar la estratigrafía y propiedades de los materiales y poder definir la profundidad de desplante. La profundidad de la exploración, deberá abarcar todos los estratos sueltos o compresibles que puedan afectar el comportamiento de la cimentación.

B.- Zona de Transición.

La Zona de Transición forma una franja que divide los suelos lacustres de las sierras que rodean al valle y de los aparatos volcánicos que sobresalen en la zona del lago. Estos materiales de origen aluvial, están constituidos predominantemente por estratos arenosos, limoarenosos intercalados con capas de arcilla lacustre y generalmente se clasifican de acuerdo al volumen de clásticos que fueron arrastrados por las corrientes hacia el lago y a la frecuencia de los depósitos; de esta manera se clasifican en: interestratificada y abrupta.

Condición interestratificada del poniente.

Esta condición se presenta en los suelos que se originaron al pie de las barrancas, donde se acumularon los acarrees fluviales que descendieron de las lomas a la planicie; estos depósitos tienen semejanza con deltas. En el proceso de formación de los suelos, el ancho de la franja y el espesor de estos depósitos transicionales interestratificados varía según el clima prevaleciente en cada época geológica. Estos depósitos se encuentran en las barrancas de San Angel, del Muerto, Mixcoac, Tacubaya, Tarango y Río Hondo.

Otra zona de transición interestratificada ancha se extiende del Valle de Cuauhtepac hacia el sur.

La zona de transición se divide en subzonas, en función de la cercanía de las lomas y sobre todo al espesor de suelos relativamente blandos; se identifican así las transiciones alta y baja, que se describen a continuación:

Transición Alta. Es la subzona de transición más próxima a Las Lomas; presenta irregularidades estratigráficas producto de depósitos aluviales cruzados; la frecuencia y disposición de estos depósitos depende de la cercanía a antiguas barrancas. Bajo estos materiales se encuentran estratos arcillosos que sobreyacen a los depósitos propios de Las Lomas. (Figura 11.3).

La estratigrafía comúnmente encontrada tiene las características anotadas en la Tabla 11.1

Estrato*	Espesor en m.	γ en t/m^3	c en t/m^2	ϕ en grados
Costra superficial	8 a 10	1.6	10	20
Suelos blandos	4 a 6	1.3	5	0

* en orden de aparición a partir de la superficie.

TABLA 11.1. ESTRATIGRAFIA Y PROPIEDADES, TRANSICION ALTA.

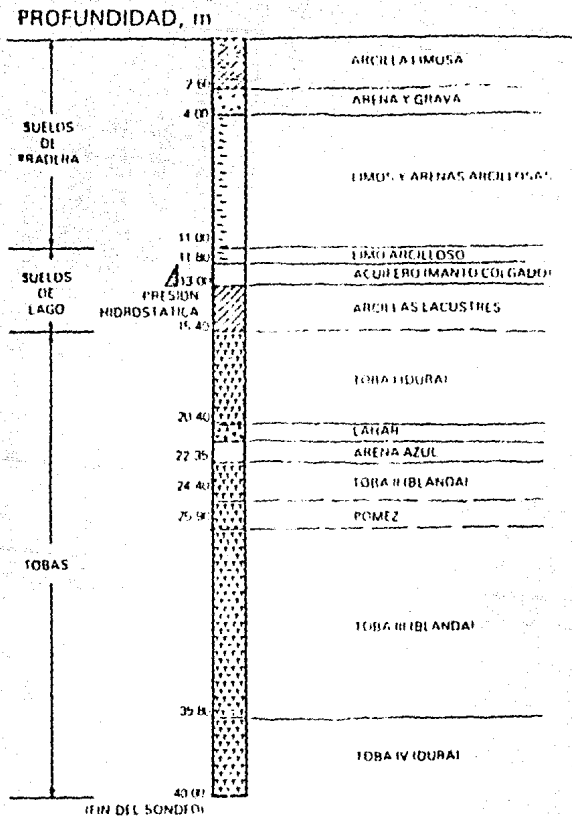


FIG. 11.3. ESTRATIGRAFIA TIPICA EN LA ZONA DE TRANSICION ALTA

Transición Baja. Corresponde a la transición vecina a la zona del lago; aquí se encuentra la serie arcillosa superior con intercalaciones de estratos limoarenosos de origen aluvial, que se depositaron durante las regresiones del antiguo lago. Este proceso dio origen a una estratificación compleja, donde los espesores y propiedades de los materiales pueden tener variaciones importantes en cortas distancias, dependiendo de la ubicación del sitio en estudio respecto a las corrientes de antiguos ríos y barrancas.

Debido a lo anterior, se puede decir que las características estratigráficas de la parte superior de la transición baja son similares a la subzona del Lago Centro I ó Centro II, que se describen más adelante con: a) la costra superficial formada por depósitos aluviales de capacidad de carga no uniforme, b) los materiales compresibles se extienden a profundidades máximas del orden de veinte metros, c) existe interestratificación de arcillas y suelos limoarenosos, y d) se presentan mantos colgados.

En la figura II.4. se muestran los resultados de un sondeo de cono característico de esta subzona.

Condición abrupta cercana a los cerros.

Esta condición se identifica en el contacto entre los rellenos de la cuenca y los cerros que sobresalen de dicho relleno, a manera de islotes. Esta transición abrupta se presenta en el Peñón de los Baños, el Peñón del Marqués, el Cerro de la Estrella y el Cerro del Tepeyac. Figura II.5.

RESISTENCIA DE PUNTA q_c , kg/cm²

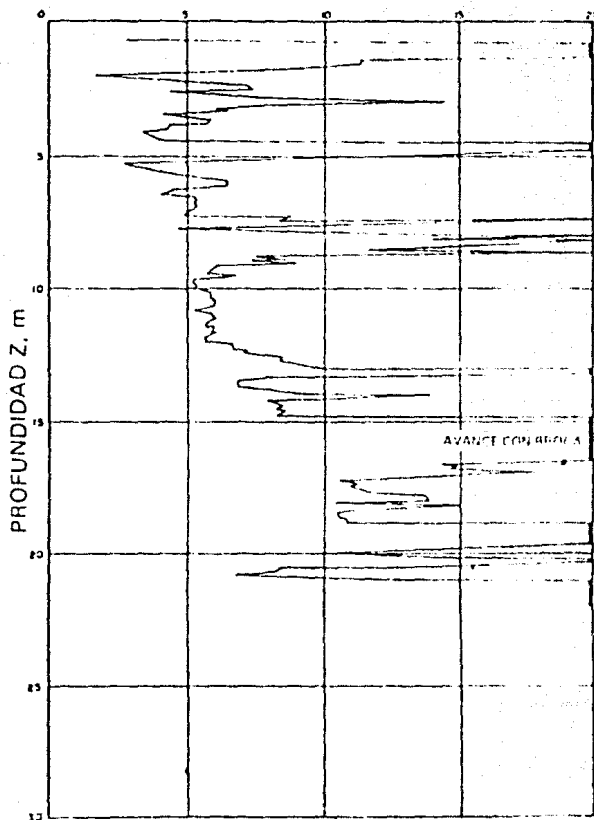


FIG.II.4. SONDEO DE CONO ELECTRICO EN LA SUBZONA DE TRANSICION BAJA

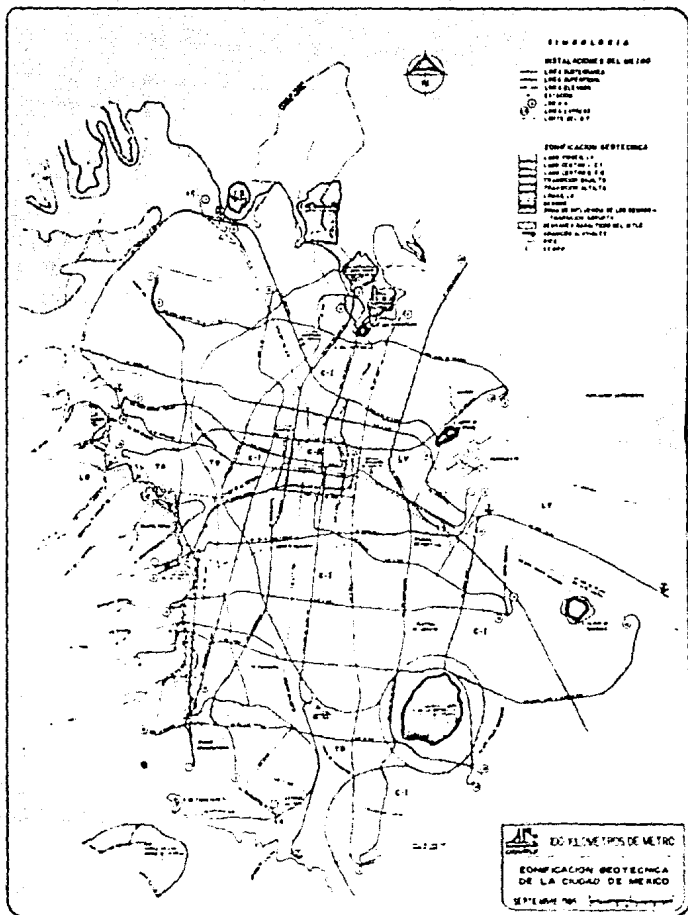


FIG. 11.5. CONDICION ABRUPTA CERCA A LOS CERROS

Una vez conocidas las características geológicas de la Zona de Transición, las investigaciones para construir en éste tipo de terreno, consistirán en realizar una exploración tomando en cuenta que suele haber irregularidades en el contacto entre diversas formaciones así como variaciones importantes en el espesor de suelos compresibles.

Las investigaciones mínimas a realizar en el subsuelo de esta zona según el artículo 220 del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, son las siguientes:

1.- Para construcciones ligeras o medianas de poca extensión y con excavaciones someras.

- a) Realizar una inspección superficial detallada después de haber cumplido con la limpieza y despalme del predio para detectar rellenos sueltos y grietas.
- b) Realizar pozos a cielo abierto o sondeos para determinar la estratigrafía y propiedades índice de los materiales del subsuelo y definir la profundidad de desplante.
- c) En caso de considerarse en el diseño del cimiento un incremento neto de presión mayor de 5 t/m^2 , - bajo zapatas o de 2 t/m^2 bajo cimentación a base de losa continua, el valor recomendado deberá justificarse a partir de resultados obtenidos de -- pruebas realizadas en el laboratorio o en campo.

2.- Para construcciones pesadas, extensas o con excavaciones profundas.

- a). Realizar una inspección superficial después de haber hecho la limpieza y despalme del predio para detectar rellenos sueltos y grietas.
- b). Hacer sondeos con recuperación de muestras inalteradas para determinar la estratigrafía y propiedades índice y mecánicas de los materiales -- del subsuelo y definir la profundidad de desplante. Los sondeos permitirán obtener un perfil estratigráfico continuo con la clasificación de los materiales encontrados y su contenido de agua. Además, se obtendrán muestras inalteradas de los estratos que puedan afectar el comportamiento de la cimentación. Los sondeos deberán realizarse en número suficiente para verificar si el subsuelo del predio es homogéneo o definir sus variaciones dentro del área estudiada.
- c). En el caso de cimentaciones profundas, la investigación estará enfocada a los movimientos del subsuelo debidos a consolidación regional y determinación de las condiciones de presión del agua en el subsuelo, incluyendo detección de mantos acuíferos colgados arriba del nivel máximo de excavación.

C.- Zona de Lago.

Comprende la parte centro y oriente de la Ciudad de México. Se caracteriza por tener un subsuelo con grandes espesores de arcillas lacustres, como consecuencia del proceso de depósito y de alteración físico-química de los materiales aluviales y de las cenizas volcánicas, el proceso de formación de suelos de esta zona sufrió largas interrupciones durante los períodos de intensa sequía, en los que el nivel del lago bajó y se formaron costras endurecidas por deshidratación o por secado solar. Otras interrupciones fueron provocadas por violentas etapas de actividad volcánica, que cubrieron toda la cuenca con mantos de arenas basálticas o pumfíticas.

El proceso formó una secuencia ordenada de estratos de arcilla blanda separados por lentes duros de limos arcillo-arenosos, por las costras secas y por arenas basálticas o pumfíticas producto de las emisiones volcánicas. Figura II.6

Evolución de las propiedades mecánicas de los suelos:

- a) Consolidación natural. Debido al proceso de formación que tuvieron estos suelos, trajo como consecuencia que se consolidaran bajo su propio peso, excepto en las costras duras, que se preconsolidaron fuertemente por deshidratación o secado solar y que en su parte inferior formaron una zona ligeramente preconsolidada.
- b) Consolidación inducida. El desarrollo urbano en la zona lacustre de la cuenca del Valle de México, ha ocasionado un complejo proceso de consolidación en el que se distinguen los siguientes factores de influencia.

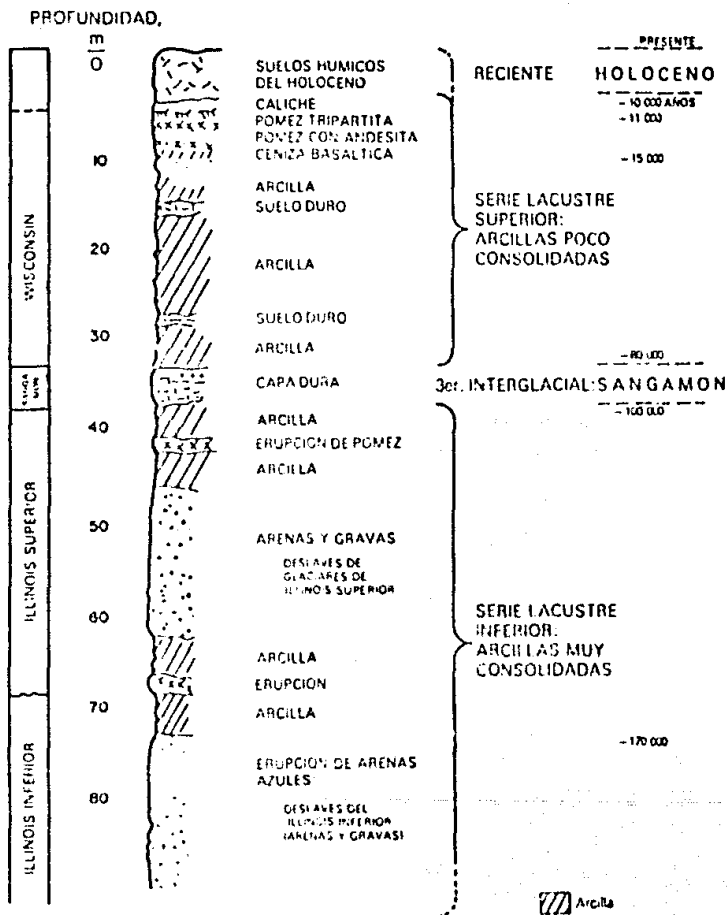


FIG. 11.6. ESTRATIGRAFIA TÍPICA DE LA ZONA DE LAGO

1.- La colocación de rellenos desde la época precortesiana, necesarios para la construcción de viviendas y pirámides, así como para el desarrollo de zonas agrícolas.

2.- La apertura de tajos para el drenaje de aguas -- pluviales y negras, que provocó el abatimiento del nivel frático, lo que a su vez incrementó el espesor de la costra superficial y consolidó la parte superior de la masa de arcilla.

3.- La extracción de agua del subsuelo, que ha venido consolidando progresivamente las arcillas, desde los estratos más profundos a los superficiales.

4.- La construcción de estructuras.

c). Resistencia al corte. Las etapas del proceso de consolidación implican la evolución de la resistencia al corte de los suelos.

Por otro lado, la estratigrafía en general es regular, aunque cada estrato suele ser de espesor variable.

La integran cinco estratos principales los cuales se describen a continuación a partir de la superficie del terreno. Figura II.7.

a). Manto o costra superficial. Este estrato está integrado por tres substratos, que constituyen una secuencia de materiales naturales cubiertos con un relleno artificial heterogéneo.

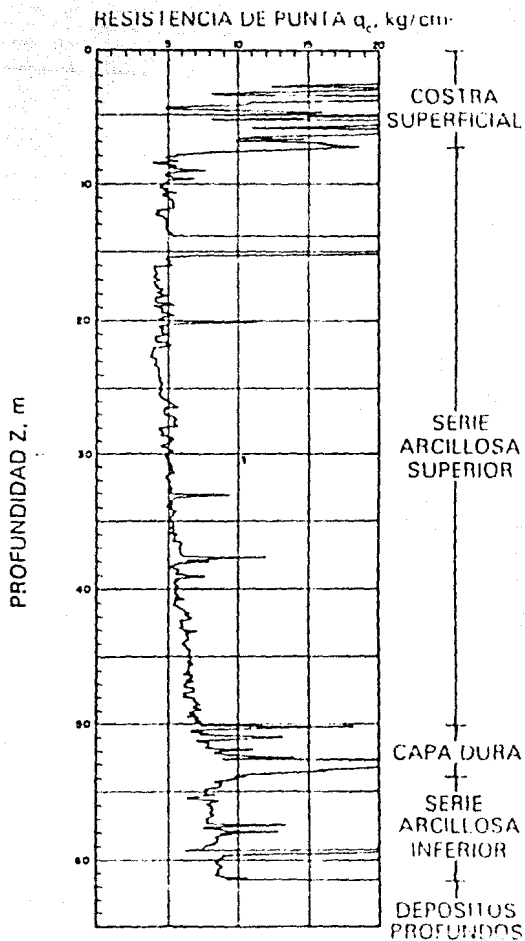


FIG. II.7. SONDEO DE CONO ELECTRICO EN LA ZONA DE LAGO

1.- Relleno artificial. Se trata de restos de construcciones y rellenos arqueológicos.

2.- Suelo blando. Se le puede describir como una serie de depósitos aluviales blandos con lentes de material edáfico intercalados.

3.- Costra seca. Formada como consecuencia de una disminución del nivel del lago, quedando expuestas algunas zonas a los rayos solares.

Generalmente este estrato ocupa los primeros cinco metros y en algunos puntos de la Ciudad hasta diez metros de profundidad.

b). Formación arcillosa superior. Consiste en depósitos lacustres de arcillas volcánicas de alta compresibilidad, de variados colores y consistencias comprendidas entre blanda y media, con intercalaciones de pequeños mantos de arena cuyo espesor varía entre 25 y 50 metros aproximadamente. La estratigrafía anterior se resume a continuación:

Estratigrafía entre la superficie y la Capa Dura	Estratos Principales	{	Costra superficial
			Arcillas preconsolidadas superficiales
			Arcillas normalmente consolidadas
			Arcillas preconsolidadas profundas
	Estratos Secundarios	{	Capas de secado solar
			Lentes de arena volcánica
			Lentes de vidrio volcánico

Las características de los estratos que integran esta formación arcillosa superior son:

Arcilla preconsolidada superficial (PCS). En este estrato las sobrecargas y rellenos provocaron un proceso de consolidación que transformó a los suelos normalmente consolidados, en arcillas preconsolidadas.

Arcilla normalmente consolidada (NC). Se encuentran a una profundidad, hasta donde llegan los efectos de las sobrecargas superficiales y por arriba de los suelos preconsolidados por el bombeo profundo. Se aclara que estos suelos se han identificado como normalmente consolidados para las sobrecargas actuales.

Arcilla preconsolidada profunda (PCP). Se forma como consecuencia del bombeo de agua, que provoca el fenómeno de consolidación, siendo más significativo en las arcillas profundas que en las superficiales.

Lentes duros. (LD). Pueden ser costras de secado solar, arena o vidrio (pómez) volcánicos, que dividen un estrato de arcilla de otro.

c). Capa dura. Formada por suelos arcillo o limoarenosos muy compactos y en ocasiones cementados; su espesor es variable, desde casi imperceptible en la zona central del lago que no llegó a secarse, hasta unos cinco metros en las orillas del lago. Debido a la heterogeneidad de los suelos el contenido de agua varía entre el 20 y el 100% considerándose un contenido de agua medio general del 50%.

d) Formación arcillosa inferior. Constituida por depósitos lacustres de ceniza volcánica de consistencia media a dura, compresibles, con intercalaciones de lentes de arena, el espesor de este estrato es de unos quince metros al centro del lago y prácticamente desaparece en sus orillas.

e) Depósitos profundos. Es una serie de capas de arena, gravas arenosas, limos arcillosos, arenas limosas, en general compactas; la parte superior de estos depósitos de unos cinco metros, está más endurecida, abajo de la cual se encuentran estratos menos cementados y hasta arcillas preconsolidadas.

Las propiedades índice de las formaciones anteriores tomadas de las curvas de regresión estadística del subsuelo de la Ciudad de México se presentan en las tablas 11.2 y 11.3.

	w _L	w _p	PI	LL	LP	IP	σ_{vm}	σ_{vp}	$\sigma_{v máx}$	σ_v	ρ_0
	%	%	%	%	%	%	cm ² /kg	cm ² /kg	cm ² /kg	kg/cm ²	kg/cm ³
Rancho superficial	170	2.5	3.1	104	54	51	-	-	-	0.77	61.8
Formación arcillosa superior	107	4.8	7.1	70	66	713	0.75	1.75	2.55	1.81	73.4
Capa dura	80	2.3	2.1	96	49	46	-	-	-	1.00	66.5
Formación arcillosa inferior	192	2.4	4.5	209	68	141	0.29	0.61	0.84	1.85	61.1
Depósitos profundos	55	2.5	2.3	117	57	68	-	-	-	2.40	124.5

TABLA 11.2.

	W _i	S _s	e _f	LL	LP	IP	A _{vm}	A _{vp}	A _{v máx}	qu	Md
	%	-	-	%	%	%	cm ² /kg	cm ² /kg	cm ² /kg	kg/cm ²	kg/cm ²
Manto superficial	95	2.5	2.8	103	54	50	-	-	-	0.91	49.1
Formación arcillosa superior	263	2.4	6.4	283	86	197	0.58	1.25	1.84	0.90	40.2
Capa dura	48	2.5	1.4	51	38	15	-	-	-	1.65	104.4
Formación arcillosa inferior	177	2.4	4.4	214	70	144	0.19	0.39	0.57	1.94	84.6
Depósitos profundos	52	2.5	1.3	71	47	32	-	-	-	2.72	157.8

TABLA 11.3.

De las tablas anteriores

W _i	Contenido natural de agua inicial	A _{vp}	Coefficiente de compresibilidad en el intervalo de preconsolidación
S _s	Densidad de Sólidos	A _{v máx}	Coefficiente de compresibilidad máxima.
e _f	Relación de vacíos	qu	Resistencia a la compresión no confinada
LL	Límite líquido	Md	Módulo de deformación.
Lp	Límite plástico		
I _p	Índice de plasticidad		
A _{vm}	Coefficiente de compresibilidad en recompresión		

Debido a los grandes espesores de arcillas blandas de alta compresibilidad, variables en cada sitio, dependiendo de la localización e historia de cargas, la zona del lago se ha dividido en tres subzonas que son:

Lago Virgen. Esta subzona corresponde al sector oriente del lago, cuyos suelos prácticamente han mantenido sus propiedades mecánicas desde su formación; sin embargo, el reciente desarrollo de esta zona de la Ciudad, está incrementando las sobrecargas en la superficie y el bombeo profundo.

La estratigrafía típica de esta subzona se ilustra en la figura II.8; y en la tabla II.4, se mencionan las propiedades medias de los estratos.

Estrato*	Espesor en m	γ , en t/m^3	C_u , en t/m^2	ϕ , en grados
Costra superficial	10 a 25	1.4	1.0	20
Serie arcillosa superior	39 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	--

* En orden de aparición a partir de la superficie.

