



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

“TUNELES PARA EL DRENAJE PROFUNDO DE LA CIUDAD DE
MEXICO, PROCESOS CONSTRUCTIVOS Y ASPECTOS TECNICOS”

T E S I S
Para obtener el Titulo de
I N G E N I E R O C I V I L
p r e s e n t a
JOSE ANTONIO PEREZ QUESNEL



Director de Tesis:
M. I. AGUSTIN DEMENEGHI COLINA

México, D. F.

1993

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



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.

TUNELES PARA EL DRENAJE PROFUNDO DE LA CIUDAD DE MEXICO
PROCESOS CONSTRUCTIVOS Y ASPECTOS TECNICOS

Página

CAPITULO I INTRODUCCION

1.- Introducción.....	1
-----------------------	---

CAPITULO II ANTECEDENTES HISTORICOS
Y TECNICOS

2.1. Antecedentes Históricos	
2.1.1. Historia de los túneles para drenaje en la Cd. de México	5
2.1.2. Plan Maestro del drenaje profundo para la Cd. de México	9
2.2. Antecedentes Técnicos	
2.2.1. Escudo de frente abierto y de aire comprimido	12
2.2.2. Escudo de frente presurizable a base de lodos	20

CAPITULO III PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO DEL TRAMO
LUMBRERA 3 - LUMBRERA 2 DEL INTERCEPTOR ORIENTE SUR

3.1. Descripción general de la obra	
3.1.1. Introducción	29
3.1.2. Trazo y geometría del túnel	31
3.1.3. Estratigrafía	33
3.1.4. Instalaciones auxiliares	36

TUNELES PARA EL DRENAJE PROFUNDO DE LA CIUDAD DE MEXICO
PROCESOS CONSTRUCTIVOS Y ASPECTOS TECNICOS

	Página
3.2. Excavación	
3.2.1. Ciclos de trabajo	40
3.2.2. Parámetros en el funcionamiento del escudo	43
3.2.3. Avances registrados y rendimientos	45
3.3. Instrumentación	
3.3.1. Instrumentación colocada en obra y presentación de resultados	47

CAPITULO IV PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO DEL TRAMO
LUMBRERA 3A - LUMBRERA 3B DEL COLECTOR SEMIPROFUNDO
CANAL NACIONAL -CANAL DE CHALCO

4.1. Descripción general de la obra	
4.1.1. Introducción	49
4.1.2. Estratigrafía	52
4.1.3. Topografía general	54
4.1.4. Instalaciones auxiliares y equipo seleccionado	56
4.2. Proceso Constructivo	
4.2.1. Antecedentes	59
4.2.2. Procedimiento constructivo	64
4.2.3. Avances y rendimientos	69

TUNELES PARA EL DRENAJE PROFUNDO DE LA CIUDAD DE MEXICO
PROCESOS CONSTRUCTIVOS Y ASPECTOS TECNICOS

	Página
CAPITULO V ALGUNOS PROBLEMAS PRESENTADOS DURANTE EL PROCESO DE EXCAVACION	
5.1. Introducción	73
5.2. Clasificación empírica del tunelero	75
5.3. Algunos casos presentados durante el proceso de excavación	79
 CAPITULO VI CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	
6.1. Conclusiones	84
6.2. Recomendaciones	87

CAPITULO I

INTRODUCCION

**Tesis Profesional
José Antonio Pérez Quesnel
Facultad de Ingeniería
U.N.A.M.**

CAPITULO I INTRODUCCION

Sin lugar a dudas, dentro del campo de acción de la Ingeniería Civil, la construcción de túneles es una de las obras más relevantes y que más dificultades entraña en su realización desde cualquier punto de vista que se analice, ya sea por su magnitud de dimensiones, por la profundidad a la que se alojan, por los recursos que emplea, por la tecnología que utiliza que siempre está en constante desarrollo, por el alto factor de riesgo permanente y en general por un sinnúmero de factores más.

No obstante lo anterior, el hombre desde el inicio de su historia, y provocado por la necesidad que implicaba contar con servicios de infraestructura que solamente eran factibles en su realización si se construían bajo la superficie, tiene que hacer frente a los retos que le planteaba la naturaleza para la realización de este tipo de obras y es así como surge la llamada Ingeniería de túneles.

De este modo, se tienen registros que hace más de dos mil años A.C., en la antigua Babilonia fue construido un túnel que pasaba por debajo del río Eufrates y comunicaba al Palacio Real con un templo, este túnel tenía una sección de 3.6 x 4.5 m. y se calcula que haya tenido una longitud de un kilómetro aproximadamente, es el más antiguo del que se tengan noticias.

En México, se sabe con certeza que ya desde la época de la gran Tenochtitlan se llevaban a cabo obras similares que pretendían ayudar a evitar las inundaciones que constantemente azotaban a la ciudad.

Por otro lado, dentro de los matices que implica el funcionamiento de una gran urbe, el desalojo de las aguas residuales se convierte en un servicio que resulta esencial sin el cual no podría desarrollarse la sociedad, y dentro de este desalojo de aguas, el sistema de drenaje sanitario constituye la esencia del mismo, entonces que mejor que analizar el sistema de drenaje de una de las ciudades más grandes del mundo, la Ciudad de México y este es, precisamente, el objetivo de este trabajo.

Al tener la ciudad de México una de las tasas de población con más alto índice de crecimiento, era lógico pensar que su servicio de drenaje debía estar a la par, por lo que la magnitud de los túneles también debía ser impresionante en todos los sentidos y su desarrollo debía estar aunado al crecimiento de la Ciudad, de tal forma que se tuvo que diseñar un Proyecto que pudiera satisfacer las necesidades de la población a largo plazo y también que tomara en cuenta los problemas técnicos que presentaba el subsuelo de la Ciudad de México, de estos conceptos surge el proyecto del Plan Maestro del Drenaje Profundo de la Ciudad de México.

De esta forma, en el Capítulo II se encuentran referidos los antecedentes históricos y técnicos del Drenaje profundo de la Ciudad de México comenzando por la historia de los túneles en esta ciudad, en donde es posible contemplar un panorama de lo que hicieron nuestros antepasados para solucionar el problema de drenaje que se tenía en esa época y en donde existía un serio problema de inundaciones frecuentes.

Conforme el tiempo transcurrió, las medidas que se habían tomado con anterioridad no eran suficientes para el acelerado desarrollo que tuvo la Ciudad en el presente siglo por lo que hubo que diseñar un nuevo sistema de drenaje el cual está descrito dentro del mismo Capítulo II. Así mismo para la realización de este plan fue necesario utilizar tecnología especial de acuerdo a cada tipo de zona donde se estuviera llevando a cabo la construcción de un túnel para el drenaje por lo que también dentro de ese mismo Capítulo se describen ampliamente las características y modo de operación de los escudos, las grandes e impresionantes máquinas con las con las que fue posible realizar este proyecto.

En el Capítulo III para poder comprender como se lleva a cabo la construcción de estos túneles para el drenaje se analiza a fondo el proceso constructivo de un tramo, en este caso el tramo estudiado es el ubicado entre la Lumbrera 3 y la Lumbrera 2 del Interceptor Oriente-Sur (en donde no esta de más aclarar el concepto de Lumbrera que consiste en una excavación vertical de cualquier tipo de sección con una profundidad que depende del nivel que tenga el túnel).

Esta excavación se llevó a cabo, bajo un suelo en el que predominaba la arcilla a diferencia del túnel que se estaba excavando de Lumbrera 4 a Lumbrera 3 perteneciente al Colector Semiprofundo Canal Nacional-Canal de Chalco.

En este tramo en cuestión, a diferencia del material que se había pronosticado que se iba a encontrar (arcilla con lentes de arena) ,se encontró basalto por lo que no fue posible ya continuar excavando como se venía haciendo en tramos anteriores y hubo de modificarse el procedimiento de excavación, a esta situación hace referencia el Capítulo IV.

Durante la excavación de los túneles, es utópico pensar que no se van a presentar problemas de diferente índole por lo que en el Capítulo V son analizadas las principales circunstancias adversas que existieron al estar excavando túneles para el drenaje profundo.

Finalmente, en el Capítulo VI se presenta parte de la tecnología que se esta utilizando en otras partes del mundo y que constituye una innovación dentro de su campo esto a manera poder recomendar su utilización, así mismo se presentan las principales conclusiones a las que se puede llegar después de analizar los anteriores Capítulos.

Así mismo, cabe aclarar que los temas presentados en el presente trabajo, se enfocan principalmente al procedimiento constructivo de los diversos túneles para el drenaje profundo de la Ciudad de México y no pretenden profundizar demasiado en los aspectos técnicos, los cuales requerirían por su complejidad, de otro tipo de investigación por lo que, esperando que sea del agrado del lector y que despierte su interés en el tema, se presenta a su consideración el presente trabajo.

CAPITULO II

ANTECEDENTES HISTORICOS Y TECNICOS

**Tesis Profesional
José Antonio Pérez Quesnel
Facultad de Ingeniería
U.N.A.M.**

CAPITULO II ANTECEDENTES HISTORICOS Y TECNICOS

2.1 ANTECEDENTES HISTORICOS

2.1.1 Historia de los túneles para drenaje en la Cd. de México

Debido a su ubicación geográfica la ciudad de México se encuentra localizada dentro de una cuenca cerrada, esto quiere decir, que no existe una salida natural para el agua que se acumula en su interior, es por ello que desde su fundación la ciudad ha sufrido una serie de inundaciones lo que ha originado la construcción de grandes obras hidráulicas para solucionar el problema.

Para enfrentar esta situación, desde épocas prehispánicas se construyeron bordos y diques de contención. Así tenemos que ya en el año de 1450, Nezahualcoyotl por encargo del Rey Azteca Moctezuma, diseñó y dirigió la construcción de un albardón de más de doce kilómetros de longitud y cuatro metros de ancho que protegía a la ciudad de Tenochtitlan de los desbordamientos del lago de Texcoco, dado que hasta esa época la única preocupación era contener las aguas, sin crear ningún sistema para desalojarlas del valle.

Pero todo cambió al inicio de la conquista cuando los españoles abrieron boquetes al albardón para permitir el paso de sus embarcaciones. Tiempo después, en épocas del virreinato las lluvias torrenciales pusieron en aviso a las autoridades sobre el grave problema que se tenía, es por esto que en el año de 1555 el Virrey ordenó la construcción del albardón de San Lázaro y se hizo el primer proyecto para el desagüe de la cuenca de México.

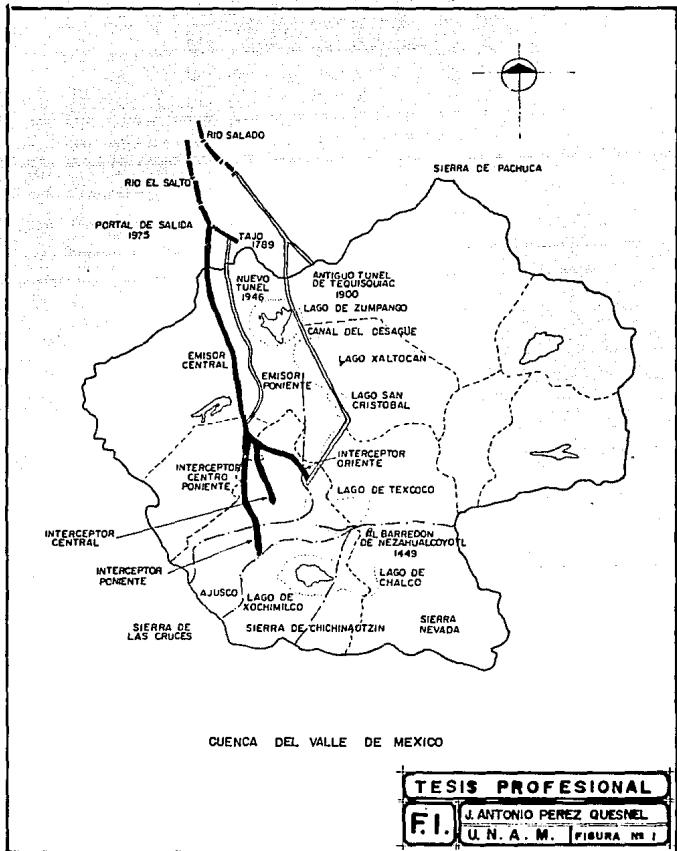
Sin embargo, no fue sino hasta 1604 y 1607 - años en los que ocurrieron grandes inundaciones provocadas por los escurrimientos del río Cuautitlan que ocasionaron numerosas muertes y daños materiales - que el Virrey acepta la propuesta de Enrico Martínez - Ingeniero, Arquitecto, Cosmógrafo y maestro de las obras de desagüe de la ciudad de México - para construir un túnel en la zona de Nochistongo al Noroeste de la cuenca de México con lo que se tendría la primera salida artificial del agua.

El socavón de Nochistongo fue de aproximadamente 7 Km de longitud y 10.5 m² de sección recta, y fue realizado en escasos 11 meses con la participación de 60,000 indios.

La construcción se atacó desde 42 lumbreras, de las cuales la más profunda tenía 46 m. Cabe mencionar que los terrenos excavados fueron los de la serie Nochistongo, constituidos por tobas arcillosas y calcáreas, del tipo de las margas, y en ocasiones se presentaron capas de arena intercaladas.

Por cuestiones económicas y políticas que impidieron suministrar los fondos requeridos para revestir el túnel y evitar los derrumbes la obra no se realizó como debiera por lo que con el paso de los años quedó prácticamente inservible.

En 1789, más de un siglo después, este túnel o socavón se convirtió en un tajo a cielo abierto, que conectado a tajos que se habían construido a su entrada y salida desde el primer proyecto, formó el llamado " Tajo de Nochistongo " que aun hoy en día opera como una de las salidas artificiales del valle de México. (Ver figura Núm. 1).



CUENCA DEL VALLE DE MEXICO

TESIS PROFESIONAL

F.I.

J. ANTONIO PEREZ QUESNEL

U. N. A. M. FIGURA Nº 1

A medida que iba creciendo la ciudad la población se concentraba aun más en las orillas de antiguos ríos y lagos los cuales al desbordarse ocasionaban cuantiosos daños.

Ya para 1856 las inundaciones eran cada vez más alarmantes por lo que en ese año se abrió un concurso para realizar el proyecto de la obras del desagüe ofreciendo un premio de doce mil pesos oros al ganador. La propuesta más atractiva fue la de el Ingeniero Francisco de Garay que comprendía el gran canal de desagüe y el primer túnel de Tequisquiac.

Durante la construcción de este túnel se tuvieron que enfrentar serias dificultades por el material excavado (tobas limo arenosas) y principalmente por el agua en abundancia que se encontró durante la excavación.

El ataque se realizó desde 24 lumbreras, con profundidades que variaban entre 22 y 93 metros y separadas una distancia de 400 m. una de otra.

Ambas obras se inauguraron en 1900 y se aprovecharon para construir la primera red de drenaje que fue terminada en 1930.

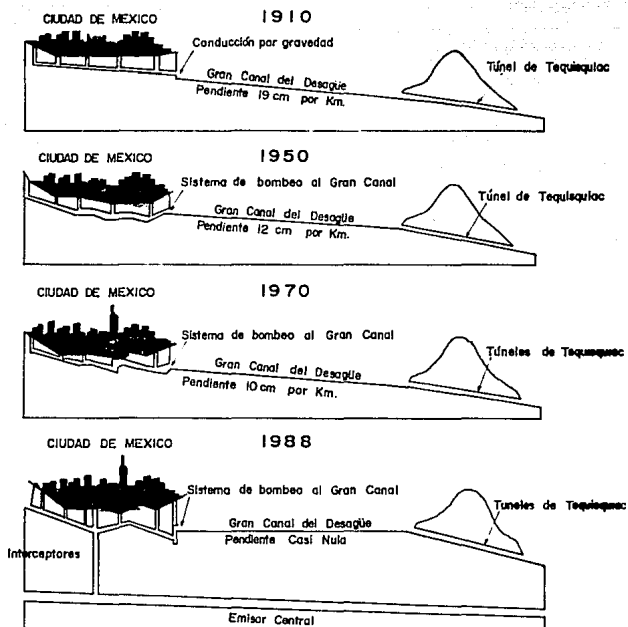
Como una consecuencia del crecimiento demográfico y de la expansión urbana el sistema existente se volvió insuficiente para una población que se había duplicado en diez años y que en 1940 era ya de dos millones de habitantes.

Aunada a esta situación se presentaba el problema del hundimiento de la ciudad, originado por la consolidación del subsuelo como consecuencia de la explotación de los mantos acuíferos.

Así se tiene que, desde principios de siglo hasta 1936 los hundimientos se mantuvieron del orden de 5 cm por año, pero al aumentar la demanda de agua , se inició con la perforación de pozos profundos que provocaron que el hundimiento en el centro de la ciudad se incrementara a 18 cm por año para llegar después a 30 y 50 cms. anuales. Esta situación trajo como consecuencia que el drenaje proyectado para trabajar por gravedad requiriera de un sistema de bombeo para elevar las aguas hasta el nivel del gran canal, con un consecuente incremento de costos de operación y mantenimiento (Ver figura Núm. 2).

Las autoridades concientes de esta situación, en los años cincuentas inician los estudios para el proyecto del plan maestro del drenaje profundo donde se necesitaba que el sistema proyectado, no fuera afectado por los asentamientos del terreno, que no necesitara de bombeo y que expulsara el agua por otra salida artificial hacia afuera de la cuenca.

EL HUNDIMIENTO DE LA CIUDAD DE MEXICO



TESIS PROFESIONAL

F.I.

J. ANTONIO PEREZ QUESNEL

U. N. A. M. FIGURA Nº 2

2.1.2 Plan Maestro del Sistema de drenaje profundo para la Ciudad de México

Como una consecuencia de los retos planteados ante el diseño de un sistema de drenaje con una capacidad suficiente para satisfacer las demandas que se tenían y que se prevían, y también que no fuera afectado por los hundimientos de la ciudad de México, la Ingeniería Mexicana respondió una vez más de manera eficaz al reto y es así como en Marzo de 1959 se presenta a las autoridades correspondientes el Plan Maestro de Drenaje Profundo para la ciudad de México.

El Plan Maestro contempla la construcción de una serie de túneles interceptores (los cuales entre sus características más notables es que están diseñados para una profundidad tal que no sean afectados por los hundimientos de la ciudad, operan por gravedad y como consecuencia de lo anterior constituyen una obra durable y a bajo costo) interconectados entre si y que fluyen hacia un mismo conducto para desalojar las aguas.

