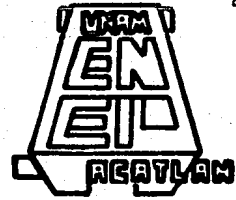




UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO

Escuela Nacional de Estudios  
Profesionales Acatlán



18  
2Ej.

**EXCAVACION DE TUNELES EN ARCILLAS  
UTILIZANDO ESCUDOS CON PRESION  
DE FLUIDOS AL FRENTE**

**T E S I S**  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO CIVIL  
P R E S E N T A :  
**PEDRO ABEL MONTESINOS RINCON**

Acatlán, Méx.



1987



Universidad Nacional  
Autónoma de México

UNAM



## **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.



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES "ACATLAN"  
COORDINACION DEL PROGRAMA DE INGENIERIA

CI/031/1987.

SR. PEDRO ABEL MONTESINOS RINCON  
Alumno de la carrera de Ingeniería Civil.  
P r e s e n t e.

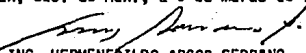
De acuerdo a su solicitud presentada con fecha 14 de septiembre de 1982, me complace notificarle que esta Coordinación tuvo a bien -- asignarle el siguiente tema de tesis: "Excavación de Túneles en Arcillas Utilizando Escudos con Presión de Fluidos al Frente", el cual se desarrollará como sigue:

- Introducción.
- I.- Características del subsuelo en la Cd. de México.
- II.- Propiedades de las arcillas en la excavación de túneles.
- III.- Descripción del método del escudo con presión de fluidos al frente.
- IV.- Otras alternativas de excavación en arcillas.
- V.- Análisis de precios unitarios.
- Conclusiones.
- Bibliografía.

Asimismo fue designado como Asesor de Tesis el señor Ing. Fernando Favela Lozoya, profesor de esta Escuela.

Ruego a usted tomar nota que en cumplimiento de lo especificado en la Ley de Profesiones, deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito básico para sustentar examen profesional, así como de la disposición de la Dirección General de Servicios Escolares en el sentido de que se imprima en lugar visible de los ejemplares de la tesis, el título del trabajo realizado. - Esta comunicación deberá imprimirse en el interior de la tesis.

A t e n t a m e n t e,  
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"  
Acatlán, Edo. de Méx., a 9 de marzo de 1987.

  
ING. HERMENEGILDO ARCOS SERRANO  
Coordinador del Programa de  
Ingeniería.

HAS' PGG/rcm.

# I N D I C E

	PAG.
INTRODUCCION	1
I.- CARACTERISTICAS DEL SUBSUELO EN LA CIUDAD DE MEXICO.	5
II.- PROPIEDADES DE LAS ARCILLAS EN LA EXCAVACION DE TUNELES.	10
III.- DESCRIPCION DEL METODO DEL ESCUDO CON PRESION DE FLUIDOS AL FRENTE.	24
IV.- OTRAS ALTERNATIVAS DE EXCAVACION EN ARCILLAS.	59
V.- ANALISIS DE PRECIOS UNITARIOS	75
CONCLUSIONES	88
BIBLIOGRAFIA	90

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

La cuenca del Valle de México situada en el extremo sur del altiplano mexicano, está limitada al Norte por las Sierras de Tepotzotlán, Tezontlalpan y Pachuca; al Este por los Llanos de Apan y la Sierra Nevada; al Sur por las Sierras del Chichinautzin y del Ajusco y al Oeste por las Sierras de las Cruces, Monte Alto y Monte Bajo. Tiene 9,600 Km<sup>2</sup> de superficie, de la cuál solo el 30% es plana y situada a una altura media de 2,250 M.

El Distrito Federal ocupa 1,480 Km<sup>2</sup> y en él se encuentra la Ciudad de México con una área urbanizada mayor de 300 Km<sup>2</sup>; se encuentra enclavada en la región sureste de la cuenca del Valle de México, la cual hasta antes de la erupción de los volcanes que forman la Sierra del Chichinautzin, era un valle que drenaba libremente sus aguas hacia Cuernavaca por el Sur.

Al represarse las aguas merced a la sierra se formó el lago, en el cuál la única salida del agua fué por evaporación, a través del tiempo dicho lago fué secandose y formando lagunas separadas, de las cuales a la fecha solo subsiste parte de la de Texcoco y los canales de la zona Xochimilco-Chalco.

Las cenizas producto de erupciones volcánicas, depositadas en el seno del lago fueron sedimentandose lentamente en forma floculenta, constituyendo a través del tiempo un suelo arcilloso sumamente compresible, al cual ahora se le ha dado el nombre genérico de arcilla del Valle de México.

El explosivo crecimiento de la actual Capital de la República en el presente siglo, motivó que las fuentes de agua potable que la abastecían fueran agotándose y en su lugar se incorporaran nuevas fuentes de abastecimiento, como bombear los acuíferos profundos del subsuelo de la Ciudad. Al causarse desequilibrio en las presiones del agua del subsuelo debido al bombeo, el material arcilloso compresible inició un proceso de consolidación presentándose el llamado "Hundimiento general del Valle de México", lo cual perjudicó notablemente la red de alcantarillado creando contrapendientes en las estructuras hidráulicas destinadas a alejar las - - aguas negras y pluviales.

Este tipo de problemas dieron origen a que las autoridades elaboraran un proyecto de drenaje a base de túneles, dicho proyecto se denominó "Sistema de Drenaje Profundo de la Ciudad de México".

El uso de túneles como solución a problemas de ingeniería - se remonta a tiempos antiguos. Frecuentemente, un túnel es la única respuesta práctica para superar obstáculos topográficos y resolver el problema de la conducción de aguas. Los túneles cumplen con numerosas y diferentes funciones, pero los problemas encontrados en la ingeniería de túneles se derivan no tanto por la variedad de tamaños y propósitos, sino por el gran número de condiciones naturales de terreno - en el que los túneles son construídos.

Varios avances técnicos principalmente en el área de la - -

ingeniería mecánica y el estudio científico de los suelos y sus propiedades ingenieriles, han contribuido a la solución de los problemas a que se enfrentan los túneles en terrenos arcillosos y permitido construir túneles en suelos donde anteriormente se consideraban como casi imposibles de excavar. El escudo como herramienta de excavación ha sido posiblemente el avance más notable en los métodos de excavación de túneles en suelos blandos durante las últimas décadas.

Las primeras soluciones utilizadas con éxito en los suelos arcillosos blandos de la Ciudad de México, requirieron del uso de escudos. Su empleo resuelve el problema de la estabilidad de las paredes, ya que el ademe se "siembra" al amparo y protección de una camisa metálica, la cual se desliza hacia adelante cada vez que el ademe está listo para recibir la carga del terreno.

Varias fallas ocurridas en lumbreras y túneles construidos al final de la década de los sesentas en las arcillas muy blandas de la Ciudad de México, siendo en su totalidad fallas por extrusión, dieron paso a la utilización del aire comprimido en combinación con el escudo. Esto permite construir túneles en suelos arcillosos de baja resistencia, sin embargo, el uso de ambiente presurizado restringe las actividades laborales y para valores mayores de cierto valor, limita su aplicación.

Cuando los suelos por excavar son muy blandos y el uso de aire comprimido está restringido por aspectos humanos o

económicos, la herramienta de excavación es más elaborada y aparece la presurización frontal mediante lodo para estabilizar el suelo excavado. A estos sistemas de excavación se les ha denominado genéricamente "Slurry Shields" (Escudos de lodo). Se han desarrollado en Inglaterra, Alemania y Japón, correspondiendo a este último país el mayor kilometraje de túneles construídos.

El sistema de excavación con escudo cortador y presurización frontal a base de lodos se está utilizando actualmente en la construcción de un túnel para el Sistema de Drenaje Profundo, en el lado Oriente de la Ciudad de México. Se trata del "Colector Semiprofundo Iztapalapa" y dado que por primera vez se utiliza en México este sistema, se hará mención de esta obra en el capítulo correspondiente para una mejor descripción del mismo.

Existen otros sistemas de tuneleo para excavar en suelos blandos, estos sistemas han sido desarrollados en países como Alemania y Japón, obteniéndose buenos resultados en las obras construídas con estos métodos y aunque en esos países generalmente los túneles han sido construídos en suelos no tan desfavorables, podría pensarse que alguno de estos métodos pueda ser aplicable al caso de la Ciudad de México.