** La información disponible es muy limitada; los parámetros presentados corresponden a pruebas triaxiales C.U.

TABLA II.4. ESTRATIGRAFIA Y PROPIEDADES ZONA LAGO VIRGEN

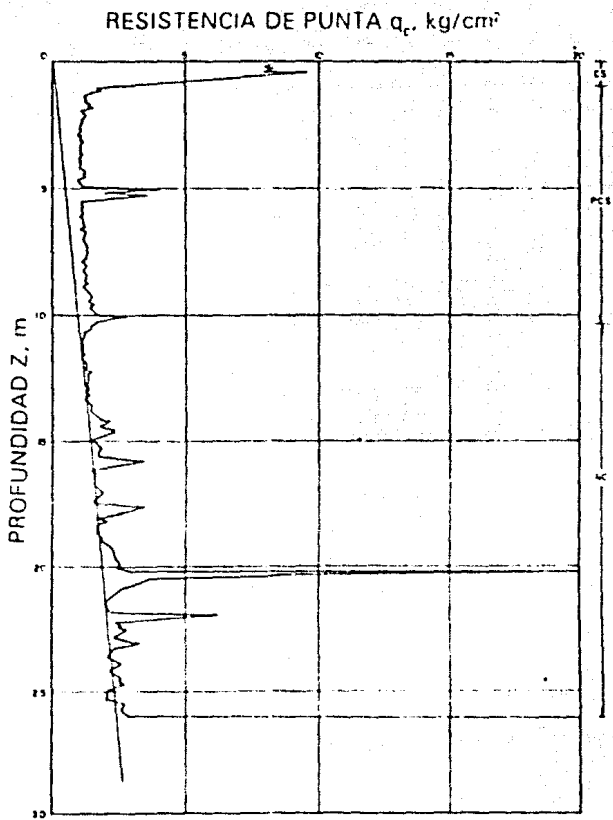


FIG.11.8. SONDEO DE CONO ELECTRICO EN LA SUBZONA LAGO VIRGEN

Lago Centro I, Comprende el sector no colonial de la Ciudad, que se desarrolló desde principios de este siglo y ha estado sujeto a las sobrecargas generadas por construcciones pequeñas y medianas; las propiedades mecánicas del subsuelo de esta subzona representan una condición intermedia entre Lago Virgen y Lago Centro II.

Las características estratigráficas propias de esta subzona se presentan en la tabla II.5, y en la figura II.9.

Estrato*	Espesor en m	γ , en t/m ³	C, en t/m ²	ϕ , en grados
Costra superficial	4 a 5	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 25
Serie arcillosa inferior	8 a 10	1.3 a 1.35	5 a 8	- -

* En orden de aparición a partir de la superficie

** La información disponible es muy limitada; los parámetros presentados corresponden a pruebas triaxiales C.U.

TABLA II.5 ESTRATIGRAFIA Y PROPIEDADES ZONA LAGO CENTRO I

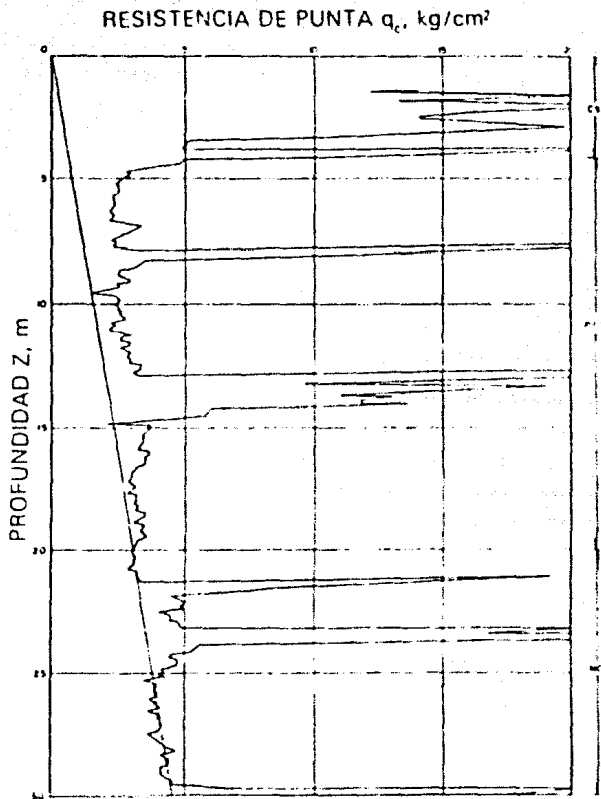


FIG. II. 9. SONDEO DE CONO ELECTRICO EN LA SUBZONA DEL LAGO CENTRO I

Lago Centro II. Esta subzona corresponde con la antigua traza de la Ciudad, donde la historia de cargas aplicadas en la superficie ha sido muy variable, esta situación ha provocado las siguientes condiciones:

a) arcillas fuertemente consolidadas por efecto de rellenos y grandes sobrecargas de construcciones aztecas y coloniales, b) arcillas blandas, asociadas a lugares que han alojado plazas y jardines durante largos períodos de tiempo, y c) arcillas muy blandas en los cruces de antiguos canales. Asimismo, el intenso bombeo para surtir de agua a la Ciudad se refleja en el aumento general de la resistencia de los estratos de arcillas por efecto de la consolidación inducida, como se puede observar en la figura II.10, en la tabla II.6 se resume la estratigrafía característica de esta subzona.

Estrato*	Espesor en m	γ , en t/m^3	C, en t/m^2	θ , en grados
Centro 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 26
Serie arcillosa inferior	6 a 8	1.3 a 1.4	6 a 12	- -

* En orden de aparición a partir de la superficie.

** La información disponible es muy limitada; los parámetros presentados corresponden a pruebas triaxiales C.U.

TABLA II.6. ESTRATIGRAFIA Y PROPIEDADES ZONA LAGO CENTRO II

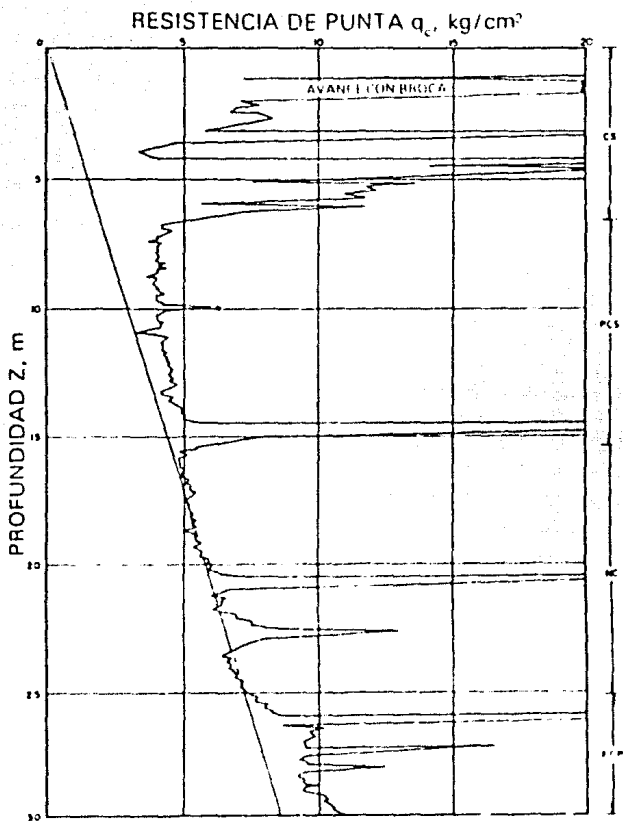


FIG. 11. 10. SONDEO DE CONO ELECTRICO EN LA SUBZONA DEL LAGO CENTRO II

Con el conocimiento del tipo de subsuelo de la Zona de Lago, de antemano sabemos que los coeficientes de seguridad se incrementan en buena forma, y las condiciones de estabilidad para construcción dadas las características estratigráficas son más desfavorables. Por lo que para construir en este tipo de terreno se deben realizar investigaciones para obtener datos completos de construcciones vecinas existentes, se deberá investigar la antigüedad de cargas soportadas previamente por el suelo del predio y áreas circundantes. Se buscarán evidencias de rellenos superficiales recientes o antiguos. También se investigará si existen antecedentes de grietas profundas en el predio o de cimentaciones que hayan sido abandonadas al demoler construcciones anteriores.

El número mínimo de exploraciones a realizar (pozos a cielo abierto o sondeos) será de una por cada 120 m. o fracción de dicho perímetro. La profundidad de las exploraciones dependerá del tipo de cimentación y de las condiciones del subsuelo pero no será inferior a dos metros bajo el nivel de desplante.

Los requisitos mínimos para la investigación del subsuelo en esta zona según el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, son los siguientes:

- I.- Para construcciones ligeras o medianas de poca extensión y con excavaciones someras.
 - a) Realizar una inspección superficial después de haber hecho la limpieza y despalme del predio, con el fin de detectar rellenos sueltos y posibles grietas.

- b) Por medio de pozos a cielo abierto complementados con exploraciones más profundas, determinar la estratigrafía y conocer las propiedades índice de los materiales del subsuelo en estudio.
- c) Si se considera en el diseño del cimiento un incremento neto de presión mayor de 4 t/m^2 bajo zapatas o 1.5 t/m^2 bajo cimentaciones a base de losa continua, el valor recomendado deberá justificarse a partir de resultados de pruebas efectuadas en campo o en el laboratorio.

2.- Para construcciones pesadas, extensas o con excavaciones profundas.

- a) Realizar una inspección superficial para detectar rellenos sueltos y posibles grietas.
- b) Por medio de sondeos determinar la estratigrafía y propiedades índice y mecánicas de los materiales para poder definir la profundidad de desplante. Además, se obtendrán muestras inalteradas de todos los estratos que puedan afectar el comportamiento de las cimentaciones.
- c) En el caso de cimentaciones profundas, se realizará una investigación de la tendencia de los movimientos del subsuelo debidos a consolidación regional y se determinarán las condiciones de presión de agua en el subsuelo.

D.- Descripción de la Línea 9 del Metro.

El trazo de la Línea 9 fue el resultado de los estudios realizados de acuerdo a las condiciones particulares existentes en la Ciudad de México, normadas por las premisas planteadas desde su origen como son:

A.- Evitar el ingreso de los autobuses suburbanos y foráneos al centro de la Ciudad.

B.- Descongestionar las zonas de mayor afluencia de vehículos de superficie.

C.- Permitir su adecuada integración con el futuro desarrollo de la red de tránsito.

Para cumplir con los objetivos señalados el trazo de la Línea 9 fue definido al considerar:

- 1.- La densidad demográfica.
- 2.- El origen y destino de los usuarios (obreros, empleados, etc).
- 3.- Las almenataciones exteriores e interiores, de procedencia urbana, suburbana y foránea.
- 4.- Y los modelos de simulación (modelos computarizados).

De tal manera se pronosticaron y ubicaron las necesidades más urgentes por resolver, para continuar con el desarrollo de la Línea.

La intensa demanda de transporte que se prevefa en el corredor Oriente-Poniente, Observatorio-Pantitlán, y el gran congestionamiento que esto podría ocasionar en las Líneas del Metro, principalmente en la Línea 1, y la correspondencia en la estación Pino Suárez, planteaba algunas de las necesidades básicas a resolver por la cuarta etapa de ampliación del Metro.

De acuerdo a los resultados de los modelos de - - transporte de Simulación y Evaluación, que consideran - diversos factores tales como: desarrollo urbano, optimización del sistema de transporte y la opinión del público entre otros, se determinó la prioridad de la construcción de la Línea 9 del Metro.

La captación diaria de pasajeros de la línea que se espera a los horizontes de proyecto es la siguiente:

- A corto plazo (1988), 620 000 pasajeros.
- A mediano plazo (1994), 800 000 pasajeros.
- A largo plazo (2010), 660 000 pasajeros.

La Línea 9 cruza la Ciudad de México de Oriente a Poniente desde la zona de Pantitlán hasta la estación Observatorio de la Línea 1, que se localiza paralela a la Terminal de Autobuses Poniente.

El trazo se definió de la siguiente manera:

Se inicia en la estación Pantitlán en donde hace correspondencia con las Líneas 1 y 5, dirigiéndose al Poniente; sobre Rfo Churubusco, cruza la Calzada --

Ignacio Zaragoza y la Avenida 8 para continuar por Viaducto Piedad y así incorporarse al Eje 3 Sur (Av. Morelos) a la altura del Velódromo Olímpico coincidiendo en su trazo hasta la Avenida Benjamín Franklin y Calle de La Paz, cruzando las siguientes avenidas: Eje 3 Oriente (Fco. del Paso y Troncoso), Eje 2 Oriente (Fco. Morazán), Eje 1 Oriente (Calzada de la Viga), Calzada de Tlalpan, Eje Central (Lázaro Cárdenas), Eje 1 Poniente (Avenida Cuauhtémoc), Eje 2 y 3 Poniente (Monterrey y Medellín), Avenida de los Insurgentes, Avenida Nuevo León, Circuito Interior (Patriotismo y Revolución), continua por la Calle de la Paz y Martí, siguiendo por ésta hasta la Avenida Jalisco y Parque Lira, en donde hace correspondencia con la Línea 1 y la Línea 7 en la estación Tacubaya, se dirige al Poniente cruzando el Anillo Periférico para llegar a su Terminal Observatorio.

Esta Línea cuenta con una longitud total de 16.4 kilómetros y 13 estaciones de las cuales:

Dos son terminales (Pantitlán y Observatorio).

Cuatro correspondencias, Jamaica con Línea 4; Chabacano con Línea 2; Centro Médico con Línea 3; Tacubaya con las Líneas 1 y 7.

Siete de paso.

Puebla
 Ciudad Deportiva
 Velódromo
 Mixhuca
 Lázaro Cárdenas
 Chilpancingo
 Patriotismo

Estratigrafía. Conocer la **estratigrafía** y propiedades mecánicas del subsuelo a lo largo del eje de trazo de una línea del Metro es factor preponderante para ratificar la decisión del tipo de estructura que se utilizará.

El estudio del subsuelo consiste en ejecutar una serie de sondeos de exploración y extraer muestras bien sean alteradas o inalteradas, para determinar posteriormente sus características con diversas pruebas de laboratorio.

El criterio que se establece para determinar el tipo y la profundidad de cada exploración consiste en realizar por lo menos un sondeo inalterado en los sitios donde se construyen estructuras importantes, como estaciones, edificios, etc. Los sondeos alterados se llevan a cabo con el objeto de determinar con más precisión la **estratigrafía** del subsuelo, la profundidad de estos es igual que la de los sondeos inalterados ya que de esta manera se pueden correlacionar perfectamente.

Una vez seleccionado el trazo de la Línea del Metro, se procede a realizar el Planteamiento Preliminar del eje de trazo mediante una poligonal gráfica llevada sobre planos fotogramétricos, tratando de colocar dicho eje en el centro aproximado de la calle o a cierta distancia de los paramentos, especificada por los estudios de Mecánica de Suelos. Esto permite colocar en forma semigráfica la posición de los puntos de apoyo para tangentes del trazo, valor de deflexiones aproximadas, así como el planteamiento de las curvas entre los tramos rectos y de esta manera proceder a la Verificación de -

la Geometría Preliminar que se refiere a localizar en el terreno los puntos obligados del trazo, para que con estos datos se afine el proyecto calculando las curvas reales de acuerdo con medidas lineales y ángulos verdaderos, y de esta manera se procede a la elaboración del proyecto definitivo.

Para el proyecto de perfil se lleva a cabo una nivelación de precisión apoyada en los bancos de nivel profundo a lo largo del eje de trazo y sobrepuesta a este, con objeto de conocer los niveles reales del terreno y en base a esta información iniciar el proyecto de perfil que se apoya en los siguientes criterios:

- Pendientes longitudinales máximas 7%
- Pendientes longitudinales mínimas 1%
- Relleno sobre el techo de la estructura de un metro en el hombro con objeto de localizar en este espacio las instalaciones municipales menores.

Para nuestro caso en estudio el tramo comprende de la Lumbreira PT-1 ubicada en el cadenamamiento 17+713.00 con un sentido de Oriente a Poniente pasando por la Calle de Ciencias y sigue por cerrada de la Paz, calle José Martí y Avenida Jalisco, para llegar a la Lumbreira PT-2 ubicada en el cadenamamiento 18+783.037.

Ubicando este trazo en la zonificación del Valle de México nos podemos dar cuenta que le corresponde la Zona de Transición.

El perfil estratigráfico de acuerdo a los resultados obtenidos con los sondeos realizados es el siguiente: Anexo 1.

En el cadenamamiento 18 + 023.621 (sondeo S9-6A) en los primeros 8.0 metros de profundidad se encuentra una secuencia de limos arcillosos y arcillas con capas delgadas de arena, de los 8.0 a los 10.0 metros se encuentra un estrato de arcilla, seguido nuevamente por limos arcillosos y arcillas con capas de arena hasta una profundidad de 14.0 metros, entre los 14 y 15 metros se encuentra el límite entre la zona blanda y la zona dura, de los 15 a los 30 metros de profundidad se encontró un estrato de arena compacta con intercalaciones de gravas.

En el cadenamamiento 18 + 777.427 (sondeo S9-7) en los primeros 4.0 metros de profundidad se encuentra una capa de arcilla limosa con algunos lentes de gravas y arena, de los 4.0 a los 9.0 metros se encuentra una secuencia de arcillas y arenas limosas, a partir de los 9.0 metros se encuentra nuevamente una capa de arcilla de unos 4.0 metros aproximadamente, y a los 13.0 metros de profundidad se encuentra el límite entre la zona blanda y la zona dura y continuar después hasta los -- 30.0 metros con un estrato compuesto de arenas limosas.

En el cadenamamiento 18 + 440.935 (sondeo S9-5) se tiene en la superficie una capa de relleno de aproximadamente 0.50 metros para continuar hasta los 2.0 metros con una capa compuesta de arcillas con arena, y seguir con una secuencia de limos arenosos hasta los 30.0 metros de profundidad, con algunos lentes duros compuestos de gravas.

En el cadenamiento 18 + 624,520 (sondeo S9-4) se encontró a partir de la superficie un relleno aproximadamente de 1.0 metro de espesor, para seguir con una capa compuesta por gravas y limos hasta los 6.0 metros, de los 6.0 a los 35.0 metros se tiene una secuencia de arenas compactas con algunas intercalaciones de gravas y limos, éste estrato se encuentra interrumpido por una capa de limos arenosos de los 24 a los 30 metros aproximadamente.

CAPITULO III

PROCEDIMIENTOS CONVENCIONALES DE EXCAVACION DE TUNELES

En resumen tendremos dos grandes posibilidades para excavar túneles: a) Método de Corte y Relleno, y b) Perforación, siendo su principal diferencia que el primero es aplicable a túneles de poca profundidad y afecta a la superficie del terreno por donde va a ir el túnel al momento de la excavación y el segundo no interfiere con la superficie del terreno ya que se "perfora" paralelo a esta.

La construcción de un túnel por el método de corte y relleno ofrece una alternativa para la perforación en los lugares donde sea posible excavar desde la superficie una zanja del ancho y profundidad que se requieran. Lo más sencillo es excavar una zanja, construir la estructura del túnel, rellenar la zanja y volver la superficie a su condición original, pero el soporte del terreno blando y el mantenimiento de la superficie existente y las instalaciones subterráneas hacen que la mayoría de los proyectos sean mucho más complejos. (Fig. III.1).

En los túneles de poca profundidad, el costo directo del corte y relleno es probable que sea mucho menor que el costo de perforación, pero los costos incidentales pueden cambiar completamente el equilibrio. Entre éstos se incluyen costos que no siempre se pueden determinar ni cargar, por ejemplo, la adecuación de instalaciones alternativas para el tráfico en la superficie, medidas para evitar el asentamiento, protección o desviación de los

sistemas de servicios y drenaje, además de costos sociales por alteración y modificación del paisaje.

Con el aumento de la profundidad aumentan rápidamente los costos directos de excavación y soporte de la zanja. En terrenos acuíferos, el agua se debe controlar por retención, bombeo y abatimiento del nivel de agua subterránea, mientras que en los terrenos de arcillas blandas, en especial el empuje vertical ascendente puede ocasionar una pérdida del terreno y asentamiento.

Para los túneles del transporte subterráneo en particular, existe una polémica interminable en cuanto a la selección de túneles perforados o de corte y relleno. Los costos directos de construcción y la economía vigente favorecen obviamente el método de corte y relleno somero, pero los túneles muy poco profundos varias veces son muy apropiados y es preciso tomar en consideración todos los costos y beneficios incidentales. No existe ninguna respuesta universal: cada caso particular, y en realidad cada Línea del Metro, tienen sus propios problemas especiales.

Las primeras Líneas subterráneas de México fueron construidas por el método de corte y relleno, pero las objeciones en cuanto a la interrupción y los costos incidentales hicieron poco posible continuar con este único método para su construcción, a menos que se utilizara un método de perforación de túneles más profundos; por lo que este método ha sido combinado en todas las Líneas posteriores del Metro.

De las dos grandes posibilidades para excavar túneles detallaremos a continuación los principios de varios méto-

dos aplicables a la perforación de ellos, ya que el tramo de la Línea 9 del Metro del cual es objeto el presente trabajo se atacó de dicha forma.

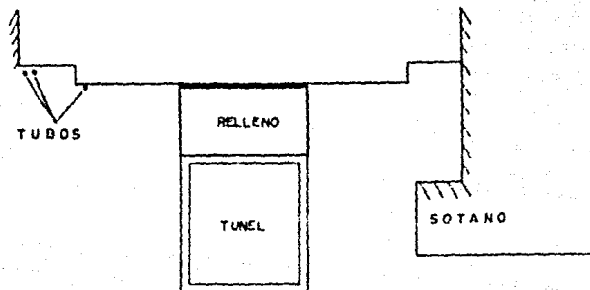


FIG. III.1. TUNEL URBANO.

A.- Método Inglés.

También llamado método de ataque a plena sección. Los túneles de pequeña sección (menos de 15 m²) son los que a menudo se ataca a plena sección.

El esquema de la figura III.2 indica el proceso de ataque, cuyas diversas etapas se numeran según su orden de ejecución, correspondiendo los números rodeados en círculo a una fase de mampostería.

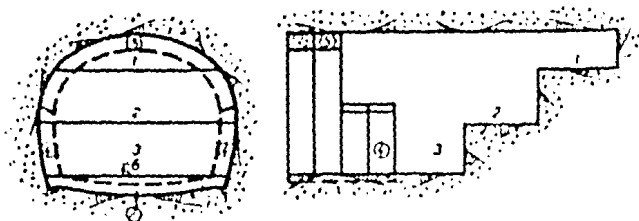


FIG. III. 2. ATAQUE A PLENA SECCION CON VARIOS PISOS.
 1. ESCALON SUPERIOR; 2. ESCALON INTERMEDIO; 3. ESCALON INFERIOR;
 4. PILARES; 5. BOVEDA; 6 Y 7. SOLERA (EVENTUALMENTE).

La excavación se inicia con una galería superior de 3 a 6 m de longitud excavando delante del frente principal. Se colocan en ella puntales radiales (apuntalamiento en abanico) que van a soportar elementos longitudinales, tras de ellos se colocan tablonces de madera, mantenidos en su lugar por maderos adicionales. Todos estos puntales se apoyan en vigas transversales. En el escalón inferior se colocan travesaños y se establece apuntalamiento entre estos y los de la etapa de la bóveda, continuando así en cada escalón. En la fig. III.3, se observa que el apuntalamiento total de un túnel atacado a plena sección es complicado y exige un gran volumen de madera y trabajos de montaje delicados.

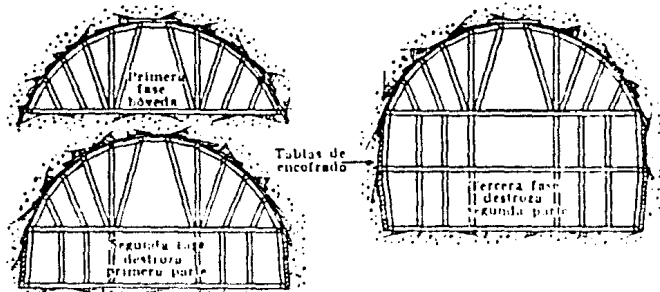


FIG. III. 3. APUNTALAMIENTO DE UN TUNEL A PLENA SECCION.

Para llevar a cabo la excavación definitiva en la parte inferior de los escombros producidos en la parte superior, se hace avanzar en el eje del escalón inferior por delante del escalón superior una galería de base que sirva para efectuar dicha evacuación a través de un pozo (Fig. III.4).