Es finalmente en marzo de 1967 cuando el Plan Maestro comienza en su primera etapa, la cual consistió en la construcción de dos túneles interceptores el Central y el Oriente los cuales fueron construidos dentro de la llamada zona de lago con el fin de mejorar la red de colectores ya existentes en el centro de la ciudad. Estos interceptores tuvieron una longitud en esta primera etapa de 10.81 Km. para el Central y de 7.19 Km para el Oriente ambos con una sección circular final de 5.00 m de diámetro.

Estos dos interceptores confluyeron en el Emisor Central, túnel de una sección circular de 6.5 m de diámetro final revestido y con una longitud total de 49.4 Km. hasta su descarga a la altura de Tepeji del Río, Hgo, donde las aguas descargan al río Tula para finalmente llegar al Golfo de México .

Aquí cabe resaltar la magnitud de este túnel el cual contó con 22 lumbreras con profundidades desde 30 hasta 200 metros y el cual cuenta con una capacidad de desalojo de aguas de 220 m³ / s .

En la segunda etapa del plan, la cual comenzó en 1977 se amplió hacia el sur el Interceptor Central en 5.3 Km. para llegar a su longitud actual construida de 16.11 Km. esta ampliación concluyó en 1981, posteriormente se prosiguió con la ampliación del Interceptor Oriente en 11.51 Km. de túnel con lo cual se llegó a la longitud actual construida de 18.70 Km.

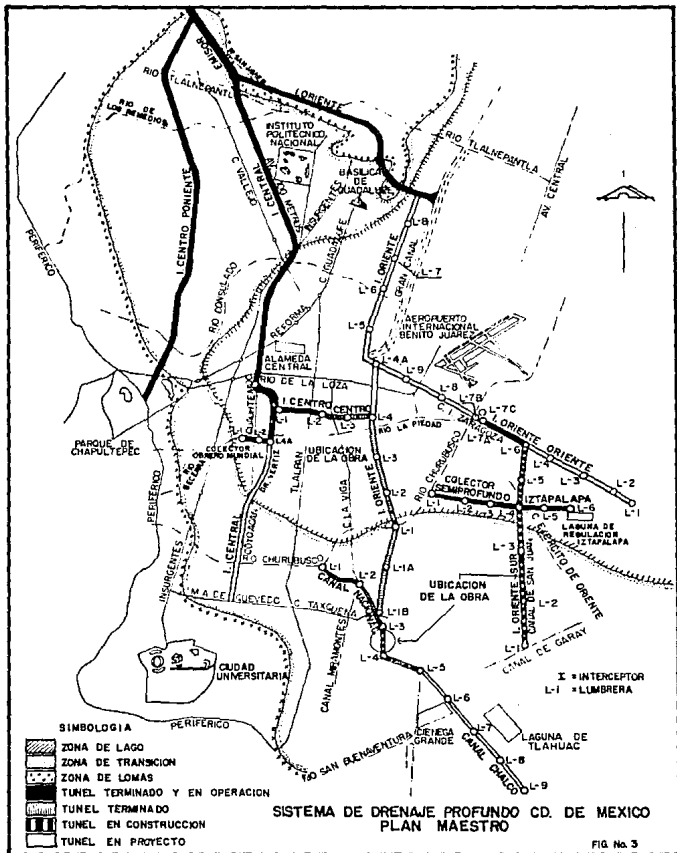
Análogo a la ampliación del Interceptor Central la construcción del túnel Interceptor Centro - Poniente se llevó a cabo de 1979 a 1981, contó con una longitud final de construcción de 16.5 Km. en un trazo Norte - Sur en el poniente y en el Norponiente de la ciudad, la sección de este túnel es del tipo portal de 5.00 m de diámetro para tener un diámetro de túnel revestido de 4.5 m. y una profundidad media de 50 m. a la plantilla. Es en 1989 cuando se terminó con la construcción del Interceptor Centro - Centro el cual se diseñó en su primera fase para integrar la parte sur del Interceptor Oriente a la red de drenaje profundo que ya está en operación y que en su segunda fase servirá para cerrar el circuito entre el Interceptor Central y el Oriente para diversas alternativas de funcionamiento.

Una vez concluido el Interceptor Centro - Centro se inició la construcción del túnel Interceptor Oriente - Sur el cual tendrá una longitud de proyecto de 7.5 Km. y una sección circular con un diámetro de túnel revestido de 5.00 m .

En proceso de proyecto se encuentra el Interceptor Oriente - Oriente el cual contará con una longitud de proyecto de 14.1 Km. y una sección circular de 5.00 m de diámetro.

El Plan Maestro también cuenta con los denominados colectores semiprofundos Canal Nacional - Canal de Chalco y el colector semiprofundo de Iztapalapa los cuales sirven de apoyo al sur de la ciudad de México en zonas donde todavía no se justifica una obra de una magnitud tan considerable como lo es un Interceptor.

Finalmente en la figura 3 se puede apreciar la distribución de los túneles para el drenaje profundo en la Ciudad de México en su situación actual, así mismo en la tabla I para lograr una mejor comprensión del tema se presenta un resumen de las principales características físicas y de operación de los túneles para el drenaje profundo en la Ciudad de México.



I = INTERCEPTOR
L-1 = LLUMBRERA

SISTEMA DE DRENAJE PROFUNDO DE LA CIUDAD DE MEXICO

Situación Actual Marzo 1993

OBRA	LONGITUD (Km.)			DIAMETRO (m.)	CAPACIDAD (m3/s)	PENDIENTE (m/km.)	PROFUNDIDAD (m.)		
	Proyecto	Construida	Faltante				mínima	máxima	
Emisor Central	49.8	49.8	0	6.50	220	2.00	48	217	
Interceptor Central	21.6	16.2	5.4	5.00	90	0.50	22	41	
Interceptor Oriente	25.5	16.7	8.8	5.00	85	0.50	37	55	
Interceptor Centro-Poniente	16.5	16.5	0	4.00	40	1.30	22	51	
Interceptor Centro-Centro	3.7	3.7	0	5.00	90	2.00	25	26	
Interceptor Oriente-Sur	7.5	7.5	0	5.00	90	2.00	25	25	
Interceptor Oriente-Oriente	14.6	2.1	12.5	5.00	90	2.00	24	30	
Interceptor Poniente	15.0	15.0	0	5.00	90	2.00	28	31	
Colectores Semiprofundos									
Iztapalapa	5.3	5.3	0	3.10	40	2.00	12	15	
Obrero Mundial	0.7	0.7	0	3.10	40	2.00	14	16	
Canal Nacional- Chalco*	6.8	6.5	0.3	3.10	40	2.00	20	15	
Cuatepec	1.8	0	1.8						
Indios Verdes	2.8	0	2.8						
Gran Canal	6.7	0	6.7						
Ermita	3.1	0	3.1						
				TUNELES EN PROYECTO					
++ Diámetro Terminado						Tesis Profesional			
* Incluye unicamente de L1 a L5						Jose Antonio Pérez Quesnet			

TABLA I

2.2 ANTECEDENTES TECNICOS

2.2.1 Escudos de frente abierto y de aire comprimido

Concepto de escudo

Desde que se inició con la construcción de túneles se hizo evidente la necesidad de contar con una herramienta que permitiera la excavación de un túnel en suelos que, por la experiencia que se tenía con ellos, se pronosticaba que solamente eran capaces de soportarse por si mismos sin fallar por periodos de tiempo nulos o muy cortos.

Sin embargo, no es sino hasta 1818 cuando surge de manera formal el concepto de escudo tal y como se le conoce hasta ahora, es en esa fecha cuando el Inglés Marc Brunel diseña y patenta el primer escudo, el cual fue usado para la excavación de un túnel bajo el río Támesis.

El concepto fundamental de escudo es el de una máquina que permite ir excavando el túnel a la vez que va soportando el terreno excavado por medio de un ademe (revestimiento), es decir que logra hacer que el proceso de excavación-revestimiento sea casi simultáneo. Por lo anterior se puede afirmar que un escudo es una máquina con una sección igual a la del túnel que será excavado, que cuenta con un mecanismo que le permite avanzar hacia adelante a través del curso del túnel y que además, es capaz de resistir las presiones del terreno en todas direcciones de tal modo que brinde una protección mientras el revestimiento se va colocando dentro de ese resguardo.

Escudos de frente abierto

Cuando se comenzó con el proyecto del Plan Maestro para el Drenaje Profundo de la Ciudad de México, y de acuerdo con el tipo de suelo tan característico de suelo que presentaba y presenta la ciudad de México, en el cual se distinguen tres grandes zonas, - zona de lomas (material generalmente rocoso), zona de transición (arcilla firme a dura, grava y boleos con arena) y zona de lago (arcilla blanda, limo, arena fósiles y materia orgánica) - se hizo evidente que gran parte del trazo de los túneles pasaría por un suelo inestable que no era capaz de autosoportarse por periodos lo suficientemente largos como para ofrecer seguridad en lo que se revestían al termino de su excavación (Ver figura 4).

Ante tales circunstancias se hizo necesaria la utilización de un escudo, y es así como comienzan las excavaciones con un escudo de frente abierto.

El Escudo de Frente Abierto consiste en un cilindro de acero rígido, abierto en ambos extremos, en su parte frontal es capaz de soportar al terreno por medio de unos gatos frontales a los cuales en el extremo se le colocan tableros de maderas para distribuir mejor el peso de terreno , y en su parte posterior (faldón) cuenta con un sistema para la erección del revestimiento prefabricado (dovelas).

El escudo es impulsado hacia adelante por medio de unos gatos hidráulicos llamados gatos de empuje, los cuales para avanzar se apoyan en las dovelas que previamente habían sido colocadas en avance anterior.

La excavación del frente se realiza en forma manual y para lo cual, la herramienta usada depende del grado de dureza del suelo siendo muy común el uso del martillo neumático, la excavación se inicia al terminar un empuje (avance del escudo) y debe ser simultánea a la colocación del revestimiento. El revestimiento se realiza también por etapas, por cada empuje del escudo, hay una sección de terreno de forma igual a la del túnel y de una longitud que dependerá de lo que haya avanzado el escudo, que es la que se reviste por medio de segmentos de concreto prefabricado (dovelas) y que cuando se ha revestido una sección completa, a esa sección circular se le conoce como anillo (Ver figura Núm. 5).

Aquí cabe resaltar un punto muy importante en este procedimiento, como es el siguiente : Debido a que la sección frontal es de un diámetro mayor que el resto del escudo para evitar que el escudo encuentre demasiada resistencia durante el empuje, se va formando un hueco anular entre los anillos del revestimiento y el suelo excavado, por lo que es necesario rellenar ese hueco con un mortero de cemento-arena con el fin de estabilizar el terreno circundante reduciendo la presión del suelo contra el revestimiento, además de actuar como un sello para el agua. El mortero se inyecta inmediatamente después de haber sido colocadas las dovelas a través de un orificio con que cuentan las dovelas y que está diseñado especialmente para ello.

Con este procedimiento de excavación se construyeron poco más de 7 Km. de túneles para el drenaje profundo principalmente del Interceptor Central y Oriente.

Los avances que se tenían dependían mucho del suelo con que se encontrara el escudo en relación a su dureza y por consiguiente su dificultad para excavarlos, pero en general los rendimientos que se obtuvieron estaban del orden de 5.50 metros por día y, de acuerdo con los registros que se tienen, se llegó a tener avances en un mes de hasta 180 metros y en un día hasta de 9 metros, lo cual sin duda constituía un gran avance para la época.

Posteriormente, conforme se iba avanzando con el Plan Maestro se iban presentando materiales que eran cada vez más difíciles de estabilizar con la sola presencia del Escudo de Frente Abierto, la situación llegó a su extremo crítico a principios de 1973 cuando se llegó al límite de la zona de lago y zona de transición.

En esta zona se encontraban ya capas de arcilla de lago, de espesores importantes, las pruebas de resistencia al esfuerzo cortante realizadas en los estratos de arcilla antes mencionados daban como resultado promedio una cohesión en algunas zonas de 0.5 Kg/cm² que, comparado con la presión total que actuaba sobre el túnel (de 2.5 a 3.00 Kg/cm²) a esas profundidades de construcción (unos 26 metros de profundidad) daban como resultado que pudiera presentarse el fenómeno de extrusión, cuando sucede lo anterior el material se dice que falla, fluye y se introduce en la excavación hecha, con los consiguientes asentamientos que se producen en la superficie por el volumen desplazado.

Además de este problema de extrusión , existía otro problema que consistía en la presencia de lentes de arena muy permeables y en estado suelto en donde, aun contando con la ayuda del

bombeo , no era posible abatir las presiones provocadas por los niveles del agua que se encontraba confinada entre estratos muy impermeables, esta situación provocaba problemas de estabilización en el frente de ataque debido al arrastre de materiales granulares provocado por la presión del agua remanente y en menor escala, por la escasa capacidad de estos materiales granulares para soportar la presión de tierra generada durante la excavación.

Debido a todas estas circunstancias no era posible continuar excavando con un escudo de frente abierto por lo que era necesario buscar otra alternativa de construcción, fue como respuesta a estas exigencias planteadas que surge el procedimiento de excavación con Aire Comprimido.



ZONA DE LOMAS



ZONA DE TRANSICION

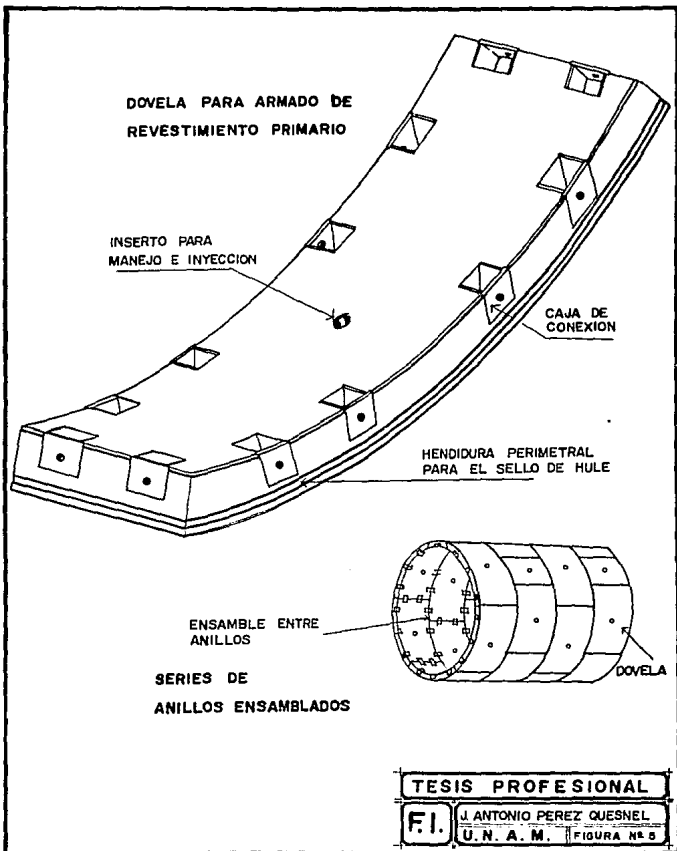


ZONA DE LAGO

LOS NUMEROS DE CURVAS DE NIVEL SE REFIEREN A LOS VALORES PROMEDIOS DE ASENTAMIENTOS ANUALES ENTRE 1963 Y 1969.

BASADO EN EL ESTUDIO
DE MARSAL & MAZARI (1959)

TESIS PROFESIONAL	
FI.	J. ANTONIO PEREZ QUESNEL
U. N. A. M.	FIGURA N° 4



ESCUDOS CON AIRE COMPRIMIDO

Después de haber estudiado las diferentes alternativas para la excavación de los túneles, y teniendo en cuenta todos los factores de inestabilidad que se han comentado con anterioridad, se llegó a la conclusión de que el empleo combinado de un escudo de frente abierto, la utilización de aire comprimido y el abatimiento del nivel freático era la solución.

El sistema de aire comprimido que se utilizó tenía por objeto crear un flujo de aire hacia el frente excavado que en el caso de haber por ejemplo arenas, produjera tensiones capilares y así evitar su arrastre, y en el caso de las arcillas extruibles, las hiciera estables (Ver figura Núm. 6).

El abatimiento del nivel freático tenía por objeto disminuir las presiones actuantes en el túnel de tal forma que se lograba tener una excavación prácticamente en seco, para este fin se bombeaba desde la superficie a través de pozos de hasta 70 m. de profundidad localizados a uno y otro lado del eje del túnel.

El uso de un Escudo de Frente Abierto también era necesario para evitar de que el terreno cargara y cediera, y además, servía como protección al personal que trabajaba en el frente.

Las presiones de operación del sistema de aire comprimido estaban en un rango que iba desde 0.6 hasta 1.4 Kg/cm², este último valor era el límite máximo por cuestiones de funcionalidad del sistema , ya que a esa presión, un trabajador por cada 5 horas de labores en la zona de aire comprimido debía pasar 3 horas en etapa de descompresión, es decir 3 horas inactivo, lo cual significaba

que por cada turno que se pagaba de 8 horas realmente se trabajaran 5, lo cual venía a elevar el costo de la operación en una gran cantidad, de tal modo que si se incrementaba la presión del aire comprimido el tiempo de descompresión debería ser mayor con lo cual se volvería impráctico el sistema.

Referente a las cuestiones técnicas de operación del sistema se observó la necesidad de que el túnel contara con alguna forma de mantener el volumen de aire a presión dentro de él, con el fin de que cumpliera con el objetivo para el cual había sido diseñado. La solución consistió en instalar una placa de acero de gran espesor la cual, en su periferia tenía un sello perfecto con el túnel y con esto lograba mantener las condiciones de hermeticidad necesarias, a esta placa se le conocía como mamparas.

Por la situación de compresión a la que eran sometidos los trabajadores, era lógico pensar que no se podía tener un acceso directo a la cámara de trabajo donde actuaba el aire comprimido ni salir de ella sin antes pasar por una etapa de descompresión, para solucionar este problema, se utilizó un gran recipiente cilíndrico, llamado "esclusa de personal" donde los trabajadores eran sometidos a la etapa de descompresión por un periodo de tiempo determinado según el tiempo al que estuvieron expuestos a un periodo de compresión.

Esta esclusa contaba con dos compuertas colocadas en cada extremo, con el fin de permitir el acceso desde la zona de presión atmosférica hasta la cámara de trabajo y viceversa.