## CAPITULO I

### CARACTERISTICAS DEL SUBSUELO EN LA CIUDAD DE MEXICO

#### 1.- ZONIFICACION DE LA CIUDAD

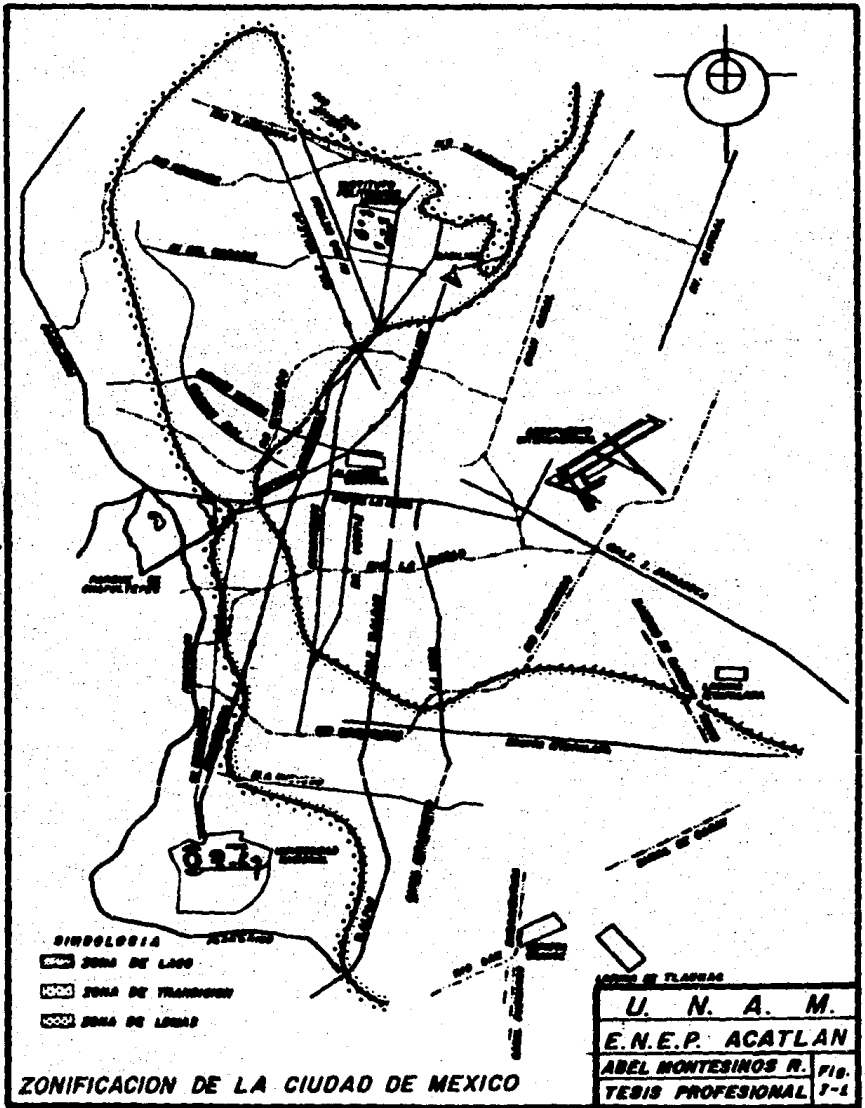
Mediante exploraciones recientes efectuadas en su mayoría - con objeto de estudiar cimentaciones de estructuras de la - Ciudad de México, se ha logrado una información bastante -- precisa de las características estratigráficas y mecánicas que presenta el subsuelo en el área urbana. Con estos datos se le ha zonificado atendiendo principalmente a las propiedades de los materiales que se encontraron en sondeos perforados a una profundidad de 50 M. o menor; en varios puntos la exploración ha llegado hasta los 100 M.

En la figura I-1 se muestra la zonificación de la Ciudad -- desde el punto de vista estratigráfico.

En la actualidad pueden conocerse cualitativamente las características más importantes de los materiales que forman el subsuelo en un punto dado, con solo determinar su estratigrafía y algunas de sus propiedades índice. Las zonas en que se encuentra dividida la Ciudad son las siguientes:

##### 1.1. Zona de lomas.

Comprende las faldas de serranías y lomeríos de la cuenca, - tales como la Sierra de Guadalupe, la serranía de las cruces, las partes altas de los cerros del peñón de los baños, peñón del Marqués, el cerro de la estrella y el derrame - -



basáltico del pedregal.

El subsuelo de esta zona está formado por terrenos compactos areno-limosos, con alto contenido de grava unas veces, y - - otras, por tobas pumíticas bien cementadas. Presenta generalmente condiciones favorables para cimentar estructuras; la - capacidad de carga del terreno es elevada y no existen capas de arcilla compresibles que puedan ser causa de asentamien--tos diferenciales de gran magnitud.

Sin embargo, debido a la explotación de minas de arena y grava, muchos predios están cruzados por galerías a diferentes profundidades, las cuales suelen tener un desarrollo muy caprichoso. La localización de dichas galerías pueden resultar difícil, porque muchas de ellas a causa de derrumbes, están rellenas con material arenoso suelto.

En la figura I-2 se muestra un perfil de esta zona.

### 1.2. Zona de transición.

Se presenta entre las serranías del poniente y el fondo del lago de Texcoco, es importante por los cambios notables que presenta su estratigrafía y por lo tanto, las propiedades mecánicas de los materiales que lo forman. En general, se tienen superficialmente los depósitos arcillosos o limosos orgánicos de la formación Becerra, cubriendo a estratos de arcilla volcánica sumamente compresibles y de espesores variables, intercalados con capas de arena limosa compacta 6 - -

PROF. mts.	SIMB.	DESCRIPCION
1		Arena limosa.
2		Arena limosa bien graduada muy compacta.
3		
4		
5		Arena limosa muy compacta con lentes de arcilla.
6		
7		Arena fina y gruesa muy compacta.
8		
9		
10		
11		Arena limosa compacta
12		
13		Limo arenoso duro
14		Arena fina y media limosa con lente de vidrio volcanico, muy compacta.
15		
16		
17		
18		
19		
20		

	ARCILLA
	LIMO
	ARENA
	VIDRIO VOLCANICO

### ESTRATIGRAFIA DE LA ZONA DE LOMAS

U. N. A. M.	
E.N.E.P. ACATLAN	
ABEL MONTESINOS R.	Fig.
TESIS PROFESIONAL	I-2

arena limpia, los cuales descansan sobre potentes mantos en los que el material predominante es la grava y la arena.

El perfil estratigráfico de la zona se muestra en la figura I-3 y sus propiedades índice en la tabla I.

### 1.3. Zona del lago.

Comprende la parte centro y oriente de la Ciudad de México, construída sobre el fondo del lago de Texcoco. Se caracteriza por tener un subsuelo con grandes espesores de arcillas lacustres de origen volcánico muy compresibles, de baja resistencia al corte y alto contenido de agua. Su estratigrafía en general es regular, aunque cada estrato suele ser de espesor variable. La integran 5 estratos principales, los cuales son los siguientes, descritos a partir de la superficie del terreno:

Manto superficial.- Ocupa generalmente los primeros 5M. y consiste en rellenos artificiales heterogéneos con sucesión de capas arenosas, limoarenosas y arcillolimosas; en ocasiones cementadas con caliche y en general compactos.

Formación arcillosa superior.- Estrato formado por arcillas volcánicas de alta compresibilidad de consistencia - - blanda a media, con intercalaciones de mantos de arena; el espesor es del orden de 25 M.



## T A B L A I

### GRUPO 4.

	Wl	Se	ej	LL	LP	IP	avm	avp	qu	qu	Md
	%	-	-	%	%	%	cal/seg/cm <sup>2</sup>	kg/cm <sup>2</sup>	kg/cm <sup>2</sup>	kg/cm <sup>2</sup>	kg/cm <sup>2</sup>
Manto superficial.	74	2.5	2.1	87.3	43	38.4	-	-	-	0.84	32.1
Formación arcillosa superior.	225	24	5.6	243	76.1	164	0.52	1.1	1.57	0.91	37.2
Capa dura.	67	2.5	1.8	69	44.7	23.9	-	-	-	1.22	55.2
Formación arcillosa inferior.	No existe ó bien está incluida en la capa superior.										
Depositos profundos.	70	2.5	2.2	104	50.5	53.5	-	-	-	1.48	72.1

### EN LA TABLA.

Wl = Contenido natural de agua inicial.

Se = Densidad de sólidos.

ej = Relación de vacíos.

LL = Límite líquido.

avm = Coeficiente de compresibilidad máxima.

qu = Resistencia a la compresión no confinada.

LP = Límite plástico.

IP = Índice de plasticidad.

avm = Coeficiente de compresibilidad en compresión.

avp = Coeficiente de compresibilidad en el intervalo de preconsolidación.

Md = Módulo de deformación.

Capa dura.- Capas de arena limosa y limo arenoso, muy compactas y en ocasiones cementadas; su espesor es del orden de 3 M.

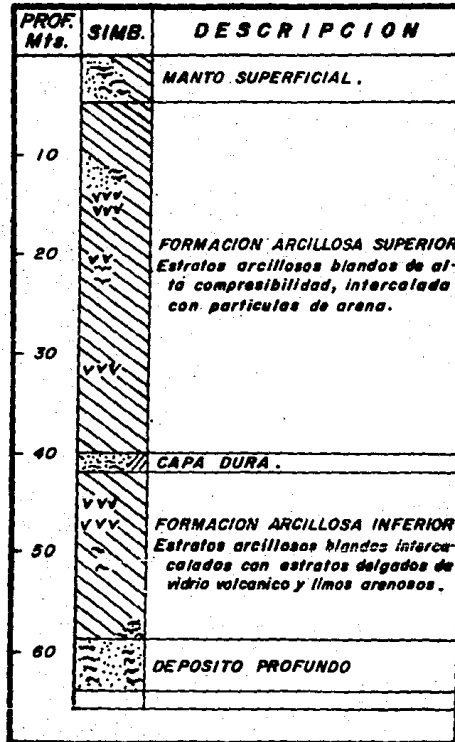
Formación arcillosa inferior.- Está constituida de lentes compactos de arcilla volcánica y de suelos limosos interstratificados con arcilla. Sus características son semejantes a las de la formación superior, aunque más comprimidas y resistentes. Su espesor es del orden de 8 M.

Depósitos profundos.- Están constituidos por suelos arenosos finos, gravas arenosas, limos arcillosos y arenas limosas en estado compacto.

En la figura I-4 se presenta un perfil estratigráfico de la zona del lago y las propiedades índice en las tablas II, III y IV.

De las tres zonas en que se divide la Ciudad de México, se puede observar que la más desfavorable es la zona del lago, debido básicamente a la cantidad de materiales arcillosos blandos y de baja resistencia al corte que lo constituye. Este tipo de suelos es el que más problemas presenta en todo tipo de obras ingenieriles, sobre todo cuando se trata de trabajos en el subsuelo, como es el caso de la excavación de túneles.