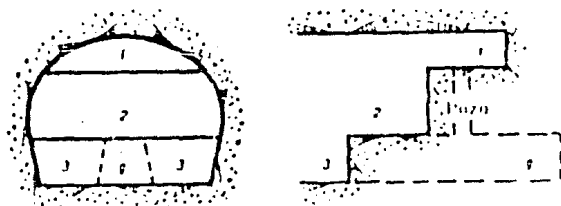


FIG. III. 4. ATAQUE A PLENA SECCION VARIANTE CON GALERIA DE BASE.
 g. GALERIA DE BASE; 1, ESCALON SUPERIOR; 2, ESCALON INTERMEDIO;
 3, ESCALON INFERIOR.

En este caso el revestimiento se ejecuta tras la excavación comenzando por los muros y terminando por la bóveda, quitando progresivamente la cimbra. A veces puede realizarse el revestimiento en su totalidad, muros y bóveda con la utilización de anillos de 2 a 3 m de longitud. Esto es posible únicamente en terrenos resistentes o estables.

La ventaja de este método es el espacio dejado para la construcción, pero depende del tipo de resistencia y la carga del tiempo que esten dentro de la capacidad de los elementos longitudinales. Este método se cataloga como económico y rápido.

B.- Método Belga.

También se conoce con el nombre de la galería clave. Este método tiene dos variantes correspondientes a terreno resistente o terreno de baja resistencia.

B.1. Caso del Terreno Resistente.

La característica del método es ejecutar rápidamente la bóveda para proteger la obra por encima, terminando después el revestimiento de los muros. (Fig. III.5).

Se ataca la mitad superior del túnel, comenzando con una galería central. La anchura de esta galería varía de 2.50 a 3 m, su altura es de 2 a 4 m y su sección de 5 a 12 m². Se construye esta galería a nivel de los arranques de la bóveda, ensanchando después a derecha e izquierda para dejar en descubierto la bóveda. A medida

que se avanza, es necesario ir ademando con vigas transversales que se apoyan en maderos longitudinales apoyados a su vez por puntales que se extienden en forma de abanico desde un soporte o durmiente en la galería central (fig. III.6).

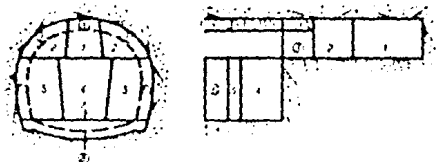
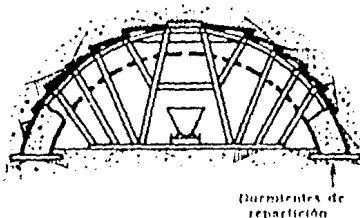


FIG. III. 5. METODO DE LA GALERIA DE CORONACION EN BUEN TERRENO (GALERIA DE CORONACION, 2, EXCAVACION DE LA BOVEDA, 3, BOVEDA, 4, DESTROZA, 5, ZONA DE LOS MUROS, 6, MUROS, 7 Y 8, SOLERA (EVENTUALMENTE)).

FIG. III. 6. ADEMADO Y CONS-
TRUCCION DE LA BOVEDA.



Después se construye la bóveda haciendo descansar directamente sobre el terreno si es resistente o sobre tabloncillos longitudinales juntos que reparten las presiones. También es posible la utilización de hormigón armado. (Fig. III.6).

Cuando la bóveda ha endurecido se quitan los encofrados y puntales. A continuación se construye la destroza o corte central hasta el lugar donde terminan los muros del túnel e inicia la cuneta (invertida) dejando bancos sobre los que se apoya la bóveda del túnel. El resto del banco se retira a continuación para completar los muros laterales, después de lo cual se cuele el concreto de la invertida. Es posible avanzar con la excavación a una distancia considerable antes de continuar con el revestimiento del túnel. (Fig. III.7).

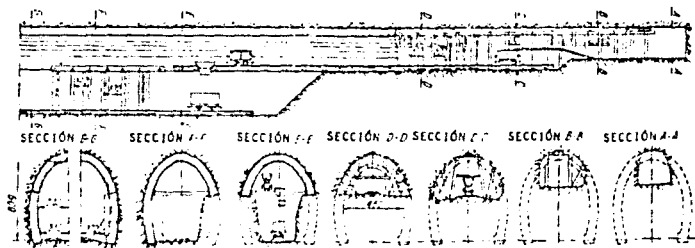
B.2. Caso del Terreno poco Resistente.

En terrenos con poca resistencia, es necesario modificar el método de excavación de la destroza y la construcción de los muros, para evitar posibles asentamientos de la bóveda durante la ejecución de la cuneta y la destroza.

Después de haber excavado bajo la bóveda y de haberla revestido como antes, se excava una zanja revestida (fig. III.8) el emplazamiento de los muros por elementos cortos ejecutados alternativamente a derecha e izquierda.

En estas excavaciones se construyen los muros bajo la bóveda primeramente y después se quitan los puntales y se excava la destroza a plena sección.

También es posible ejecutar los muros antes que la bóveda, para lo que se excava y se apuntala, construyendo en seguida los muros en zanjas revestidas, después se



ESQUEMA DEL MÉTODO BELGA (ARCO VOLADO), A PARTIR DE UN ATAQUE SUPERIOR

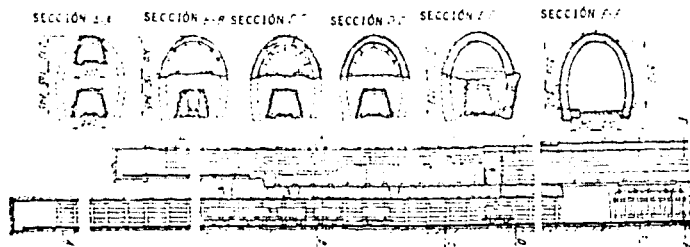


FIG. III. 7. DETALLES DE ATAQUE DOBLE EN EL MÉTODO BELGA

construye la bóveda y se excava la destroza a plena sección. (Fig. III.9).

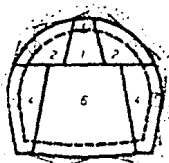


FIG. III.8 METODO DE LA GALERIA DE CLAVE EN MAL TERRENO (GALERIA DE CLAVE); 2. ENSANCHOS DE LA BÓVEDA; 4. EXCAVACION DE LOS MUROS; 5. DESTROZA Y SOLERA (EVENTUALMENTE).

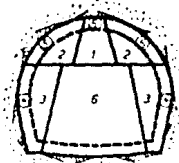


FIG. III.9 METODO DE LA GALERIA DE CLAVE EN MAL TERRENO (VARIANTE); 1. GALERIA DE CLAVE; 2. EXCAVACIONES DE LA BÓVEDA; 3. EXCAVACION DE LOS MUROS; 4. MUROS; 5. BÓVEDA; 6. DESTROZA Y SOLERA (EVENTUALMENTE).

Podemos concluir, diciendo que; este método es adecuado para terrenos resistentes y es seguro.

Presenta el inconveniente de exigir vías de evacuación de los escombros a diferentes niveles la galería de avance que evacua por la parte superior del túnel y los últimos tajos de la excavación de la destroza al nivel de la solera. Al llegar a unirse las dos etapas, los escombros de la galería de clave deben hacerse bajar al piso inferior.

C.- Método Austriaco.

Este método se caracteriza por el empleo de una galería de avance en el eje y base del túnel. En ella se instala una vía de evacuación que se utiliza en toda la obra. (Fig. III.10).

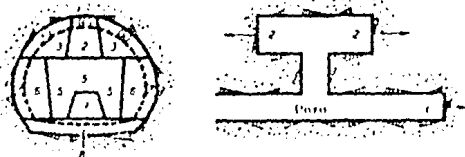


FIG III.10. MÉTODO DE LAS DOS GALERÍAS.
1. GALERÍA DE BASE. 2. GALERÍA DE CORONACIÓN. 3. EXCAVACIÓN DE LA BOVEDA. 4. BOVEDA. 6. DESTROZA. 5. EXCAVACIÓN DE LOS MUROS. 7. MUROS. 8. SOLERA (EVENTUALMENTE).

Cuando esta galería ha avanzado cierta longitud, se sube verticalmente con un pozo hacia la clave del túnel atacando después una segunda galería por encima de la primera y trabajando hacia adelante y hacia atrás.

Los escombros de la galería superior se envían por el pozo a la galería inferior que sirve para evacuar sin transbordo todos los escombros de los diferentes ataques en la galería de coronación. (Fig. III.11).

Una vez perforada la galería de clave, se continúa como en el método belga: excavación de la bóveda, construcción de esta destroza excavación de los muros y construcción del revestimiento de estos (Fig. III.11). Este método es apropiado para un terreno razonablemente estable.

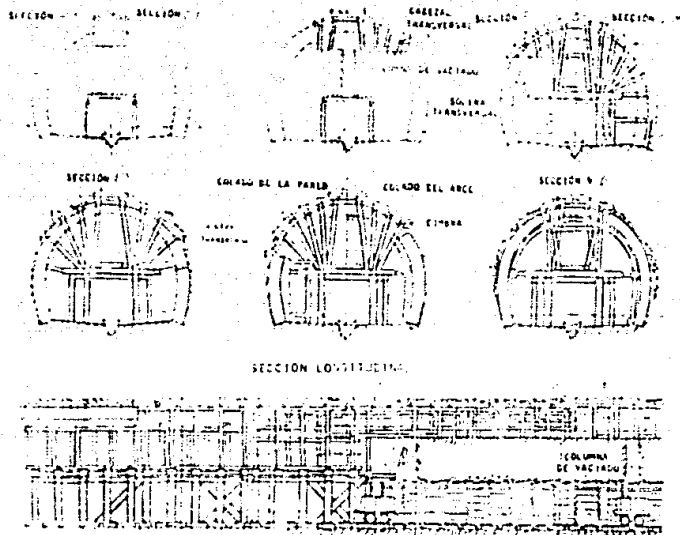


FIG. III. II. FASES CONSTRUCTIVAS DEL MÉTODO AUSTRIACO.

D. Método Alemán.

También llamado método de las tres galerías, se caracteriza por la conservación de la destroza hasta la terminación de los muros de la bóveda. La destroza sirve de apoyo para todos los apuntalamientos y cimbras, evitando el empleo de andamios.

Se atacan dos galerías de base a derecha e izquierda del túnel (fig. III.12). Se ensanchan después y se construyen los muros apuntalados contra la destroza. Se añade una galería de coronación que se ensancha construyendo la bóveda haciéndola descansar sobre los muros ya construidos y sobre los puntales apoyados en la destroza.

Cuando la bóveda ha endurecido, pueden quitarse todos los puntales excavando la destroza. Después se ejecuta la solera para completar el revestimiento por franjas de algunos metros de longitud para evitar evacuar completamente la destroza antes de terminado el revestimiento.

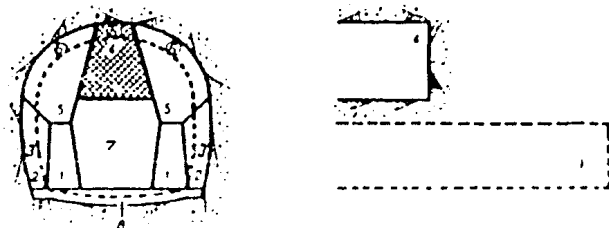


FIG. III.12. METODO DE LAS TRES GALERIAS.
 1, GALERIA DE BASE; 2, ENSANCHES DE MUROS; 3, MUROS;
 4, GALERIA DE CLAVE; 5, EXCAVACION DE LA BOVEDA;
 6 Y 6', BOVEDA; 7, DESTROZA; 8, SOLERA (EVENTUALMENTE).

La permanencia de la destroza durante la construcción de la sección del túnel ofrece seguridad contra los empujes laterales del terreno (fig. III.13.0), pero la aplicación de este método genera costos elevados.

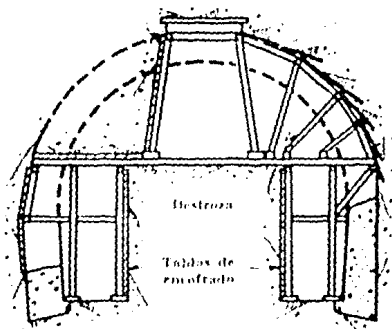


FIG. III.13. SECCION DE UN TUNEL ATACADO CON TRES GALERIAS.

E. Método Italiano.

También llamado Método de la Plantilla. Se desarrolló para terrenos muy blandos en los que se excavan solamente pequeñas áreas. Es muy costoso y ha sido sustituido por el método de escudo, utilizado hoy en día.

En este método se construye primero una plantilla con mampostería sólida desde un frente inferior para proporcionar una base segura para los postes y columnas. Esta mampostería se extiende lateralmente hacia arriba

en pequeñas unidades, que incluyen un grueso arco temporal, constituido de mampostería sobre el frente de trabajo para que la excavación de la corona, se pueda finalmente ademar y revestir el arco utilizando el arco temporal como centro.

En la Fig. III.14 se muestran los pasos a seguir para la construcción de la sección del túnel.

Podríamos concluir, que además de los métodos antes descritos, también existen los métodos: a) túnel sumergido, b) hincado de tuberías.

El método de túnel sumergido, constituye la solución más económica para los cruces subacuáticos; en este sistema se prefabrica el túnel en un dique y luego se hace flotar en el río y se hunde en una zanja que ya ha sido dragada en la que se conectan los tramos. (Figs. III.15 y III.16).

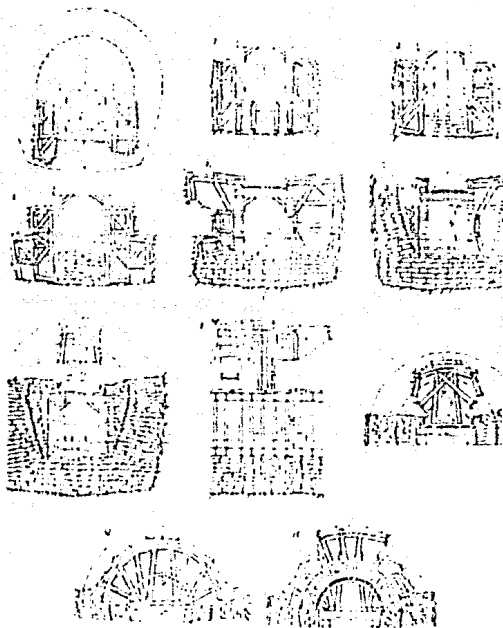


FIG III 14 DESCRIPION DE LOS PASOS A SEGUIR PARA LA
 CONSTRUCCION DE LA SECCION DE UN TUNEL
 POR EL METODO ITALIANO .

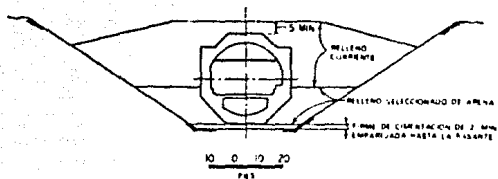


FIG. III. 16. LOS TUNELES DEL TIPO TUBO HINCADO SE COLOCAN EN UNA ZANJA QUE LUEGO SE RELLEA.

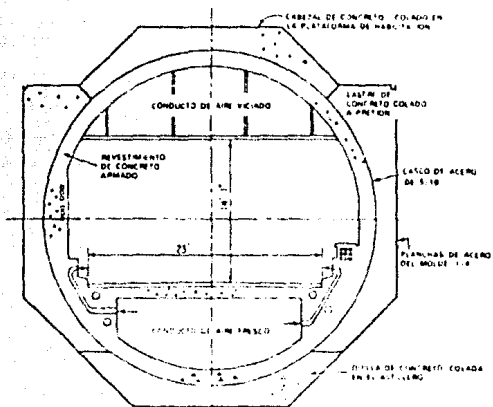


FIG III 16. TUNEL DE TUBO CILINDRICO HINCADO.

El método de tubería hincada, ha resultado ser un método muy útil en túneles prefabricados y túneles pequeños. Este método es aplicable en terrenos blandos. En éste método la tubería de acero se habilita en superficie, luego se baja por un pozo hasta el nivel donde será desplantado el túnel y es colocado en una cama de madera (cuneta). Una vez colocada la tubería se procede a la construcción de un muro de concreto reforzado (ataque) en la cara del pozo posterior al túnel. La tubería es empujada al interior de la superficie por una serie de gatos hidráulicos colocados uniformemente en el perimetro de la tubería y apoyados en el muro de concreto. Todos los tramos de tubería, deben conservar el eje del túnel para tener un empuje efectivo (figs. III.17).

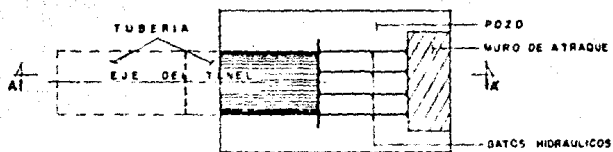
Posteriormente se realiza una excavación a cielo abierto para efectuar el conec-te de los tramos.

F. Revestimiento Provisional o Primario.

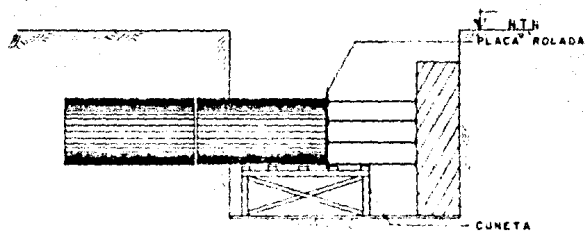
La finalidad del ademe provisional es garantizar la estabilidad del túnel desde el momento de excavación hasta el colado del revestimiento definitivo.

Los principales tipos de ademe primarios o provisionales que se emplean son:

- a) Marcos metálicos y retaque de madera.
- b) Concreto lanzado.
- c) Marcos metálicos y concreto lanzado.
- d) Caso especial con anclas.
- e) Dovelas.



PLANTA



CORTE A-A

FIG. III. 17. HINCADO DE TUBERIA.

a) Los marcos metálicos y retaque de madera. Su empleo se funda en los métodos de ademe muy empleado en las minas y en los túneles construídos a fines del siglo XIX y principios del XX. Originalmente el ademe estaba compuesto todo por piezas de madera, más tarde, los elementos de acero vinieron a dar mayor solidez. Estos son empleados principalmente en las excavaciones en los que no existe problema con el terreno y la separación de ellos o cuando se usa concreto lanzado; sin embargo la decisión final para el uso de los mismos se define en campo, ya que las condiciones de roca como el agua son muy variables, es por eso que la presencia o no del agua define el uso de los marcos metálicos o del concreto lanzado, (Fig. III.18).

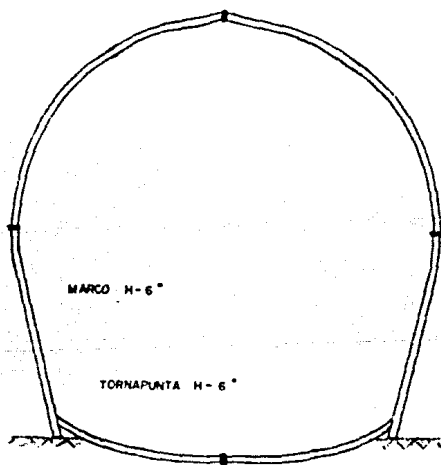


FIG. III.18 SOPORTE DE MARCOS METÁLICOS TIPO HERRADURA.

En suelos firmes del Valle de México se ha utilizado extensamente el sistema de marcos metálicos y retaque de madera, sobre todo en la formación de Tarango y en los túneles de drenaje, es decir de secciones entre 12 y 60 m², (fig. III.19).



FIG. III.19. ADENE DE MARCOS METÁLICOS.

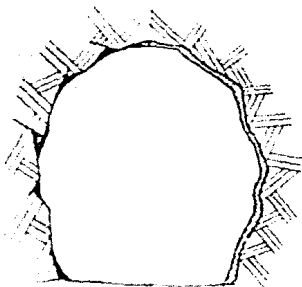
b). Ademe de concreto lanzado. Varias son las ventajas que tiene el ademe de concreto lanzado en comparación con el ademe tradicional, de marcos metálicos y retaque de madera; entre ellas: el concreto lanzado se puede aplicar prácticamente a todo tipo de terreno salvo en arcillas blandas y en arenas sueltas, se ajusta además a cualquier geometría pudiéndose colocar tan pronto como se excava en un mínimo de espacio, lo que muchas veces permite traslapar el lanzado con otras actividades del túneleo, y se ahorra tiempo y dinero. Los menores espesores de ademe, comparados con los que requieren los marcos metálicos y la madera llevan a secciones de excavación menores. Por otra parte, los trabajos de reparación y reademado son con el concreto lanzado mucho más fáciles.

El concreto lanzado ha revolucionado las técnicas de túneles. En el Valle de México se ha utilizado siguiendo varios criterios, (fig. III.20).

- a). El sueco, que sólo hace una aplicación zonal para proteger áreas potencialmente alterables y sellar grietas o fracturas a modo de junteo con mortero. Se aplica en rocas fracturadas y suelos muy firmes de buena calidad.
- b). El centro-europeo, que hace una aplicación en capas continuas. En Austria y Europa Central se acostumbra incluir en el concreto una o dos capas de malla de acero como elementos de liga y refuerzo; los canadienses (y suecos) prefieren prescindir de la malla.

- c). El nuevo Método Austriaco de Túneles (NATM), que además incluye anclas (generalmente anclas de fricción o de resistencia repartida, inyectadas con lechada o embebidas en mortero en toda su longitud) de longitud entre 2 y 5 m y separaciones entre 1 y 2.5 m.

CONCRETO LANZADO
 APLICACION POR
 ZONAS
 (POCAS)

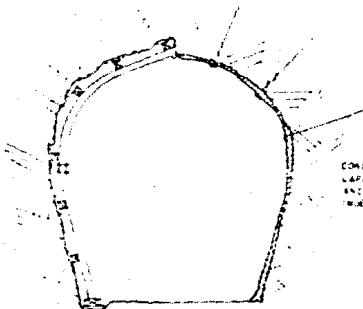


CONCRETO LANZADO
 APLICACION POR
 CAPAS CONTINUAS
 (POCAS Y SUELOS FIRMES)

FIG. III 20.

SISTEMAS DE SOPORTE.

MARCOS METALICOS
 Y RETAJE DE MADERA
 CON CONCRETO LANZADO



CONCRETO LANZADO POR
 CAPAS CONTINUAS +
 ANCLAS INYECTADAS
 NUEVO METODO AUSTRIACO

(EN POCAS Y SUELOS)

En gran parte de los túneles de drenaje profundo localizados en la formación de Tarango y en los suelos firmes de la zona de transición, se empleó el concreto lanzado y los criterios del NMAT (Fig. III.21), se ha generalizado su uso en nuestro país, principalmente en las obras subterráneas en el Valle de México y a él se recurre cada vez con más frecuencia en los nuevos contratos. Como ejemplo se pueden citar el Interceptor Centro-Poniente, el Túnel Analco-San José del Sistema Cutzamala y los ramales norte y sur, de este mismo sistema. En los túneles del Metro, en la tercera etapa de la Línea 3 (Sur) y en la Línea 7, se ha adoptado lo más relevante de estas técnicas y estos conceptos de tunelaje moderno.



FIG III 21 APLICACION DEL CONCRETO LANZADO
EN EL EMISOR CENTRAL.

El espesor de la capa inicial de concreto lanzado puede variar de 5 a 10 cm, lo que dependerá de las condiciones del terreno.

- c) Marcos metálicos y concreto lanzado. Este tipo de ademe se usa normalmente cuando existen problemas de aportaciones de agua o simplemente no existe, el terreno pudiera ser arenoso pero compacto, el cual al intemperizarse se vuelve deleznable al perder humedad, lo que provoca desconchamientos en el terreno. Otro uso que tiene es el funcionar como bóveda, transmitiendo los empujes del terreno a los marcos metálicos, (fig. III.22).