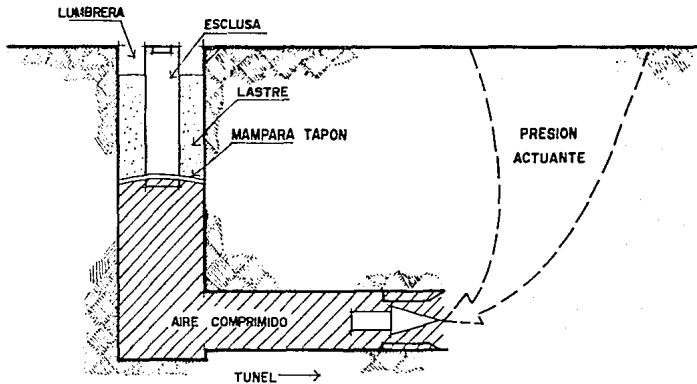
Otro problema que se presentó al no tener acceso directo a la cámara de trabajo desde la zona de aire libre y viceversa, es la forma en que se desalojaba a la rezaga producto de la excavación desde el frente del escudo hasta la lumbrera, por lo que se hubo de utilizar otra esclusa, llamada esclusa de rezaga por donde a través de ella se desalojaba exclusivamente a la rezaga.

Esta nueva alternativa de construcción dio muy buen resultado ante las exigencias planteadas por las condiciones del suelo no obstante de presentar unos avances muy lentos de alrededor de 5.00 m. por día.

A pesar de estos avances tan precarios se lograron excavar entre 1973 y 1986 mas de 8.6 Km de túneles para el Drenaje Profundo lo que significó un nuevo avance en la Ingeniería de túneles.

Es a mediados de la década de los ochenta cuando nuevamente el subsuelo plantea duras y diversas exigencias. La presión a la que se debería trabajar para evitar inestabilidad del suelo debía ser de hasta 2.00 Kg/cm² y, aunada a esta situación se presentaban valores de resistencia al esfuerzo cortante menores a 0.70 Kg/cm². Para este tipo de suelo resultaba ya ineficiente el empleo del aire comprimido por lo que nuevamente se hizo necesaria la presencia de un nuevo procedimiento constructivo que viniera resolver el problema.

ESTABILIZACION DEL FRENTE EXCAVADO
A BASE DE AIRE COMPRIMIDO



TESIS PROFESIONAL

F.I.

J. ANTONIO PEREZ QUESNEL
U. N. A. M. FIGURA Nº 6

2.2.2 Escudo de frente presurizable a base de lodos

Ante las condiciones reinantes tan críticas que presentaba el subsuelo, bajo las cuales, como se comentó con anterioridad, ya no era factible continuar excavando con un escudo de aire comprimido, se hizo necesario el diseño de un escudo que permitiera seguir trabajando en suelos con características tan especiales.

El suelo en cuestión que iba a predominar a lo largo de las excavaciones era un suelo tipo CH (arcilla altamente compresible) en el cual resaltaban las siguientes características :

- Contenido de agua de 3 a 4 veces el contenido de sólidos.
- El valor de límite líquido era comparable al del agua.
- El peso volumétrico era de 1.15 a 1.25 veces el del agua.

De experiencias que se habían obtenido al excavar en este tipo de suelos, se concluyó que los principales problemas geotécnicos a los que se tendría que hacer frente durante el proceso de excavación eran :

a) Estabilidad del suelo arcilloso blando en el frente de excavación.

Esta situación era realmente crítica, ya que al trabajar en este tipo de suelos, si no se logra estabilizar el frente excavado se pueden presentar deformaciones plásticas, y en casos extremos extrusión del material.

b) La acción del desplazamiento del material durante la excavación.

Este efecto era el mismo que se presentaba al trabajar con escudos de frente abierto, es decir el material fluye plásticamente por el hueco anular que se forma entre el material excavado y el revestimiento primario, por lo que en este caso la solución consistía también en la inyección de un mortero el cual estabilizara el terreno circundante al escudo.

c) Deformaciones en el revestimiento primario.

Debido a la profundidad a la que se alojan los túneles, la carga vertical es muy significativa, y en este tipo de materiales, se acentúa, provocando que las deformaciones en el endovelado aumenten en el sentido horizontal y disminuyan en el sentido vertical por lo que para evitar esto al máximo había que hacer que el proceso de excavación-revestimiento fuera lo más simultáneo posible, esto último traería consigo que los avances fueran mucho mayores.

Conociendo todos estos factores, Ingenieros Mexicanos en conjunción con Ingenieros Japoneses presentan en el año de 1979 ante las autoridades Mexicanas el Proyecto Ejecutivo para la construcción de un Escudo de frente presurizable a base de lodos con el cual se pretendía continuar con la excavación de túneles en suelos arcillosos blandos.

En esencia, el escudo de frente presurizable sigue el mismo principio de un escudo de frente abierto con aire comprimido, la diferencia con este último, es que en el escudo de frente presurizable, solamente en una sección de la máquina se tiene la presión necesaria para soportar el empuje del suelo (cámara de presurización) en tanto que en el resto del escudo y del túnel la presión es la atmosférica (Ver fig. Núm. 7).

Además la excavación la realiza directamente el escudo por medio de una cabeza cortadora mientras que en el procedimiento con frente abierto y aire comprimido la excavación se lleva a cabo por medios manuales auxiliados por algunos elementos mecánicos.

Se puede afirmar, entonces que las principales innovaciones y ventajas que trajo consigo la introducción de este nuevo escudo fueron :

a) Soporte mecánico del frente de excavación independientemente del soporte por medio de una presión hidráulica, lograda a través de la recirculación del lodo que es producto de la misma excavación.

b) Cabeza cortadora que además de proveer el soporte mecánico del frente excavado, gira en ambos sentidos con lo cual va "cortando" el material.

c) Extracción del producto de corte hacia la superficie y recirculación del mismo, mediante bombas instaladas en el interior del túnel.

d) Sistema de monitoreo automático el cual permite conocer los siguientes factores en todo momento :

- Presión del flujo hidráulico (lodo) en el frente de trabajo.

- Volumen excavado.

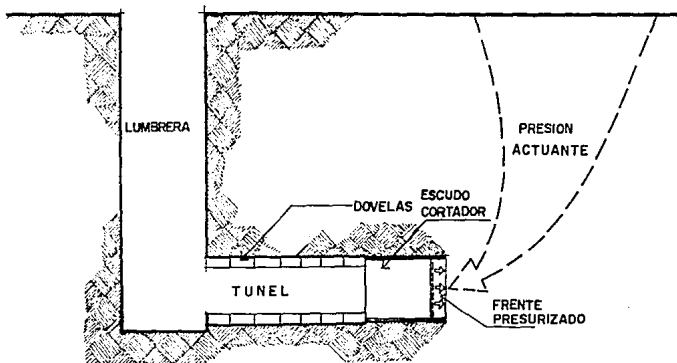
- Alineamiento y nivelación del escudo.

- Presión de los gatos de empuje.

e) Rendimientos mayores de hasta 20 metros por día.

Como se puede notar, la introducción de este escudo marcó una nueva generación en lo que se refiere a la excavación de túneles con escudos.

ESTABILIZACION DEL FRENTE EXCAVADO
A BASE DE UN ESCUDO DE FRENTE PRESURIZADO



TESIS PROFESIONAL

F.I.

J. ANTONIO PEREZ QUESNEL

U. N. A. M. FIGURA Nº 7

COMPONENTES DEL ESCUDO.

Para entender el funcionamiento del escudo es necesario antes que nada, estar familiarizado con los principales elementos que lo conforman.

Estos elementos son :

1.- Cuerpo del escudo.

Como se había comentado con anterioridad, el concepto de escudo consiste en una estructura de la misma sección del túnel que permite ir ademandando el terreno mientras se va excavando y revistiendo, la estructura exterior del escudo (en el caso de los túneles para el drenaje profundo de sección circular formando un cilindro) donde se alojan los demás componentes del escudo como son cabeza cortadora, cámara de mezclado, gatos de empuje etc, es la que se denomina cuerpo del escudo.

2.- Cabeza cortadora.

Este elemento como se mencionó antes fue una de las principales innovaciones que trajo consigo el escudo de frente presurizado y además de ir cortando el terreno conforme va avanzando el escudo, gracias a la acción de unas cuchillas cortadoras que son de acero de una aleación especial, sirve para dar el apoyo mecánico que en conjunto con el soporte a base de un fluido a presión (lodo) logra mantener la estabilidad del frente excavado.

3.- Cámara de presurización

También llamada cámara de mezclado, se encuentra ubicada en la parte delantera del escudo inmediatamente después de la cabeza cortadora y esta separada del resto de los componentes del escudo por una mampara metálica.

La presión necesaria para contrarrestar la presión existente del frente y así estabilizarlo se presenta únicamente en esta zona gracias al lodo que es suministrado desde la superficie y que es mezclado con el suelo excavado por medio de unas paletas mezcladoras (agitadores) con el fin de obtener una mezcla bombeable hacia la superficie estableciendo así la recirculación del material, este manejo de lodos se describirá mas ampliamente en el momento de tratar el funcionamiento del escudo.

La cámara de mezclado cuenta también con unas compuertas de inspección que están ubicadas en la mampara metálica y que permiten hacer reparaciones y mantenimiento cuando es necesario. Por toda la parte central de la mampara, atraviesa una flecha que es la encargada de transmitir el torque a la cabeza cortadora, dentro de la cámara de mezclado, también se pueden encontrar válvulas y tuberías de suministro y descarga de los lodos.

4.- Transmisión.

Como su nombre lo indica es el elemento mecánico encargado de proporcionar la fuerza necesaria para que la cabeza cortadora gire, para este fin cuenta con unos motores eléctricos en un número que depende del tamaño del escudo. En el caso de un escudo de 6.24 m. de diámetro exterior cuenta con 8 motores mientras que en el de 4.00 m cuenta con 4 motores.

5.- Gatos de empuje

Como ya se había descrito en el punto de excavación con escudos de frente abierta con aire comprimido, los gatos de empuje son los elementos mecánicos que apoyados en las dovelas que con anterioridad se habían colocado permiten que el escudo vaya avanzando en la dirección deseada.

Estos gatos tienen una longitud de 1.15 m. esto es con el fin de que el gato tenga una carrera efectiva de 1.00 m. y dar cierta holgura en el momento de colocar una dovela. El escudo de 6.24 m. tiene en su caso 24 gatos en tanto que uno de 4.00 m. cuenta con 16 gatos de empuje.

6.- Anillo erector.

Un anillo de revestimiento está formado por seis dovelas y para poder ensamblar ese anillo se utiliza un elemento mecánico denominado anillo erector que es el que sujeta a la pieza (dovela) y la coloca en el lugar deseado, para poder hacer esto el erector tiene la capacidad de girar hasta 180 grados.

7.- Faldón del escudo.

Es la zona en donde se colocan las dovelas hasta formar un anillo de revestimiento, una vez acoplado este elemento el escudo puede avanzar dejando así que el anillo resista las presiones del suelo que lo rodea.

En la parte última del escudo se encuentran tres sellos, rodeando perimetralmente al escudo, estos tres sellos, dos que son de cerdas de alambre y uno de neopreno evitan que la inyección de mortero que se hace para estabilizar el suelo penetre en la zona que ocupa el escudo evitando así fugas del material.

Todos estos elementos antes mencionados se pueden apreciar en la figura Núm 8.

8.- Aunque no forme parte directa de los componentes del escudo es necesario mencionar al tren de equipo del escudo el cual consiste en la cabina del operador del escudo y una serie de elementos hidráulicos, mecánicos y eléctricos los cuales hacen posible el funcionamiento del escudo.

Todos elementos van inmediatamente atrás del escudo y para poder avanzar simultáneamente con este, se va tendiendo una vía la cual le permite ir siguiendo al escudo.

En general estos son los elementos principales que componen el escudo de frente presurizado, así pues surge la imperiosa necesidad de comprender como interactúan estos elementos entre si logrando el funcionamiento del escudo.

FUNCIONAMIENTO DEL ESCUDO

El inicio de un ciclo de trabajo del escudo (empuje) en donde avanza solamente la longitud necesaria para colocar un anillo de dovelas (1.15 m en donde 1.00 m. corresponde al ancho del anillo y el resto es holgura) comienza cuando se suministra lodo al frente de excavación para lograr conservar la presurización necesaria para trabajar, este lodo es producto del suelo excavado en un empuje anterior el cual fue bombeado a la superficie en donde se deja sedimentar en un gran tanque de almacenamiento (cárcamo de sedimentación) con el objeto de que la mayor parte de los elementos solidos como arena y arcillas sedimentables puedan ser desalojadas por medios mecánicos, esto es, una grúa con una almeja mecánica (cucharón de 1 1/2 yd³) deposita estos sedimentos en camiones de volteo los cuales se encargan de llevar el material a algún tiro designado para este fin. Otra parte del suelo en el tanque es desalojado bombeandolo hacia unos camiones pipas los cuales también están encargados de llevarlos a algún tiro. El cárcamo a su vez está seccionado en dos áreas principales, en la primera el material sigue el proceso de sedimentación y desalojo

antes comentado hasta llegar a la segunda sección la cual esta separada de la anterior por un vertedor el cual permite el paso de lodo ya prácticamente sin sedimentos. Todo este proceso permite que la densidad del lodo producto de la excavación que en un principio es de 1.10 a 1.14 baje hasta 1.06 el cual es el valor máximo permitido de densidad para poder suministrarlo ya que con una densidad mas alta se tendrían problemas en el momento de bombearlo hacia el frente. Sin embargo, en ocasiones a pesar de todo el proceso anterior, el lodo sigue teniendo una densidad no adecuada para suministrarlo por lo que hay que agregarle agua con el fin de bajar su densidad.

Simultáneamente al suministro de lodo comienza la excavación, la cabeza cortadora empieza a girar y el material excavado entra a la cámara de presurización en donde es mezclado con el lodo suministrado, una parte de esta mezcla es bombeada hacia la superficie en donde se deposita para iniciar un nuevo ciclo, existen medidores de densidades y de gastos para el lodo de suministro y de extracción con el objetivo de mantener siempre el equilibrio de presiones en el frente, así como para indicar cuando debe de suspenderse el suministro y comenzar con la extracción de lodos. Todo este ciclo de recirculación de lodos puede distinguirse en la figura Núm.9. Al terminar con un empuje del escudo se puede proceder a la colocación del endovelado y una vez terminado de colocar un anillo se puede inyectar este, para el proceso de inyección se cuenta con un tren de equipo independiente al tren de equipo del escudo.

Una vez realizado todo lo anterior es posible ya continuar con un nuevo ciclo de excavación, este proceso se repite así sucesivamente hasta lograr la longitud excavada deseada.

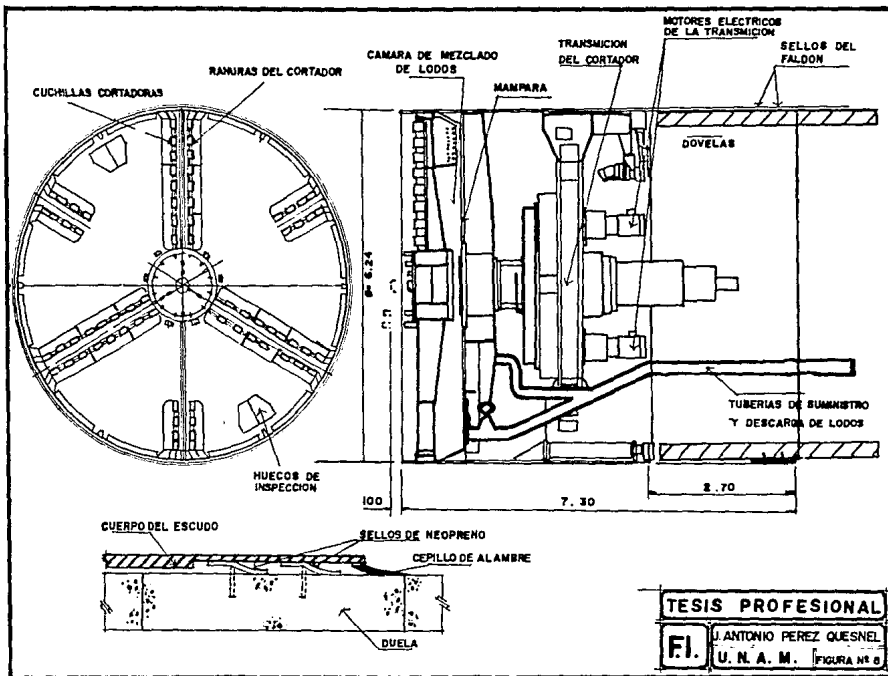
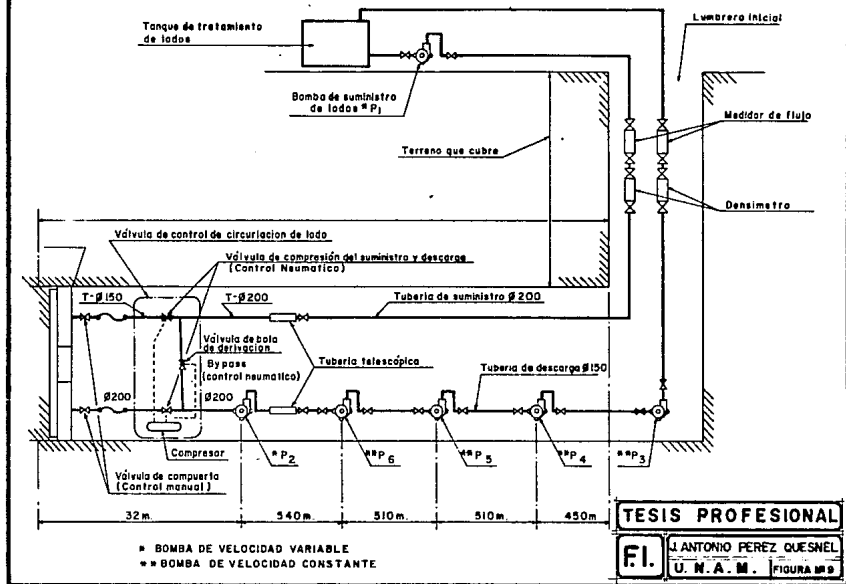
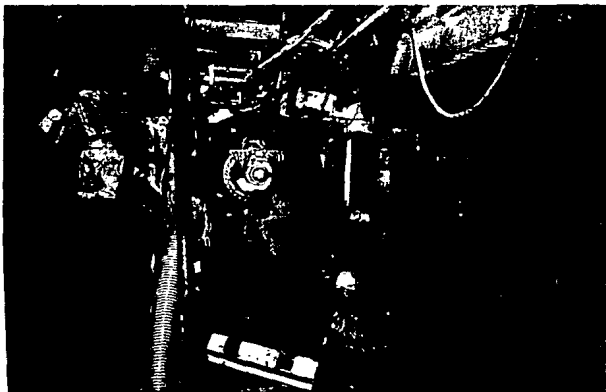
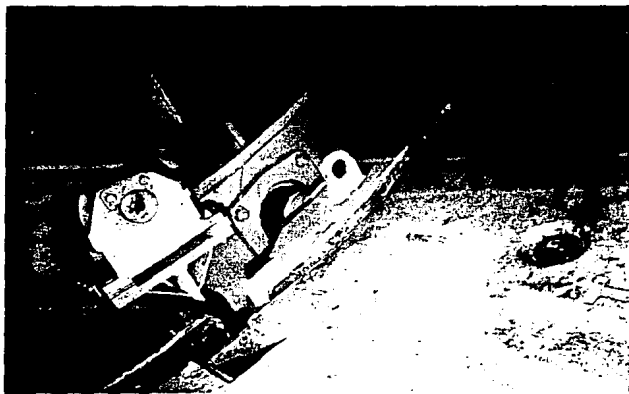


DIAGRAMA DE CIRCULACION DE LODOS





Vista posterior del escudo de frente presurizado donde se aprecian el anillo erector (aro amarillo), las tuberías de lodo de suministro y de descarga y el manejo de una doveña para su colocación.