### ESTRATIGRAFIA DE LA ZONA DEL LAGO

U. N. A. M.	
E.N.E.P. ACATLAN	
ABEL MONTESINOS R.	Fig.
TESIS PROFESIONAL	1-4

## T A B L A I I

### GRUPO I.

	W <sub>i</sub>	S <sub>s</sub>	e <sub>j</sub>	LL	LP	IP	e <sub>vm</sub>	e <sub>vp</sub>	e <sub>vm</sub> <sup>max.</sup>	q <sub>v</sub>	M <sub>d</sub>
	%	-	-	%	%	%	cm <sup>2</sup> /kg	cm <sup>2</sup> /kg	cm <sup>2</sup> /kg	kg/cm <sup>2</sup>	kg/cm <sup>2</sup>
Manto superficial.	45.2	2.5	3.0	131	58.1	72.3	-	-	-	1.14	127
Formación arcillosa superior.	54.4	2.4	8.4	327	90.2	236	1.10	2.39	3.12	0.48	23
Capa dura.	57.9	2.6	1.4	58	45.2	13.4	-	-	-	2.43	100
Formación arcillosa inferior.	22.8	2.5	5.9	219	68.3	144	0.37	0.77	1.11	0.91	45
Depositos profundos.	67.7	2.5	1.9	92	48.5	45	-	-	-	2.25	143

### EN LA TABLA.

W<sub>i</sub> = Contenido natural de agua inicial.

S<sub>s</sub> = Densidad de sólidos.

e<sub>j</sub> = Relación de vacíos.

LL = Límite Líquido.

e<sub>vm</sub> = Coeficiente de compresibilidad máxima.

q<sub>v</sub> = Resistencia a la compresión no confinada.

LP = Límite plástico.

IP = Índice de plasticidad.

e<sub>vm</sub> = Coeficiente de compresibilidad en recompresión.

e<sub>vp</sub> = Coeficiente de compresibilidad en el intervalo de preconsolidación.

M<sub>d</sub> = Módulo de deformación.

GRUPO 1.- Pertenecen a terrenos de la zona del lago no sometidos a sobrecargas en la superficie, ni a pérdidas de presión importantes en los conductos del subsuelo.

GRUPO 2.- Terrenos en la zona del lago sobre los que existen construcciones ligeras y con importantes las pérdidas de presión en los conductos del subsuelo (barridos).

GRUPO 3.- Unidades en la zona del lago, afectadas por construcciones pesadas y por un bombeo intenso y prolongado.

T A B L A III

GRUPO 2.

	Wl	Se	ej	LL	LP	IP	avm	avp	avmax	qu	Md
	%	-	-	%	%	%	cm <sup>2</sup> /kg	cm <sup>2</sup> /kg	cm <sup>2</sup> /kg	kg/cm <sup>2</sup>	kg/cm <sup>2</sup>
Manto superficial.	109	2.5	3.1	104	54	51	-	-	-	0.77	41.6
Formación arcillosa superior.	292	2.4	7.1	298	86	213	0.79	1.76	2.55	0.81	23.6
Capa dura.	80	2.3	2.1	96	49	46	-	-	-	1.09	46.6
Formación arcillosa inferior.	190	2.4	4.5	209	68	141	0.29	0.61	0.64	1.49	61.6
Depositos profundos.	55	2.5	2.1	117	50	64	-	-	-	2.60	1265

T A B L A IV

GRUPO 3.

	Wl	Se	ej	LL	LP	IP	avm	avp	avmax	qu	Md
	%	-	-	%	%	%	cm <sup>2</sup> /kg	cm <sup>2</sup> /kg	cm <sup>2</sup> /kg	kg/cm <sup>2</sup>	kg/cm <sup>2</sup>
Manto superficial.	95	2.5	2.8	103	54	50	-	-	-	0.91	49.1
Formación arcillosa superior.	263	2.4	6.4	283	86	197	0.58	1.25	1.84	0.90	40.2
Capa dura.	48	2.5	1.4	51	38	15	-	-	-	1.65	0.44
Formación arcillosa inferior.	177	2.4	4.4	214	70	144	0.19	0.38	0.57	1.94	84.6
Depositos profundos.	52	2.5	1.3	71	42	32	-	-	-	2.72	1578

EN LAS TABLAS.

Wl = Contenido natural de agua inicial.

Se = Densidad de sólidos.

ej = Relación de vacíos.

LL = Límite líquido.

avmax = Coeficiente de compresibilidad máximo.

qu = Resistencia a la compresión no confinada.

LP = Límite plástico.

IP = Índice de plasticidad.

avm = Coeficiente de compresibilidad en recomposición.

avp = Coeficiente de compresibilidad en el intervalo de preconsolidación.

Md = Módulo de deformación.

La excavación de un túnel produce en el subsuelo movimientos horizontales y verticales a su alrededor, ocasionando con esto, un asentamiento en la superficie del terreno y -- cuando se trata de arcillas, el problema es más grave por las características que éstas presentan y que más adelante se mencionan en el capítulo II.

## C A P I T U L O   I I

### PROPIEDADES DE LAS ARCILLAS EN LA EXCAVACION DE TUNELES

#### 1.- TUNELES EN SUELOS BLANDOS

El método o procedimiento constructivo a utilizar para la construcción de un túnel, depende de las condiciones de estabilidad que presente un terreno al excavar. Un terreno rocoso o un suelo firme suele provocar pocos problemas y en nuestro país se cuenta con una vasta experiencia en este tipo de materiales. Sin embargo cuando la construcción del túnel es en suelos blandos, como las arcillas características del Valle de México, éste tiene que ser excavado con herramientas y procedimientos constructivos bien definidos, de tal forma que garanticen en todo momento la estabilidad del frente de excavación.

Debido a que el presente trabajo se refiere a la excavación de túneles en suelos blandos, me limitaré a dar una descripción de este tipo de materiales, desde el punto de vista de la ingeniería de túneles.

En forma simplista se definirá como suelo todo material que sea eficientemente excavable con pico y pala. Estos pueden dividirse en dos grupos:

- a) Residuales: procedentes de la intemperización de rocas, en el mismo sitio.
- b) Transportados: formados por la sedimentación progresiva de partículas procedentes de otros

suelos o del desgaste de rocas.

En los suelos residuales, se presenta una secuencia ordenada desde la superficie hacia la profundidad, donde los materiales varían desde suelos francos, a roca sana pasando por condiciones intermedias de suelos con fragmentos de roca y rocas parcialmente intemperizadas.

La profundidad y el tipo de suelos residuales, depende de las condiciones climatológicas prevaletientes durante su formación, pudiendo provocarse suelos residuales predominantemente arcillosos en ambientes cálido, húmedos o granulares en ambientes frios secos.

Los suelos transportados pueden ser, según una clasificación común de campo, los siguientes:

- Arena y grava.- Agregados sin cohesión, formados por fragmentos redondos, subredondeados, subangulares o angulares, procedentes de rocas poco alteradas.
- Tepetate.- Tierra endurecida, con extraordinaria resistencia a la penetración de las herramientas de perforación.
- Limo inorgánico.- También llamado "harina de roca", es esencialmente un suelo de grano fi-

no formado por partículas equidimensionales, - que se comportan como poco plásticas cuando actúan en conjunto. Cuando las partículas son similares a hojuelas, con dos dimensiones mayores que la tercera, aumenta la plasticidad del conjunto de partículas.

- Arcilla.- Derivada de la descomposición de los minerales de las rocas, provoca los comportamientos más indeseables del subsuelo, haciéndolo potencialmente expansivo si está seco y preconsolidado, o bien compresible si se ha sedimentado en un medio acuático.
- Turba.- De origen francamente orgánico, tiene componentes fibrosos de origen vegetal y es sumamente inestable y compresible.
- Toba.- Es un agregado de fragmentos minerales o rocas, arrojadas por erupciones volcánicas y depositado por acción del agua o del viento.
- Loess!.- Sedimento uniforme y colusivo de origen eólico, su tamaño medio de partículas oscila entre 0.01 y 0.05 mm y su cohesión es debida a la presencia de carbonato de calcio.
- Margas.- Arcillas calcáreas duras a muy duras

- Caliche.- Capas de suelo cementado por algún carbonato.
  
- Arcillas bentoníticas.- Formadas por la alteración química de las cenizas volcánicas.

## 2.- CLASIFICACION DE LOS SUELOS

La clasificación empírica del tunelero, presenta básicamente diez categorías para clasificación del material excavado, ordenadas de la menor a la mayor posibilidad de dificultades que pueden surgir al excavar un túnel. Dicha clasificación se presenta en la tabla I, señalando el tipo de suelo que lo constituye y la forma que se comporta el túnel al ser "atacado".

Es interesante observar que los materiales encasillados como "DURO" o "FIRME", soportan claramente las concentraciones de esfuerzo provocadas por la excavación sin menoscabo de su resistencia interna a pesar del "desconfinamiento".- Es de esperarse que su componente cohesiva (cementación) - sea altamente importante.

En los materiales descritos como de "GRANEO LENTO" o "RAPIDO", las concentraciones de esfuerzos pueden mermar de alguna manera la capacidad resistente del material el cual -



TABLA I

CLASIFICACION EMPIRICA DEL TUNELERO

No.	CLASIFICACION DEL SUELO PARA TUNELEO	CONDICIONES DE TRABAJO EN EL TUNEL	TIPOS DE SUELO REPRESENTATIVOS
1	DURO	La frente del túnel puede avanzar sin soporte en la clave.	Arcillas calcáreas muy duras; grava y arenas cementadas.
2	FIRME	La frente del túnel puede avanzar sin soporte en la clave, y el soporte permanente puede construirse antes de que empiece a moverse el suelo.	Loess arriba del nivel freático, arcillas calcáreas de baja plasticidad.
3	DE GRANEEO LENTO	Empiezan a caer del techo y paredes terrones y hojuelas de material, algún tiempo después que el suelo ha estado expuesto.	Gráneo rápido se presenta en suelos residuales o en arena con cementante de arcilla, bajo el nivel freático
4	DE GRANEEO RAPIDO	Gráneo rápido el proceso se inicia en pocos minutos.	Arriba del nivel freático el mismo tipo de suelos puede comportarse como Gráneo lento o aún firme.
5	DE EXTRUSION LENTA	El terreno avanza lentamente hacia el túnel sin fracturarse y sin incremento de agua perceptible. Puede provocar hundimiento en superficie.	Arcilla blanda o medianamente blanda.