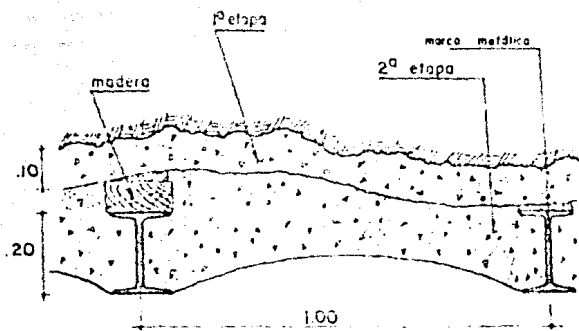


FIG III 22 DETALLE DE COLOCACION DE CONCRETO LANZADO
1ª Y 2ª ETAPA .

- d) Anclas. Se emplean casi exclusivamente en las excavaciones en donde existan rocas relativamente sanas.

El principio general del anclaje de las rocas es hacer que éstas formen parte de la estructura del soporte, es decir, que se autoporte a excepción de cuando las anclas soportan fragmentos sueltos de roca.

El uso de anclas generalmente se restringe, debido principalmente a los cambios importantes que sufre el terreno a la roca y que obligan a cambios en los sistemas de anclaje en la separación y orientación de las anclas, todo lo cual repercute en los costos (Fig. III. 23).

Las anclas tienen por lo general 1 pulg. de diámetro y 2.50 mts. de largo. Se pueden empalmar para obtener mayores longitudes. Esta longitud debe ser suficiente para proveer agarre en la roca sólida más allá de la probable línea de fractura.

- e) Dovelas. En los últimos años la excavación de túneles por medio de escudos, permite la utilización de un sistema de soporte que consiste en dovelas o segmentos que forman anillos los cuales pueden estar o no ligados entre sí, estas permiten facilidad de montaje (Fig. III. 24). Estas dovelas pueden ser de concreto, de fierro fundido, de acero o combinación de marcos metálicos con madera. Por razones de economía en materiales, fabricación y montaje, se ha empleado en mucho -- mayor medida el concreto que el acero. El sistema

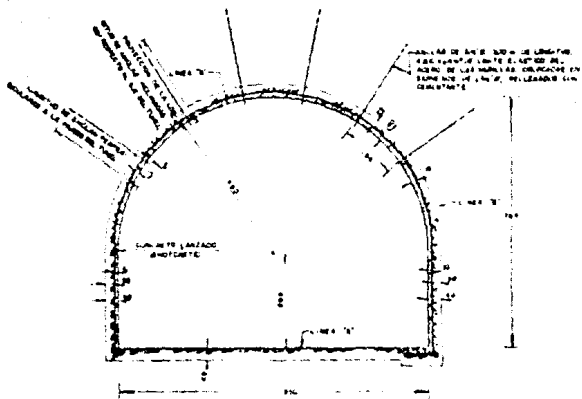


FIG. III. 23. CROQUIS DE LA SECCION TRANSVERSAL Y PATRON DE ANCLAJE DEL TUNEL CHIAPAS MEXICO.

de dovelas se ha ido perfeccionando en aplicaciones recientes, reduciendo el número de piezas por anillo y por consiguiente el de pernos, para los tiempos de colocación, se colocan sellos de neopreno en las juntas para eliminar el problema de las filtraciones.

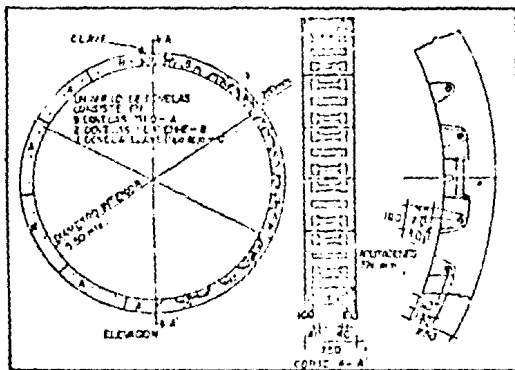


FIG. III. 24. ADEME DE DOVELA UTILIZADO EN LOS INTERCEPTORES CENTRAL Y ORIENTE .

En los túneles del Méetro de la Ciudad de México el sistema de dovelas ha tenido mucho éxito.

G. Revestimiento Definitivo.

El revestimiento definitivo pueden ser únicamente -
dovelas de concreto o dovelas de fierro fundido, tam-
bién pueden ir acompañadas de concreto armado. El aca-
bado del revestimiento definitivo va a depender de las
características del proyecto a cumplir.

El principal objetivo de un revestimiento definitivo,
radica en que junto con el revestimiento primario y el
suelo perimetral formarán una estructura que deberá ser
capaz de soportar las cargas que con el tiempo actuen --
sobre dicho conjunto (Fig. III.25). La existencia de --
este dependerá íntimamente de las características del
suelo.

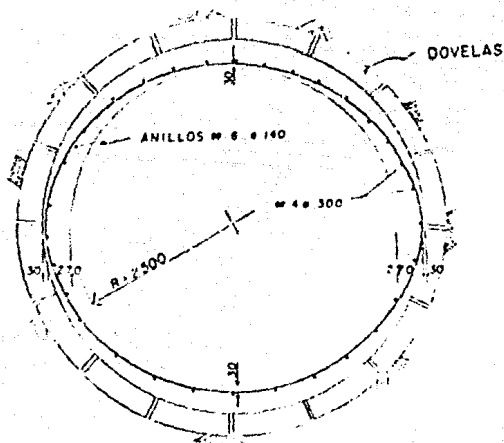


FIG. III. 25.

En el Emisor Central así como en los interceptores del Sistema de Drenaje Profundo de la Ciudad de México, fue necesaria la aplicación de éste revestimiento por la existencia de suelos poco resistente. En este revestimiento se logró una superficie lisa para reducir el factor de fricción y turbulencia.

La ejecución del revestimiento definitivo en el Sistema de Drenaje Profundo se lleva a cabo mediante una cimbra metálica deslizante, concreto colado con bombas y preparado en plantas que garantizan el programa de construcción. (Fig. III.26).

En muchas estaciones de las Líneas 7, 9 Poniente y 3 Sur del Metro de la Ciudad de México se les aplicó un revestimiento definitivo a base de concreto reforzado (Fig. III.27), y en el resto, el revestimiento primario (dovelas) fue el definitivo.

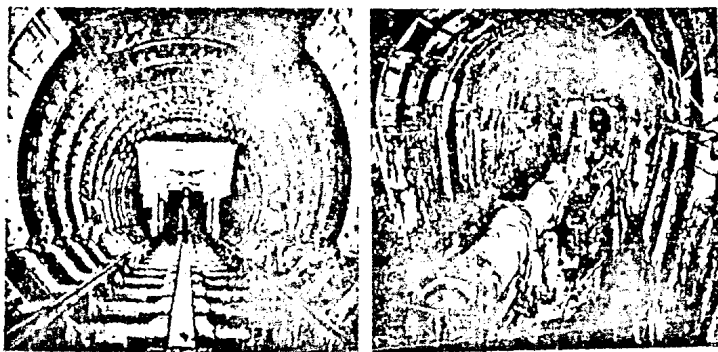


FIG. III. 26. VISTA DE LA COLOCACION DE LA CIMBRA DESLIZANTE (IZQUIERDA), COLADO DEL REVESTIMIENTO DEFINITIVO (DERECHA).



FIG. III. 27. COLADO DEL REVESTIMIENTO DEFINITIVO EN LOS TUNELES DEL METRO

CAPITULO IV

TECNICA UTILIZADA EN LA EXCAVACION DEL TUNEL TRAMO
PATRIOTISMO-TACUBAYA

Al tratar de excavar un túnel en cualquier tipo de terreno sea éste duro, semi-duro o blando, se nos presentan diferentes obstáculos que tendremos que librar para lograr nuestro objetivo. Para la realización de la excavación existen diferentes tipos de equipos o máquinas de corte, las cuales se utilizarán dependiendo del tipo de material por atravesar.

Tuneledoras o topos. Son máquinas de excavación de túneles cuyo trabajo se efectúa por ataque simultáneo de toda la cara del frente. Las tuneledoras de sección circular disponen de una cabeza rotatoria equipada de elementos cortantes (dientes, moletas, discos, fresas, etc) que atacan el frente de manera continua. La cabeza recibe dos tipos de movimientos: uno circular de corte y otro lineal de avance. Las de sección rectangular disponen de dos o más cabezas rotatorias con los útiles de corte repartidos en brazos.

Máquinas de ataque selectivo. Estas realizan su trabajo en el frente de manera secuencial y no global como los topos, las de ataque selectivo por corte disponen por lo general de una cabeza provista de picos, las de ataque selectivo por impacto llevan montado un martillo neumático en el extremo del brazo de barrido, y el arranque del material se produce por el golpeo del martillo.

Jumbos. Son aquellos equipos provistos de uno o varios brazos de perforación y utilizados para la realización de barrenos de voladura y de anclaje, pueden trabajar prácticamente en cualquier tamaño de sección, y están provistos de martillos rotatorios o rotopercusivos, neumáticos o hidráulicos.

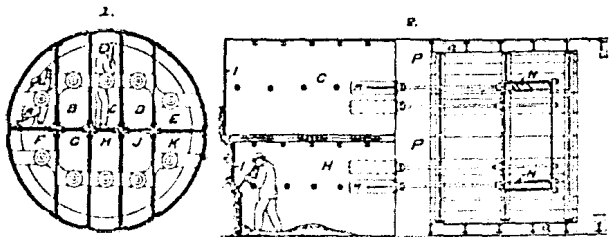
Brazos hidráulicos de perforación. Es un dispositivo que posiciona el elemento activo (martillo de perforación) en cualquier posición pre-determinada del frente. El brazo hidráulico a su vez va montado sobre un jumbo, que puede portar uno o varios brazos. El brazo está -- vinculado a su placa de fijación mediante una serie de articulaciones que, dependiendo del modelo, le permiten algunos o todos los siguientes movimientos: rotación completa sobre su eje; deflexión angular horizontal; deflexión angular vertical.

Fresadoras. Son máquinas de ataque selectivo por corte que tienen montado en el extremo de su brazo orientable un motor eléctrico que envía la energía directamente a la cabeza de corte, la máquina puede superar pendientes de un 58 por ciento y fresar frentes de hasta 28 m² sin cambiar el emplazamiento, ésta máquina ha sido diseñada tanto para explotaciones subterráneas y a cielo abierto como para el avance en galerías y túneles.

En los últimos años se han desarrollado técnicas modernas para la perforación de túneles como son las Máquinas Perforadoras de Túneles o Escudos de los cuales se hablará más ampliamente en el inciso A de este capítulo.

A.- Reseña histórica de escudos.

El primer escudo para túneles fue patentado en Inglaterra en el año de 1818 por Sir Marc Brunel, el cual se usó a partir del año 1821 en la construcción de un túnel bajo el río Tamesis. Este escudo tenía una sección rectangular de 6.75 x 11.40 metros y estaba provisto de un complicado sistema de plataformas de ademe que sostenían el frente por medio de tornillos mientras que el escudo se movía hacia adelante penetrando en el terreno mediante unos gatos de tornillo apoyados contra el revestimiento final. Fig. IV.1.



From drawing obtained by the Bureau of Patent No. 476 of 1818.

FIG. IV.1. ESCUDO DE BRUNEL

En el año de 1851 Cubitt patenta sus esclusas para hincarcilindros mediante aire comprimido. Fig. IV.2

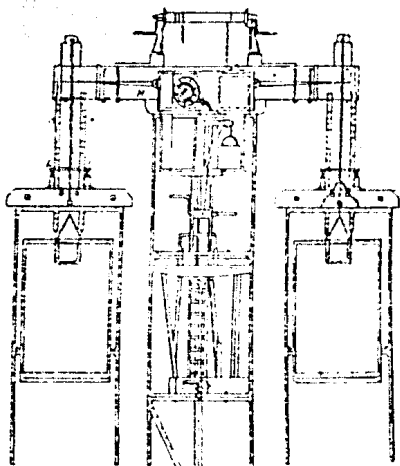


FIG. IV.2. ESCLUSAS PARA CILINDROS

En 1869 Greathead construye el primer escudo cilíndrico (Fig. IV.3). Es principalmente un dispositivo que proporciona soporte continuo del terreno. También puede funcionar en menor grado como un dispositivo de corte y perfilado. El escudo está formado por un casco cilíndrico de acero rigidizado mediante nervaduras y

diafragmas, y provisto de gatos hidráulicos para impulsarlo hacia adelante. Además de estos elementos básicos se pueden incorporar o fijar al escudo dispositivos auxiliares.

Las operaciones fundamentales que han de seguirse al usar este escudo serán:

- 1.- Excavar hacia adelante ademandando el frente según sea necesario.
- 2.- Empujar hacia adelante el escudo una distancia igual al espesor de un anillo, accionando con gatos desde el revestimiento terminado. Se podrá utilizar el escudo para perfilar cuidadosamente la excavación siempre y cuando no se requiera un empuje excesivo.
- 3.- Retirar los arietes de empuje y armar el revestimiento por segmentos en el espacio libre detrás del escudo.
- 4.- Aplicar inyecciones de cementantes en todos los espacios vacíos entre los segmentos y el terreno.

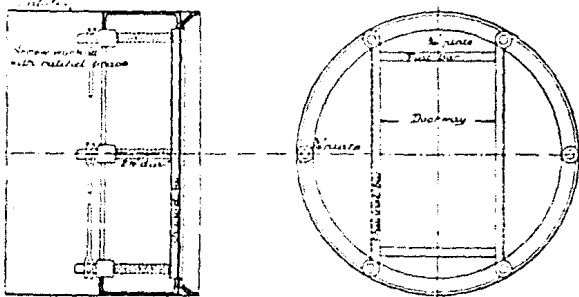


FIG. IV.3. ESCUDO DE GREATHEAD

En el año de 1897, Thompshon diseña el primer excavador mecánico. (Fig. IV.4) Que consistía, en una escalera con picos y conjilones montada en una vfa.

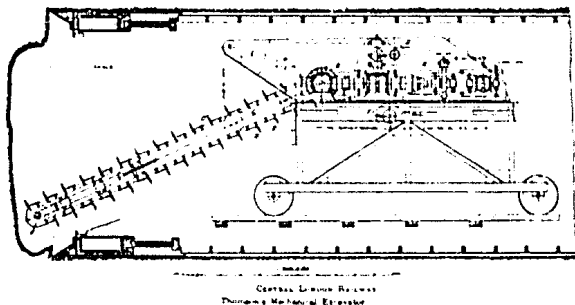
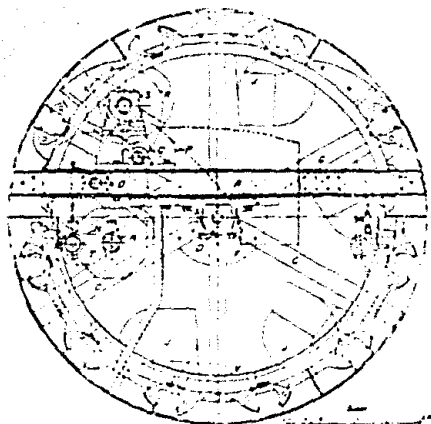


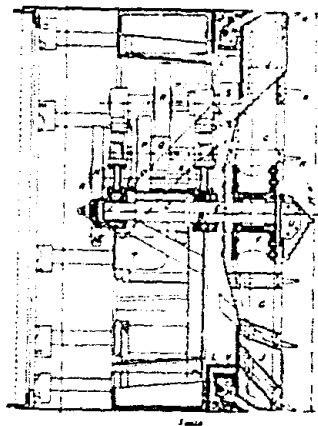
FIG. IV. 4. EXCAVADOR MECANICO

También en el año de 1897, Price diseña la primera máquina para túneles. (Fig. IV.5 y IV.6). El cual se utilizó en el túnel de Blackwall, el escudo estaba provisto con dos diafragmas completos, equipados con escluyas neumáticas destinadas a permitir el uso de una presión más alta en el frente de los diafragmas que en el resto del túnel. Tenía también un sistema de contraventanas de acero en el frente, las cuales sustituían el ademado, que podían deslizarse dentro del escudo por medio del control de tornillos de gufa durante el empuje de los arietes principales. La utilización de la presión diferencial del aire nunca fue práctica.



CASING CROSS AND HERRYHILL RAILWAY, LONDON
Type a Combined Shield and Mechanical Excavator Back Excavator

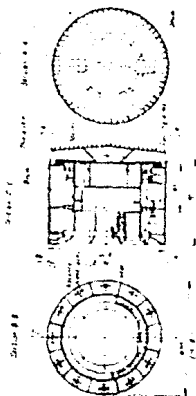
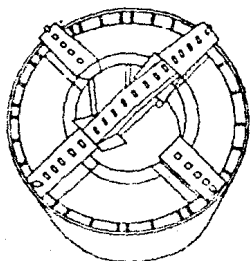
FIG. IV. 5. MAQUINA EXCAVADORA



CASING CROSS AND HERRYHILL RAILWAY
Type a Combined Shield and Mechanical Excavator Longitudinal Section

FIG. IV. 6. MAQUINA EXCAVADORA

En 1961 Kinner Moodie diseña los escudos basculantes con cámara de bentonita al frente (Fig. IV.7).



The above drawings are based on the design of Kinner Moodie and Mac Kay (1961)

FIG. IV.7. MAQUINA EXCAVADORA BASCULANTE

En el año de 1966 aparece el escudo japonés con cabeza rotatoria, cámara de bentonita y sello triple en la cola. Fig. IV.8.

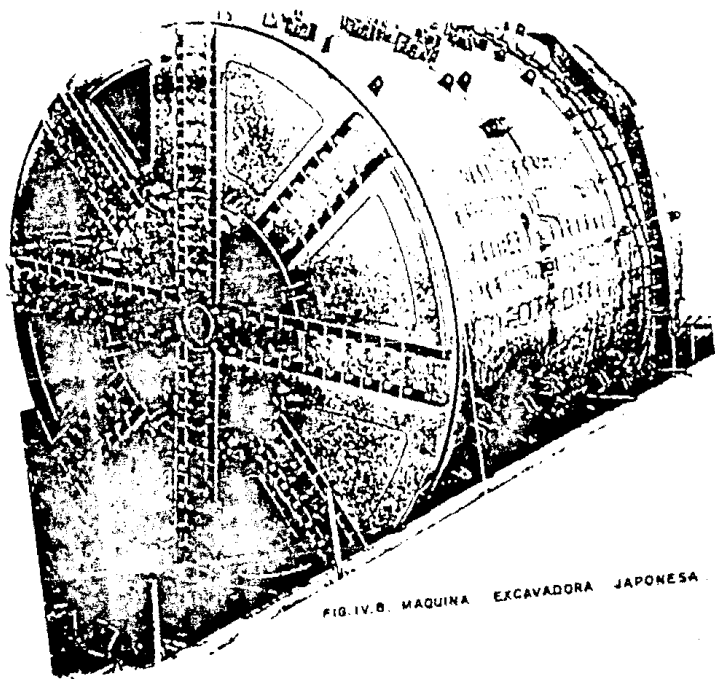


FIG. IV. B. MAQUINA EXCAVADORA JAPONESA

La anterior reseña significa que las técnicas modernas para perforar túneles en suelos blandos se han desarrollado en los últimos 150 años y en su mayoría han sido revolucionados por la electricidad, máquina de vapor, pistola neumática, gatos hidráulicos, automatización, etc.

El escudo moderno, de frente abierto, puede ser de sección circular, rectangular, herradura, etc., siendo en todos los casos una estructura rígida abierta en ambos extremos; provee facilidades en el frente para la excavación del terreno y en su parte posterior para la erección del revestimiento prefabricado.

Características principales del escudo.

Constituidos por una coraza metálica son básicamente un sistema de soporte móvil que provee de áreas de trabajo seguras para la excavación del frente del túnel al mismo tiempo que se coloca el revestimiento. Generalmente constan de 3 partes de acuerdo a sus funciones.

- a) Visera o parte frontal.
- b) Cuerpo o parte intermedia.
- c) Faldón o parte posterior.

En la visera se realizan las actividades de excavación del frente y en la mayor parte de los casos alojan la maquinaria o el personal con el que se realiza dicha actividad. El cuerpo aloja todo el equipo hidráulico propio para el movimiento del escudo además de servir de apoyo para la instalación del equipo con el que se ejecutan, la excavación del frente y colocación del revestimiento. En el faldón o parte posterior se coloca

el revestimiento del túnel en forma continua, quedando el túnel revestido a medida que el escudo avanza. Para avanzar el escudo se apoya en el revestimiento recién colocado, empujándose a través de un sistema de gatos hidráulicos los cuales al desarrollo de toda su carrera dejan espacio para la colocación del revestimiento.

Las actividades fundamentales que se realizan en la excavación de túneles con escudo son las comunes a cualquier tipo de túnel.

- a) Excavación del frente.
- b) Rezaga y transporte del material de excavación.
- c) Colocación del revestimiento.
- d) Manteo o eliminación del material excavado

Sin embargo dependiendo del grado de mecanización - de los escudos, dichas actividades pueden ejecutarse en forma simultánea.

Tipos de escudos.

En los últimos años el nombre de "Escudo" ha tendido a ser menos usual cambiándose por "Maquinas Tipo Escudo" o "Máquinas Perforadoras de Túneles", estando íntimamente ligado este cambio con el grado de mecanización o con las principales características de cada escudo en particular.

Existen dos grandes grupos de escudos, los cuales se distinguen en función a la forma de ataque del frente de excavación:

- Escudos de frente abierto.
- Escudos de frente cerrado.

Estos dos grupos pueden integrarse de la forma siguiente:

- 1.- Escudo de frente abierto.
 - a) Escudo manual.
 - b) Escudo con rejilla al frente.
 - c) Escudo con cabeza cortadora oscilante.
 - d) Escudo excavador.
 - e) Escudo con cabeza cortadora giratoria.

Escudos manuales. Sin equipo propio para excavación del frente, dicha actividad debe realizarse en forma manual.

Son los escudos más simples y cuentan con gatos frontales y plataformas accionadas hidráulicamente para ademar el frente. Su uso está restringido para suelos blandos o poco compactos puesto que la eficiencia en el avance de la excavación disminuye conforme se incrementa la capacidad del suelo. Estos escudos han tenido bastante uso en la Ciudad de México a partir de la década de los 60's, continuando su utilización hasta la fecha; en condiciones críticas de estabilidad del frente de excavación ha sido necesario emplear aire comprimido en el interior del túnel, resultando una buena combinación.

Escudos con rejilla al frente. Están dotados con una rejilla metálica al frente, realizan la excavación empujando contra el suelo por excavar, el cual se introduce a través de cada una de las divisiones de la rejilla.

lla en un fenómeno de extrusión. La rejilla cumple las funciones de ademe y para condiciones críticas de estabilidad pueden colocarse placas en la estructura de la rejilla para cerrar el frente. Este tipo de escudo se utiliza en suelos blandos cohesivos y es de patente mexicana.

Escudo con cabeza cortadora oscilante. El movimiento del cortador se logra generalmente mediante un par de potentes cilindros hidráulicos que se extienden y retraen, haciendo que el cortador oscile a través de un buje. Al accionar la cabeza cortadora también cumple la función de ademe para estabilizar el frente. Sin embargo, el movimiento oscilante es poco eficiente.

Escudos excavadores. Son los escudos clásicos a los cuales se les monta una o más excavadoras en su interior a fin de atacar el frente en forma más eficiente. Una de las principales ventajas de montar una herramienta de excavación en el interior de un escudo, es que el escudo puede aportar mayor apoyo para la herramienta, no sucediendo así con retroexcavadoras montadas sobre orugas o en cualquier equipo móvil.

Otra de las ventajas de los escudos excavadores consiste en la posibilidad de ademar el frente aún con la máquina excavadora; algunos escudos son construidos con sistema de compuerta de ademe accionada hidráulicamente y que pueden cerrar el frente en unos cuantos segundos. Otros cuentan con gatos hidráulicos adicionales para extender o retraer un conjunto de placas que constituyan una visera móvil.

Estos escudos pueden utilizarse para excavar a través de suelos compactos.