Detalle de los gatos de empuje donde se observa los gatos y sus zapatos de apoyo que reaccionan contra las doveñas previamente colocadas.

CAPITULO III

PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO PARA EL TRAMO LUMBRERA 3-LUMBRERA 2 DEL INTERCEPTOR ORIENTE-SUR

**Tesis Profesional
José Antonio Pérez Quesnel
Facultad de Ingeniería
U.N.A.M.**

CAPITULO III PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO PARA EL TRAMO LUMBRERA 3 -
LUMBRERA 2 DEL INTERCEPTOR ORIENTE SUR.

3.1 DESCRIPCION GENERAL DE LA OBRA

3.1.1 Introducción

El Interceptor Oriente-Sur (I.O.S.) cuenta con una longitud total de proyecto de 7.5 Km. (divididos en 6 tramos de Lumbrera 1 a la lumbrera 6) los cuales ya han sido a la fecha excavados en su totalidad.

Este interceptor comienza en la Lumbrera 1 ubicada sobre Canal de Garay (Prolongación del Periférico Sur) entre la calles de Nautla y Estrella en las proximidades del cerro de la Estrella, sigue su trazo por todo el centro de la Av. Canal de Garay y poco antes de cruzar la Av. Ermita Iztapalapa se desvia un poco para seguir un trazo aproximadamente paralelo a Canal de Garay hasta llegar a la Lumbrera 6, ubicada en la esquina de Ignacio Zaragoza y Canal de garay, es aquí en donde se unirá al Interceptor Oriente-Oriente (Actualmente en proceso de proyecto).

Cabe mencionar que este interceptor Oriente Sur a la altura de la Lumbrera 4, lo atraviesa el denominado Colector Semiprofundo Iztapalapa de 5.3 Km. de longitud actualmente en funcionamiento.

Este tramo Oriente-Sur se piensa poner en funcionamiento en los primeros meses de 1994 y es muy factible que así sea pues a la fecha solamente falta la etapa de revestimiento definitivo en dos tramos (De L4 a L3 y de L2 a L1) lo cual representa una longitud de 2700 m. en conjunto.

El tramo analizado en este capítulo es el comprendido entre la Lumbrera 3 localizada entre las calles de Luis Mendez (Eje 6 Sur) y Albarrada en la Col. Vicente Guerrero y la Lumbrera 2 ubicada en las calles de Luis M. Rojas y Rafael Curiel en la Col. Constitución de 1917 ambas dentro de la Delegación Iztapalapa. La localización particular del tramo se puede apreciar en la figura Núm. 3

Este tramo presentaba la particularidad de que a diferencia de otros del mismo Interceptor atravezaba por unidades habitacionales y en una zona cruzaba por debajo de un Gasoducto de Pemex, por lo que cualquier asentamiento superficial inducido por la construcción del túnel acarrearía graves consecuencias.

De los estudios de mecánica de suelos que se realizaron, previos a la construcción del Interceptor, se pudo determinar las principales características del suelo que se iba a presentar a lo largo de la excavación (arcilla blanda con alto contenido de humedad) y después de un minucioso estudio técnico de esos factores, sin dejar de contemplar el aspecto económico, se llegó a la conclusión que lo mejor era continuar excavando como se venía haciendo en tramos anteriores, con un escudo de frente presurizable, decisión que como se verá más adelante en los resultados que se presentan, fue la adecuada pues además de tener movimientos en superficie diferenciales los avances que se tuvieron fueron muy favorables, lo que repercutió en un costo menor de la obra.

3.1.2 Trazo y geometría del túnel

La excavación de este túnel se llevó a cabo de Norte a Sur desde la Lumbrera 3, donde se ubicó el frente de ataque con un cadenamamiento de 10+651.243 m. hacia la Lumbrera 2 con un cadenamamiento de 12+208.587 m. lo que hace una longitud de 1557.344 m. , con un diámetro de túnel terminado en todo el Interceptor de 5.00 m.

El trazo de este tramo se proyectó para que en lo menos posible atravesara por zonas urbanas, aunque esto último no fue posible cumplirlo en su totalidad ya que el trazo del túnel se debe ajustar también en gran parte a las limitaciones en cuanto a los radios de curvatura y a los ejes de salida y de llegada marcados en cada Lumbrera.

Es de vital importancia el salir y llegar a la lumbrera respectiva exactamente en los ejes marcados por el proyecto, pues en cada lumbrera existe una zona denominada como zona de mejoramiento y el escudo tanto en su salida como en su llegada debe cruzarla, de tal modo que todo su cuerpo se encuentre dentro de esta zona.

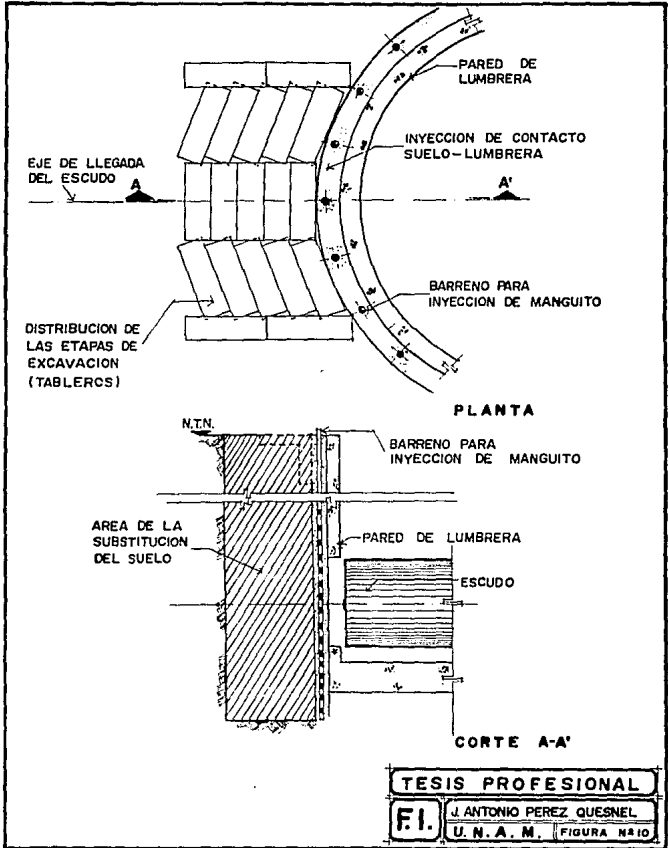
La zona de mejoramiento (Ver figura Núm. 10) tiene la función de sustituir al material natural (suelo) en una zona que por ser crítica podría presentarse el fenómeno de extrusión, la sustitución del suelo se hace excavando un área determinada y de acuerdo a la profundidad que tenga la lumbrera se va realizando en etapas sucesivas (en forma de rectángulos "tableros"), conforme

se excava un tablero el material es sustituido por un mortero, evitando así el fenómeno de extrusión.

Por otro lado el escudo siguió dos parámetros en su trayectoria, una línea de alineamiento que le marcaba el proyecto y que está referida al trazo del túnel en su proyección horizontal y una línea de control de elevaciones referida a un plano vertical en donde se marcaba que conforme se avanzaba hacia la Lumbrera 2 la línea de elevación debía ir en aumento, esto con el fin de cumplir con las especificaciones que marcaba la pendiente.

Con el fin de poner de manifiesto las características geométricas más notables, de una manera breve se presentan a continuación :

- a) Profundidad media al eje23.00 m.
- b) Pendiente media al eje1 m/Km.
- c) Profundidad de plantilla de L3.....22.50 m.
- d) Profundidad de plantilla de L2..... 23.57 m.
- e) Diám. exterior del escudo cortador.....6.24 m.
- f) Diám. del túnel con revestimiento primario .. 5.60 m.
- g) Diám. del túnel con revestimiento definitivo.. 5.00 m.



3.1.3. Estratigrafía

En todo proyecto geotécnico se hace imprescindible conocer antes que cualquier otra cosa las características mecánicas del subsuelo en el que va a trabajar.

En el tramo L3-L2 del I.O.S. se llevaron a cabo diversos estudios del terreno a excavar y, de acuerdo a estos se pudo inferir un perfil estratigráfico como el mostrado en la figura Núm. 11.












En este perfil, podemos observar que en la clave del túnel se presentan arcillas de alta plasticidad con intercalaciones de arena fina, mientras que, en la media sección inferior se presentan únicamente arcillas.

Conforme se avanzó con la excavación se pudo comprobar la presencia del material anteriormente señalado por lo que el escudo de frente presurizado no tuvo mayor problema durante el proceso de excavación.

Da la apariencia que con la utilización del escudo, un material como el que se presenta no reviste mayor problema durante la excavación, sin embargo para tener una idea más cercana a la realidad y comprender el gran trabajo que realiza el escudo, a continuación se presentan los valores promedio que se obtuvieron de los límites de consistencia del material de donde se pudo observar que el material a excavar presentaba porcentajes de humedad del orden del 300 % y sus demás valores como límite líquido y plástico también estaban altos para el tipo idóneo de material a excavar.

VALORES DE LIMITES DE CONSISTENCIA

Muestra	Profundidad promedio	W (%)	L.L. (%)	L.P. (%)	I.P. (%)	Cr
1	0.80	65.24	65.49	39.24	26.25	0.00
4	2.45	135.80	241.76	54.99	186.77	0.56
5	3.55	154.34	291.04	56.97	243.07	0.58
9	7.15	308.06	328.84	68.84	260.00	0.07
13	10.75	250.86	183.33	59.45	123.88	0.00
16	13.55	230.09	308.02	63.42	244.60	0.31
19	16.15	244.26	276.42	67.53	208.89	0.15
22	18.85	171.29	163.43	48.76	114.67	0.00
23	19.95	104.52	101.68	51.48	50.20	0.00
24	20.35	125.91	107.40	47.20	60.20	0.00
25	20.75	30.43	52.40	32.94	19.46	1.12
26	22.35	258.18	77.90	24.54	50.36	0.00
27	23.35	323.28	324.22	92.45	231.77	0.00
29	25.15	162.07	237.16	72.43	164.73	0.45
30	26.05	78.87	202.73	32.83	169.90	0.72
31	26.95	35.99	42.45	18.25	24.20	0.26
32	27.85	138.96	159.60	59.08	100.57	0.20
33	28.75	260.76	308.32	81.86	226.46	0.21
34	30.05	76.99	40.62	23.72	16.90	0.00

PROFUNDIDAD	CLASIFICACION Y DESCRIPCION	
0	Rellenos constituidos por limos arenosos firmes (ML).	
5	Arcilla de alta plasticidad blanda (CH)	
7	Arcilla de alta plasticidad con lentes de arena negra fina (CH).	
10	Arcilla de alta plasticidad blanda.	
14	Arena negra fina de origen volcánico (SP).	
15	Arena arcillosa de consistencia media (SC).	
16	Arcilla de alta plasticidad con intercalaciones de arena negra fina (CH).	
20	Arcilla de alta plasticidad blanda (CH).	
25	Arena negra fina (SP).	
26	Arcilla de alta plasticidad (CH).	
28	Limos arenosos firmes con gravas de origen volcánico (1° capa dura).	

ESCUDO CORTADOR

Fig. 11

3.1.4 Instalaciones auxiliares en obra

Es indudable que para poder realizar este tipo de obras, no basta contar solamente con una maquina que vaya realizando la excavación junto con su tren de equipo, sino que debe también contarse con una serie de instalaciones auxiliares que apoyen a la excavación.

Estas instalaciones se colocan antes de empezar con la excavación y es importante en todos los casos que se encuentren habilitadas al 100 % antes de iniciar los trabajos.

Pareciera ser, al observar la lista de las instalaciones , en primera instancia , que la amplia gama de diversos talleres con los que se cuenta son excesivos, pero sucede que aparte de las obligadas tareas electromecánicas que se realizan tanto en el frente como en superficie, constantemente se habilitan estructuras metálicas o se reparan piezas que requieren de un trabajo de soldadura especial, además en el frente de excavación se necesitan frecuentemente habilitar polines, tablones, etc, con el fin de prolongar la vía por donde circula el tren de equipo, por esta razón es menester contar con talleres de soldadura y de carpintería.

Ahora bien, todas estas instalaciones son desmontables, pero en el caso de los carcamos de sedimentación, se tiene que excavar una zona de 30 x 13 m. y de una profundidad de 3.20 m. con el fin de alojar momentáneamente al lodo mientras es recirculado.

Una vez que se terminó de excavar el tramo, y al proceder con el desmantelamiento del campamento, este hueco dejado tiene que rellenarse compactandolo en varias capas, esto es con el fin de dejar la zona de campamento tal y como se encontró, la lumbrera por otro lado es cubierta por una losa tapa formada a base de vigas de concreto armado coladas en sitio y vigas precoladas.

Procediendo entonces con la descripción de las instalaciones, tenemos que las podemos dividir en dos grandes grupos:

I.- Instalaciones en túnel

II.-Instalaciones superficiales

I.- INSTALACIONES EN TUNEL

a) Planta de inyección de mortero.

Esta planta se encuentra montada en la pared de la lumbrera y consiste en dos silos almacenadores de cemento y arena, una tolva bascula y una mezcladora en donde se prepara el mortero el cual es transportado a su vez hasta el frente por unos carros almacenadores en donde finalmente es inyectado.

b) Tuberías de suministro y descarga de lodos, ductos eléctricos, de agua, y de aire comprimido.

Las tuberías y ductos son llevados desde la superficie por todo lo largo del túnel hasta el frente de excavación , obviamente estos ductos y tuberías cuentan con conexiones que le permiten ir incrementando su longitud conforme avanza la excavación.

Respecto al diámetro de las tuberías de suministro y descarga de lodos es de 8" y 6" respectivamente.

c) Locomotora eléctrica, vías, durmientes.

Estos tres elementos permiten el movimiento de materiales hasta el frente de excavación, y también lógicamente, estos dos últimos elementos se van agregando conforme avanza la excavación.

Los durmientes que se colocan son polines de una medida de 8" X 8" y de una longitud de 3.40, estos durmientes están apoyados directamente sobre las dovelas sirven de apoyo a las vías, y tienen una separación de 80 cm, con el fin de soportar eficientemente el tránsito de los elementos.

II.- INSTALACIONES EN SUPERFICIE

Dentro de las instalaciones superficiales resaltan las siguientes :

a) Subestación Eléctrica.

Con el fin de evitar cualquier problema con el suministro de la energía eléctrica de la red municipal se coloca esta subestación la cual provee de energía suficiente para el alumbrado exterior e interior del túnel, no así para poder poner en funcionamiento el sistema eléctrico del escudo.

b) Grúa Pórtico

La función de esta grúa es la de depositar diversos elementos en el fondo de la lumbrera o extraerlos de ella, generalmente para lo que más se utiliza es para depositar las dovelas en la lumbrera.

Tiene una capacidad máx. de 7.5 ton., y está formado por un marco de elementos estructurales con una capacidad de transportar pesos como el anteriormente mencionado.

c) Cárcamos.

Este punto había sido tratado cuando se discutió el funcionamiento del escudo de frente presurizable.

d) Oficinas Técnico administrativo

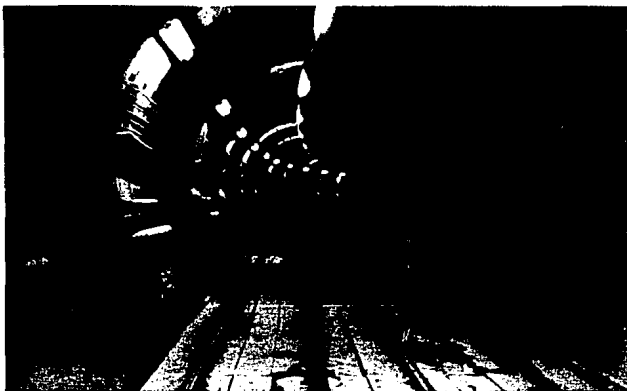
Con el objeto de llevar un control eficiente de la obra se debe contar con un almacén y oficinas técnico-administrativas así como también con los anteriormente señalados talleres de Soldadura, de Carpintería, Mecánicos, Eléctricos que sirven de apoyo a las actividades inherentes a la excavación.



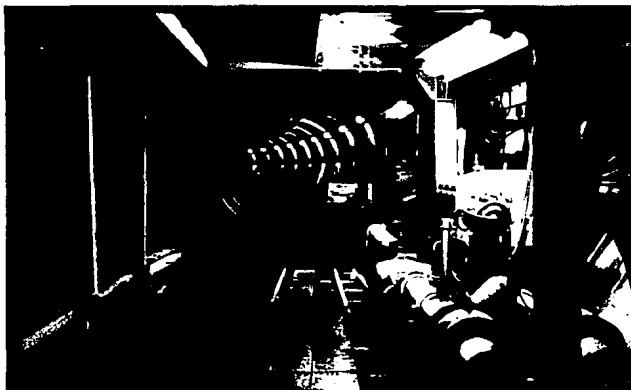
Patio de manto. En primer plano dovelas utilizadas para la etapa de revestimiento primario, y en el fondo se distingue a la grua Pórtico.



Salida del escudo cortador de frente presurizable en la Lumbrera 2 del I.O.S.



Aspecto del túnel excavado con sus instalaciones auxiliares.



Tren de equipo del escudo cortador de frente presurizable.