TABLA I  
CLASIFICACION EMPIRICA DEL TUNELERO

No.	CLASIFICACION DEL SUELO PARA TUNELEO	CONDICIONES DE TRABAJO EN EL TÚNEL	TIPOS DE SUELO REPRESENTATIVOS
6	EXPANSIVO	Al igual que en el caso anterior, el terreno avanza lentamente hacia el túnel, pero existe un notable incremento de volumen.	Arcillas fuertemente preconsolidadas con Índice Plástico mayor de 30%; formaciones sedimentarias conteniendo capas de anhidrita.
7	DE CORRIDA COHESIVA	La remoción del soporte lateral en cualquier superficie con ángulo de talud mayor de 34° provoca una "corrida", donde el material fluye como azúcar granulada, hasta que el ángulo de talud se vuelve 34°. Si la "corrida" es precedida de un breve período de granco, se le denomina de <u>Corrida Cohesiva</u>	Corridas cohesivas ocurren en arena fina limpia y húmeda.
8	DE CORRIDA		Corridas ocurren en arena limpia mediana o gruesa, arriba del nivel freático.
9	DE EXTRUSION RAPIDA	El terreno avanza rápidamente hacia el túnel en un flujo plástico.	Arcillas y limos con alto índice de plasticidad.
10	FLUYENTE	El terreno se mueve como un líquido viscoso. Puede invadir el túnel por el techo, paredes y piso hasta llenar el espacio.	Cualquier suelo bajo el nivel freático con diámetro efectivo menor de 0.005 mm.

poco a poco se rompe y translada su responsabilidad al medio vecino, a la vez que extiende el proceso de desconfinamiento.

Los materiales calificados como "EXTRUSION LENTA" o "RAPIDA", son incapaces de soportar los nuevos esfuerzos impuestos por la oquedad, pero en vez de romperse bruscamente y salirse del sistema soportante, se plastifican progresivamente alrededor del hueco, conservando una parte de su responsabilidad aunque con un notable incremento en las deformaciones. La rapidéz con la que se provoca la plastificación depende del nivel de esfuerzos en relación a la resistencia del material y condiciona el que la extrusión sea lenta o rápida.

En los materiales "EXPANSIVOS", existe una acción directa del agua sobre la estructura interna del material, que al haber perdido su confinamiento aumenta de volumen y pierde algo de su resistencia.

Los suelos de "CORRIDA", pierden por completo su resistencia al desconfinarse, cediendo libremente a las fuerzas gravitatorias hasta alcanzar su estabilización.

Finalmente en los suelos "FLUYENTES" la acción desconfinante, sumada al flujo de agua despertado por la excavación, provocan una completa movilización del suelo afectado que busca su nuevo estado de equilibrio.

### 3.- PROPIEDADES DE LAS ARCILLAS

Las propiedades de las arcillas de mayor **significación** en lo que se refiere a túneles, son su **expansividad** al ser **aliviadas** de cargas, la **variación** de la **resistencia** al **esfuerzo** cortante con la **presión** normal y la **velocidad** de **reacción** a los **cambios** de **esfuerzos**.

Cuando la arcilla es **aliviada** de **presiones** **tiende** a **expandirse** y en **presencia** de **agua** lo **hace** **generalmente** en **alto** grado. Cuando un **túnel** es **excavado** en **estos** **materiales**, la **arcilla** de las **zonas** **próximas** al **borde** de la **excavación** **ve** **disminuída** sus **presiones** de **confinamiento** y **por** lo **tanto**, **se** **expande** **tomando** **agua** del **material** **más** **alejado** del **túnel**; **esto** **trae** **consigo** la **disminución** de la **resistencia** al **esfuerzo** cortante de la **arcilla** **próxima** a las **paredes** del **túnel**.

En **ocasiones** se **ha** **señalado** que **es** la **humedad** **prevaleciente** en **general** en el **interior** de los **túneles** la **causa** del **reblandecimiento** de la **arcilla** en **techo** y **paredes**; **esta** **afirmación** **carece** **totalmente** de **consistencia**, y **de** **hecho** una muestra de **arcilla** **extraída** de la **pared** y **dejada** **dentro** del **túnel** en **contacto** con el **medio** **ambiente**, **se** **seca** **fuertemente** en **pocos** **días**.

Cuando un túnel en arcilla no es ademado adecuadamente, el material de las paredes, piso y techo fluye lentamente y -- tiende a cerrar la excavación; se dice entonces que fluye plásticamente. Durante ese proceso y debido a la expansión que se produce simultáneamente, la resistencia de la arcilla al esfuerzo cortante disminuye hasta un mínimo, en el cual se mantiene prácticamente constante; este valor se denomina cohesión última. El tiempo que tardan en producirse los fenómenos de expansión y pérdida de resistencia, depende de la permeabilidad de la arcilla en primer lugar, y del conjunto de sus propiedades en general.

Para un túnel dado y a una profundidad dada, la velocidad de expansión aumenta rápidamente con las dimensiones de la parte del túnel no ademada, por lo que para prevenir problemas de expansión, basta llevar el ademe suficientemente cerca de la excavación.

Tan pronto como se adema y acuña convenientemente un túnel el flujo de arcilla cesa, aún cuando ésta no se haya adaptado al nuevo estado de esfuerzos producido por la excavación y por lo tanto, no se haya neutralizado la tendencia a -- fluir. Como consecuencia de esto, la presión contra los ademes aumenta aunque a razón decreciente. El tiempo durante el que tal aumento de presión ocurre, oscila entre algunas semanas y muchos meses.

#### 4. - CONSIDERACIONES EN LA EXCAVACION DE TUNELES.

Dos aspectos importantes que deben considerarse durante la excavación de túneles, son los siguientes:

- Estabilidad del frente
- Deformaciones del terreno

#### 4.1. Estabilidad del frente.

Durante la construcción de túneles en suelos las mayores dificultades y las más frecuentes se presentan al hacer la excavación. La falla o "caído" del frente acarrea siempre grandes molestias; en el mejor de los casos implica retraso en el avance de la construcción y costos adicionales para recuperar el frente caído; pero en ocasiones, no poco frecuentes involucra la pérdida de equipo y de vidas humanas. Por esto la estabilidad en el frente es un aspecto importante a considerar, sobre todo en túneles practicados en terrenos arcillosos, pues influencia los métodos constructivos a utilizar.

El problema más serio que se presenta en varias partes del mundo durante la construcción de túneles en arcillas muy blandas, es el fenómeno conocido como "extrusión", que se presenta haciendo que el material pierda de pronto su resistencia, volviéndose una masa semilíquida capaz de recorrer decenas de metros hasta llenar la oquedad invadida, provocando en la superficie una depresión cuyo volumen equivale sensiblemente al del material extruído.

Según el criterio de Broms y Bennemark, en la excavación de un túnel en arcillas, la extrusión se presenta cuando el peso propio del terreno a nivel del centro del túnel, es mayor que 6 veces la cohesión de la arcilla en prueba no drenada:  $\gamma H > 6C$ .

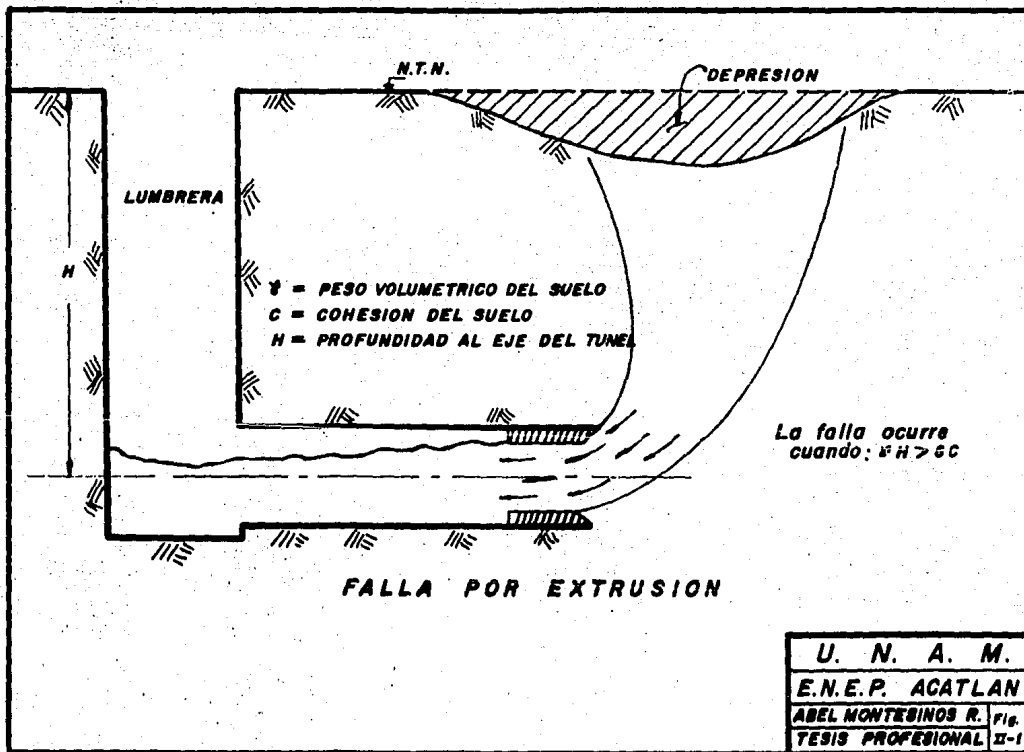
En la figura II-1 se muestra un esquema de la falla por extrusión.