Escudos con cabeza cortadora giratoria. Están provistos de motor y transmisión para el movimiento giratorio de la cabeza de corte, han sido muy usados en suelos generalmente buenos, autosoportables, secos y estables. Debido a que la cabeza cortadora tiene aberturas, no son adecuados para suelos inestables, sin embargo, ofrecen buena protección contra caídas en la corona y las paredes. Una variante de estos escudos es que ha sido aplicado en suelos muy duros y competentes o en rocas suaves; son escudos de cabeza cortadora giratoria con "patas" laterales, las cuales avanzan sin necesidad de apoyarse contra el revestimiento del túnel.

2.- Escudos de frente cerrado.

- a) Con cabeza cortadora giratoria.
- b) Con mampara de presión.
- c) Con frente presurizado por lados
- d) Con presión de tierra balanceada.

Escudo con cabeza cortadora giratoria. La cabeza cortadora es casi totalmente cerrada o se puede cerrar hidráulicamente en forma total. El objetivo de esto es conservar el cortador prácticamente en contacto con el frente del túnel y solamente dejar pasar el material que es cortado por las navajas del cortador.

Si el suelo no es estable pueden ocurrir caídas las cuales pueden no ser detectados por el personal en el túnel. En algunos casos han ocurrido caídas por falla parcial del frente mientras el resto permanece estable.

y el escudo ha excavado grandes cavidades antes de que la falla sea detectada. En este tipo de escudos se recomienda usar equipo para pesar o medir volumen de material comparando contra el avance a fin de detectar cualquier sobreexcavación.

Escudos con mampara de presión. Estos escudos cuentan con una mampara metálica al frente (al inicio de la visera) formando una cámara en donde se aplica aire comprimido para estabilizar el frente, dejando el resto del túnel en condiciones normales de presión atmosférica.

Con estos escudos se vislumbró la posibilidad de introducir un líquido para contener el frente, regulando la presión del líquido mediante una cámara de aire comprimido formada por dos mamparas. Asimismo se descubrió la conveniencia de usar escudos que trabajaran con el frente húmedo, evitando peligros de incendios y explosiones al entrar en contacto el aire comprimido con formaciones que contengan gases.

Este fue el inicio para que se introdujeran escudos con cabeza cortadora giratoria con mampara de presión y las diversas modalidades de escudos con frente presurizado.

Escudos con frente presurizado de lodos. Estos cuentan con una cabeza cortadora giratoria para realizar la excavación del frente. Se utilizan en suelos que presentan problemas de estabilidad, la cual se logra mediante el uso del lodo bentonítico a presión confinado entre el frente de excavación y la mampara. Con el lodo presurizado se reduce la dependencia de la cabeza cortadora giratoria para contener el frente.

El lodo a presión es suministrado a la cámara formada por la mampara y el frente de excavación a través de una tubería de suministro, desalojando los materiales excavados en combinación con lodo bentonítico a través de una tubería de retorno.

Generalmente, para el manejo de lodos bentoníticos se requieren instalaciones superficiales donde se separan los materiales excavados y se regenera el lodo bentonítico para ser usado nuevamente.

El uso de estos escudos se ha incrementado enormemente a partir del año 1971.

Actualmente se está desarrollando una nueva modalidad de estos escudos, denominado Escudo de Lodos de Alta Densidad; al usar lodos muy viscosos se trata de eliminar el uso de grandes volúmenes de lodo y para eliminar el material excavado no se requiere licuarlo, pudiendo ser manejado por un transportador de tornillo.

Además, se ha desarrollado otro tipo de escudo que cuenta con una cámara de aire comprimido para regular la presión del lodo bentonítico contenido entre la mampara y el frente.

Escudo de presión de tierra balanceada. Escudo de fabricación y tecnología japonesa constituye una variante de los escudos de lodos de alta densidad en los que se elimina totalmente el uso de lodos bentoníticos; el material excavado por la cabeza cortadora llena la cámara de tal manera que se mantiene una presión que contrarresta los empujes del subsuelo. Conforme el escudo avanza el

materia excavado es forzado a entrar en un transportador de tornillo que se encarga de depositarlo en una tolva localizada en la parte posterior del escudo.

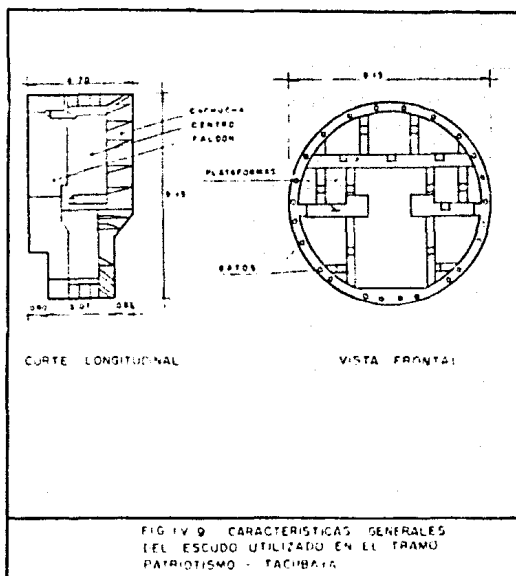
Presente y Futuro de los Escudos.

Una vez resuelto el problema de ataque y estabilización del frente de excavación, los diseñadores y constructores de escudos han dedicado sus esfuerzos a crear un sistema completo que permita las construcciones de túneles con altos promedios de avance diario; se han implementado eficientes mecanismos de colocación del revestimiento (anillos erectors o erectors circulares), el transporte y eliminación del material excavado utiliza diversos equipos que mueven grandes volúmenes a gran velocidad y lo que es muy importante, el grado de automatización electrónico que se implementa día con día para el control óptimo de todas las actividades de la construcción de túneles.

En lo que respecta al aspecto económico, la proliferación del uso de escudos con todo tipo de configuraciones ha demostrado que se encuentran en un nivel competitivo con los sistemas convencionales, motivo por el que cuentan con un futuro promisorio de capital importancia dentro de la planeación y ejecución de obras de infraestructura.

Para la excavación del túnel tramo Patriotismo-Tacubaya las características del escudo usado son las siguientes:

La estructura del escudo está formada por un cilindro de acero de 9,15 m de diámetro y 4,70 m de longitud, el cual puede ser de frente abierto o cerrado, según sean las condiciones del terreno por atravesar, para este caso particular se usó como escudo de frente abierto presurizado. Algunas de las partes más importantes del escudo son: cachucha en el frente, gatos frontales, plataforma de trabajo, gatos de empuje y faldón, como se indica en la figura IV.9.



B.- Ventajas en la excavación de túneles con escudo.

La tecnología en la excavación de túneles presenta actualmente adelantos muy importantes, tanto en rapidez como en seguridad, gracias al empleo de máquinas perforadoras de túneles, llamadas usualmente escudos, figura IV.10, sobre todo desde hace 50 años a la fecha.



FIG. IV.10. ESCUDO MOSTRANDO EL FRENTE DE CORTE

Con la excavación por medio de escudos, se ha logrado encontrar un sistema, que puede ser usado a través de cualquier condición de suelo sin causar ningún trastorno en la superficie (debido a que en la mayor parte de los casos el túnel debe atravesar bajo zonas densamente construidas, bajo el fondo del mar, etc.), ya que si se tiene un techo pequeño, en relación al diámetro del túnel, las deformaciones originadas por el relajamiento de presiones por el material excavado, provocaría que el área de influencia de éstos afectara las construcciones existentes en la superficie.

Las ventajas que proporcionan los escudos en la excavación, protección y soporte de túneles son reconocidas cada vez en mayor grado, considerando las desventajas de los métodos convencionales. Así en el caso de rocas, el empleo de barrenación y voladura es un procedimiento que tiene riesgos y avances lentos por los trabajos que hay que realizar, por ejemplo: para excavaciones de sección completa y diámetros grandes es necesario contar con plataformas para la perforación, colocadas en una estructura metálica cuadrada, llamada jumbo, que se apoya sobre vías, ruedas neumáticas o patines. El jumbo debe retirarse del frente unos 100 metros al efectuarse la voladura, lo mismo que todos los demás dispositivos y maquinaria de excavación y de rezaga. Para que el jumbo avance nuevamente a su posición de trabajo junto al frente, hace falta quitar previamente el material excavado. Es necesario también revisar la superficie recién excavada, mediante picas, para desprender materiales poco afianzadas y evitar así caídos imprevistos. El proceso exige la colocación de un ademe provisional y procedimientos de estabilización mediante concreto lanzado, pernos, mallas, marcos y tornapuntas que eviten derrumbes.

Con los escudos, los problemas descritos anteriormente se reducen considerablemente, además, dando un empleo adecuado a los mismos e implantando un sistema idóneo de rezaga por lo que se tendrá una mayor seguridad en la construcción del túnel, figura IV.11, sobre todo si se realiza en zonas urbanas.



FIG. IV.11. CONSTRUCCION DE UN TUNEL CON ESCUDO

Cuando se utilizan estas máquinas, casi todas las operaciones de perforación de túneles se lleva a cabo simultáneamente con la excavación, en contraste con la barrenación y voladura, que son realizados individualmente.

El objetivo de un escudo es prevenir la deformación del terreno hacia el túnel mediante una coraza de metal (figura IV.12), para permitir una excavación segura y llevar un frente más uniforme, liso y bien terminado lo que representa una situación de ataque más favorable, - además ir colocando el ademe, constituido por dovelas de concreto, figura IV.13.

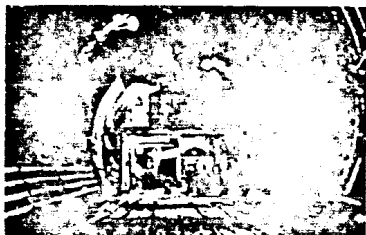


FIG IV.12. UNA MPT INICIANDO LA EXCAVACION DE UN TUNEL ADEMADO CON MARCOS METALICOS CIRCULARES

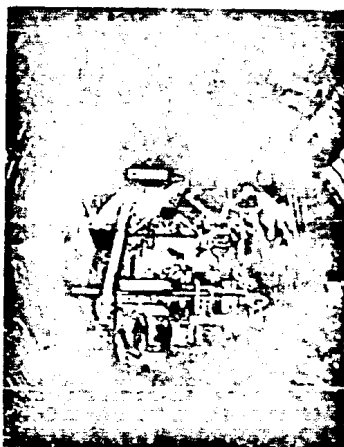


FIG IV.13. ADEME DE UN TUNEL CON DOVELAS DE CONCRETO

Otra ventaja del escudo es que cuando se hinca la cuchilla cortadora, una franja de suelo queda liberada de la carga vertical y crea un empuje pasivo contra el frente de ataque estabilizando la excavación.

La idea o propósito fundamental para utilizar un escudo es que el proceso de excavación sea una actividad casi simultánea con el montaje del revestimiento para poder así obtener las siguientes ventajas:

- 1.- La sección del túnel puede ser excavada a sección completa.
- 2.- Que se ofrezca un soporte constante al terreno, en todas direcciones.
- 3.- Evitar deformaciones excesivas del terreno y por lo tanto, reducir los asentamientos en la superficie.
- 4.- La utilización del recubrimiento primario de --dovelas como definitivo.
- 5.- Mayor seguridad en la construcción del túnel.
- 6.- Mayor rendimiento en la construcción del túnel, con la consecuente disminución del costo.
- 7.- Mayor limpieza en la realización de los trabajos, ya que no hay filtración de agua gracias a las juntas de neopreno que tiene cada dovela.
- 8.- Mayor control en la construcción del túnel por la sistematización y mecanización de los escudos.
- 9.- Mayor rapidez en la rezaga del material producido de la excavación

Para poder lograr un rendimiento adecuado del escudo, se deberán tener resueltos los siguientes aspectos:

- 1.- Haber elegido convenientemente el tipo de escudo para el suelo donde se construirá el túnel.
- 2.- Contar con personal técnico adecuado que conozca el equipo a utilizar.
- 3.- Haber resuelto el problema, tanto técnico como económico, de la separación del material producto de la excavación, del material que se utilice en el frente como estabilizador (según sea el caso), y de la extracción de la rezaga.
- 4.- Contar con un diseño adecuado de las dovelas que se utilicen como recubrimiento.
- 5.- Implementar una adecuada fábrica de dovelas que tengan todas las características que exija el diseño.

C.- Aportaciones del país en la construcción de escudos.

Debido al gran auge que ha tenido la construcción de túneles en nuestro país, particularmente en la Ciudad de México, se hace necesario el modernizar las técnicas utilizadas para la excavación de dichos túneles.

Para la construcción de los primeros túneles en la Ciudad de México (Metro y Drenaje Profundo), se han utilizado diversas técnicas: primero fueron las convencionales, mediante explosivos y ademes metálicos o concreto lanzado. Después los escudos de frente abierto, en la zona de transición; finalmente el llegar a la zona del lago, fue necesario añadir a los escudos una herramienta adicional; el uso del aire comprimido. Al desarrollar este sistema, se requirió adecuarlo a las condiciones de altitud de la Ciudad de México, en el cual se requieren presiones de 2 a 3 Kg/cm², que implican grandes riesgos para los trabajadores, además de 7 u 8 turnos de trabajo para completar el ciclo de 24 horas del día. Todo el equipo utilizado era traído de otros países.

Esto condujo a crear un Comité Técnico Integrado por especialistas mexicanos y extranjeros que desarrollara un proyecto de máquina excavadora que pudiera resolver el problema, claro está siempre basada en la patente japonesa.

Primeramente se desarrolló el escudo de frente -- abierto con rejilla al frente, la fabricación del escudo se realizó en Japón y traído a México donde se le añadió la rejilla al frente, (que es de patente mexicana), la descripción de éste escudo se mencionó en el inciso A) de este capítulo.

Con las experiencias obtenidas y con el objeto de construir con mayor rapidez y seguridad los túneles del Metro y del Drenaje Profundo de la Ciudad de México, se decidió construir un escudo de frente abierto totalmente mecanizado, cuyo nombre propio es escudo de frente presurizado, el diseño de esta máquina tuvo como origen, la necesidad de construir túneles de dimensiones considerables para alojar dos vías del Metro y a poca profundidad, teniendo un techo efectivo reducido para generar el auto-soporte del suelo en condiciones de deformación aceptable.

Este escudo está equipado con: (figura IV.14).

- 1.- Ademe mecánico del tercio superior del frente.
- 2.- Equipo excavador que cubre la totalidad de la sección.
- 3.- Sistema de sellos que permite la inmediata inyección del hueco entre dovelas y terreno a la salida de éstas del faldón del escudo.
- 4.- Sistema de extracción de rezaga compatible con la velocidad de excavación.
- 5.- Anillo colocador de dovelas rápido y seguro.

Y algunos elementos más que en conjunto, dieron como resultado un diseño conceptual bastante detallado, logrado por personal mexicano especialista, de diferentes empresas.

Este diseño fue finalmente balanceado y detallado por la empresa mexicana Industria del Hierro con la consultoría de la empresa estadounidense Hamilton, C. La fabricación de esta máquina se realizó totalmente en el país, en un tiempo de 10 meses, utilizando un alto porcentaje de elementos nacionales y, el resto, de elementos austriacos de donde se adquirieron equipos excavadores, recolectores y bandas transportadoras.

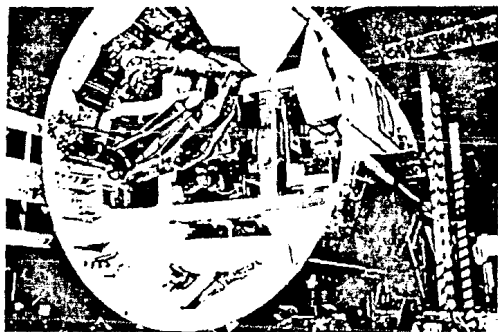


FIG. IV.14. ESCUDO DE FRENTE PRESURIZADO CONSTRUIDO EN EL PAÍS DE MEXICO

Diferencias e innovaciones. Por lo que se refiere a la experiencia con escudos similares en el mundo, desde luego las hay. Sin embargo, por su característica este escudo de 9.51 metros de diámetro se sitúa en el grupo de aquéllos totalmente mecanizados, contando con diferencias e innovaciones entre las cuales se destacan las siguientes: (figura IV.15).

1.- Cuenta con un excavador adosado en su parte frontal, el cual desgarrará el material y tiene un giro de 360°, sin restricción, es decir, lo puede hacer hacia ambos lados en forma continua.

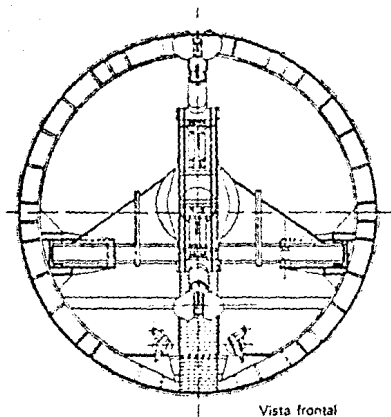
2.- Los gatos de empuje, - 31 piezas -, tienen movimientos independientes cada uno, mientras que en otros escudos se mueven por cuadrantes u octantes.

3.- Tiene un sistema doble de sello - uno de alambre y otro de neopreno -, los cuales impiden que la inyección se filtre hacia el interior del escudo.

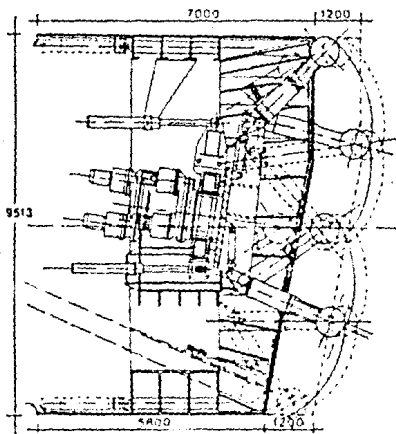
4.- Dispone de un sistema de seguridad con base en seis puertas de ademe, las cuales son capaces de soportar el tercio superior del frente para el caso en que se presente inestabilidad en el mismo.

5.- Su operación requiere únicamente de tres personas: una para el excavador, otra para el colocador de dovelas y una más para la descarga de material; así mismo, de una pequeña brigada para atornillar y suministrar dovelas al frente.

Las dimensiones de la máquina y características, se muestran en la ficha técnica que se presenta al final del inciso.



Vista frontal



Corte longitudinal

FIG. IV. 15. ESCUDO DE FRENTE PRESURIZADO CON BRAZOS CORTADORES

La energía que requiere para su funcionamiento es de 23,000 KVA, la cual se transforma en energía hidráulica a diferentes presiones, según el sistema que se alimente.

La velocidad de excavación teórica que se presenta en su diseño es de 20 a 25 metros por día, pero debido a la falta de experiencia, se han tenido rendimientos promedio de 10 a 15 metros.

Ciclo de excavación. En cuanto al ciclo de excavación normal de la máquina, las etapas son:

- a) El escudo excava 0.80 metros en toda la sección.
- b) Con el impulso de sus 31 gatos de empuje, avanza 0.80 m.
- c) Con el tren de apoyo, al escudo, se le suministran las dovelas, las cuales constituyen el revestimiento definitivo del túnel y se colocan -- por medio del anillo erector.
- d) Se realiza una inyección primaria con base en gravilla con el objeto de rellenar el hueco que queda entre las dovelas y el suelo.
- e) Se efectúe una inyección secundaria o de consolidación.

Para los trabajos de extracción de rezaga y suministro de dovelas, se cuenta con un equipo de apoyo, con una longitud de 108 metros formado por 10 plataformas, (figura IV.16).

Las primeras cinco con pórtico, se encargan de alimentar con dovelas al escudo, equipo hidráulico para los sistemas, transformadores y tableros, inyección y tolva de almacenamiento, respectivamente.

Las demás, sirven para que circulen vagonetas que suministran y extraen los materiales que requiere y descarga el escudo.

Por su diámetro, este escudo está diseñado para la construcción del Metro. Sin embargo, este equipo cuyo costo promedio en 1986 fue de \$2,000 millones de pesos, se puede emplear en cualquier tipo de obras subterráneas tales como carreteras, drenajes, pasos a desnivel, minas, etcétera.

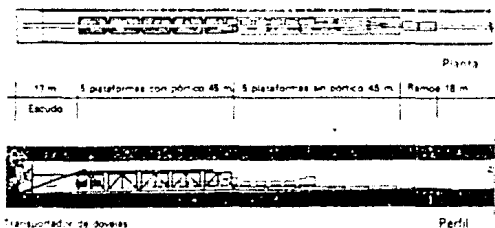


FIG. IV.16. TRANSPORTADOR DE DOVELAS Y EXTRACCION DE REZAGA

En el caso del tramo Patriotismo-Tacubaya se utilizó el escudo con frente abierto al cual se le hicieron algunas mejoras para usar dispositivos para la excavación mecanizada en el frente y aumentar así el avance por día, (el cual era del orden de 6 m. lineales diarios cuando se ataca el frente manualmente con herramientas neumáticas)

Las mejoras hechas al escudo, permiten el acceso al frente de ataque a una máquina rosadora marca Westfalia con capacidad de 40 m³/hr., un cargador frontal de descarga lateral izquierda, que vacía la rezaga en los trucks para vía. Con éste equipo utilizado se tienen rendimientos de 8 a 10 m. lineales por día laborable.

Ficha técnica

1. Escudo		6. Sello de neopreno	
Diámetro exterior	9.513 m	Dureza Shore	60-70
Longitud superior	7.6 m	Resistencia a la tensión	250.0 Kg/cm ²
Longitud inferior	6.4 m	Fabricado con hule natural	
Peso aproximado	230.0 t	7. Sello de alambre	
Secciones que lo componen:		Formado por escobetillas de	
Cachucha de corte	2.4 m	alambre acerado de 4 mm de ø	
Cuerpo y marco interior	2.8 m	8. Sistema de respaldo	
Faldón	2.4 m	Plataformas con pórticos	5 pzas.
2. Anillo erector		Plataformas sin pórticos	5 pzas.
Diámetro exterior	6.9 m	Secciones de rampa	3 pzas.
Diámetro interior	6.14 m	Peso aproximado	220.0 t
Peso aproximado	8.5 t	Longitud total	120.0 m
3. Puertas de ademe		9. Tolva de descarga	
Número de puertas	6 pzas.	Capacidad	7.42 m ³
Área ademada	21.0 m ²	Operada hidráulicamente	
Peso de cada puerta	1.5 t	10. Transportador primario	
4. Brazos excavadores		Velocidad del transportador	1.14 m/s
Velocidad de rotación	1.33 r.p.m.	Ancho del transportador	0.8 m
Radio promedio, brazo exterior	4.0 m	Volumen a transportar	209.0 m ³ /hr
Radio promedio, brazo interior	1.75 m	Máxima altura permitida del material	8.5 cm
5. Gatos de empuje		11. Transportador secundario	
Número de gatos de empuje	31 pzas.	Ancho del transportador	0.9 m
Presión de trabajo	350.0 Kg/cm ²	Velocidad del transportador	1.52 m/s
Carrera	1.35 m	Capacidad	540.0 m ³ /hr

CAPITULO V

PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO DEL TUNEL.

El Plan Rector de Vialidad y Transporte Urbano del Distrito Federal, prevé dentro del Plan Maestro, que las Futuras líneas serán construidas en zonas muy transitadas y en avenidas o calles relativamente estrechas, por lo cual una solución superficial, elevada o en cajón es cada vez más difícil de aplicar, dando lugar a la posible realización de líneas en túneles profundos, minimizando afectaciones al tráfico, reduciendo las obras inducidas y afectaciones a instalaciones de Servicios Públicos. Tal es el caso del túnel de la Línea 9 Poniente, que va de la estación Patriotismo a la estación Observatorio, cuyo procedimiento constructivo en uno de sus tramos, que consideramos el más relevante en cuanto a técnica se refiere, se describe en los cinco incisos siguientes.

A.- Descripción del procedimiento de excavación.