3.2 PROCESO DE EXCAVACION

3.2.1 Ciclo de trabajo

El ciclo de trabajo que se definió para el tramo L3-L2 es el mismo que se llevó a cabo en tramos anteriores cuando se trabajó con un escudo de frente presurizable.

Básicamente un ciclo de trabajo está dividido en dos etapas fundamentales :

- A) Excavación, empuje e inyección simultáneamente
- B) Colocación del anillo de dovelas.

Ademas de estas dos etapas que deben ser sucesivas, se realizan actividades que pueden ubicarse en cualquier momento del ciclo, estas son :

- Prolongación de vía.
- Prolongación de tuberías (Suministro, Descarga, de ventilación, de agua, etc.)
- Prolongación de vías eléctricas para alumbrado y alimentación del equipo.

Así mismo la descripción del proceso de excavación, empuje inyección y colocación del anillo de dovelas había sido descrito a detalle en el punto que trata acerca del funcionamiento del escudo de frente presurizable sin embargo, vale la pena recordarlo sintetizandolo en los siguientes puntos.

1.- Primero, se establece la recirculación de lodos y una vez que se ha logrado estabilizar la presión en la cámara de presurización comienza a girar la cabeza cortadora.

2.- Se abren las compuertas de las ranuras de admisión del material con el fin de permitir la entrada del mismo a la cámara de presurización.

3.- Simultáneamente al anterior punto, comienzan a extenderse los gatos de empuje, cabe recordar que no siempre se empujan todos los gatos sino que la selección depende del alineamiento que se le quiera dar al escudo así como de la elevación pedida.

4.- El material que penetró por las compuertas de admisión del material, se mezcla con el lodo suministrado y es enviado a la superficie, donde se deposita en los cárcamos de sedimentación para su tratamiento.

5.- Una vez que los gatos de empuje han avanzado 1.15 m. se detiene el avance, es decir se para el giro de la cabeza cortadora y se cierran las ranuras de admisión del material.

6.- Es importante hacer notar que la recirculación del lodo se debe mantener hasta que las densidades de los lodos de suministro y descarga se igualen, situación en la que ya entonces se puede decir que ha terminado la excavación.

7.- Durante la excavación y empuje, se va realizando la inyección del hueco dejado entre el endovelado y el terreno natural originado cuando el escudo va avanzando.

En general un ciclo como el anteriormente descrito, tarda unos 20 minutos aproximadamente, pero este tiempo no es efectivo, ya que como se observó durante la excavación de este tramo hubo imponderables como taponamientos de la tubería, problemas con las dovelas suministradas etc, lo que repercutía en tiempos muertos e interrumpían la continuidad entre ciclo y ciclo.

3.2.2 Parámetros en el funcionamiento del escudo

Anteriormente se había hablado que en el frente de trabajo se llevaba un control del funcionamiento del escudo y en efecto, así es. Pero además de este control, en superficie también se vigilan ciertos parámetros, es ahí donde existe una consola de operación que registra todas y cada una de las variables en el funcionamiento del escudo.

Estos parámetros se pueden dividir de acuerdo a la información que proporcionan en dos grupos :

- 1.- Información sobre la excavación.
- 2.- Información sobre la recirculación de lodos.

Por cada empuje del escudo se registra toda la información correspondientes a estos puntos y así es posible detectar cualquier anomalía, por ejemplo, se conoce de antemano un promedio de lo que normalmente tarda el escudo durante un empuje (1.00 m. de avance) y se conoce también cual es el gasto de extracción por lo que de una sencilla relación se determina el volumen que se está excavando y si ese volumen es mayor al promedio de lo que se extrae normalmente, significa que hay una sobreexcavación, lo que quiere decir que la cabeza cortadora no está dejando de funcionar cuando es debido y al excavar material de mas, puede provocarse un asentamiento en la superficie, del mismo modo se analiza la presión frontal que está requiriendo el escudo para estabilizar el frente (presión frontal).

Por otro lado dependiendo del número de gatos y de la presión con la que actúen se puede determinar el empuje total del escudo, de este modo se cuidan estos parámetros.

Con el objeto de tener una idea más clara de cuales son estos parámetros, a continuación se presentan estos datos junto con los valores promedio totales que resultaron de todo el tramo L3 - L2 I.O.S. y así mismo en la tabla II se presentan estos valores promediados a cada 100 metros (100 anillos aproximadamente)

1.- Información sobre la excavación.

- Núm. de gatos utilizados 20 gatos
- Presión de los gatos 164 Kg/cm²
- Empuje total..... 1336 ton.
- Velocidad de empuje 4.11 cm/min.
- Presión del gato cortador 95 Kg/cm²

2.- Información sobre la circulación de lodos :

- Presión Frontal..... 1.38 Kg/cm²
- Gasto Suministrado..... 2.60 m³/min.
- Gasto extraído..... 3.68 m³/min.
- Densidad de suministro..... 1.04
- Densidad de extracción..... 1.10
- Volumen excavado..... 30.23 m³

**PROMEDIO DE LOS PARAMETROS DE OPERACION DEL ESCUDO
EXCAVACION L3-L2 del I.O.S.**

	ANILLOS						
	1-100	101-200	201-300	301-400	401-500	501-600	601-700
EXCAVACION							
N° de gatos requeridos	18	20	23	17	21	21	24
Presión de gatos (Kg/cm2)	170	150	140	220	150	150	130
Empuje total (Ton.)	1224	1200	1288	1760	1260	1260	1248
Velocidad de empuje (cm/min.)	5.0	4.4	4.01	3.8	4.3	4.8	3.8
Presión gato cortador (Kg/cm2)	100	120	110	50	100	170	100
LODOS							
Presión frontal (Kg/cm2)	1.5	1.6	1.5	1.6	1.5	1.5	1.4
Gasto Suministrado (m3/min.)	2.6	2.4	2.0	2.4	2.2	2.4	2.8
Gasto extraído (m3/min.)	4.0	3.8	3.2	3.6	3.8	3.7	4.0
Densidad de suministro	1.06	1.05	1.03	1.04	1.05	1.06	1.00
Densidad de extracción	1.15	1.11	1.12	1.12	1.14	1.11	1.13
Volúmen excavado (m3)	30.5	33.5	31	30.5	30	30.5	31
Tesis Profesional José Antonio Pérez Quesnet U.N.A.M.							

TABLA II

PROMEDIO DE LOS PARAMETROS DE OPERACION DEL ESCUDO EXCAVACION L3-L2 del I.O.S.								
	ANILLOS							
	701-800	801-900	901-1000	1001-1100	1101-1200	1201-1300	1301-1400	1401-1557
EXCAVACION								
Nº de gatos requeridos	18	23	20	18	21	22	17	16
Presión de gatos (Kg/cm2)	170	150	150	160	170	130	200	220
Empuje total (Ton.)	1224	1380	1200	1552	1428	1144	1460	1408
Velocidad de empuje (cm/min.)	4.2	4.0	4.5	4.8	4.0	4.0	3.5	2.5
Presión gato cortador (Kg/cm2)	80	70	80	80	100	100	80	80
LODOS								
Presión frontal (Kg/cm2)	1.5	1.4	1.1	1.3	1.6	1.2	1.0	1.0
Gasto Suministrado (m3/min.)	2.2	2.6	2.2	2.4	2.6	2.6	2.5	3.0
Gasto extraído (m3/min.)	3.8	4.0	3.7	3.6	3.6	2.8	3.6	4.0
Densidad de suministro	1.03	1.03	1.05	1.05	1.04	1.03	1.03	1.04
Densidad de extracción	1.08	1.06	1.10	1.09	1.09	1.12	1.08	1.08
Volúmen excavado (m3)	28.5	1250	30.5	29	30	29.5	31	28
Tesis Profesional Jose Antonio Pérez Quesnel U.N.A.M.								

TABLA II

3.2.3 Avances registrados y rendimientos

La excavación del tramo L3-L2 dio inicio el día 26 de Noviembre de 1991 y terminó prácticamente el día 4 de Abril de 1992 cuando el escudo llegó a la zona de mejoramiento de la Lumbrera 2 llevado una longitud excavada de 1545.075 m.

Una vez ahí el escudo debía avanzar con mayor lentitud, pues el escudo además de atravesar por una zona de mejoramiento tendría que cortar prácticamente el muro de la lumbrera para atravesarlo e ir avanzando deslizando sobre una estructura metálica que lo recibiría para posteriormente colocarlo correctamente dentro de la misma lumbrera y empezar la excavación del tramo siguiente, por lo que la ubicación por donde saldría el escudo tendría que coincidir perfectamente con la de proyecto y debido a estas razones el avance es mucho más lento.

Esta operación anteriormente descrita y denominada salida del escudo dio inicio el día 8 de Abril y finalizó el día 23 de ese mismo mes, con lo que la longitud total del túnel excavado fue de 1557.075 m. habiéndose colocado en total 1563 anillos de concreto.

Cabe hacer una aclaración, se había mencionado con anterioridad que un anillo de concreto tenía un ancho en sentido longitudinal de 1.00 m. , sin embargo hay ocasiones en que, por exigencias del tramo se debe seguir una curva por lo que las dovelas que se colocan no son normales sino unas dovelas denominadas correctivas las cuales son de geometría similar

a las normales aunque tienen una sección en planta trapezoidal teniendo en su parte mas ancha 0.975 m. de longitud lo que les permite ir siguiendo una curva conforme se van colocando.

Los datos mas relevantes en lo que se refiere a avances de obra se presentan en la tabla III, donde se presenta una gráfica del avance diario pudiendo observar los picos tanto de valores máximos como mínimos y en la tabla III-A se presentan los valores numéricos de estos avances.

AVANCE DIARIO DE EXCAVACION

Lumbrera 3-Lumbrera 2 I.O.S.

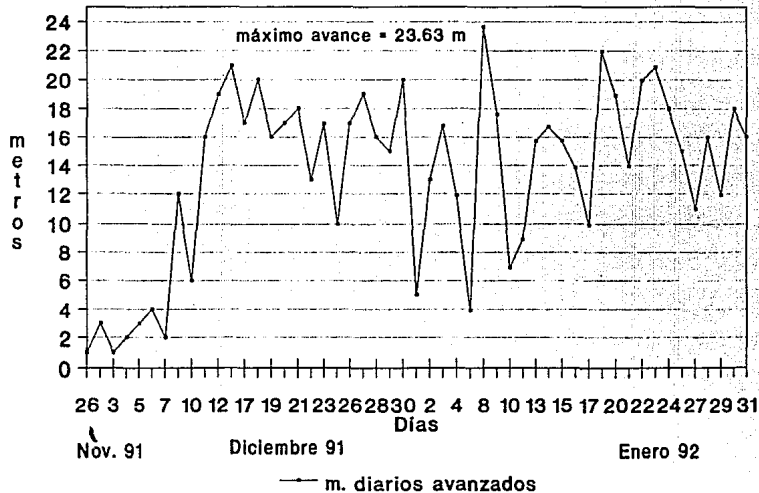


TABLA III

Tesis Profesional
J. Antonio Pérez Quesnel
U.N.A.M.

AVANCE DIARIO DE EXCAVACION Lumbrera 3-Lumbrera 2 I.O.S.

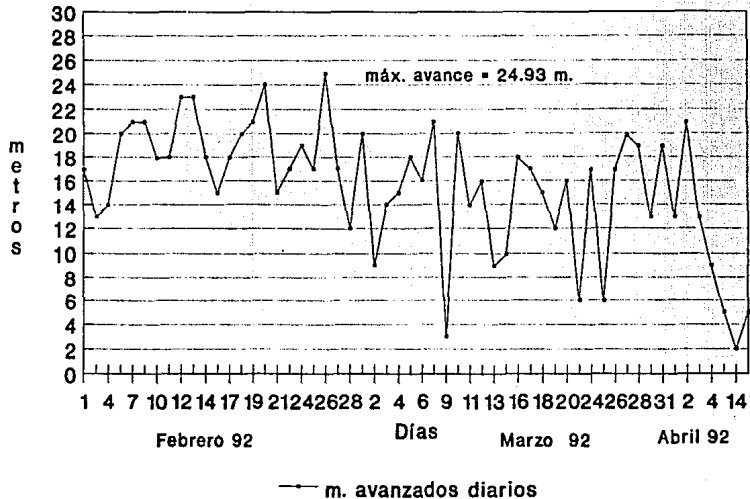


TABLA III

Tesis Profesional
J. Antonio Pérez Quesnel
U.N.A.M.

Dias	Metros	Dias	Metros	Dias	Metros	Dias	Metros
26-Nov-9	1.000	4	11.850	8	20.975	12	15.875
2-Dic-9	3.000	7	3.925	10	17.900	13	8.950
3	1.000	8	23.625	11	17.950	14	9.900
4	2.000	9	17.600	12	22.950	16	17.900
5	2.975	10	6.875	13	22.975	17	16.950
6	4.000	11	8.875	14	17.975	18	14.975
7	1.975	13	15.725	15	14.950	19	11.950
9	11.975	14	16.725	17	17.950	20	15.950
10	6.000	15	15.750	18	19.975	23	5.975
11	15.975	16	13.825	19	20.975	24	16.875
12	18.950	17	9.900	20	24.000	25	5.950
13	20.925	18	21.950	21	15.000	26	16.900
17	17.000	20	18.900	22	16.975	27	19.850
18	20.000	21	13.925	24	18.975	28	18.900
19	16.000	22	19.925	25	16.975	30	12.925
20	17.000	23	20.850	26	24.925	31	18.900
21	18.000	24	17.975	27	17.000	1-Abr.-92	12.950
22	13.000	25	15.000	28	12.000	2	20.920
23	16.950	27	11.000	29	19.975	3	12.925
24	10.000	28	15.975	2-Mar-9	9.000	4	8.975
26	16.975	29	11.925	3	14.000	8	5.000
27	19.000	30	18.000	4	15.000	14	2.000
28	16.000	31	16.000	5	18.000	23	5.000
29	15.000	1-Feb-9	16.925	6	16.000		
30	19.975	3	12.950	7	20.975		
31	5.000	4	13.950	9	3.000		
2-Ene-92	13.000	6	19.975	10	19.975		
3	16.775	7	20.975	11	13.900		

Longitud total = 1557.075 m.

Promedio = 14.55 m./dia

TABLA III-A
AVANCES DIARIOS EN LA EXCAVACION
TRAMO L3-L2 I.O.S

Tesis Profesional
J. Antonio Pérez Quesnel
U.N.A.M.

3.3 Instrumentación colocada en obra

A pesar de que se tenía experiencia gracias a tramos anteriores del comportamiento del terreno conforme se excava con escudo, sabiendo que la presencia del escudo produce por si misma asentamientos diferenciales en superficie o bufamientos, se hizo indispensable la colocación de bancos de nivel colocados en superficie sobre el eje del túnel y separados a cada 20 m. uno de otro, esto se hizo con el fin de tener un control diario del comportamiento de cada punto y ver, si efectivamente se cumplían las expectativas que se tenían acerca del comportamiento del suelo y en un momento dado que no se cumplieran estas, ver con anticipación las posibles soluciones.

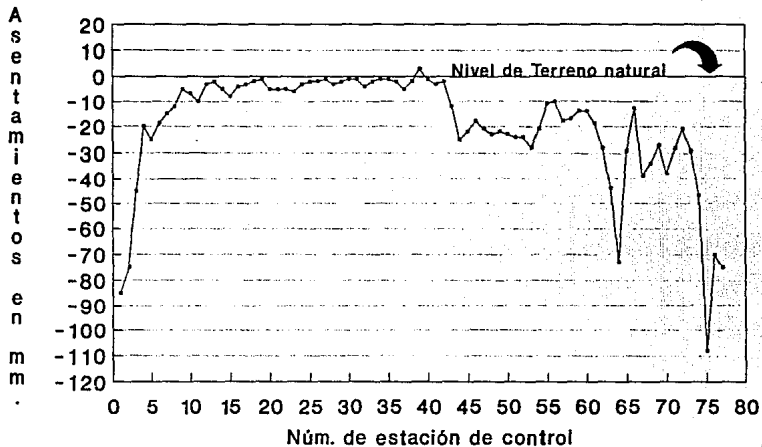
Dentro del túnel también se tienen ubicados bancos de nivel con los que es posible confirmar la elevación que sigue el escudo y ver si concuerdan con los datos que arroja la cabina central del escudo.

En el caso del tramo que nos ocupa, se colocaron 77 estaciones de control, como se dijo espaciadas a cada 20 m. y referidas al cadenamiento inicial de la Lumbrera 3, los resultados de estos movimientos verticales se encuentran graficados en la Tabla IV y corresponden a las lecturas finales, es decir son los valores que el terreno adquirió al estabilizarse.

De esta gráfica se distingue que el terreno al estabilizarse tiende a asentarse de manera uniforme, sin embargo se observan dos picos, al inicio de la excavación y al final de la misma, estos asentamientos fueron provocados por problemas durante la excavación en el primer caso y durante la salida del escudo a la Lumbrera 2 en el segundo caso los cuales serán tratados con más detenimiento en un capítulo posterior, sin embargo, y a pesar de que se pudiera pensar que fue una situación crítica, si se consultan los valores numéricos de estos asentamientos en la tabla IV-A se verá que son asentamientos que en el caso más grave no sobrepasan los 10 cm lo cual es prácticamente irrelevante considerando la magnitud de la obra que se realizó.

CONTROL DE NIVELACIONES

Excavación L3-L2 I.O.S.



— Asentamientos

Tesis Profesional
J. Antonio Pérez Quesnel
U.N.A.M.

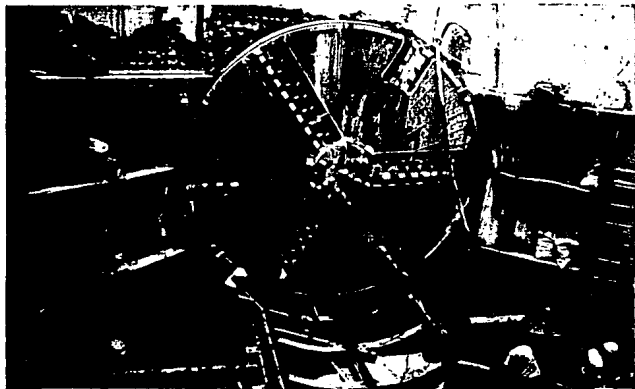
TABLA IV

Núm. de estación	Asentamiento en mm.	Núm. de estación	Asentamiento en mm.	Núm. de estación	Asentamiento en mm.
1	-85	26	-2	51	-24
2	-75	27	-1	52	-24
3	-45	28	-3	53	-28
4	-20	29	-2	54	-21
5	-25	30	-1	55	-11
6	-19	31	-1	56	-10
7	-15	32	-4	57	-18
8	-12	33	-2	58	-17
9	-5	34	-1	59	-14
10	-7	35	-1	60	-14
11	-10	36	-2	61	-19
12	-3	37	-5	62	-28
13	-2	38	-2	63	-44
14	-5	39	3	64	-73
15	-8	40	-1	65	-29
16	-4	41	-3	66	-13
17	-3	42	-2	67	-39
18	-2	43	-12	68	-34
19	-1	44	-25	69	-27
20	-5	45	-22	70	-38
21	-5	46	-18	71	-28
22	-5	47	-21	72	-21
23	-6	48	-23	73	-29
24	-3	49	-22	74	-47
25	-2	50	-23	75	-108
				76	-70
				77	-75

PROMEDIO = -19.104 mm

TABLA IV-A
Asentamientos en el tramo L3-L2 I.O.S.