Como generalmente no se pueden cambiar las propiedades del suelo, peso y cohesión, así como la profundidad de un túnel para un proyecto dado, el fenómeno de extrusión estará siempre latente en la excavación de túneles; sin embargo puede evitarse si se aplica una presión estabilizadora ( $P_e$ ), que contrarreste el efecto del peso propio del terreno, logrando así que la diferencia entre éste y la contrapresión sea siempre menor que 6 veces la cohesión de la arcilla:

$$\gamma H - P_e < 6C \quad (1)$$

#### 4.2. Deformación del terreno.

Como en la mayoría de los problemas de mecánica de suelos, no solo es necesario evitar la falla del suelo para construir el túnel (estabilidad del frente), sino también - - -





reducir a un mínimo las deformaciones del terreno producidas por el procedimiento constructivo. De ahí que sea de suma importancia verificar sistemáticamente que el volumen excavado sea igual al requerido para alojar el túnel. No obstante el cumplimiento de este requisito, es inevitable que ocurran asentamientos y desplazamientos del suelo por alteración del estado de esfuerzos y el flujo del material a los huecos que va dejando el escudo u otro dispositivo de ataque.

Debe tenerse en cuenta que por el trazo del túnel y las variaciones propias del medio que éste atraviesa, se requiere un buen número de secciones en las que se midan asentamientos y desplazamientos horizontales, en la superficie y a diferentes profundidades durante el avance de la excavación, la instalación del ademe temporal y el colado del revestimiento definitivo.

Aún cuando no haya amenaza de un colapso, derrumbe o cierre de la excavación, puede requerirse el revestimiento como una forma para mantener las deformaciones de la excavación dentro de límites tolerables. Deformaciones muy grandes pueden distorsionar en exceso la sección estructural, producir cambios en la superficie del terreno ó daños a estructuras próximas; además, las grandes distorsiones suelen producir reducciones indeseables en la resistencia al esfuerzo constante de los suelos.

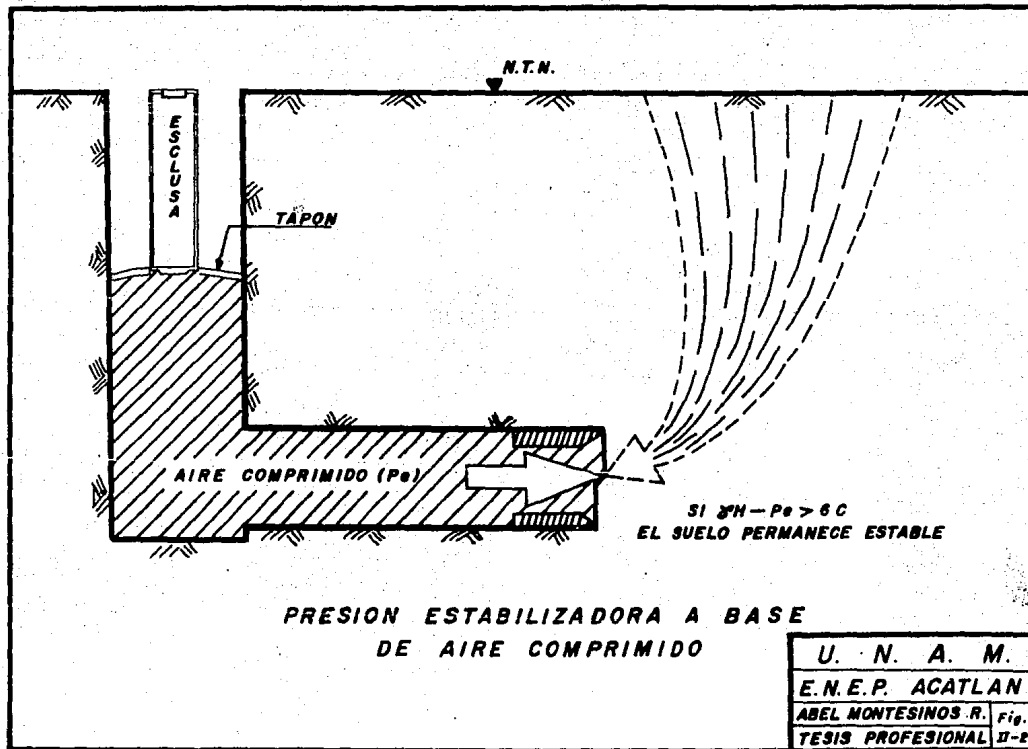
## 5. ELECCION DEL PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO.

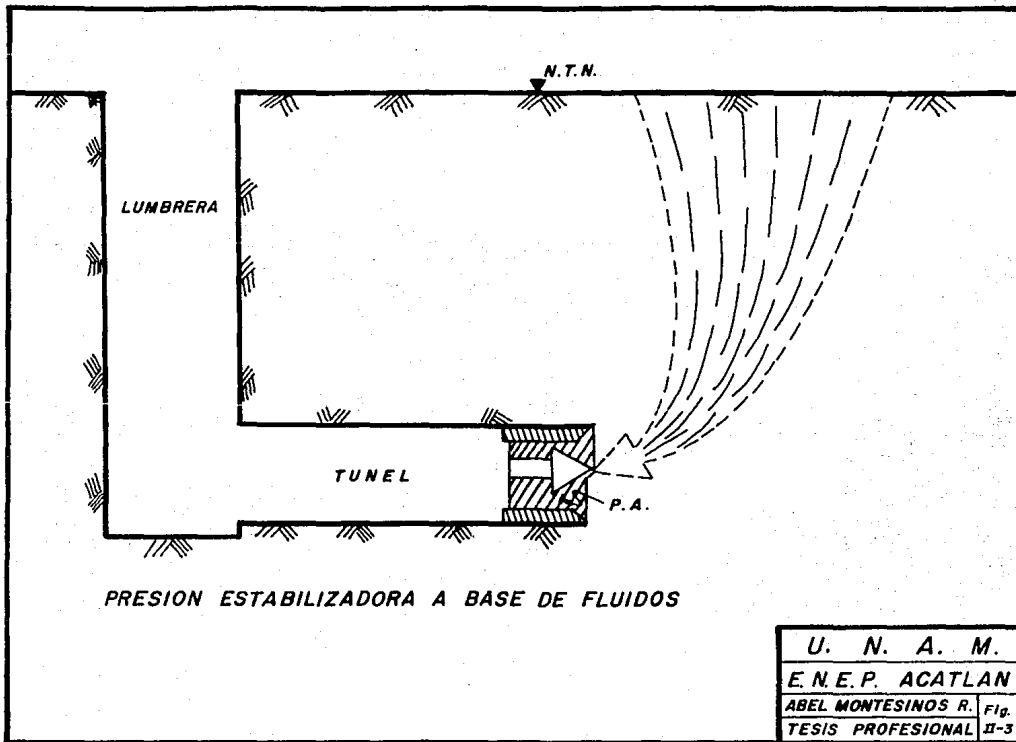
Existe un gran número de métodos tradicionales para el tuelleo en arenas y gravas. Los escudos se han venido utilizando con este propósito; sin embargo, si un túnel va a ser construido bajo el nivel freático, en un suelo de mala calidad, generalmente es necesario el uso de medios adicionales para prevenir el colapso del frente del túnel

Como se mencionó anteriormente, para evitar la falla del frente es necesario aplicar una presión estabilizadora que contrarreste el efecto del peso propio del terreno (expresión 1).

Con estas bases, en la actualidad dicha presión estabilizadora puede lograrse con dos métodos: el primero se logra con el uso de aire comprimido, en combinación con escudos de frente abierto (denominado "proceso pleno"), que a manera de fuerza invisible sostiene el frente, permitiendo su excavación (Figura II-2). El otro método consiste en aplicar la contrapresión requerida solo en el frente, dejando el resto del túnel y, por ende, a los trabajadores, a la presión atmosférica normal. Surge entonces el principio de la "Estabilización frontal a base de un fluido a presión" (Figura II-3)

Existen otras formas de obtener la estabilidad del frente, como tratar con inyecciones de cemento ó de productos





PRESION ESTABILIZADORA A BASE DE FLUIDOS

U. N. A. M.	
E. N. E. P. ACATLAN	
ABEL MONTESINOS R.	Fig.
TESIS PROFESIONAL	II-3

químicos el terreno a través del cual se excavará el túnel. Bajo ciertas circunstancias, es posible también estabilizar el suelo por congelamiento. Todos estos métodos tienen la desventaja de ser lentos y costosos. Incluso la utilización de aire comprimido puede tener efectos adversos sobre la salud de los trabajadores dentro del túnel cuando la presión requerida exceda de  $1.5 \text{ Kg/cm}^2$ .

De acuerdo a lo anterior, podemos ver que en la actualidad, el método apropiado para estabilizar el frente de un túnel construido en suelos arcillosos saturados, es la utilización de escudos con presión de fluidos al frente.

## C A P I T U L O   I I I

### DESCRIPCION DEL METODO DEL ESCUDO CON PRESION DE FLUIDOS AL FRENTE.

#### 1.- ANTECEDENTES

Durante la excavación de un túnel en suelo compacto, la estabilidad puede lograrse de una manera relativamente sencilla, por el contrario, en suelos blandos, la misma se logra aplicando técnicas más elaboradas.

En este último tipo de suelos la estabilidad del frente no es fácil de obtener, ya que, excavar y soportar el frente son actividades que se contraponen. Es decir, se requiere liberar del soporte natural al frente para poder avanzar en la excavación del túnel, lo cual impone una condición de inestabilidad del mismo, pudiendo llegar al extremo de producir una falla por extrusión.

Para resolver esta aparente contradicción, fué necesario desarrollar métodos que estabilizaran el frente sin entorpecer las labores de excavación, lo cual se logró aplicándole una contrapresión, dejando el resto del túnel sujeto a la presión atmosférica normal.

Surge entonces el principio de la "estabilización frontal a base de un fluido a presión", cuyas metas fundamentales son las siguientes.

- a) Tener la capacidad de excavar suelos inestables
- b) Que no altere la posición de nivel freático
- c) Que se permita al personal trabajar a la presión atmosférica normal.
- d) Que se provoquen asentamientos mínimos en superficie.