La excavación del túnel se inicia en la Lumbra PT-1 ubicada en el cadenamiento 17 + 713.000 utilizando un escudo de frente cerrado, hasta el cadenamiento 17 + 875.000, este escudo tiene la función de contener las paredes de la excavación entre la sección de ataque y la sección ya revestida. Del cadenamiento 17+875.000 hasta la Lumbra PT-2 ubicada en el cadenamiento 18+783.037, se utilizó un escudo de frente abierto, el cual reduce la cedencia del material (deformaciones), - amén de que controla el flujo del material hacia el túnel, ocasionado por la baja resistencia al corte del mismo. El proceso constructivo de las lumbres se describe en el inciso (B) de este capítulo.

El túnel tiene un diámetro interior de 8.64 m. en el sentido horizontal y 8.31 m. en el sentido vertical, y 9.15 m. de diámetro exterior, con una longitud de desarrollo de 1070.00 m aproximadamente, tal como se observa en la figura V.1, y su revestimiento consiste en tres segmentos o dovelas prefabricadas de concreto armado. El proceso del revestimiento se describe en el inciso (E) de este capítulo.

Para iniciar la perforación del túnel, el escudo se apoya en una estructura de atraque. El atraque es un elemento de concreto reforzado que se encuentra situado en el lado opuesto al avance del escudo, y orientada transversalmente al eje del túnel. Su principal función es la de servir de apoyo al escudo, durante sus primeros movimientos en la lumbra mediante la colocación de semianillos de dovelas tipos a y b colocadas en posición

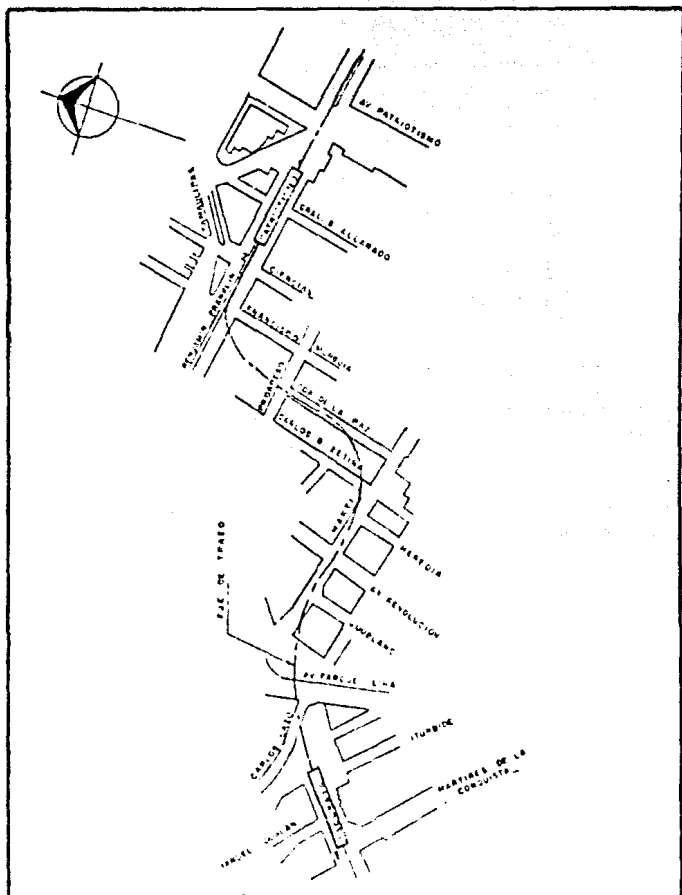


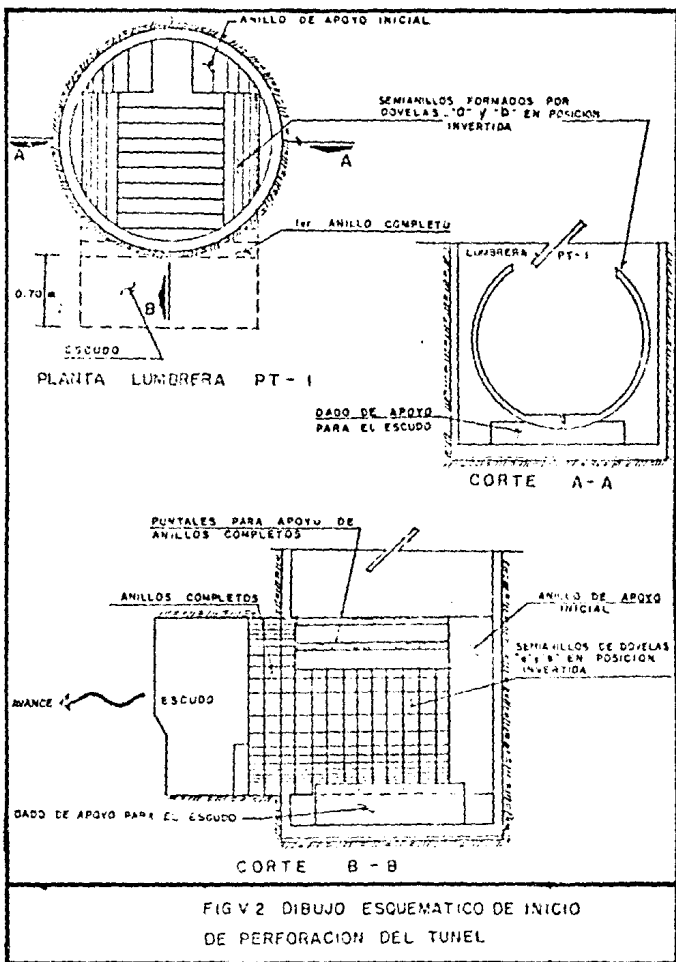
FIG. V.1. CROQUIS DE LOCALIZACION
TRAMO PATRIOTISMO - TACUBAYA

invertida, (como se indica en la figura V.2) sobre los cuales se apoyan los gatos de empuje del escudo en el momento de efectuar los primeros metros de excavación del túnel.

La existencia del atraque, así como de los semianillos de dovelas tipos a y b colocados en la lumbrera es temporal, ya que con el fin de contar con un espacio lo suficientemente adecuado para las maniobras en el fondo de la lumbrera, es necesario retirar de la misma el atraque formado por los semianillos, una vez que se haya iniciado una cierta cantidad de metros, en los cuales las dovelas tengan la suficiente adherencia al terreno natural, previniendo con ello una posible falla al momento de los empujes del escudo.

Cuando el frente del escudo esté en contacto con el muro de la lumbrera se inicia la demolición de dicho muro y al mismo tiempo se comienza a colocar el primer semi-anillo dentro de la camisa del escudo, lo cual se realiza con ayuda de los brazos erectores; terminado de colocar el primer y segundo semi-anillo, se rezaga la demolición del muro y se procede a avanzar el escudo por tramos de 80 cm., medidos en la carrera de los vástagos de los gatos de empuje dando oportunidad a colocar los semi-anillos subsecuentes.

La colocación de anillos completos, se inicia una vez que la totalidad de la camisa del escudo esté en contacto con el terreno, es decir, cuando el escudo esté prácticamente a punto de desaparecer de la lumbrera, para garantizar la seguridad en su colocación, se apuntalan en la parte superior contra el anillo de apoyo inicial, según se indica en la figura V.2.



Antes de realizar cualquier avance del escudo, se procede a efectuar el corte del material existente en todo el frente, definido por el perimetro interior del escudo en una longitud máxima de 80 cm., para permitir el avance del escudo; en la zona correspondiente a la cachucha del escudo, se excava una ranura de 80 cm. de longitud y 40 cm. de ancho y en la parte central del frente se realiza una excavación de una longitud máxima de 2.0 m. Esto depende de las condiciones que presente el suelo con el objeto de que en cada avance, la cachucha antes mencionada no encuentra resistencia al mismo (ver figuras V.3 y V.4).

Dependiendo de las condiciones de estabilidad del terreno por atravesar, la excavación de la ranura se realiza preferentemente al ras de la cachucha del escudo y dependiendo de los resultados de las nivelaciones superficiales se mantiene o elimina la excavación en la parte central antes mencionada.

En el caso de zona de curva en el trazo del túnel, la excavación de la ranura puede admitir ligeras sobreexcavaciones (10 cm. como máximo), esto es con el fin de facilitar el control topográfico del escudo, evitando de esta manera posibles daños a los anillos previamente colocados debido a empujes forzados.

Habiendo efectuado el corte, se procede a dar un avance con una longitud máxima de 80 cm., los cuales se miden en la carrera de los vástagos de los gatos de empuje.

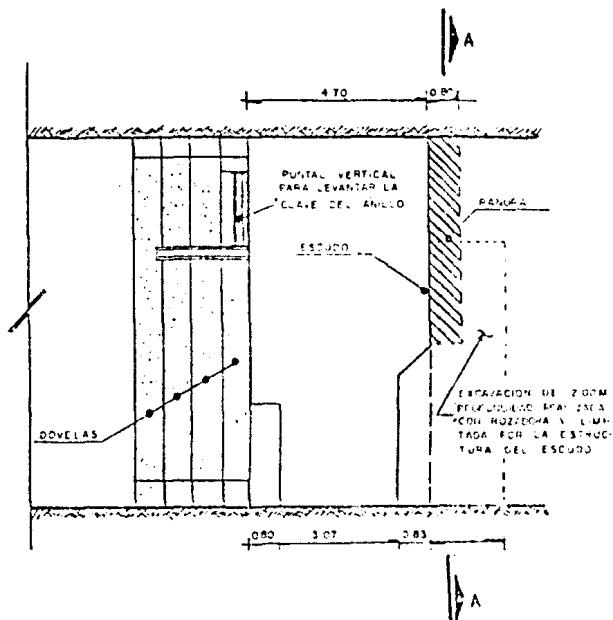


FIG.V.3. APUNTALAMIENTO DE DOVELAS

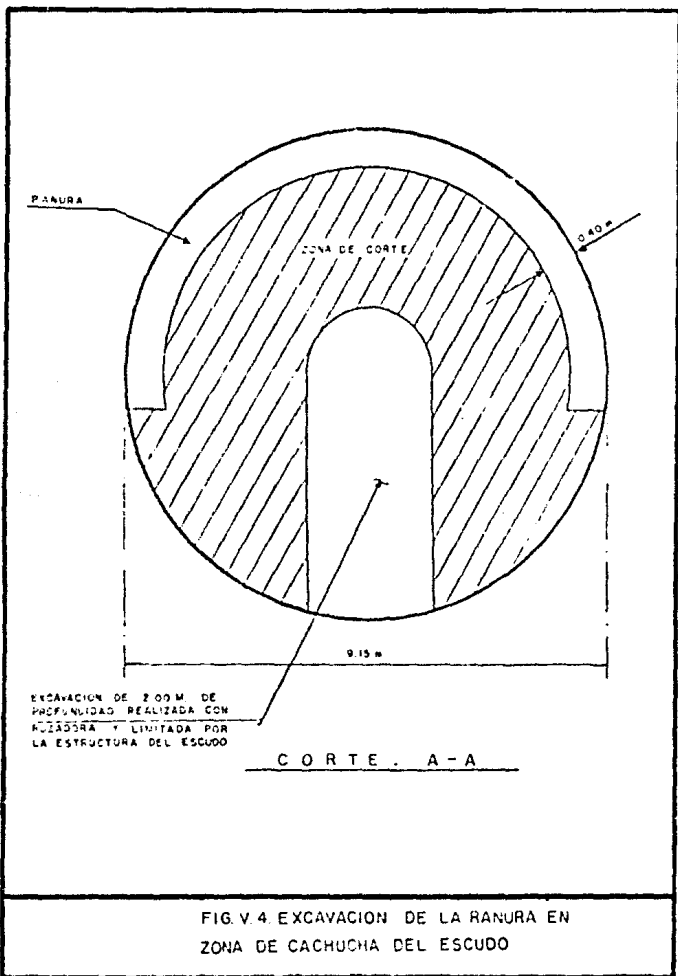


FIG. V. 4. EXCAVACION DE LA RANURA EN ZONA DE CACHUCHA DEL ESCUDO

El ataque del frente se hace con herramienta manual o mecánica dependiendo de los aditamentos instalados en el escudo, la excavación se inicia en el instante en que se haya terminado el empuje del escudo mientras se colocan los segmentos que forman el último anillo. Habiéndose desalojado la rezaga del frente, se procede a ejecutar un nuevo avance.

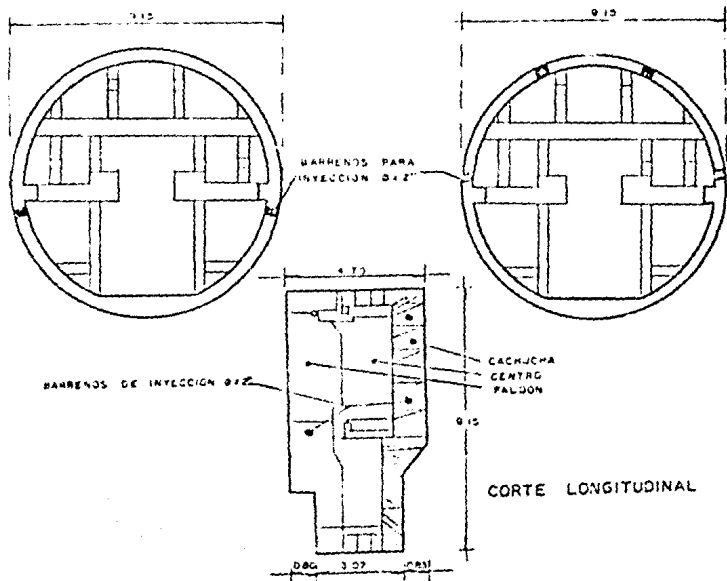
El avance del escudo se logra mediante la operación de los gatos de la parte trasera, los cuales se apoyan por medio de sus zapatas en los anillos ya colocados.

Cuando la presión de los gatos de empuje para un avance cualquiera rebase los 259.00 kg/cm^2 (3700 lb/in^2), se debe realizar en la superficie de contacto de la camisa del escudo con el terreno la inyección de una mezcla compuesta por lodo bentonítico, al cual se le agrega el 5% de aceite soluble.

La inyección antes mencionada, se realiza a través de las preparaciones existentes en el escudo. (figura V.5). La presión máxima de inyección es de 3.00 kg/cm^2 , el volumen límite de inyección es de 1.00 m^3 por barrenos.

El objeto de la inyección antes mencionada, es el de reducir las fuerzas de fricción que se generan en la superficie de contacto entre la camisa del escudo y el suelo circundante, evitando de ésta manera presiones excesivas en los gatos de empuje que pudieran dañar los anillos previamente colocados; en caso de que en un tramo se mantengan las presiones de empuje altas, se podrá efectuar la inyección ya mencionada a cada 10 m. medidos en el sentido de avance del escudo.

FIG. 5. LOCALIZACION DE BARREROS
PARA INYECCION DE MEZCLA



Para realizar la rezaga del material, producto de la excavación del frente, se desaloja por medio de un cargador con descarga lateral, el cual a su vez forman con el producto de la excavación una plataforma de trabajo para el tránsito del equipo a utilizar y posteriormente descargar directamente a las vagonetas montadas sobre plataformas para vía.

Las plataformas para vía, son jaladas hasta la lumbrera por locomotoras donde se vacía la rezaga a los botes cargadores de 5 m³ de capacidad c/u. que a su vez son izados con una grúa o malacate de 20 ton. hasta la torre de manteo, donde descargan a la tolva reguladora o a los camiones, que la transportarán a zona de tiro elegido.

B.- Construcción de Lumbreras.

Las lumbreras, son estructuras que constituyen una forma fácil y segura de llegar al nivel donde se iniciará el túnel, además permiten la introducción de los equipos y materiales necesarios para su construcción, así como la extracción de los materiales producto de la excavación del túnel; en términos reales la lumbreira se puede definir como un túnel vertical, generalmente de forma cilíndrica.

La construcción de las lumbreras puede ser realizada de distintas formas, dependiendo de la naturaleza del terreno y de la profundidad que se deba alcanzar.

El procedimiento constructivo que se utilizó en la construcción de las lumbreras PT-1 y PT-2 pertenecientes a la línea 9 del Metro, es uno de los llamados métodos tradicionales.

La lumbreira PT-1 se efectuó con la finalidad de poder introducir el escudo para la excavación y construcción del túnel del Metro, la ubicación de la lumbreira se indica en la figura V.7.

La lumbreira es, de sección circular con un diámetro libre de 10.70 m ; la sección excavada tiene, un diámetro aproximado de 11.50 m. como se puede apreciar en la figura V.8. La profundidad de excavación es de 18.53 m, que corresponde al nivel 2223.20 m considerando el nivel del terreno natural igual a 2241.73 m.

Extracción de muestras cúbicas. Con el objeto de tener mayor información sobre las características del

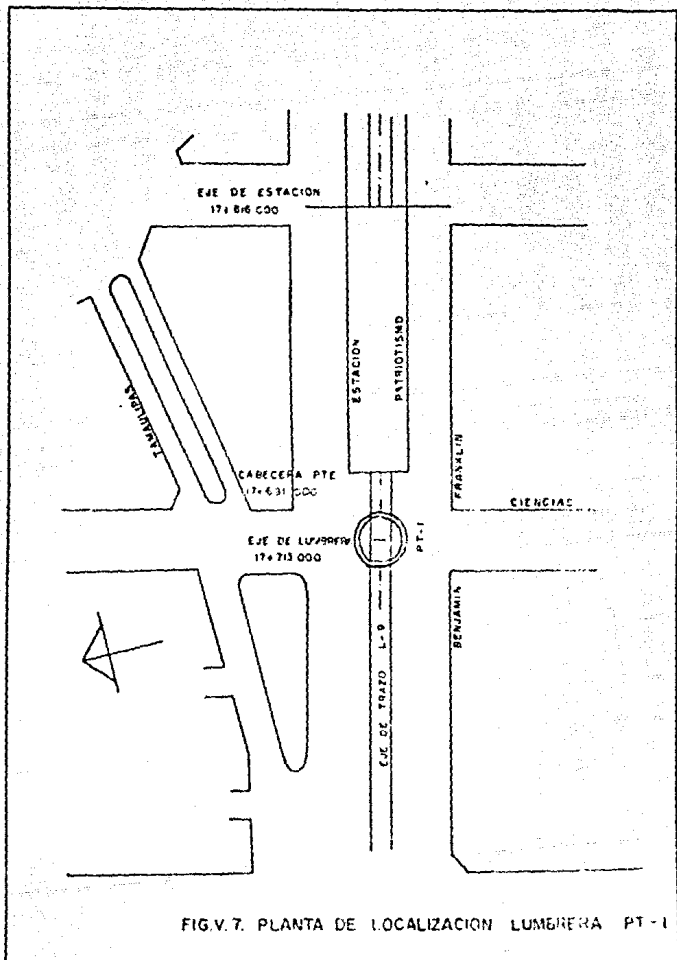


FIG.V.7. PLANTA DE LOCALIZACION LUMINERA PT-1

subsuelo en la zona donde se construyó la lumbrera fue necesario extraer muestras cúbicas de 25x25x25 cm., en las siguientes profundidades: 7.00, 9.00, 14.00, 16.00 y 17.50 m aproximadamente. La extracción de las muestras cúbicas se realiza a medida que la excavación alcanza las profundidades antes citadas.

Bombeo de achique. En caso de que se presenten filtraciones hacia el interior de la lumbrera durante el proceso de excavación, estas se controlan mediante zanjas, ubicadas en las orillas del fondo de la excavación las cuales tienen pendientes hacia cárcamos de bombeo de 30 x 30 x 30 cm., desde donde se extrae el agua por medio de bombeo de achique.

A continuación describiremos las actividades constructivas de acuerdo a la cronología de ejecución.

a) Construcción de brocales. Una vez que sobre el terreno se ha definido el trazo de la lumbrera, se excava a mano o con maquinaria hasta una profundidad de 1.50m y en un ancho de 1.0m donde quedan alojados los faldones del brocal, los cuales se cuelan utilizando una cimbra apoyada contra el terreno por puntales (polines) de madera de 4" x 4".

Los puntales se colocan a cada 2.50m. de separación horizontal y en el sentido vertical se coloca un nivel a una profundidad de 0.75m., medido a partir del nivel de terreno natural.

La rama horizontal del brocal (alero) está formado por una pequeña losa, la cual sirve para que la máquina de excavación pueda rodar libremente sin peligro de que

se produzca algún caído en la superficie de la lumbrera. La sección del brocal se indica en la figura V.8.

b) Excavación y construcción de la lumbrera. Una vez que se haya colado el brocal (tres días), se está en condiciones de iniciar la excavación para la construcción de la lumbrera.

Se excavó, en toda el área de la lumbrera, en tramos de 2.40 m. de profundidad, excepto en la zona comprendida entre 6.0 y 18.53 m. de profundidad donde se debe efectuar en tramos de 1.20 m.

Una vez alcanzada la profundidad de excavación en el tramo en cuestión, se procede a colocar una estructura de retención, formada por un revestimiento primario, el cual está constituido por una capa de concreto lanzado de 15 cm. de espesor y reforzado con una malla electrosoldada del tipo 6" x 6" -6/6, como se indica en la figura V.9.

El traslape que debe existir en la malla electrosoldada en cada tramo en cuestión, debe ser de 20 cm. como mínimo.

El proceso de excavación y la colocación del revestimiento primario se realiza en tramos de 1.20 o 2.40 m. de profundidad, según sea el caso, repitiéndose tantas veces como sea necesario hasta alcanzar la profundidad de proyecto de la lumbrera.

c) Construcción de la losa de piso y de la estructura para la extracción de rezaga (SKIP).

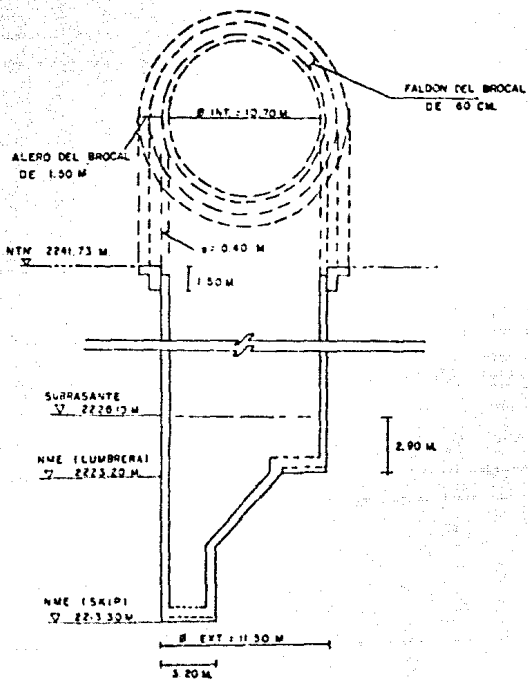


FIG. V.8. CONSTRUCCION DEL BROCAL DE LA LUMBRERA

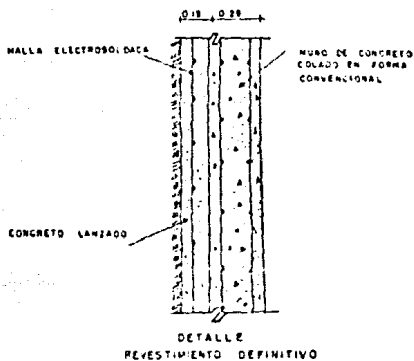
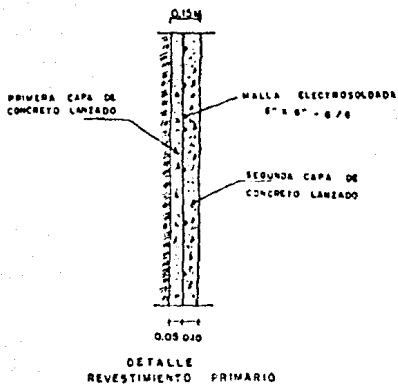


FIG.V.9. REVESTIMIENTO PRIMARIO Y DEFINITIVO DE LA LUMBRERA

Una vez que se ha alcanzado la profundidad de proyecto de la lumbrera, se procede inmediatamente a colar en el fondo, una planilla de concreto pobre de 10 cm. de espesor provisto de un aditivo acelerante de fraguado, excepto en el área de construcción de la tolva y del SKIP.