Tesis Profesional
 Antonio Pérez Quesnel
 U.N.A.M.



Vista frontal de la cabeza cortadora del escudo de frente presurizado.

Aspecto de túnel excavado
con la etapa de revestimiento
definitivo.



CAPITULO IV

**PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO PARA EL
TRAMO LUMBRERA 3A-LUMBRERA 3B DEL
COLECTOR SEMIPROFUNDO CANAL NACIONAL
- CANAL DE CHALCO**

**Tesis Profesional
José Antonio Pérez Quesnel
Facultad de Ingeniería
U.N.A.M.**

CAPITULO IV PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO DEL TRAMO LUMBRERA 3A -
LUMBERA 3B DEL COLECTOR SEMIPROFUNDO CANAL NACIONAL

4.1 DESCRICION GENERAL DE LA OBRA

4.1.1 Introducción

Dentro de las obras que abarca el Plan Maestro de Drenaje Profundo para la ciudad de México se encuentran contemplados la construcción de túneles semiprofundos (denominados colectores) y uno de estos túneles es el llamado Colector Semiprofundo Canal Nacional - Canal de Chalco el cual tiene una longitud de 6.85 Km. divididos en cinco tramos, desde la Lumbrera 1 hasta la Lumbrera 5, y unas características generales como las mostradas en la Tabla I del Capitulo II.

Este general este colector se encuentra a unas profundidades comprendidas entre los 15 y los 20 metros y está ubicado dentro de la zona arcillosa de la ciudad de México. Durante casi la totalidad de su ejecución se usó un escudo de frente presurizable de 4.00 m. de diámetro, ya que como se había comprobado en tramos anteriores, era la máquina idónea para este tipo de suelos, este procedimiento se usó desde la L-1 hasta la L-3.

Durante el mes de Agosto de 1990 se inició la excavación del tramo L-3 a L-4 el cual comprendía una longitud de 1903.39 metros, sin embargo, conforme se avanzaba con la excavación, se empezó a detectar la presencia de fragmentos de roca basáltica y evaporita en tamaños que variaban de 1/4 " a 10" lo que lógicamente ocasionaban serios daños a los elementos del escudo dado que por

un lado las cuchillas de la cabeza cortadora no estaban diseñadas para cortar este tipo de material y por otro en la tubería de descarga se presentaban continuos taponamientos.

Esto originaba grandes pérdidas de tiempo al tener que parar constantemente para dar mantenimiento al escudo y aun así se continuo trabajando, hasta que se llegó a una situación en la que ya no se pudo seguir excavando. Al llegar a los 1433.24 m de túnel excavado se bloqueó de una manera total la cabeza cortadora, es decir no pudo seguir girando y cortando el material lo que originó un paro total de la excavación.

Inmediatamente se procedió a realizar sondeos del suelo que se tenía en toda la longitud faltante del tramo con el objetivo de determinar plenamente el tipo de material que se tenía adelante del escudo cortador, así como para determinar el volumen y la longitud de la roca que había encontrado el escudo.

Una vez definidos estos parámetros se procedió a construir una lumbrera de sección cuadrada ubicada directamente frente al escudo con el fin de poder rescatarlo, a esta lumbrera se le denominó Lumbrera 3-A.

Ya que se tuvieron los sondeos del terreno, se pudo inferir que la roca basáltica se presentaba únicamente en una longitud que no sobrepasaba los 50 metros por lo que se procedió a construir otra Lumbrera, la Lumbrera 3-B de sección circular de 9.00 m. de diámetro y a una distancia de 66.68 m. de la Lumbrera 3-A.

A partir de la Lumbrera 3-B se presentan las mismas condiciones que en el resto del colector por lo que desde ese punto se empezará a excavar usando el escudo cortador de frente presurizable.

Para determinar el procedimiento a seguir en la excavación de los 66.68 m. de túnel de LJA A 13B que presentaba frente mixto (llamado así por la características tan diversas del material bajo el cual se realizaría la excavación : basalto, arena, brecha volcánica y suelos blandos) se propusieron varias alternativas.

El procedimiento elegido para la excavación del túnel fue el método tradicional de excavación empleado equipo neumático para la demolición del material, soporte primario (revestimiento primario) a base de marcos metálicos y un retaque de madera para finalizar con una capa de concreto lanzado, todo este procedimiento estuvo antecedido por un tratamiento de inyección de geles químicos desde la superficie con el fin de impermeabilizar los estratos arenosos y no tener problemas con caídos del material.

Como comentario final, antes de introducirnos al tema propiamente, es necesario ubicar el lugar de construcción, la localización general del túnel puede observarse en la figura 3 del Capítulo II y este tramo se encuentra sobre el Eje 3 Oriente entre Avenida Santa Ana y Calzada de la Virgen.

De todo lo anteriormente comentado se puede deducir que este procedimiento constructivo presenta variadas diferencias en relación a la construcción de túneles utilizando un escudo cortador, por lo que de ese punto surge la necesidad de profundizar en el tema.

4.1.2 Estratigrafía

Con el objetivo de conocer las condiciones geológicas de subsuelo y las características de la roca encontrada, dada la gravedad que representaba encontrar basalto en una zona donde se suponía que únicamente habría suelos arenos - arcillosos, se procedió a realizar exhaustivos sondeos de exploración. En total fueron 37 sondeos distribuidos en toda el área del tramo L3A-L3B.

Para poder establecer con más detalle las condiciones geológicas y de estabilidad de los materiales a excavar fue necesario establecer un perfil estratigráfico a partir de los sondeos.

La información que se pudo deducir de las exploraciones puede distinguirse en la figura Núm. 12 y es la siguiente :

El tramo de túnel ubicado entre el sondeo F9 y F6 cuya longitud es de 35 metros presenta en la clave del túnel un estrato de arcilla de aproximadamente 1.20 m de espesor y en la parte inferior basalto que comprende hasta el piso del túnel.

Entre los sondeos F6 y F5 se detectó arcilla con pequeñas franjas de arena con un espesor de 1.00 metro dentro de la sección del túnel , el resto del material era fragmentos de basalto.

Del sondeo F5 al sondeo F1 se presentaron en la media sección superior algunos estratos de arena fina volcánica con diversos lentes arcillosos . En la media sección inferior se encontró basalto.

Interpretando toda la información anterior de los sondeos ubicados sobre el trazo del túnel se pudo inferir un perfil estratigráfico (Fig 12) de donde se concluyó que durante la excavación del tramo L3A-L3B se presentaría basalto solamente en la media sección inferior mientras que en la media sección superior se presentarían intercaladamente arcillas y arenas.

Lo anterior significaba que no era posible excavar una sección completa del túnel porque podrían tenerse problemas con los caídos, por lo tanto el procedimiento a excavar fue primero la sección superior reforzandola y posteriormente la sección inferior.

Este procedimiento constructivo será tratado a profundidad más adelante.

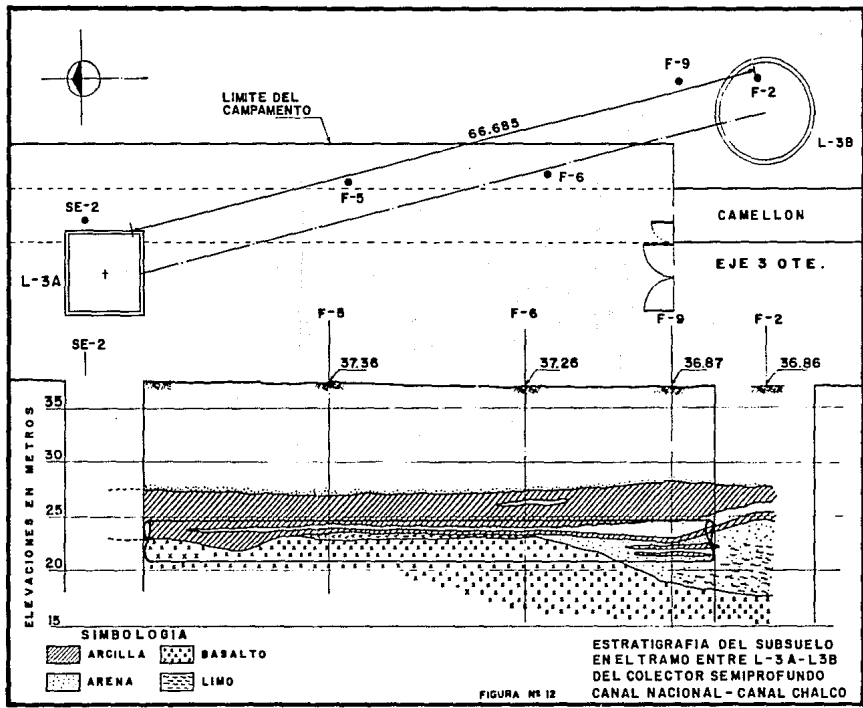


FIGURA Nº 12

4.1.3 Topografía general

Una vez que se tuvieron los apoyos necesarios para definir el trazo del túnel en superficie, se ubicaron geoméricamente las líneas y los ejes de los barrenos de inyección, así mismo se procedió a fijar en el interior de la lumbrera el eje de salida que debía seguir el túnel y la elevación correspondiente en ambas lumbreras.

Se implementaron diversos puntos de control tanto en el área de campamento como externamente en las construcciones aledañas a la obra, con el fin de realizar diariamente nivelaciones y observar el comportamiento del suelo durante el desarrollo de los trabajos de inyección así como también durante la excavación propia del túnel.

Estos bancos de control estaban apoyados en un banco profundo designado oficialmente donde no pudiera ser afectado por los trabajos que se realizaban.

Antes de iniciar la excavación se procedió a dibujar en el muro de la lumbrera el perímetro de lo que sería la excavación y también se colocó el primer marco metálico en el paño del muro de la lumbrera.

Estos marcos metálicos serán descritos a detalle, tanto en sus elementos que lo componen como en su manera de colocarlos más adelante dentro de este mismo Capítulo.

A medida que avanzaba la excavación, fue necesario ir colocando diversos bancos secundarios puestos normalmente sobre las rastras metálicas (Las rastras son viguetas I de 1.50 m. de longitud colocadas normales al plano de la sección ubicadas a la mitad de la sección de excavación entre los perfiles de apoyo "patas" y el perfil en la media sección superior) ya que se tomaba el patin de estas estructuras como el apoyo para definir las medidas de abertura de los marcos como el de la ubicación de las patas correspondientes.

Una vez ensamblado el marco completo, colocado el concreto lanzado en dicha sección, y colada la plantilla del piso del túnel, se procedió a realizar el alineamiento de los perfiles para checar el acabado final del túnel y así cumplir con las medidas solicitadas en el proyecto.

Es importante también señalar que los trabajos de topografía contemplaron el trazo de una cuadrícula que sirvió de plantilla de barrenación, esta cuadrícula tenía una separación de barrenos de 3.00 m a todo lo largo del eje del túnel y una longitud de sección transversal de 6.00 m.

4.1.4 Instalaciones y equipos utilizados.

En este tramo en particular, considerando que los volúmenes de obra no eran muy grandes y además, tomando en cuenta el riesgo de excavar en arcilla y roca simultáneamente, donde cualquier vibración podría originar una sobreexcavación y por consecuencia un asentamiento del terreno, se tuvo que realizar una exacta selección del equipo a utilizar buscando su optimización.

Como un ejemplo de lo anterior a continuación se mencionan las cantidades de obra que se ejecutaron en este tramo :

- Longitud total del túnel..... 67.29 m.
- Excavación en roca 321.77 m.
- Excavación en arcillas 534.22 m.
- Marcos metálicos 110.00 pzas.
- Rastras metálicas (viguetas) 296.16 m.
- Tornapuntas 50 pzas.
- Madera de retaque 10.54 m3
- Concreto lanzado 57.65 m3
- Perforación de barrenos 1178.65 m.l.

Después de un minucioso estudio se decidieron ocupar los equipos que a continuación se detallan, pero antes, cabe comentar que las instalaciones auxiliares que se usaron, fueron las típicas de campamento de lumbrera como las descritas en el Capítulo III, que consisten en Talleres mecánicos, eléctricos, de carpintería y de soldadura además de las necesarias oficinas técnico-administrativas y almacén .

A) Equipo de Perforación

En concordancia con las dimensiones de los barrenos (4"), a la cantidad y a la profundidad de estos, se decidió utilizar perforadoras Long-Year con las cuales se lograron obtener buenos rendimientos en la ejecución de los 86 barrenos que se perforaron a 15 m. cuando existía material arcilloso y a 12.50 m. en donde aparecía roca dentro de la sección que sería el túnel .

B) Equipo de Inyección.

Las instalaciones y conducciones se diseñaron de modo que el equipo y las conducciones pudieran ser operados desde una sola área, donde se conjuntaban las tanques almacenadores de agua, los tapancos de cemento y bentonita, así como ocho tanques de almacenamiento de productos químicos.

Estos elementos se mezclaban entre si según se necesitara ahí mismo en unos agitadores y posteriormente eran bombeados hasta el frente de trabajo.

C) Equipo de excavación

Analizando las dimensiones del túnel y el sistema de excavación que se había propuesto, se tenía una situación en la que el espacio era muy reducido para rezagar el material producto de la excavación y además, en el caso de desalojar roca, hacerlo por medios manuales resultaba impráctico.

Por lo anterior, se decidió utilizar para la carga y descarga de la rezaga dentro del túnel un cargador frontal del Tipo Bob-Cat con capacidad de 1 Yd3 y un arreglo especial para poder adaptarle un martillo hidráulico con el fin de atacar la roca, cuando se presentaron suelos se utilizaron martillos Tex-11 y cuando era roca Tex-42.

D) Equipo de rezaga en superficie.

En un inicio, se contempló la extracción de la rezaga de fondo de lumbrera por medio de botes de rezaga y una grúa, pero al analizar el factor económico se vio que no era muy rentable por lo que se decidió utilizar una Torre América apoyada en el acoplamiento de un malacate de 1.50 ton. de capacidad.

Una vez que la rezaga salía a superficie, era depositada en una banda transportadora la cual a su vez la conducía a un camión de volteo para finalmente llevarla al tiro designado para ello.

4.2 PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO

4.2.1 Antecedentes técnicos

Antes de introducirse propiamente al proceso constructivo se hace necesario conocer los elementos que lo conforman y como interactúan entre si.

A) Inyección para estabilización del terreno.

Cuando se trató el punto de la estratigrafía del terreno, se comentó que de acuerdo a la información proporcionada por los piezómetros, (aunque un poco inciertos estos datos) se corría el riesgo de tener presiones hidráulicas del orden de 5 ton/m² por lo que podían presentarse grandes filtraciones que produjeran inestabilidad al momento de estar realizando la excavación.

Para solucionar esto último, se tuvo que realizar un tratamiento a los suelos areno-arcillosos que se encontraban en la clave del túnel principalmente para empaarlos e impermeabilizarlos.

Estos tratamientos consistieron en la aplicación de inyecciones estabilizadoras a base de lechadas y de geles conformados por productos químicos.

En una primera etapa la inyección de lechada cemento-agua se implementaría como una primera acción para reducir la permeabilidad de los estratos y darle cierta consolidación a los materiales inestables, mientras que por otro lado la inyección de productos químicos, serviría para formar geles y obstruir los huecos en el estrato portador de agua.

Todo este proceso de inyección se estableció inyectando diversas mezclas desde la superficie del terreno natural, mediante el procedimiento denominado inyección de manguito usando una cuadrícula de barrenos separados 3.00 m entre si cubriendo un ancho que comprende a las paredes del túnel.

Cabe mencionar después del tratamiento de inyección , se hizo necesario rellenar por medio de inyecciones a través del muro de lumbrera toda el área por donde iba a iniciarse la excavación con el fin de tener una cierta seguridad de estabilidad al momento de iniciar los trabajos.

B) Marcos Metálicos.

Considerando el tipo de terreno en el que se iba a trabajar, se hizo necesario colocar un revestimiento primario con el fin de garantizar la estabilidad del terreno mientras se colocaba el revestimiento definitivo.

Este ademe consistió en la colocación de marcos metálicos separados a 1.00 m uno de otro y además en la colocación de una capa de concreto lanzado de 10 cm de espesor.

En la figura Núm. 13 pueden distinguirse los elementos que componen a un marco metálico como los utilizados en este túnel de donde se pueden distinguir 3 partes principales:

- En la sección superior 2 viguetas IPR de 6 x 4 la cuales fueron "roladas" en la obra con el fin de darle la curvatura que se necesitaba.

- En la mitad de la sección del marco se colocaron 2 rastras , estas rastras estaban formadas cada una por 2 viguetas IPR de 5 x 8 1/4., cabe mencionar que estas rastras eran el primer elemento del marco que se colocaba ya que el marco se ensamblaba en partes dentro del túnel.

- En la sección inferior del túnel se colocaban viguetas IPR de 6 x 4" que servían de apoyo a los elementos antes descritos, a estos elementos se les conocían como " patas ", por otro lado, cuando el terreno lo permitía, se colocaban tornapuntas, estas tornapuntas se fabricaban con secciones de placa soldada debido a que la curvatura de proyecto del marco era muy cerrada y por lo tanto no podían ser roladas.

C) Ciclos de trabajo.

Como en todo proceso constructivo, se tuvo que definir una secuencia de trabajo a seguir , en el caso de la excavación de este túnel el ciclo de trabajo que se definió fue el siguiente :

1.- Iniciar la excavación de la "coyotera", es decir el lugar donde quedaría instalada la rastra. Se excavaba para este fin una sección rectangular de 1.00 m X 1.20 m. y con una profundidad de 1.30 m. que era la longitud que tenía cada rastra.

2.- Se colocaban y nivelaban las rastras de 1.30 m. de longitud soldandolas con la rastras que habían sido colocadas en un empuje anterior.