En base a una investigación a nivel mundial, se concluyó - que todo lo anterior se logra mediante el uso de un escudo con frente presurizado por medio de lodos (SLURRY SHIELD), el cual, como herramienta de tuneleo, ha sido posiblemente el avance más notable en los métodos de excavación de túneles en suelos blandos durante las últimas décadas.

El empleo de este tipo de escudos es una tecnología relativamente nueva comparada con los escudos convencionales ó - el uso de aire comprimido. Fué estudiado y desarrollado en varios países que se encontraron con graves problemas al - excavar túneles en suelos blandos con grandes contenidos - de agua. La técnica fué ideada en Inglaterra en donde fué desarrollada y patentada en 1964.

A pesar de haber sido en Inglaterra en donde se ideó la -- técnica, los mayores logros en cuanto al método fueron alcanzados en Japón, debido a que compañías constructoras -- han desarrollado sus propios sistemas de tuneleo usando -- flúidos a presión y dichos estudios han culminado en la actualidad, con la aplicación de sistemas ingeniosos que per

miten controlar en las zonas urbanas los asentamientos del terreno.

Este procedimiento es recomendable a utilizarse en aquellos tipos de suelos donde predominan las arenas, limos o arcillas totalmente saturadas.

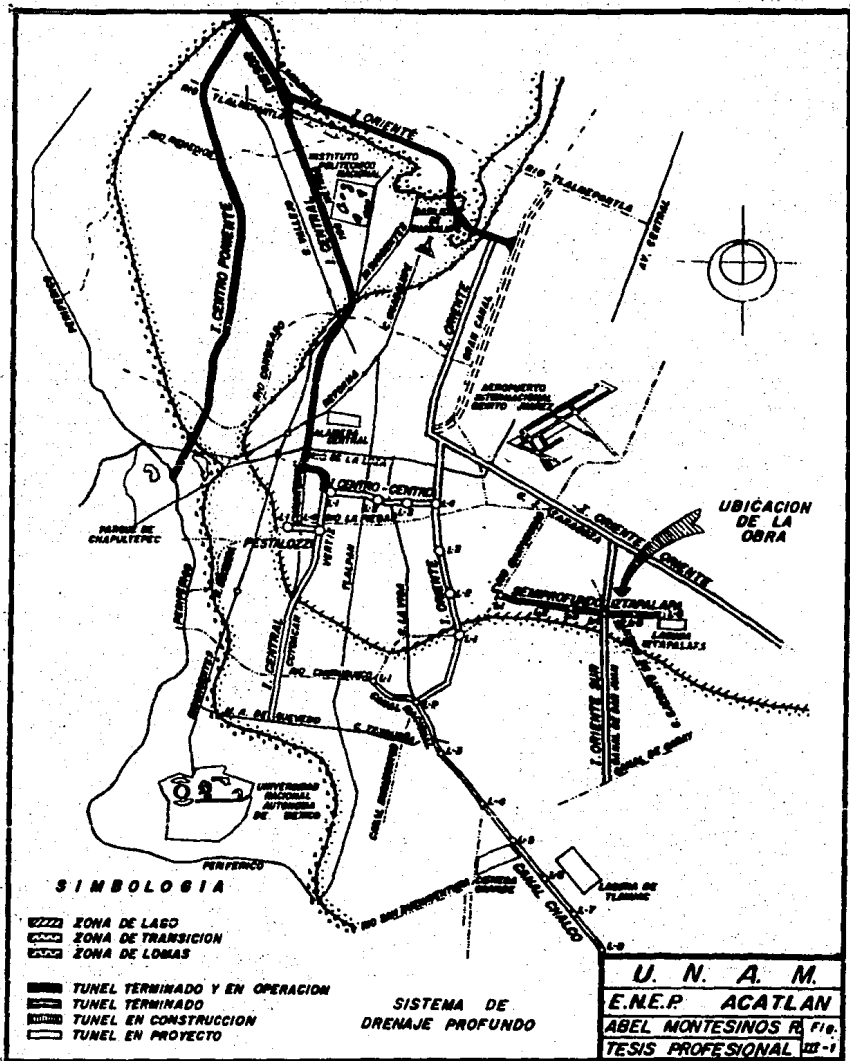
Debido al tipo de suelo tan desfavorable con que cuenta la Ciudad de México, la construcción de un túnel para el Drenaje Profundo, denominado "Colector Semiprofundo Iztapalapa", ofreció la oportunidad de poner en funcionamiento por primera vez en América Latina, un escudo cortador con presión de fluidos al frente.

## 2.- UBICACION DEL COLECTOR SEMIPROFUNDO IZTAPALAPA.

Este Colector forma parte del plan maestro del Drenaje Profundo del Distrito Federal y se encuentra ubicado en la zona Oriente-Sur de la Ciudad de México, la cual, en la actualidad, es una de las áreas de la Ciudad más desprotegidas, en cuanto a la disponibilidad de Drenaje Profundo. La figura III-1 nos presenta la ubicación del Colector dentro de la red del Sistema de Drenaje Profundo.

La obra consta de un conducto subterráneo de 5,340 m. de longitud y 3.20 m. de diámetro terminado, ubicándose a una