Después de colada la planilla, se inicia el armado y colado de la losa de piso, dejando las preparaciones necesarias para la liga estructural con el muro de revestimiento definitivo.

Una vez colada la losa de piso de la lumbrera (24 horas), se inicia el proceso constructivo de la estructura para la rezaga (SKIP), figuras V.10 y V.11, el cual se realiza de la siguiente manera:

La excavación y construcción se hace en dos fases.

Fase 1. Consta de dos etapas con un avance cada una, igual a 2.40 m, según se indica en la figura V.11, realizada la excavación de la etapa superior, se coloca un revestimiento primario, el cual está constituido por una capa de concreto lanzado de 15 cm. de espesor y reforzado con una malla electrosoldada del tipo 6" x 6" - 6/6.

Concluida la colocación del revestimiento primario en la etapa superior, se procede a la construcción del revestimiento definitivo, según lo indica el plano estructural correspondiente. Esta construcción se realiza utilizando concreto lanzado.

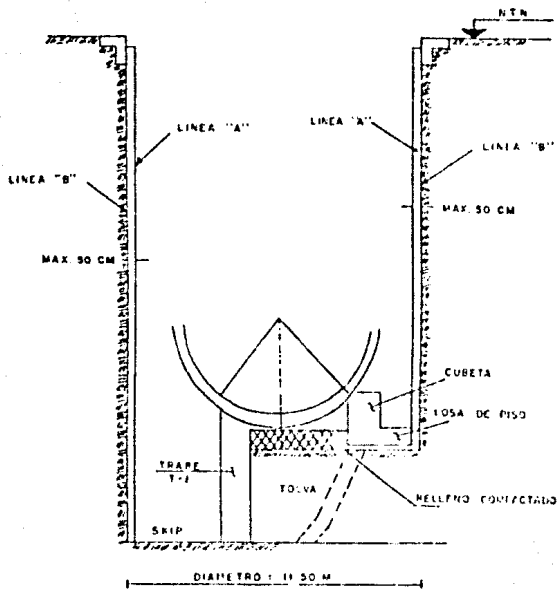


FIG.V.10. LUMBRERA DE ENTRADA DEL ESCUDO

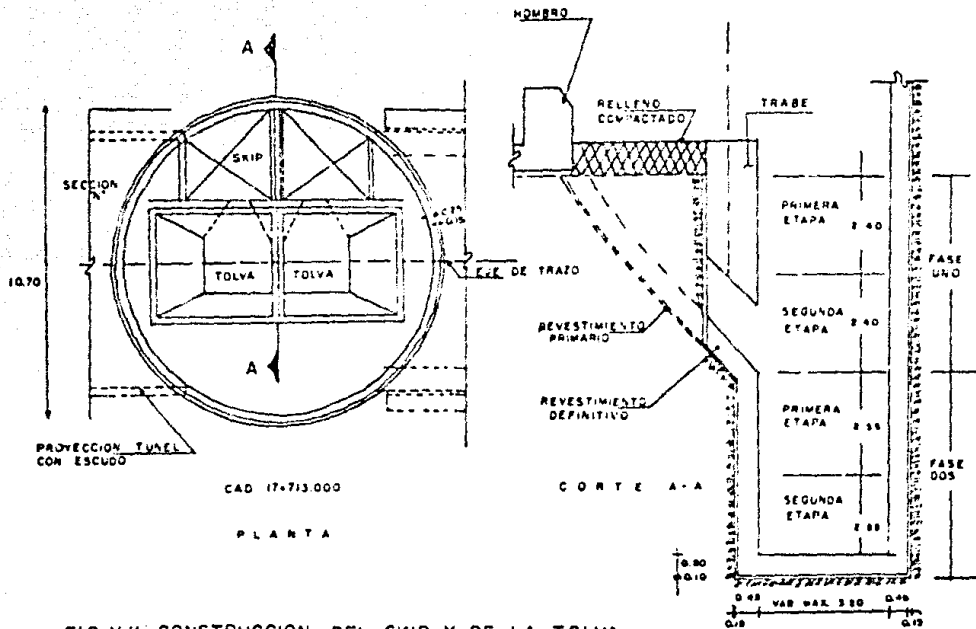


FIG. V.II. CONSTRUCCION DEL SKIP Y DE LA TOLVA

Es condición necesaria que se haya revestido en forma definitiva la etapa superior para iniciar la excavación de la etapa inferior.

Realizada la excavación de la etapa inferior, se construye el revestimiento primario; según lo indicado en la etapa superior. Una vez concluido el paso anterior, se procede a la construcción del revestimiento definitivo, utilizando concreto lanzado.

En la colocación del revestimiento definitivo, se deben dejar las preparaciones necesarias para la liga estructural con los muros correspondientes a la tolva, la ubicación de dichos muros, así como sus dimensiones no se especifican en este trabajo.

Efectuado el revestimiento definitivo de la fase anterior se procede a efectuar la segunda fase, la cual consta de dos etapas cuya profundidad de excavación para cada una de ellas es de 2.55 m.

La excavación de la segunda Fase, se realiza bajo los mismos lineamientos indicados en la primera Fase.

Terminada la excavación, hasta la profundidad de desplante del SKIP, se construye el revestimiento primario, según lo indicado para la fase anterior, y a continuación se cuela en el fondo una plantilla de 10 cm. de espesor constituida por concreto pobre, se recomienda agregar a esta plantilla un aditivo acelerante de fraguado con el fin de agilizar los trabajos.

Colada la plantilla, se coloca el armado y se efectúa el colado de losa de piso del SKIP, durante la colocación del armado, se deben dejar las preparaciones correspondientes para la liga estructural con el revestimiento definitivo, después de concluido el colado (24 horas) de dicha losa se realiza la construcción de los muros y trabes del SKIP.

Una vez que los muros y trabes del SKIP alcancen su resistencia de proyecto, se procede a realizar la construcción de la cubeta para el apoyo del escudo, para ello se debe colocar, previamente, un material de relleno hasta el nivel de desplante de dicha cubeta, según se indica en las figuras V.10 y V.11; el material de relleno debe ser areno-limoso tipo tenetate.

La cubeta es una estructura de concreto reforzado (aunque también puede ser metálica), en donde se posiciona el escudo, por lo que es de suma importancia que al momento de construir la cubeta, ésta posea los datos de proyecto del túnel, en cuanto a dirección y elevación ya que dicho en otras palabras la cubeta es una plataforma de lanzamiento del escudo.

Esta estructura cuenta generalmente con tres rieles a todo lo largo, localizados en su parte inferior, ahogados en el concreto y perfectamente anclados, cuya finalidad es la de facilitar el deslizamiento del escudo.

El procedimiento constructivo es el tradicional para el colado de elementos masivos de concreto reforzado, teniendo especial cuidado en los siguientes aspectos:

1.- Anclaje de la cubeta, al acero de refuerzo de la plantilla del fondo de la lumbrera.

2.- Trazo y nivelación al detalle, principalmente en el nivel y alineamiento de rieles que son la gufa del escudo.

d) Construcción del revestimiento definitivo.

Concluida la construcción del SKIP y de la cubeta, se inicia la construcción del revestimiento definitivo de la lumbrera, el cual consiste en un muro de concreto armado; durante el colado de este muro se puede utilizar cimbra convencional o cimbra deslizante.

El revestimiento definitivo con dirección al tramo, debe ser eliminado, dejando una preparación mediante una caja de maderas, de tal forma que quede únicamente el revestimiento primario.

e) Construcción de la tolva.

Es condición necesaria para iniciar el proceso constructivo de la tolva, que el escudo se encuentre cuando menos a una distancia de 30.0 m. de la lumbrera. Cumplida esta condición, se demuele la estructura de atraque para el arranque inicial del escudo; se demuele la cubeta y se inician las excavaciones correspondientes para la construcción de la estructura de la tolva.

La excavación se realiza en una sola etapa. (Con la forma y dimensiones que indican los planos estructurales correspondientes). A continuación se coloca el espesor

correspondiente de revestimiento primario reforzado con una malla electrosoldada, 6" x 6" - 6/6. Por último se realiza la construcción del revestimiento definitivo teniendo cuidado en ligar el acero de refuerzo de la tolva con el SKIP y con la losa de piso.

C.- Instalaciones exteriores e interiores.

Instalaciones de superficie:

1) Campamento. se tiene que ubicar en un predio que cumpla con las dimensiones mínimas necesarias, (se recomienda un área no menor a 7,000 m²), teniendo siempre -- presente que las afectaciones a los servicios públicos sean los menos posibles.

Dentro de las instalaciones que conforman al campamento se encuentran las siguientes:

a) Almacén general y patio .- Es el lugar donde se encuentran ubicados los materiales de uso más común para la construcción del túnel como son: refacciones menores del escudo, tornillería para el ensamble de dovelas, material eléctrico para el funcionamiento de los equipos y el mantenimiento de la iluminación tanto en el interior como en el exterior del túnel, almacenamiento de combustibles y lubricantes, maderas y rieles para la instalación de la vía en el interior del túnel, etc.

El área que generalmente se le asigna a un almacén de estas características es de aproximadamente 250 m².

b) Oficinas Técnico - Administrativas y Supervisión.
En esta área se encuentran ubicados los siguientes departamentos.

- 1.- Superintendencia general.
- 2.- Superintendencia y Jefatura de Obra.
- 3.- Ingeniería de Frente.
- 4.- Departamento Técnico.
- 5.- Departamento de Estimación.

Esto es por lo que se refiere a la necesidad de espacio en cuanto al área técnica propiamente. En lo referente al área administrativa, es de la siguiente forma:

- 1.- Administración General.
- 2.- Departamento de Personal.
- 3.- Departamento de Almacén.
- 4.- Vigilancia.

Es conveniente que durante el diseño de las instalaciones del campamento, las oficinas Técnico - Administrativas queden ubicadas en lugares estratégicos que permitan aún estando en el interior de la oficina observar los movimientos que se estén realizando en el exterior.

Por lo que respecta a las oficinas de supervisión, el lugar de su ubicación generalmente la designa el cliente.

c) Sub-estación de energía eléctrica.- La designación de la zona donde se ubicará la sub-estación, será un lugar de no fácil acceso para el personal de campo - que se encuentra trabajando en la obra, tomando las debidas medidas de seguridad en cuanto a señalizaciones y protecciones necesarias.

d) Grúa portico.- La instalación de esta grúa portico se hará sobre el brocal de la lumbrera y su ubicación dependerá en mucho de la orientación que se tenga del eje del túnel, así como de la zona de almacenaje de dovelas.

Cabe hacer notar que éste es el principal medio de transporte de los materiales y equipo entre la superficie de la lumbrera y el túnel.

e) Planta de emergencia y compresores. La existencia de una planta de emergencia en la construcción de un túnel es conveniente más no necesaria, ya que al sufrir alguna interrupción en el suministro exterior de la energía eléctrica, las actividades en el interior del túnel se suspenderán necesariamente si no se cuenta con una fuente alternativa de energía, por lo que será necesario contar con los dispositivos de seguridad para el desalojo del túnel en caso de prolongarse la interrupción en el suministro de la energía eléctrica.

La sala de compresores o disponibilidad de aire comprimido está supeditado básicamente al consumo que se tenga tanto en el interior del túnel (por ejemplo para bombes de achique) como en superficie para el consumo de los talleres.

f). Area para talleres. Los talleres con los cuales se cuenta en este tipo de obras, son generalmente los siguientes:

1.- Taller de carpintería. Se encarga básicamente del habilitado e instalación de durmientes y andadores para la vía en el túnel.

2.- Taller de electricidad. Se ocupa básicamente de prolongar las líneas de suministro de energía eléctrica en el túnel, conforme avanza el escudo.

3.- Taller mecánico. Se ocupa de lo relacionado al mantenimiento del escudo, así como de los equipos auxiliares.

4.- Taller de soldadura. Se encarga del habilitado e instalación de la soportería de las diferentes tuberías que se encuentran en el túnel, así como también de las pequeñas reparaciones y adecuación de instalaciones, tanto en el interior como en el exterior del túnel.

En la fig. (V.12) se muestra una planta típica de un campamento para la construcción de un túnel por medio del método de escudo.

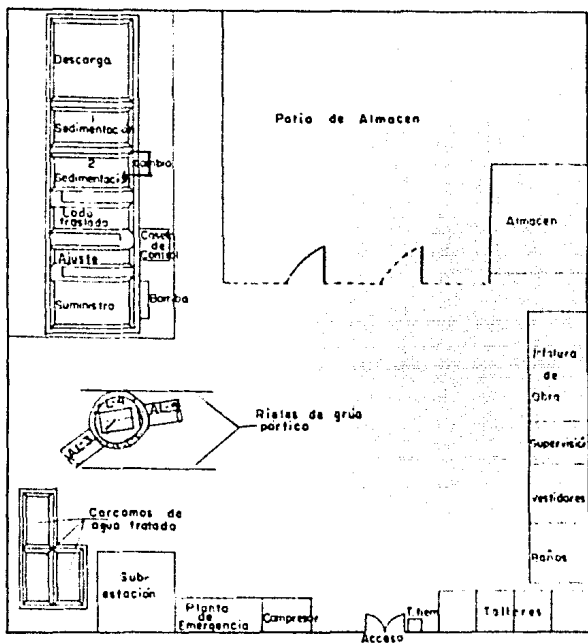


FIG.V.12. CAMPAMENTO E INSTALACIONES

D.- Control topográfico del túnel.

La topografía en túneles, por sus características generales, difiere substancialmente de los procedimientos ordinarios, los cuales debido a su condición a "Cielo Abierto" son más favorables para su ejecución, por lo tanto y en consecuencia la topografía en control de túneles estará más limitada en cuanto a espacio y recursos para el desarrollo o aplicación de métodos para resolver algún o algunos problemas topográficos particulares.

El control topográfico deberá ejecutarse con procedimientos que por sistema, garanticen logros óptimos de tiempo, economía y precisión.

Al tratar de introducir el eje básico de proyecto por los portales o lumbreras al núcleo de la obra, se busca la precisión que satisfaga las necesidades de exactitud requeridas, dada la importancia que esto representa en la construcción de un túnel.

Con la construcción de oculares acodados (equipo accesorio de los tránsito actuales) que son básicamente un juego de prismas de 45° convenientemente dispuestos, se evitó la intervención del recurso tradicional de las plomadas, ya que éstas, en longitudes o profundidades de lumbreras muy grandes (más de 20.0 m), por su oscilación propia, además del movimiento terrestre, así como obstáculos en el tiro de la lumbrera, etc., es muy limitado su rango de precisión.

Este accesorio de prismas acodados, se monta directamente en el ocular del tránsito, teniendo así una proyección vertical-visual de t^2 , del movimiento del eje vertical del aparato, es decir la posibilidad de observación hacia el Zenit lo cual en este caso es requerido.

Pasos a seguir para la introducción del eje básico de proyecto al interior del túnel:

a) Se trazó convenientemente el eje de proyecto sobre el brocal del tiro de la lumbrera y/o en los paños de la misma si es factible.

b) Se coloca un hilo a "reventón" apoyándose en estas referencias Fig. (V.13).

c) Ya estando en la parte interior del tiro de la lumbrera (Boca del túnel) se intercepta visualmente este cruce de hilos con la reticula de la visual del aparato en dos posiciones (para evitar un posible desajuste mecánico del aparato en el eje de colimación) y se traza la proyección visual-vertical del promedio de las dos punterías (aparato directo e inverso) en dos puntos.

d) Se cambia la ubicación del aparato, a una posición $t 90^\circ$ en relación al primer eje visual obtenido ejecutándose los mismos pasos que en la primera línea por interceptar.

e) Obtenida de intersección de las dos visuales, presumiblemente se tiene la intersección de la proyección vertical del cruce de los hilos en el Brocal de la Lumbrera. Fig. (V.14).

f) Se centra el tránsito en esta intersección y se visualiza nuevamente a la parte superior de la lumbrera para comprobar que se está en la proyección vertical del eje - intersección. Comprobando ésto, se toma puntería

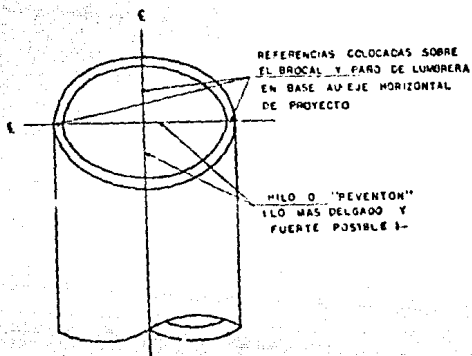


FIG. V.13. INTRODUCCION DEL EJE BASICO DE PROYECTO AL INTERIOR DEL TUNEL

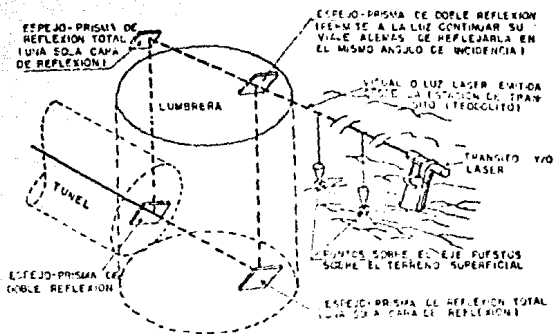


FIG. V.14. PRINCIPIO FUNDAMENTAL DE UTILIZACION DE LOS OCULARES ACODADOS

dentro del campo visual de la lumbrera al desarrollo del hilo sobre el eje principal (que es el eje horizontal de proyecto) para proceder así al trazo del mismo en la zona inferior y/o interior de la lumbrera y/o túnel por construir.

Para la introducción de la nivelación en el túnel, partiendo de la elevación tomada como base en el banco del brocal (previamente checado), se procedió a la introducción de la elevación en el interior de la lumbrera o túnel, ejecutándose para este fin los siguientes pasos:

a) Se determinó convencionalmente la cota o elevación al borde del brocal de la lumbrera, en un sitio tal que garantizará la visibilidad sin obstáculo y "a plomo" sobre el paño de la lumbrera hasta el fondo de la misma.

b) Se ubicó lo más al fondo de la lumbrera (o cercas del piso de la misma) y en un lugar asignado, previamente para tal efecto un punto o niveleta (ploma) en su caso, que pudiera ser utilizado formalmente como Banco de Nivel

c) Se midió con cinta directamente desde el borde del brocal hasta la parte superior de la niveleta, para así en consecuencia y aritméticamente determinar la elevación del B.N. interior del túnel como se indica en la Fig. (V.15).

d) Ya determinada la elevación del B.N. en el interior del túnel se prosiguió en lisa con la nivelación para establecimiento del B.N.S. (Banco de Nivel Superficial) a lo largo del túnel y a la distancia entre uno y otro lo más adecuadamente cerca o lejos posible que provea así mismo la visibilidad necesaria.

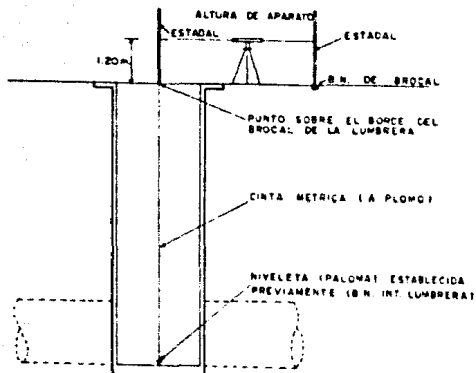


FIG. V.15. INTRODUCCION DE LA NIVELACION EN EL TUNEL

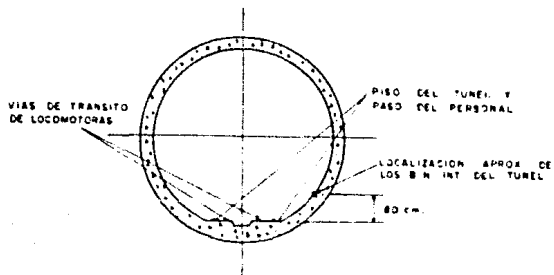


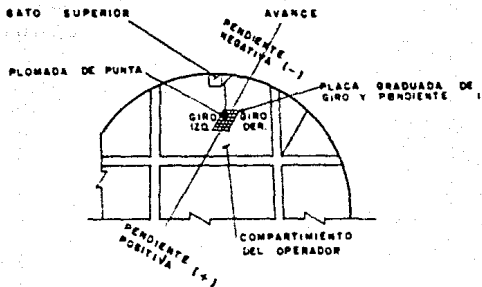
FIG. V.16. UBICACION DE LOS BANCOS DE NIVEL EN EL TUNEL

e) La ubicación de los B.N. de trabajo en el interior del túnel fue también restringido o supeditada a la geometría tanto de la sección del túnel como a la del trazo de proyecto, ya que en zonas de curva la frecuencia de la instalación fue más continua debido a que, por razón lógica al ir "Curvando" en el túnel, los B.N.S. anteriores quedaban ocultos a la visibilidad en tramos relativamente cortos (± 40 mts.) de acuerdo al radio de curvatura en cuestión.

La posición en relación a la sección del túnel regularmente fue la misma, es decir: se ubicaron los Bancos a una altura accesible en relación al piso del túnel, pero lo suficientemente lejos de la zona de paso de personal y equipo. Fig. (V.16).

Giro y pendiente. El procedimiento para conocer la pendiente y el giro del escudo consta de los siguientes pasos:

a) Con una plomada pendiendo libremente del gato superior (punto asignado para este propósito), hacia la placa graduada colocada en el piso del compartimiento del operador o en el lugar más adecuado de acuerdo a las características del escudo, con el cual se este perforando, se toman medidas en el sistema coordenado, para lo cual, en la placa misma, se ubica el centro de este sistema; siendo en este caso considerado como eje de las abscisas el eje origen de control de la pendiente y al eje de las ordenadas consecuentemente como el eje de control del giro.

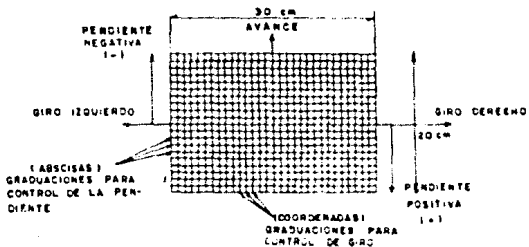


Funcionamiento teórico-práctico de la placa.

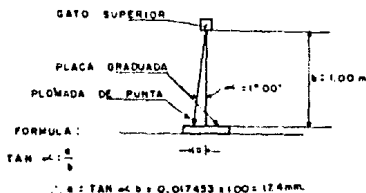
Dimensiones y características: placa de 1/2" de espesor; de aluminio, bronce o cobre.

Longitud = 30 cms.

Ancho = 20 cms.



Las dimensiones de las graduaciones para el giro, obedecen la base trigonométrica de la tangente, es decir, para el caso de una longitud de plomada de 1 m y un giro en el escudo de $1^{\circ}00'$ sobre su eje se obtiene:



Para el caso de las pendientes (inclinaciones longitudinales del escudo), en el cual el desplome porcentual es requerido, para esto se advierte que obedeciendo así - a la gravedad, la plomada en un metro de longitud (1.00 m), al inclinarse el escudo una unidad de por ciento (1.00 c/u), el desplazamiento a observarse de la plomada en la placa, de acuerdo a su longitud es:

$$\frac{1}{100} = 0.01 \text{ mts.} = 10 \text{ mm.}$$

Es importante enfatizar que el empleo de nuevos métodos de excavación de túneles exige también innovación en sus sistemas de control como es el caso del rayo lásser, (utilizado en la línea 9 del Metro), así como también el uso del giroscopo para efectuar orientaciones astronómicas, con lo cual se ha logrado una precisión casi perfecta en cuanto a control topográfico se refiere en excavación de túneles.

El uso del sistema lásser en la construcción de túneles sirve no solo para reducir costos, sino para mejorar la exactitud, reducir pérdidas de tiempo y proporcionar mayor seguridad.