3.- Fue necesario hacer una excavación de la ranura perimetral donde se alojaría la media sección superior del marco, dejando un núcleo o corazón central que posteriormente se excavaría.

4.- Colocación de los marcos metálicos formados a base de viguetas IPR .

5.- Como el marco no quedaba perfectamente empotrado al terreno excavado, se hacía necesario colocar madera de retaque con el objeto de que el empuje vertical del terreno se distribuyera uniformemente en todo el marco.

6.- Una vez realizado lo anterior, se procedía a la excavación del túnel, existían dos núcleos principales, el de la media sección superior, y el volumen de la media sección inferior, es necesario mencionar que se excavaba por ciclo una longitud de 1.20 m.

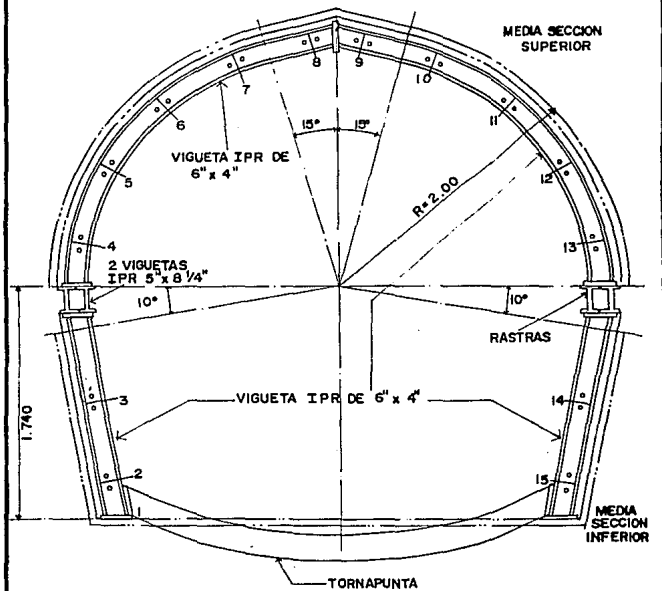
7.- Posteriormente, se procedía a la colocación del concreto lanzado de 0.10 m de espesor en la media sección superior.

8.- Una vez que se había rezagado, colocado el concreto lanzado y se había retirado la rezaga, el trabajo se avocaba a la colocación de la patas y si el terreno lo permitía también de las tornapuntas.

9.- Como parte final del ciclo, se aplicaba otra capa mas de concreto lanzado, pero esta en las patas de apoyo de los marcos metálicos.

Concluidos estos puntos anteriores era posible continuar avanzando, como aclaración importante es necesario decir que estos ciclos no se realizaban desde un solo frente dado que el ataque del túnel se llevó acabo desde dos lumbreras como se verá mas adelante.

SECCION EXCAVACION TUNEL MIXTO



TESIS PROFESIONAL

F.I.

J. ANTONIO PEREZ QUESNEL

U. N. A. M. FIGURA Nº 13

4.2.2 Procedimiento constructivo

I.- Tratamiento de inyección.

Con el afán de eliminar las aportaciones de agua y mejorar las propiedades mecánicas y de resistencia del material a excavar, se planteó la necesidad de inyectar diversas mezclas para solucionar el problema.

De acuerdo al trazo topográfico que se había hecho, se contaba con una cuadrícula de barrenación a cada 3.00 m en ambos sentidos. En la figura Núm. 14 se puede apreciar la geometría de ubicación de una parte de estos barrenos.

Así mismo, estas perforaciones contaban con una profundidad del orden de 15.50 m. con el fin de poder influenciar a las zonas que afectaban a la media sección superior del túnel, un aspecto de esto último lo podemos apreciar en la figura Núm. 15 que es una vista de la sección transversal del tratamiento de inyección.

Además en esta última figura también se encuentra representada la geometría del túnel con el revestimiento primario (marcos metálicos) y la geometría con el acabado final (revestimiento definitivo) lo cual le dará su diámetro terminado de 3.10 m.

El procedimiento de inyección que se siguió se puede dividir en tres etapas :

- a) Inyección de vaina.
- b) Inyección de mezclas estables.
- c) Inyección de productos químicos.

a) Inyección de vaina.

Una vez llevado a cabo la perforación y limpieza de los barrenos con un diámetro de 4" , se introdujo una tubería galvanizada de 2" con perforaciones en tramos de 3.20 m. unidos mediante coples y dejandola 20 cm. por arriba del nivel de terreno natural.

En este procedimiento, una vez centrado el tubo de 2" se procede a rellenar el hueco anular entre el barreno de 4" y el tubo colocado con un mortero plástico de baja resistencia.

Este tratamiento es el conocido como inyección de vaina o de primera fase, y se realiza empleando una mezcla de agua-cemento en relación 3:1 y con el 20 % de bentonita respecto al peso del cemento.

El volumen de mortero inyectado en cada uno de los barrenos fue variable, ya que dependía de la saturación del estrato, una vez que se terminaba esta etapa se limpiaba perfectamente el tubo de 2" para que no se obstruyera de ninguna forma.

b) Inyección de mezclas estables o de segunda fase.

La anterior inyección de vaina servía para poder fijar al suelo los tubos de PVC de un diámetro de 1 1/4" (tubería de manguito) que se colocaban dentro del tubo de 2".

Por medio de esta tubería de manguito se aplicaba a presión la inyección de mezclas estables y de productos químicos.

Esta tubería de manguito estaba equipada con sellos de neopreno (copas) que delimitaban las progresiones (las progresiones son etapas de inyección, es decir se inyectan por progresión un volumen determinado - en este caso 50 cm. -)

En este caso de las mezclas estables su objetivo era, como ya se mencionó anteriormente, impermeabilizar el terreno en la clave del túnel y empaquetarlo lo mas posible.

Para esta 2da fase se estableció una lechada de cemento-agua en proporción de 2:1

c) Inyección de productos químicos o de 3ra fase.

Se llevó a cabo la inyección de productos químicos con el fin de formar geles entre los huecos provocados por el material inestable obteniendo resultados favorables.

La mezcla que se ocupó en esta inyección estaba conformada por los siguientes elementos :

- Silicato de sodio
- Agua
- aceite de etilo
- Estabilizador.

El volumen que se inyectó variaba mucho por barreno, pero en general se puede hablar que se inyectaron en promedio 9 m³/barreno a una presión de 5 kg/cm².

Una vez terminadas las tres fases de inyección se realizaron dos barrenos de 4" de diámetro en los extremos de la clave del túnel (3B) con el objetivo de conocer la manera en que habían trabajado las inyecciones.

De acuerdo a los resultados que arrojaron estas pruebas se continuaba teniendo un problema de inestabilidad del terreno en un estrato de arena, por lo que se decidió como medida de seguridad incrementar la presión de inyección en esa zona y además se colocaron 21 barrenos mas intercalados entre los existentes.

II.- Excavación del túnel.

Como una medida precautoria, y es bueno comentarlo, antes de iniciar con la excavación propiamente dicha, se realizó una inyección de consolidación del terreno en la clave del túnel se colocaron 9 tubos a 1.00 m de profundidad y seis a 1.50 m.

Para iniciar y demoler la pared de la lumbrera por donde se comenzó ,se trazó una línea perimetral de acuerdo a las dimensiones del proyecto y se demolió en primera instancia la zona de las rastras y se pudo observar que el material a excavar presentaba una buena compactación y nula filtración del material.

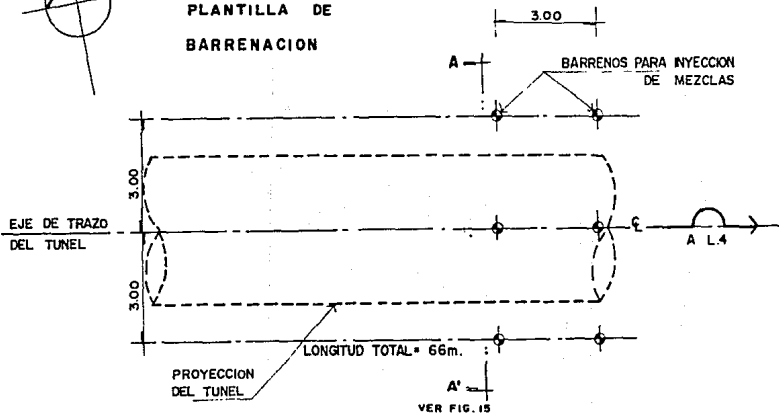
Una vez que se comprobó la anterior se excavó toda la media sección superior y se colocaron rastras de 1.30 m de longitud, después se colocó una capa de concreto lanzado y se comenzó a demoler la media sección inferior, colocando dos pares de patas y una capa de concreto lanzado de espesor de 10 cm y $f'c = 200 \text{ kg/cm}^2$ al igual que las anteriores.

También se hace necesario señalar que en los primeros 8.00 m. de túnel la rezaga se acarreo en forma manual en carretillas y posteriormente se utilizó el cargador Bob-Cat.

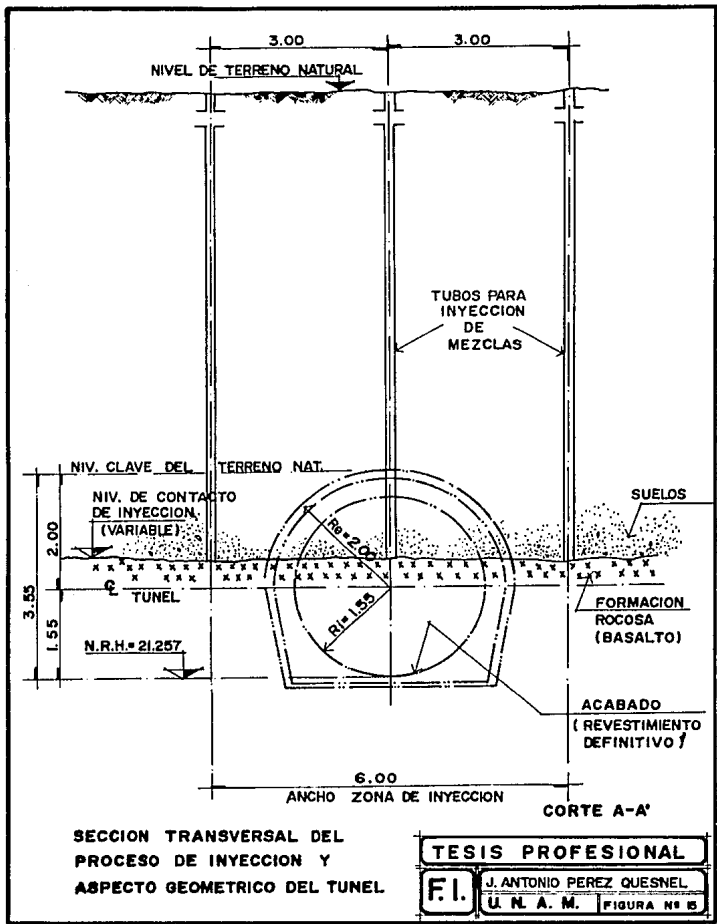
Como último y necesario comentario, hay que anotar que cuando se llevaban 31.20 m. de túnel excavado en la zona de piso se comenzó a detectar roca, la cual fue subiendo a medida que se avanzaba y durante los metros subsecuentes se localizó siempre arriba de la media sección inferior.



PLANTILLA DE BARRENACION



TESIS PROFESIONAL	
FI.	J. ANTONIO PEREZ QUESNEL
U. N. A. M. FIGURA N.º 14	



TESIS PROFESIONAL	
F.I.	J. ANTONIO PEREZ QUESNEL
U. N. A. M. FIGURA N° 15	

4.2.3 Avances y rendimientos

En un principio se empezó a excavar desde un solo frente, (desde la Lumbrera 3B), estos trabajos iniciaron el día 17 de Septiembre de 1992, pero considerando los recursos y la factibilidad técnica el día 6 de Octubre se comenzó a atacar el túnel desde la Lumbrera 3A.

Ambas excavaciones finalizaron el día primero de Noviembre cuando los frentes se unieron llevando recorridos 39.25 m. desde la Lumbrera 3B.

Por lo anterior el rendimiento global fue el siguiente :

Días efectivos de trabajo.... 52 días (considerando ambos frentes)
Longitud total 67.29 m
Rendimiento real $67.29/52 = 1.30$ m. por día.

Analizando de manera particular los volúmenes de obra que se manejaron los resultados son los que se indican a continuación:

I.- Inyecciones de tratamiento.

- Respecto a la primera fase :

Volumen total inyectado 38.90 m³
Tiempo de ejecución 7 días.
Rendimiento 5.55 m³/día.

- En la segunda fase se tuvo :

Volumen total inyectado..... 722 m3
Tiempo de ejecución 16 días
Rendimiento..... 4.13 m3/día

- Finalmente en la tercera fase :

Volumen inyectado..... 735 m3
Tiempo de ejecución 14 días
Rendimiento..... 52.50 m3/día

II.- Ciclo de excavación.

De acuerdo a los resultados obtenidos en todos y cada uno de los elementos del ciclo de excavación los rendimientos observados fueron :

1.- Excavación de coyotera.

Vol. excavado = $1.00 \text{ m} \times 1.20 \text{ m} \times 1.30 \text{ m} = 1.56 \text{ m}^3$
como son dos coyoterías = $1.56 \text{ m}^3 \times 2 = \dots 3.12 \text{ m}^3$
Tiempo aprox. de ejecución..... 150 min.

2.- Colocación y nivelación de rastras.

Cantidad: 2 Viguetas IPR de $5 \times 8 \frac{1}{4}$ " de 26 kg/m.
Tiempo de colocación..... 70 min.

3.- Excavación de la ranura perimetral.

Volumen excavado = $0.80 \text{ m} \times 0.70 \text{ m} \times 5.72 \text{ m} = 3.20 \text{ m}^3$

Tiempo de ejecución 120 min.

4.- Colocación de los marcos metálicos.

2 Viguetas IPR de 6x4 de 17.9 kg/m.

Longitud total de las dos viguetas 8.762 m.

Peso total del marco superior 0.205 ton.

Tiempo de colocación..... 120 min.

5.- Ademe de madera..... 20 min.

6.- Excavación del núcleo sup. e inf.

Volumen a excavar (con abundamiento) 4.59 m³

7.- Colocación del concreto lanzado

En media sección superior:

Volumen 0.68 m³

Tiempo de colocación 100 min.

8.- Coloc. de patas y tornapuntas

Tiempo de ejecución 90 min.

Rezaga del material producto de excavación 224 min.

9.- Concreto lanzado en patas de apoyo..... 45 min.

En general podemos concluir que a pesar de las dificultades técnicas que implicaba la construcción de este túnel, los avances obtenidos no eran despreciables pues hablar de avances de 1.30 m. diarios en este tipo de material excavado era muy significativo.



Aspecto de la excavación del túnel mixto donde se aprecian los marcos metálicos y al fondo el cargador frontal.



Aspecto del túnel mixto (L3A-L3B) terminado faltando únicamente la etapa de revestimiento definitivo.

CAPITULO V

**ALGUNOS PROBLEMAS PRESENTADOS
DURANTE EL PROCESO DE EXCAVACION**

**Tesis Profesional
José Antonio Pérez Quesnel
Facultad de Ingeniería
U.N.A.M.**

CAP V ALGUNOS PROBLEMAS PRESENTADOS DURANTE EL PROCESO DE EXCAVACIÓN

5.1 Introducción

Dentro de la naturaleza cuando el subsuelo no ha sido alterado por algún factor externo encontramos un estado inicial de esfuerzos primarios en donde esas presiones primarias están en función básicamente de la profundidad de la zona estudiada, del peso volumétrico de los materiales ubicados sobre ese punto, de la presión del agua existente y de las propiedades mecánicas del subsuelo.

Sin embargo, cuando bajo la superficie del terreno se alteran estas condiciones, modificándolas por ejemplo con la presencia de alguna excavación, la distribución de esfuerzos primarios que se tenían en un principio cambia y se provoca una concentración de esfuerzos en el perímetro de la zona excavada.

Al presentarse una concentración de esfuerzos en la periferia de la cavidad pueden suceder alguna de estas situaciones

1.- El material tiene la suficiente fuerza para soportar la concentración de esfuerzos y no se presentan problemas de inestabilidad.

2.- El material no es capaz de soportar por sí solo esa concentración de esfuerzos por lo que requiere de un ademe primario (revestimiento primario)

3.- Se determina de acuerdo a las condiciones mecánicas del subsuelo que el material si es capaz de soportar los esfuerzos que impondrá el material, sin embargo se presentan algunos factores durante la excavación que no estaban contemplados en un principio como :

- Presencia de material que al estar compactado resiste correctamente los esfuerzos sin embargo al alterarlo no responde de la misma forma.

- El material no es tratado adecuadamente o no se logra contener correctamente por lo que empieza a fluir.

- Presencia de agua que no estaba contemplado encontrar durante la excavación.

Quando se presenta esta situación en la que el material no cumple con las expectativas que se plantearon surgen las situaciones críticas.

A pesar del largo camino que ha recorrido la Ingeniería de túneles y de la experiencia que se ha acumulado a lo largo de los años se llegan a presentar en ocasiones esas situaciones inesperadas y dependiendo de particularidad del caso es su solución por lo que no hay formulas dadas para determinado problema.

El objetivo de este Capítulo es precisamente mostrar algunos problemas que se han presentado durante la excavación de túneles para el drenaje profundo de la Ciudad de México ilustrando sus casos mas sobresalientes.

5.2 Clasificación empírica del túnelero

Toda la experiencia que se ha ido acumulando en la excavación de túneles durante el paso de los años no ha sido en vano y ha servido para establecer criterios de excavación, de tal modo que actualmente con solo conocer el tipo de material en que se trabajará se puede hacer una previsión muy aproximada del comportamiento que tendrá.

De esta forma, diversos estudiosos del tema como el Dr. K. Terzagui, han clasificado al material de acuerdo al comportamiento que presentan en diez categorías, y estas son:

1.- Material Duro (Hard)

En este tipo de material, el frente del túnel puede ir avanzando sin presentar mayores problemas de estabilidad y no requiere de un ademe adicional.

Dentro de esta categoría encontramos diversos tipos de roca como Basalto, Riolita, Andesita, etc.

Este tipo de material es el más adecuado para realizar una excavación, aunque hay que recordar que aún en este tipo de condiciones idóneas, cuando la excavación se realiza a gran profundidad y debido a los niveles de esfuerzos que se alcanzan se puede sobrepasar su punto de fluencia.

2.- Material Firme (Firm)

En este tipo de material, el frente que se está excavando puede avanzar sin requerir un soporte inmediato y el revestimiento definitivo puede instalarse antes que se empiecen a detectar movimientos en el material excavado.