**SIMBOLOGIA**

- ~~~~~ ZONA DE LAGO
- ZONA DE TRANSICION
- ZONA DE LOMAS
- TUNEL TERMINADO Y EN OPERACION
- TUNEL TERMINADO
- TUNEL EN CONSTRUCCION
- TUNEL EN PROYECTO

**SISTEMA DE DRENAJE PROFUNDO**

**U. N. A. M.**  
**E. N. E. P. ACATLAN**  
**ABEL MONTESINOS R. FIG.**  
**TESIS PROFESIONAL III-1**

UBICACION DE LA OBRA

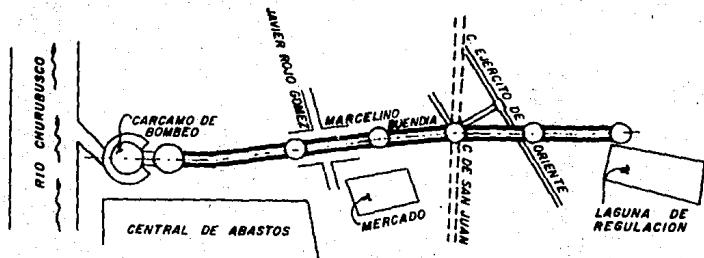
profundidad promedio de 12.50 m. a su eje y de seis lumbreras con diámetros entre 15.00 m. y 9.00 m.

El objetivo principal de la obra a corto plazo, es el de conducir las aguas negras y pluviales que se acumulan en la laguna de regulación de Iztapalapa, ubicada al sur del Peñón del Marqués, incorporando además en su recorrido las aguas de los Colectores Indeco, Ejército de Oriente, Canal de San Juan y Central de Abastos, para desfogarlas mediante bombeo al Río Churubusco.

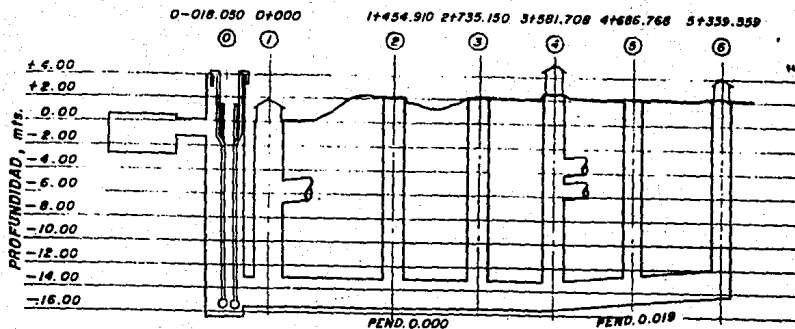
A largo plazo, cuando se prolonguen los interceptores - Oriente, Oriente-Oriente y Oriente-Sur, las aguas conducidas por este Colector serán captadas en la Lumbrera No. 4, con lo que se invertirá el flujo entre las Lumbreras 1 y 4 logrando que todo el sistema opere por gravedad, abatiendo costos de operación al eliminar la planta de bombeo en el Río Churubusco. La figura III-2 muestra la planta y perfil del proyecto y sus datos generales.

### 2.1. Estratigrafía del subsuelo

El túnel de Iztapalapa se encuentra ubicado en la zona lacustre del Valle de México, caracterizada por la presencia de formaciones arcillosas blandas con alto contenido de humedad y baja resistencia al esfuerzo cortante.



PLANTA



SECCION LONGITUDINAL

DATOS DE PROYECTO

LONGITUD TOTAL DEL TUNEL	5339.56 m.
PENDIENTE DEL TUNEL DE L-4 A L-6	0.019 %
NUMERO DE LUMBRERAS	7
Ø EXTERIOR DEL ESCUDO CORTADOR	4.0 m.
Ø INTERIOR DEL REVESTIMIENTO PRIMARIO	3.50 m.
Ø INTERIOR DEL TUNEL TERMINADO	3.20 m.

NOTA:

--- INTERCEPTOR ORIENTE SUR (A FUTURO)

COLECTOR SEMIPROFUNDO IZTAPALAPA

U. N. A. M.	
E.N.E.P	ACATLAN
ABEL MONTESINOS R.	Fig
TESIS PROFESIONAL	III-2

Para conocer las características índice y mecánicas del suelo, se efectuaron a lo largo del trazo del Colector 5 - sondeos mixtos continuos, dos hasta 40.0 m. de profundidad, tres hasta 15.0 m. y 5 con cono eléctrico hasta 15.0 m. de profundidad.

La estratigrafía representativa de la zona, obtenida por dichos sondeos, se resume en la figura III-3.

### 3.- DESCRIPCION DEL ESCUDO CORTADOR

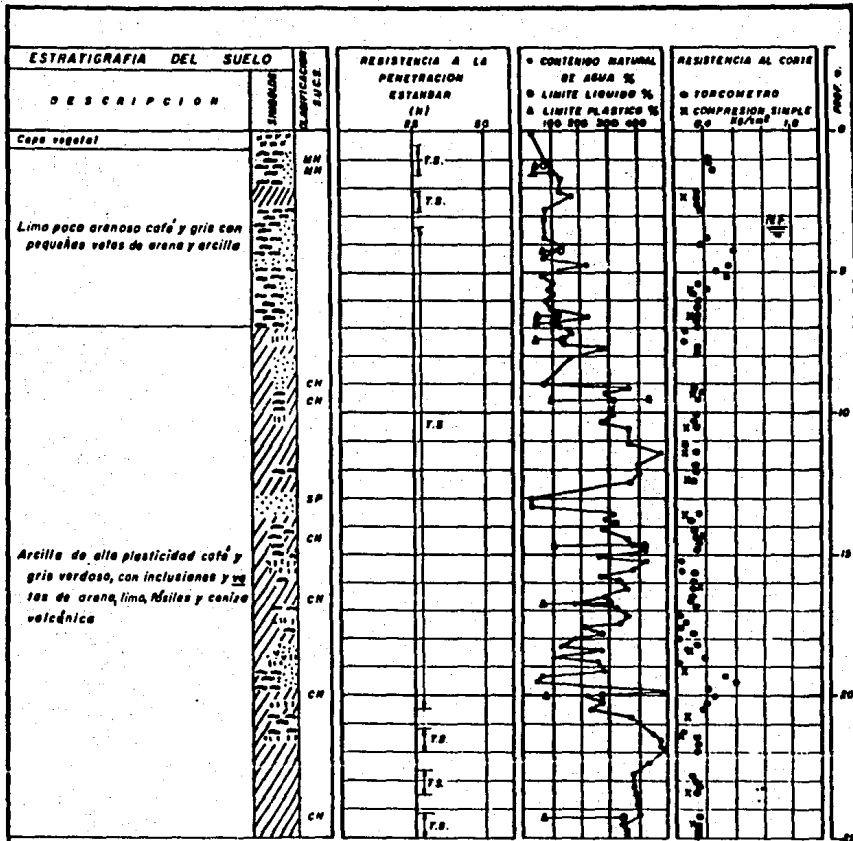
Los componentes principales de este equipo son los siguientes:

#### a) Cuerpo del escudo







Es un cilindro de 4.00 m. de diámetro exterior y 6.30 m. de longitud. Constituye el elemento estructural básico al que todos los demás elementos se le adicionan. En su interior se alojan los principales elementos que componen el equipo: cabeza cortadora, cámara de mezclado, transmisión de la cabeza cortadora, gatos hidráulicos de empuje y anillo erector de dovelas.

#### b) Faldón del escudo

Es el lugar donde se realizan las maniobras para la colocación

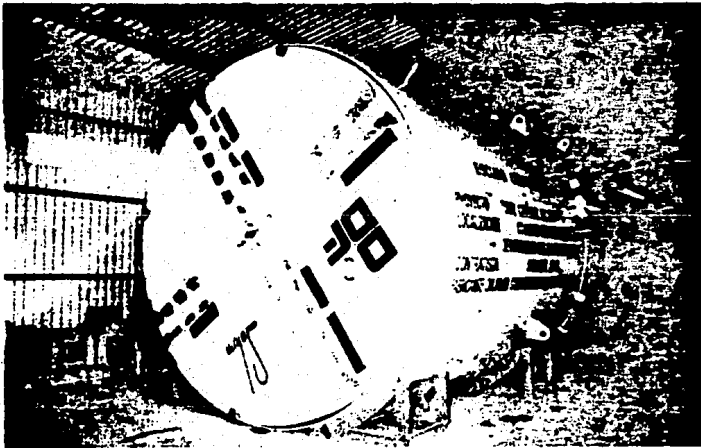


**SIMBOLOGIA**

-  VEGETAL
-  ARENA
-  LIMO
-  FOSILES
-  ARCILLA
-  VIDRIO VOLCANICO

**ESTRATIGRAFIA DEL SUELO**

**U. N. A. M.**  
**E. N. E. P. ACATLAN**  
**ABEL MONTESINOS R. Fig.**  
**TESIS PROFESIONAL III-3**



ESCUDO CORTADOR

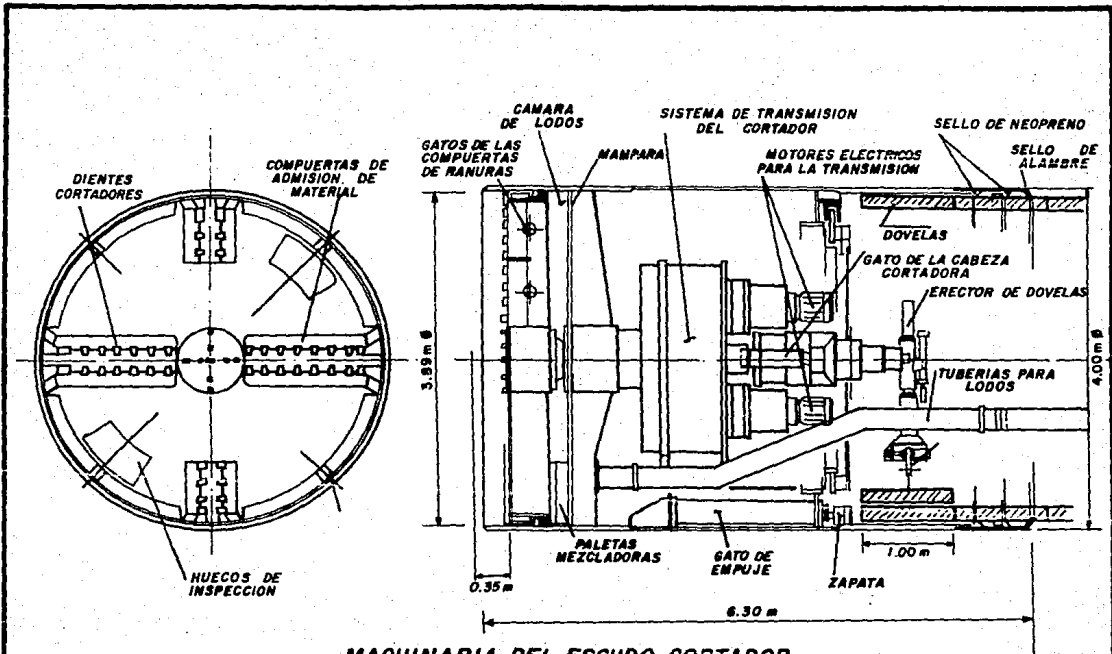
ción del revestimiento primario formado por dovelas de --  
concreto precoladas.

En la parte posterior del escudo se coloca un triple se--  
llo, dos de hule natural y uno de cerdas de alambre, se -  
colocan en todo el perímetro interior del faldón y perma--  
necen en contacto con la superficie externa de las dove--  
las. El objetivo de este triple sello es el de evitar que  
se pierda lodo fluido del frente de excavación, así como  
que entre agua del subsuelo, material de inyección o el -  
propio suelo, haciendo posible realizar la inyección de -  
contacto entre dovelas y terreno natural, conforme avanza  
la excavación.

La figura III-4 muestra el escudo y los equipos que se --  
alojan dentro de él.

### c) Cabeza cortadora

Es un disco metálico, situado al frente del escudo que --  
tiene dos funciones principales; la primera, dar soporte  
mecánico al suelo para mantenerlo estable, lográndose és--  
to con la ayuda de un gato cuya capacidad es de 200 ton.  
y tiene una carrera de 35 cm., la segunda, es la de efec--  
tuar el corte o excavación propiamente dicha, para lo - -  
cual cuenta con 12 ranuras provistas de dientes cortado--  
res, estratégicamente ubicadas que pueden ser abiertas a  
voluntad.



DIENTES  
CORTADORES

COMPUERTAS DE  
ADMISION DE  
MATERIAL

HUECOS DE  
INSPECCION

CAMARA  
DE Lodos  
GATOS DE LAS  
COMPUERTAS  
DE RANURAS

MAMPARA

SISTEMA DE TRANSMISION  
DEL CORTADOR

MOTORES ELECTRICOS  
PARA LA TRANSMISION

SELLO DE NEOPRENO  
SELLO DE  
ALAMBRE

DOVELAS

GATO DE LA CABEZA  
CORTADORA

ERECTOR DE DOVELAS

TUBERIAS PARA  
Lodos

PALETAS  
MEZCLADORAS

GATO DE  
EMPUJE

ZAPATA

3.89 m

0.35 m

6.30 m

1.00 m

4.00 m

**MAQUINARIA DEL ESCUDO CORTADOR**

U. N. A. M.	
E.N.E.P. ACATLAN	
ABEL MONTESINOS R. FIG.	
TESIS PROFESIONAL	III-4



Para poder efectuar el corte, la transmisión le proporciona un torque máximo de 70 ton-m, pudiendo hacerla girar - en ambos sentidos a razón de 1.1 ó 1.6 r.p.m.

En el frente de la cabeza se tienen unas compuertas, con las que se regula la entrada del material cortado a la cámara de mezclado, de acuerdo a la velocidad de avance de la excavación. Esto evita la posibilidad de flujo incontrolado del material a través de las ranuras, lo cual podría ocasionar un colapso del frente.