En túneles con escudo, como lo es nuestro caso, el uso de un lásser con tarjetas elimina mucho tiempo de comprobación después de cada empuje ayudando a acelerar el ciclo. El escudo puede ser dirigido únicamente por el operador, y el turno de topógrafos debe concentrar su atención a comprobar constantemente la colocación del lásser, tarjetas y puntos intermedios (o de control).

La luz lásser se dirige continuamente a dos tarjetas de material transparente fijas en el escudo (una adelante y otra atrás) como se observa en la figura V.17. En las intersecciones de la luz con las tarjetas, aparecen puntos rojos brillantes conforme el escudo se mueve, los puntos rojos trazan trayectorias en las tarjetas.

La posición relativa de la trayectoria marcada por el punto, comparada con la trayectoria calculada, indica la desviación del escudo en la posición deseada. Para un rápido chequeo del giro y la pendiente del escudo, se puede usar una plomada y una placa graduada en grados de giro y porcentaje de pendiente.

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

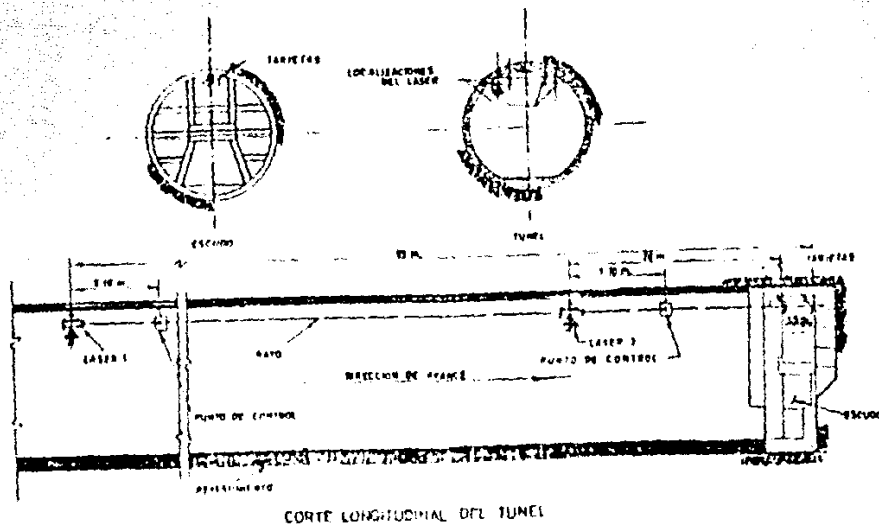


FIG.V.17. LOCALIZACIONES DEL LASER Y LAS TARJETAS

Los resultados obtenidos, sirven de base para seleccionar los gatos a usar en el próximo avance,

Para efectuar los empujes programados del escudo se van tomando como guía la longitud de los vástagos de cada gato, comparándolos con los definitivos teóricamente

Se dan especial importancia al claro que existe entre la cara exterior de la dovela y el diámetro interior del faldón del escudo para evitar que se dañen los sellos del mismo, al producirse una excentricidad entre los anillos y el mismo faldón.

E.- Revestimiento.

El revestimiento del túnel está constituido por anillos de concreto formado por dovelas las cuales son de tres tipos: a, b y c; cada anillo está formado por tres dovelas, una de cada tipo, las dovelas a y b, forman los costados y la clave, estas dovelas son similares con excepción de sus extremos superiores donde se forma una rótula, donde se efectúa la unión por medio de un canal de 8" x 0.70 m., el cual va soldado a los insertos H en los que se coloca previamente tubo de 2 1/2" ϕ cédula 40 x 0.10 m., de longitud; la dovela C forma la cubeta del túnel y proporciona el piso de rodamiento para los procesos de acarreo (rezaqa, dovelas, etc.). Las dovelas son de concreto de resistencia igual a 350 kg/cm² y acero de refuerzo de 3/4", y tienen un ancho de 0.80 m y un espesor de 0.25 m., salvo las correctivas que dependen de la curvatura del túnel que es donde se colocan este tipo de dovelas.

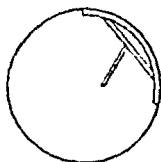
El orden de colocación de las dovelas es indistinto, pero con el objeto de plantear una secuencia de colocación ascendente se transporta en primer lugar la dovela "a" al pie del escudo en donde se acopla a los brazos erectores y es izada para colocarla en su posición definitiva dentro del faldón del escudo. posteriormente se transporta la dovela "b", para ser izada y colocada en su posición en igual forma que la dovela "a"; por último, se transporta y coloca en su posición la dovela "c" (cubeta). esta secuencia de colocación se muestra en la figura V.18.

Las dovelas "a" y "b", traen insertos en la clave para ser unidas mediante un canal de 8" x 0.70 m como se indica en la fig. V.18.

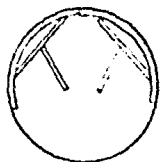
Posteriormente se transporta hasta la parte posterior del escudo un troquel que se ensambla en dos insertos que para tal fin traen las dovelas "a" y "b" (troquel horizontal), figura V.19.

Una vez que el anillo haya salido de la camisa del escudo, se coloca un puntal vertical de acero, cédula 40 x 6" de diámetro: el cual, mediante un gato hidráulico, ayuda a los gatos de expansión a levantar la clave del anillo. La colocación de este puntal vertical, se puede apreciar en la figura V.19.

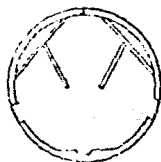
Habiéndose colocado el puntal vertical antes mencionado, se procede a aplicarle la precarga correspondiente y a expandir el anillo mediante los gatos de expansión, los cuales se colocan en los extremos de las dovelas a-c y b-c; debiendo realizar estos eventos en forma simultánea. La precarga que se aplica al puntal vertical,



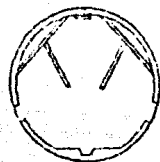
COLOCACION DE LA DOVELA 0°



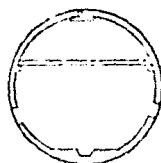
COLOCACION DE LA DOVELA 0°



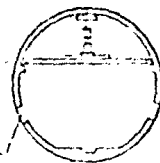
COLOCACION DE LA DOVELA 0°



COLOCACION DEL CANAL
EN LA CLAVIJA



COLOCACION DEL PUNTA
HORIZONTAL



COLOCACION DEL PUNTA
VERTICAL

ZONA PARA COLOCAR
LOS GATOS DE
EXPANSION

FIG. 18. SECUENCIA DE COLOCACION
DE DOVELAS

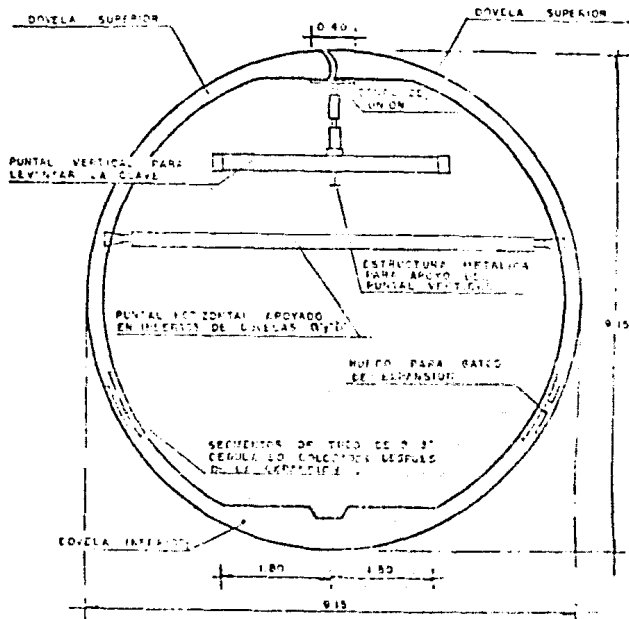


FIG.V.19. COLOCACION DEL PUNTO VERTICAL

es de 15 toneladas y la correspondiente a los gatos de expansión es de 30 toneladas.

Terminada la expansión se procede a colocar unos pequeños troqueles de tubo de 3" de diámetro, cédula 80 con placas de 3/8" de 10 x 10 cm., entre las dovelas para sustituir los gatos de expansión; hecho esto se retiran los gatos de expansión y se ligan las dovelas a-c y b-c figura V.19.

Concluido lo anterior, se cuela el hueco ocupado por los gatos de expansión con concreto f'c = 350 kg/cm², con aditivo estabilizador de volumen, después de lo cual se retira el puntal vertical, dejando ahogados en este colado los dos pequeños troqueles de tubo de 3" de diámetro.

El puntal horizontal colocado en los insertos de las dovelas "a" y "b", debe permanecer en su posición - por lo menos 8 horas contadas a partir del momento de su colocación hasta el momento en que se retira.

Los anillos formados por dovelas tienen un diámetro exterior menor al de la excavación, debido al espesor de la placa del escudo, ya que estos se ensamblan bajo la protección del faldón del escudo. Por esta razón, cuando los anillos salen de esta protección temporal va quedando un hueco anular entre dovelas y terreno. Con el objeto de reducir los asentamientos superficiales que puedan presentarse durante la excavación del túnel debido a este hueco que va quedando, y reducir las filtraciones de agua freática hacia el interior de este, se hace una inyección de acuerdo con lo siguiente:

Con la finalidad de que cada anillo presente una inyección satisfactoria en su perímetro, se utilizan los insertos para maniobras existentes en cada dovela, realizando perforaciones adicionales de 2" de diámetro, tanto las perforaciones adicionales como las que se efectúan a través de los insertos, deben penetrar en el suelo circundante 15 cm.

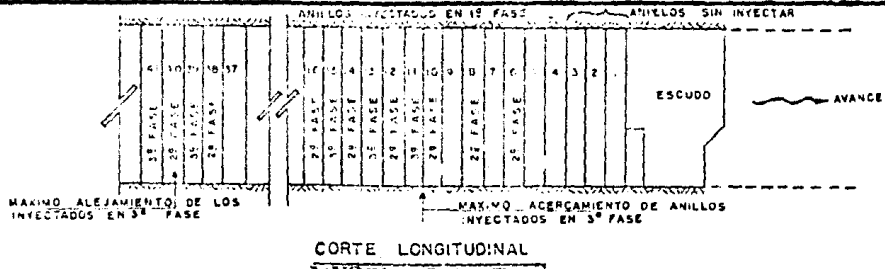
Las perforaciones adicionales son 3 en los anillos que se inyectan en 2a. fase y una en los anillos que se inyectan en 3a. fase. Estas fases se explicarán con detalle más adelante, estas perforaciones adicionales se efectúan durante la construcción de las dovelas o una vez colocadas éstas en el interior del túnel; la secuencia de inyección y distribución tanto de insertos como de perforaciones adicionales se pueden apreciar en la Fiv. V.20.

Cada anillo debe contar con una inyección de dos fases, cuyos proporcionamientos se indican en la tabla V.1. La inyección de primera fase se realiza en todos los anillos y las inyecciones de segunda y tercera fase, se efectúan en anillos alternados tal como se muestra en la figura V.20.

Inyección de primera fase:

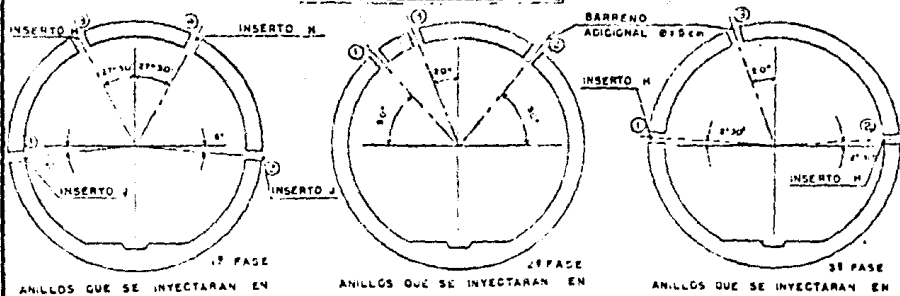
Antes de iniciar el proceso de inyección de primera fase, es necesario calafatear las juntas de unión entre las dovelas colocadas, con el fin de impedir la pérdida de la inyección. Este calafateo se efectúa con una mezcla formada por dos partes de cemento y una de yeso.

FIG. V.20 SECUENCIA DE INYECCION DE ANILLOS



SECUENCIA DE INYECCION

CORTES TRANSVERSALES



Una vez calafateadas las juntas se inicia la inyección de primera fase, la cual se lleva a cabo en cada uno de los insertos que se muestran en la figura V.20, y se efectúa una vez que el anillo por inyectar, cuente con tres anillos como mínimo o cinco como máximo entre él y el faldón del escudo, o bien no debe transcurrir un lapso mayor de 24 horas entre la colocación de cualquier anillo y su inyección de primera fase.

El volumen máximo a inyectar por barreno es de 0.5 m^3 por barreno o cuando se ha alcanzado la presión de 1.0 kg/cm^2 , lo que ocurra primero. También debe cumplirse que la mezcla que se inyecte tenga las características y proporcionamiento tal que se obtengan resistencias como mínimo de 50 kg/cm^2 a los siete días.

Inyección de segunda fase:

Para la realización de la inyección de segunda fase, el anillo por inyectar, debe contar con la inyección de primera fase y tener entre este anillo y el faldón del escudo, una distancia variable entre cinco y siete anillos, es decir, el sexto u octavo anillo localizado atrás del faldón es el que se inyecta en segunda fase.

El volumen a inyectar por barreno es de 0.5 m^3 a una presión de 1.5 kg/cm^2 . La inyección se suspende cuando se ha inyectado un volumen de 0.5 m^3 por barreno o cuando se ha alcanzado una presión de 1.5 kg/cm^2 , lo que ocurra primero.

Inyección de tercera fase:

Para efectuar la inyección de tercera fase a un anillo, éste debe contar con la inyección de primera fase y tener entre él y el faldón del escudo una distancia variable entre 10 y 12 anillos, es decir, el máximo acercamiento de la inyección de tercera fase al faldón del escudo, es de 10 a 12 anillos así como la distancia al anillo más alejado de dicho faldón en que se realice la inyección de tercera fase no debe exceder de 40 anillos.

El volumen máximo a inyectar por barrero es de 0.5 m^3 a una presión de 1.5 kg/cm^2 . La inyección se suspende cuando se ha inyectado un volumen de 0.5 m^3 por barrero o cuando se ha alcanzado la presión de 1.5 kg/cm^2 , lo que ocurra primero. Además, debe verificarse que la mezcla que se inyecte tenga una resistencia de 30 kg/cm^2 como mínimo a los siete días.

En la tabla siguiente se indican las proporciones de cada una de las inyecciones.

T A B L A V. I.

	1a. Fase	2a. Fase	3a. Fase
Agua (Lts.)	136	160	152
Cemento (Kgs.)	250	250	250
Lodo Bentonítico (Lts.)	67	42	50.2
Areña (Kgs.)	160	150	---
Acelerante de fraguado	2.5	---	---

El lodo bentonítico debe tener una proporción de agua bentonítica de 10:1. El lodo bentonítico debe cumplir con el proporcionamiento indicado para cada fase y además, la bentonita debe cumplir con un tiempo mínimo de hidratación de 8 horas.

La arena que se utilice para la elaboración de la mezcla de inyección, debe estar constituida por partículas redondas, preferentemente de río, con dimensiones máximas de 1.5 mm, los límites granulométricos son los siguientes:

Malla N°	% que pasa
8	100
10	90 - 100
30	50 - 85
50	20 - 25
100	10 - 30

CONCLUSIONES

Una de las grandes inquietudes que motivó a la realización del presente trabajo es dar a conocer la evolución que han tenido los procedimientos de construcción de las Líneas del Metro.

Dentro de los procedimientos constructivos la solución en túnel profundo ha demostrado con creces ser una solución para las zonas densamente pobladas y con edificaciones en la superficie, además de permitir aliviar el tráfico superficial a largo plazo y no entorpecer el tráfico actual.

Algo cierto es que la evolución de los procedimientos de construcción va ligada a los avances en las técnicas utilizadas en la excavación. Es por ello que en el presente trabajo se da a conocer el procedimiento constructivo del túnel Línea 9 del Metro tramo Patriotismo-Tacubaya; la técnica utilizada es una de las más avanzadas hasta ahora en nuestro país, ya que se utilizó un escudo de frente presurizado totalmente mecanizado.

El escudo en general, ha demostrado ser sin duda una herramienta idónea para atacar suelos tan difíciles como el de la Ciudad de México, aunque es claro que este tipo de máquinas son susceptibles de hacerle algunas mejoras, adecuándolas a las condiciones del lugar donde se van a poner a trabajar.

Los avances técnicos y científicos han permitido notables mejoras y refinamientos en la construcción de escudos y el reto para el futuro es construir una máquina capaz de excavar en todo tipo de suelos.

Estas mejoras se van desarrollando con las experiencias obtenidas, es por ello que nuestro país se ha preocupado por construir sus propios escudos adecuándolos al tipo de terreno con que cuenta, en particular el de la Ciudad de México.

El procedimiento empleado en el túnel motivo de este trabajo permitió cumplir con los programas establecidos, avanzar siempre con gran seguridad, sin provocar daños a las estructuras vecinas por problemas de asentamientos en el terreno. el revestimiento primario cumplió con las características para quedar como revestimiento definitivo; teniéndose por éste concepto un gran ahorro en el costo y en el tiempo de ejecución.

Dada la importancia que tendrán los túneles en el futuro y tomando en cuenta que proseguirá el hundimiento de la Ciudad de México, además de estar iniciando construcciones de este tipo en ciudades importantes como Monterrey y Guadalajara, es necesario continuar el desarrollo de -- nuevas técnicas y capacitar al personal para que los trabajos que se realicen se hagan con eficiencia y seguridad, garantizando el buen funcionamiento de los servicios.

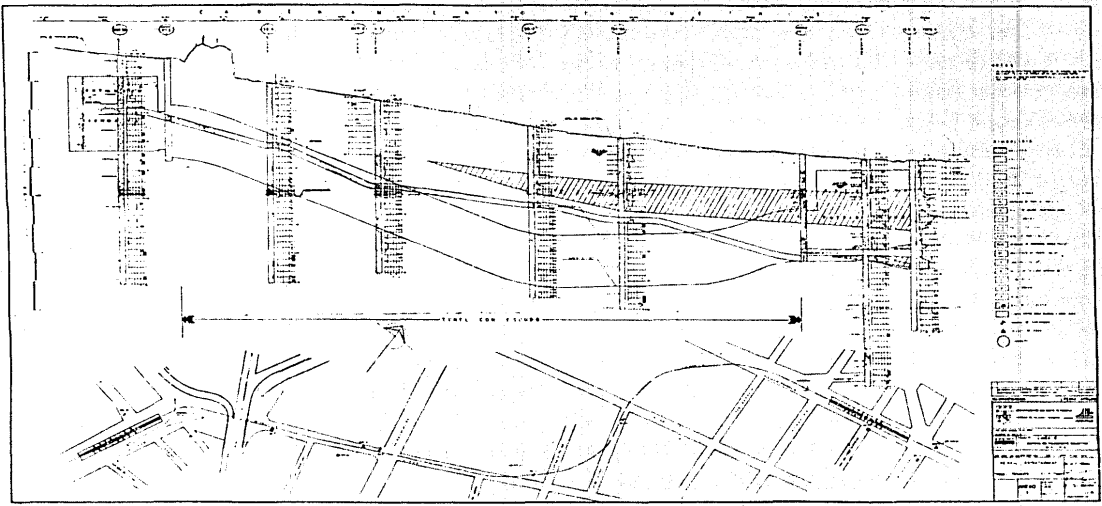
Recientemente en el año de 1985 se terminó con la -- construcción del túnel de mayor longitud en el mundo, hasta ahora, 53.9 kilómetros, a cien metros abajo de la base marina, y a 240 metros del nivel de las aguas, en el Estrecho Tsugaru para enlazar las islas japonesas Hokkaido y Honshu, utilizando la tecnología más avanzada hasta el momento en ese país.

Actualmente se trabaja en la construcción del túnel que enlazará a Francia con Gran Bretaña, este proyecto de

ingeniería civil, el más grande jamás emprendido cruzará el Canal de la Mancha a una profundidad de 40 metros bajo la superficie del fondo del mar, con tres túneles de 49 km. cada uno.

Estos son ejemplos claros de que día con día se trabaja en la perfección de nuevas tecnologías que permitan excavar túneles en cualquier tipo de suelo y bajo cualquier circunstancia.

Debido a lo anterior no es de extrañarse que en un futuro muy próximo nuestro país cuente con su propia tecnología para excavar túneles en cualquier tipo de terreno que se presente. Esto claro basado en las experiencias obtenidas en otros países que llevan la vanguardia en las tecnologías más avanzadas para este tipo de obras.



REVISIONS	
NO.	DESCRIPTION
1	AS SHOWN
2	AS SHOWN
3	AS SHOWN
4	AS SHOWN
5	AS SHOWN
6	AS SHOWN
7	AS SHOWN
8	AS SHOWN
9	AS SHOWN
10	AS SHOWN

BIBLIOGRAFIA

- 1.- Características Geológicas y Geotécnicas del Valle de México, COVITUR, Secretaría General de Obras, D.D.F.,
- 2.- Efemerides del Metro, COVITUR, Secretaría General de Obras, D.D.F.
- 3.- Inauguración de la Línea 9 del Metro, COVITUR, Secretaría General de Obras, D.D.F., 1988.
- 4.- Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Cimentaciones, Departamento del Distrito Federal, Secretaría General de Obras, México, 1987.
- 5.- Sistema de Drenaje Profundo, Dirección General de Obras Hidráulicas, Jac's S.A., México 1975.
- 6.- Interceptores Profundos y el Emisor Central, Dirección General de Obras Hidráulicas, Regina de los Angeles, S.A., México 1969.
- 7.- Revista Mexicana de la Construcción, Organó Oficial de la Cámara Nacional de la Industria de la Construcción, No. 39, México 1987.
- 8.- Revista Ingeniería, Organó Oficial de la Facultad de Ingeniería de la U.N.A.M., Regina de los Angeles S. A., No. 7, México 1982.
- 9.- Revista de Ingeniería Organó Oficial de la Facultad de Ingeniería de la U.N.A.M., Regina de los Angeles S.A., No. 3, México 1983.
- 10.- Túneles en Suelos Blandos y Firmes, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos A.C., México 1982.
- 11.- Túneles Carreteros 1984, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos A.C., México 1985.

- 12.- Túneles. Planeación, Diseño y Construcción, T.W. Megaw-J.V. Bartlett, Limusa, Vol. I, México 1988.
- 13.- Túneles. Planeación, Diseño y Construcción, T.W. Megaw-J.V. Bartlett, Limusa, Vol. II, México 1988.
- 14.- Mecánica de Suelos, Eulalio Juárez Badillo - Alfonso Rico Rodríguez, Limusa, Vol. II, México 1979.
- 15.- Cimentaciones y Túneles, Tratado de Procedimientos Generales de Construcción, Revete, 1975.
- 16.- Manual del Ingeniero Civil, Federick S. Merritt, Mc. Graw Hill, Vol. III.
- 17.- Tesis profesional, "Excavación de Túneles en la Ciudad de México", José Alfredo Peña Baez, Fco. Javier Mera Córdova, Acatlán Edo. de México 1980.
- 18.- Tesis profesional "Generalidades sobre Construcción de Túneles con Escudo", Juan Manuel Cadena Soto, Facultad de Ingeniería, UNAM, 1988.
- 19.- Tesis profesional "Procedimientos de Excavación de Túneles en Suelos Blandos con el uso de Escudo de Frente Abierto y Aire Comprimido"; Salvador López Rodríguez; Universidad Autónoma de Zacatecas, Zacatecas, Zac. 1982.
- 20.- Tesis profesional "El Uso de Escudos en Túneles"; Francisco Javier Aceves Mayllén, UNAM, México, D.F. 1981.
- 21.- Tesis profesional, "Construcción de Túneles y Lumbreras flotadas en las arcillas blandas de la Ciudad de México, para el Interceptor Centro del Sistema de Drenaje Profundo", Beethoven Acosta Villegas, José de Jesús Granados Nájera, Pablo Raquel López, Juan Eduardo Rojas Ramírez, UNAM, México, D.F., 1988.