Un ejemplo típico de este tipo de material lo constituyen las calizas.

3.- Graneo Lento (Slow Raveling)

4.- Graneo Rápido (Fast Raveling)

En ambos materiales, en el frente excavado, de la clave del túnel o de la zonas laterales comienzan a desprenderse pequeños fragmentos del material.

Cuando este fenómeno se presenta a los pocos minutos de haber excavado el material se dice que es graneo rápido.

Un ejemplo de graneo lento lo podemos encontrar en la brecha volcánica, mientras que la arena semicompacta es típica del graneo lento.

5.- Extrusión Lenta (Squeezing)

El material cuando se presenta este fenómeno, tiende a avanzar lentamente hacia el interior del túnel sin fracturarse y sin un incremento notable de agua.

Lo crítico de este material es que aunque en el túnel no se presenten grandes movimientos, en superficie pueden ocurrir grandes asentamientos.

Este tipo de material, cuyo ejemplo clásico son las arcillas extruibles de la Cd. de México, es el que con mayor frecuencia se ha presentado durante la excavación de túneles para el Drenaje Profundo en la Cd. de México.

6.- Material Expansivo

Al contrario de lo que ocurre con el material anterior, en este material, el terreno al avanzar al interior del túnel, sufre un fuerte incremento de volumen que se nota sensiblemente en el túnel.

Las arcillas expansivas del tipo Montmorilonita son la que mejor ilustran este tipo de material.

7.- Material con Corrida Cohesiva (Cohesive Running)

8.- Material con corrida.

Cuando se presenta una superficie con un talud mayor a 34 grados y es retirado algún ademe lateral, se provoca una corrida del material en el que avanza rápidamente uniformemente en forma granular.

Cuando antes de este fenómeno se presenta un lapso en el que haya granqueo del material se le denomina corrida cohesiva.

Un ejemplo de este caso lo pueden constituir el material Limo - Arcilloso.

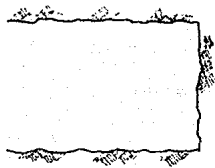
9.- Materiales con extrusión rápida (Very Soft Squeezing)

Cuando se presenta un material en el que se pueda presentar el fenómeno de extrusión y además existe cierta carga de agua, puede llegar a suceder que se provoque el fenómeno conocido como extrusión rápida en el que el material se introduce rápidamente en el interior del túnel como flujo plástico.

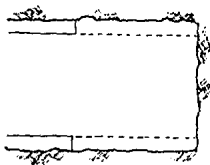
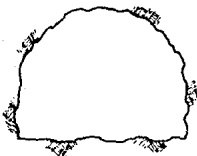
10.- Material Fluyente.

Esta situación es parecida a la anterior, solamente que aquí la carga de agua que se presenta provoca que el material se comporte como un fluido viscoso que puede invadir la sección completa del túnel y en un caso extremo, si el flujo no se detiene puede llegar a llenar completamente la excavación.

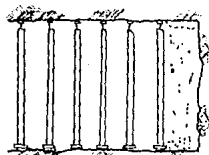
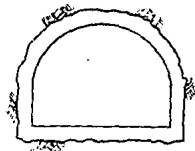
Es importante hacer notar que esta clasificación no sustituye de ninguna manera a los diversos estudios técnicos que deben de realizarse forzosamente, sino sirve como un antecedente para realizar estos estudios.



1 DURO



2 FIRME



3 LENTO

GRANEO



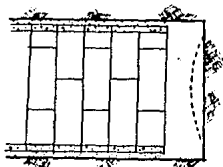
4 RAPIDO

TESIS PROFESIONAL

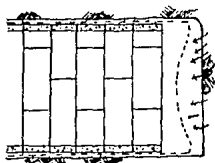
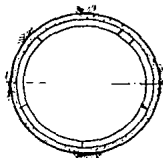
F.I.

J. ANTONIO PEREZ QUESNEL

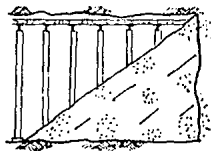
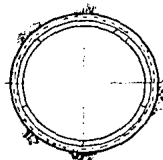
U. N. A. M. FIGURA N.º 18



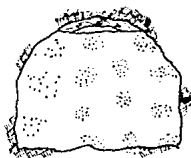
6 EXTRUSION LENTA



6 EXPANSIVO



7 CORRIDA COHESIVA

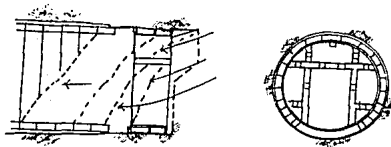


8 CORRIDO

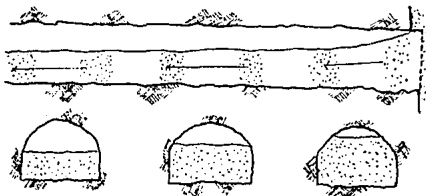
TESIS PROFESIONAL

FI

J. ANTONIO PEREZ QUESNEL
U. N. A. M. FIGURA N.º 18



9 EXTRUSION RAPIDA



10 FLUYENTE

5.3 Algunos problemas presentados durante el proceso de
excavación

Este punto a tratar puede ser enfocado desde distintos puntos de vista, y en este caso se refiere a la descripción de algunas situaciones críticas que se llegaron a presentar durante la construcción de túneles para el drenaje profundo de la Ciudad de México.

Definitivamente, se podrían enumerar una gran cantidad de casos en los que por distintas circunstancias se presentaron problemas, sin embargo se han elegido los que se han considerado mas ilustrativos.

A) Después de haber excavado 616 m. del Emisor Central en 1974, correspondientes a la segunda fase del Plan Maestro de drenaje, se encontró dentro del manto rocoso que se había detectado, una zona de falla que estaba formada por arcillas expansivas del tipo Montmorilonita que cuando se someten a humedad aumentan de volumen y así mismo se deterioran rápidamente con el intemperismo.

Se estaba utilizando durante la excavación de este tramo un revestimiento primario formado a base de marcos metálicos y la sección era del tipo herradura (De la misma forma que la ocupada en el C.S.Canal Nacional L3A-L3B ver Capitulo IV) y hasta ese momento no se había presentado ningún problema.

Sin embargo al llegar a la longitud mencionada (616 m.) se encontró el material expansivo el cual se extendió hasta los 1516 m. del túnel.

Debido a lo anterior se presentaron grandes problemas de estabilidad ya que al estar excavando se ponía en contacto la arcilla con el aire y al absorber la humedad de la atmósfera el material lógicamente se expandía rompiendo la madera de retaque que ayudaba al marco a soportar el terreno y se comenzaron a deformar los marcos por lo que se hizo necesario sustituirlos por otros (Ver fig. 17).

La solución que se tomó fue colocar concreto lanzado sobre los marcos y esto ayudo a evitar el intemperismo del material y lógicamente su expansión.

B) Aunque no pertenece propiamente al Sistema de Drenaje de la Ciudad de México, este caso estudiado en este punto resulta interesante, ya que el túnel que se construía también era para drenaje y además se pone de relieve lo importante que resulta cuidar todos los elementos que constituyen el ciclo de excavación.

Se habían excavado 25 m de este túnel ubicado en una zona urbana a una profundidad media de 25 m. utilizando un escudo de frente presurizable, cuando se llegó a una zona donde se tenía arcilla blanda de baja resistencia lo que provocó dificultades en el manejo del escudo por lo que las dovelas colocadas no pudieron ensamblarse correctamente entre si de una forma adecuada y debido a la presión que existía fueron desplazadas 10 m. por detrás de su posición original lo que ocasionó que el suelo arcilloso que se encontraba sobre la clave del túnel entrara de manera intempestiva hacia el interior de la excavación y llenara el espacio de túnel que se había hecho hasta ese momento.

Como una consecuencia de lo anterior en la superficie se produjo un asentamiento de hasta 3 metros en su parte mas crítica (Ver fig. 18). Debido a esta situación y a la dificultad que implicaba continuar excavando en este material se decidió cambiar el trazo original del túnel empezando la excavación desde otro punto.

C) Se llevaban 70 m. de excavación en un túnel, que como el anterior servía para drenaje en una zona urbana, cuando se llegó a una zona de suelo limo-arenoso y areno-limoso localizada a 30 m. de profundidad.

La excavación se estaba realizando con un escudo de frente presurizable, sin embargo al encontrar este material (aunado a la presencia de agua con una magnitud considerable de presión - 15 m. de tirante -) el escudo no pudo realizar su función eficientemente lo que ocasionó que el terreno comenzara a ceder y como consecuencia de esto se provocó un asentamiento en superficie que a su vez ocasionó la ruptura de un colector que hizo que el flujo de suelo y agua que se generó atrapara a la cabeza de corte del escudo.

D) Refiriéndose a casos relacionados con los temas contemplados en este trabajo, y en concreto con lo sucedido durante la excavación del tramo L3-L2 del I.O.S. cabe señalar los siguientes comentarios:

Al inicio de la excavación y cuando se llevaban excavados únicamente 12 m., de forma accidental se desactivó el sistema que accionaba a los gatos de empuje lo que ocasionó que la presión del subsuelo empujara al escudo hacia atrás del frente excavado retrasandolo 2 m. aproximadamente y ocasionando un asentamiento en superficie por el material que se desplazó. Debido a esto es que en la gráfica de asentamientos (Tabla IV Capitulo II) se observa un valor crítico al inicio del tramo.

La solución que se adoptó fue poner el escudo en posición de excavación y en la zona de asentamiento inyectar un mortero con el fin de estabilizar el terreno.

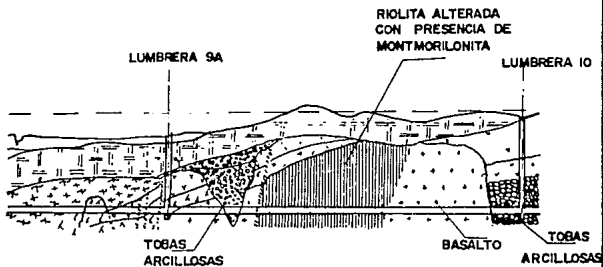
Otra situación critica que se presentó, se dio cuando se había terminado de excavar el tramo y estaba saliendo el escudo del túnel hacia el centro de la Lumbrera 2.

En esa ocasión, el escudo por diversos factores que habían afectado su alineamiento, no llegó a la zona de mejoramiento del suelo en la L2 como debiera sino que, parte del cuerpo quedó fuera.

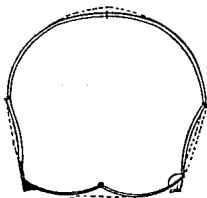
Esto originó que al estar empujando el escudo para atravesar el muro de Lumbrera el material que no había sido tratado empezara a fluir en una gran cantidad y a una gran presión.

Afortunadamente, y a pesar de contar con lapso de tiempo muy breve para tomar decisiones, la solución adoptada - que consistió en seguir empujando para que el cuerpo de escudo sirviera como ademe - fue la adecuada y a pesar de que si hubo flujo de material los asentamientos en superficie no fueron lo fuertes que se esperaban (Ver Tabla IV, Cap. II).

Estos son en general algunos de los problemas más representativos que se han presentado, en donde se puede apreciar que a pesar de contar con una amplia experiencia en la excavación de túneles, si no se cuida bien todos los elementos que intervienen se pueden presentar situaciones críticas.



GEOLOGIA DEL CASO N° 3



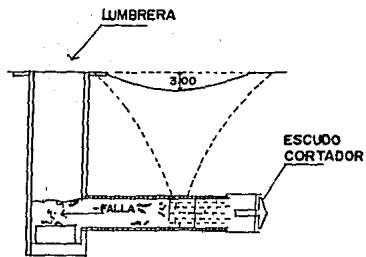
CASO N° 3

TESIS PROFESIONAL

FI.

J. ANTONIO PEREZ QUESNEL

U. N. A. M. FIGURA N° 17



CASO N° 4

TESIS PROFESIONAL		
F.I.	d. ANTONIO PEREZ QUESNEL	
	U. N. A. M.	FIGURA N° 12

CAPITULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

**Tesis Profesional
José Antonio Pérez Quesnel
Facultad de Ingeniería
U.N.A.M.**

CAPITULO VI CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

Es indudable el gran avance que han tenido las obras para el Drenaje Profundo en la Ciudad de México.

Si consideramos que las obras en forma comenzaron en Marzo de 1967 y a la fecha (Marzo de 1993) se llevan construidos 140 Km, tenemos un rendimiento de 5.34 Km. por año, o lo que es lo mismo, casi 500 m. por mes.

Esto representa un rendimiento realmente sobresaliente, si consideramos que este avance es sin tomar en cuenta interrupciones por cuestiones administrativas.

También de este rendimiento se puede deducir que el avance en estos últimos años ha sido muy favorable, ya que a pesar de que en los primeros años se tenían avances muy cortos, en épocas recientes aumentaron, elevando así el promedio.

Respecto a la excavación con escudo de frente presurizable a base de lodos, en el tramo Lumbrera 3 - Lumbrera 2 del Interceptor Oriente-Sur, se puede apreciar en sus respectivos análisis que a pesar de que el terreno exigió que se contrarrestara su empuje con presiones realmente altas, del orden de 1.66 Kg/cm², se logró mantener esa presión durante toda la excavación sin presentarse mayores problemas, lo cual indica que todas las consideraciones que se hicieron acerca del comportamiento del suelo relativo a su estabilidad se cumplieron, lo que habla del uso eficiente del escudo con frente presurizable.

Para confirmar esta eficiencia se pueden analizar las gráficas de avance (Tabla III, Capítulo 3) en donde se aprecia que se llegaron a tener rendimientos de hasta 24 m./día que, comparados con los 5 m./día que se lograban avanzar cuando se inició con la excavación de túneles en 1967, representa un incremento de casi el 80 % de avance diario.

Por si esto último no fuera suficiente, en las gráficas de asentamientos (Tabla IV, Capítulo 3) se observan que los valores que se presentaron fueron realmente mínimos (salvo casos particulares analizados en el Capítulo anterior) lo que indica que nuevamente se cumplieron las expectativas que se tenían del escudo en relación a su comportamiento con el terreno.

Es en base a lo anterior que se puede decir que el empleo de un escudo de frente presurizable a base de lodos en la excavación del tramo Lumbrera 3 - Lumbrera 2 del Interceptor Oriente - Sur, representó la mejor elección hecha, y además también se puede pensar que a pesar de tener condiciones tan desfavorables de excavación (arcillas altamente extruibles), si se prevén correctamente todas las situaciones que se pueden llegar a presentar, y utilizando el procedimiento y la herramienta adecuados, es altamente probable que no surga ningún problema en los trabajos, por lo que no hay límites en lo que respecta a la excavación en este tipo de suelos.

Con respecto al tramo Lumbrera 3A-Lumbrera 3B del Colector Semiprofundo Canal Nacional- Canal de Chalco, donde se presentó una situación inesperada (Presencia de roca donde se suponía encontrar arcillas) se hace evidente la necesidad de realizar sondeos más

exhaustivos de la zona en donde se alojará el túnel, con el fin de no encontrar sorpresas .

Los avances en este tramo (1.30 m./día) fueron altos si se considera el tipo de material mixto que se encontró y considerando que en algunas zonas se presentó casi en su totalidad basalto.

Lo más sobresaliente en esta excavación fue la inyección de diversas mezclas para estabilizar el terreno que podía haber presentado grandes problemas, situación que se logró ampliamente como se demostró durante la excavación.

Con esto último se puede concluir y demostrar que siempre y cuando al subsuelo se le trate y enfrente correctamente, será posible excavar en él, no importando que tanta inestabilidad pueda presentar el material trabajado.

6.2 Recomendaciones

Durante la excavación de los túneles que aquí se analizaron, se hizo un minucioso seguimiento de todos los parámetros que intervinieron y en general fue posible prevér muchas situaciones anómalas, que al solucionarlas a tiempo no tuvieron consecuencias graves.

Debido a esto se ve la conveniencia de continuar con este tipo de seguimientos y profundizar aún más en los factores que originan variaciones en los mencionados parámetros.

Por otro lado a últimas fechas han surgido innovaciones tecnológicas en lo referente a la excavación de túneles en suelos blandos.

Una de estas innovaciones la constituye el denominado escudo de lodos balanceado, el cual evita que el lodo tenga que recircular hasta la superficie, ya que esta recirculación se realiza dentro del mismo escudo.

Con esto se logran abatir los costos de operación grandemente, además de resolver el problema ecológico que representa la contaminación que produce el lodo que llega a caer de los camiones que lo transportan hacia la zona de tiro determinada. Además se evita la contaminación y molestias que se generan con la presencia de los cárcamos de sedimentación.

Por lo tanto, convendría hacer un estudio de factibilidad técnica y económica para determinar la conveniencia de excavar con este tipo de escudo.

Otra innovación importante es el uso de máquinas tuneadoras que permiten hacer microtúneles en suelos blandos (con diámetros inclusive desde 20 cm.).

El diseño de estas máquinas está basado en el funcionamiento de un escudo de frente presurizable y logra evitar la excavación de zanjas que provocan grandes molestias y que además hacen más lento el proceso.

Por todo esto se hace evidente la necesidad de permanecer a la vanguardia en lo referente al desarrollo tecnológico que se da en el mundo, ya que esto traerá como consecuencia grandes ventajas técnicas-económicas y ambientales.

BIBLIOGRAFIA Y REFERENCIAS

- Nine years of slurry shield tunnelling for Mexico City drainage
M.I. A. Arturo Bello Maldonado
I.C.A. S.A. de C.V. 1992

- Memoria técnica de las obras del drenaje profundo de la Ciudad de México.
T.U.S.A. 1984

- El sistema de drenaje profundo de la Ciudad de México.
Departamento del Distrito Federal
D.G.C.O.H. 1992

- Curso Victor Hardy Excavaciones y obras subterráneas
AMITOS 1992

- Procedimiento de excavaciones en frente mixto
Grupo Mofal 1992

- Mediciones e interpretaciones
Interceptor Oriente-Sur tramo L1-L6
GEOTEC 1992

- Reporte de Avances y asentamientos
Tramo L3-L2 del I.O.S.
I.C.A. C.P. 1992

- Excavación con escudos en suelos
blandos de la Cd. de México
Ing. A. Necedal Maldonado 1985

- Memoria Técnica Junta anual de
Superintendentes
Solum - TUSA - Derna 1989

- Inyecciones con silicatos
Silicatos y derivados 1992

- Manual del Ingeniero Civil
Frederick S. Merritt
Mc. Graw Hill 1991