#### d) Cámara de mezclado

Está limitada por la cabeza cortadora y una mampara metálica en cuyo interior se alojan dos agitadores que giran hasta 50 r.p.m., haciendo que el suelo excavado se integre al lodo suministrado. Para auxiliar a los agitadores en esta actividad, el cortador cuenta con paletas metálicas en su parte posterior.

#### e) Transmisión

Su función es la de transmitir el torque al cortador, para lo cual cuenta con cuatro motores eléctricos de 30 KW (40 H.P.) cada uno. Estos motores son reversibles a fin de auxiliar la corrección de giros en el escudo.

f) Gatos de empuje

Son los encargados de regular el avance al momento de la excavación, apoyándose en las dovelas correspondientes - al último anillo colocado. Son 16 gatos en total con capacidad de 100 ton. cada uno y 1.15 m. de carrera, distribuidos en todo el perímetro del escudo a intervalos iguales.

g) Anillo erector

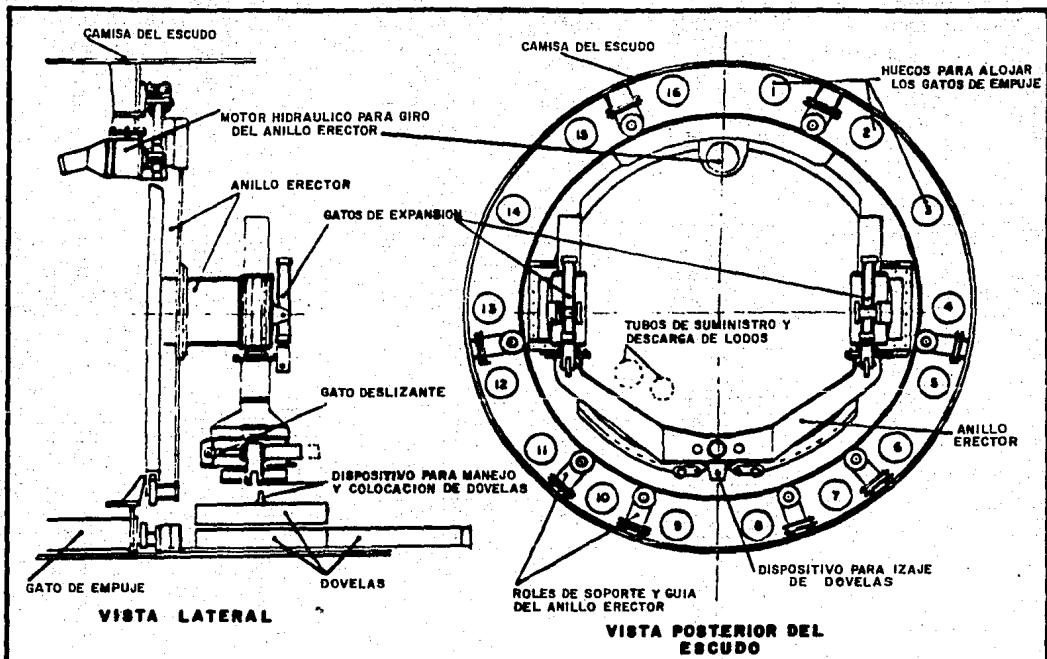
Este dispositivo se utiliza para el montaje de las dovelas y tiene la posibilidad de acoplar, deslizar, girar y colocar las dovelas en su posición final.

En la figura III-5 se muestra el anillo erector y la distribución de los gatos de empuje.

h) Sistema de lodos

Este sistema proporciona la presión continua necesaria - para estabilizar el frente, además de retirar el suelo - cortado de la cámara de mezclado a suficiente velocidad, para que el escudo cortador alcance su rendimiento de diseño.

El flujo del lodo de suministro se realiza a través de -



**ANILLO ERECTOR Y DISTRIBUCION DE LOS GATOS DE EMPUJE**

U. N. A. M.	
E. N. E. P. ACATLAN	
ABEL MONTESINOS R.	FIG.
TESIS PROFESIONAL	III-5

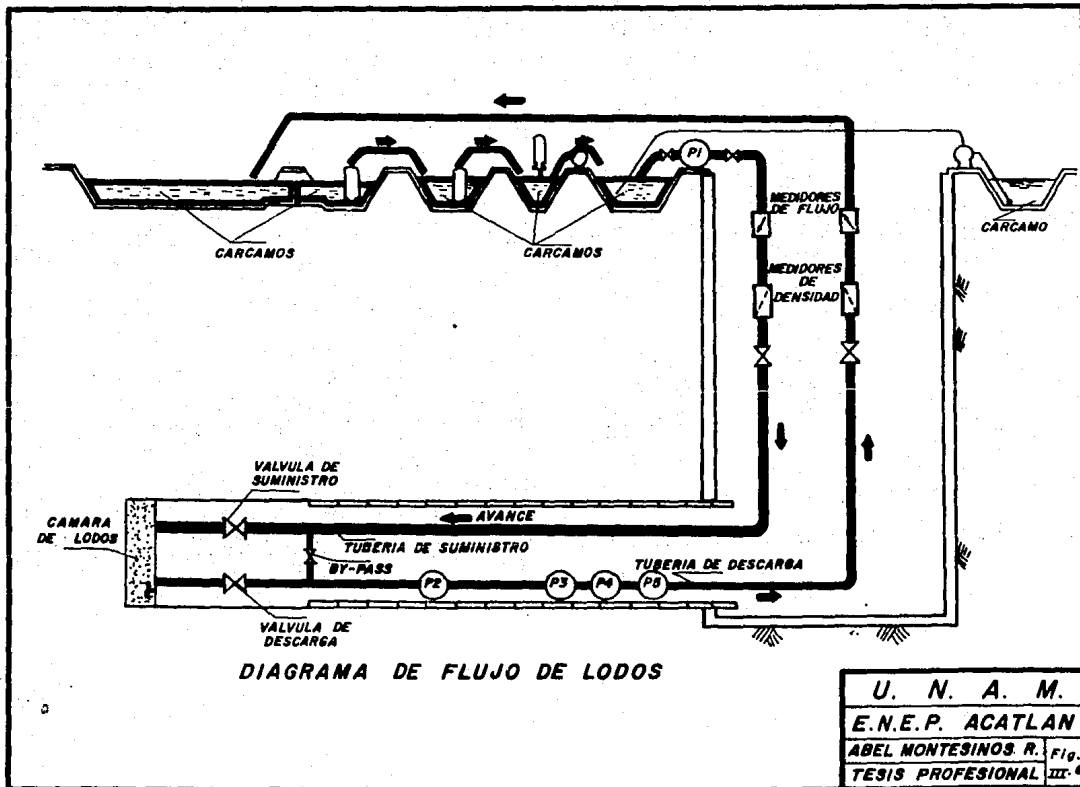
una tubería de 8" de diámetro y vá del cárcamo de lodos - (en superficie) a la cámara de presión en el frente, impulsado por la bomba P1, de 45 KW, velocidad variable y gastos máximos de 3.4 m<sup>3</sup>/min.. La descarga del lodo se hace a través de una tubería de 6" de diámetro, conectada a la cámara de mezclado en el frente, siendo impulsado por la bomba P2, de 75 KW, velocidad variable y gasto máximo de 3.4 m<sup>3</sup>/min.. Para auxiliar en el traspaleo del lodo a la bomba P2, se utilizan 3 bombas intermedias (P3, P4 y P5), de 45 KW con velocidad constante y gasto máximo de 3.4 m<sup>3</sup>/min.

El lodo de baja densidad puede recircular por el frente o ser desviado por una ruta alterna (by-pass) que no pasa por la cámara de lodos. La ruta alterna se utiliza siempre que la cabeza no se encuentre excavando y se instala para el arranque inicial del sistema de lodos.

Lo anteriormente expuesto se puede observar en forma esquemática en la figura III-6.

#### 4.- TREN DE EQUIPO

En él se encuentran alojados todos los equipos necesarios para completar las actividades del sistema de tuneleo. Es tá construido con marcos y plataformas metálicas y se desplaza sobre rieles, jalado por el empuje de los gatos hi-



dráulicos del escudo, ya que va unido a éste por medio de cables de acero.

Los componentes del tren de equipo (figura III-7) son los siguientes:

a) Cabina del operador

Está ubicada inmediatamente atrás del escudo, en el interior se cuenta con un tablero en el que se tienen medidores, indicadores e interruptores que le permiten controlar algunos sistemas del escudo, los cuales son los siguientes:

- Gatos de empuje del escudo
- Gato de la cabeza cortadora
- Gatos de las compuertas de las ranuras
- Velocidad de rotación de la cabeza cortadora
- Agitadores de la cámara de mezclado
- Erector de dovelas
- Unidades hidráulicas

b) Unidades hidráulicas

Son dos unidades hidráulicas que van alojadas en el tren de equipo, la primera de ellas se encuentra en el primer



carro y está formada por dos bombas, una de las cuales proporciona potencia a los gatos de empuje del escudo y al -- erector de dovelas; la otra bomba, proporciona potencia al gato de empuje de la cabeza cortadora y a los gatos de las compuertas de ranuras.

La unidad hidráulica No. 2, se encuentra en el segundo carro y proporciona potencia a los motores que permiten el - funcionamiento de los agitadores dentro de la cámara presu rizada.

#### c) Unidad neumática

Forma parte del segundo carro del tren de equipo y se controla desde la superficie, en la cabina central de control. Esta unidad permite abrir y cerrar las válvulas del sistema de lodos.

#### d) Gabinete de equipo eléctrico

Se encarga de la distribución eléctrica a todos los sistemas que requieran de ella para su funcionamiento. Se encuentra ubicado en el tercer carro del tren de equipo.

#### e) Gabinete transmisor



Se localiza en el mismo carro que el gabinete eléctrico y está compuesto de una serie de circuitos electrónicos que permiten recibir, procesar y enviar a la cabina central - de control una información bastante completa de los equipos que intervienen en el proceso, permitiendo un mejor - control y que los equipos realicen sus funciones en forma coordinada.

f) Bomba de descarga

Se ubica en el cuarto carro del tren de equipo, ahí mismo se encuentra un panel para su control, que puede ser local<sub>mente</sub> o desde la cabina central.

g) Transformador

Se encuentra ubicado en el quinto carro del tren de equipo y se encarga de alimentar a los motores que hacen girar la cabeza cortadora, los motores de las bombas hidráulicas, - los circuitos de control, los circuitos electrónicos de -- control y la iluminación en el escudo y paneles.

h) Carro para cables

En este carro se encuentran los rollos de cables del sistema eléctrico los cuales se van colocando conforme avanza - el escudo, en bastidores fijados en las paredes del túnel.

### i) Tuberías telescópicas

Ocupan el último sitio del tren de equipo y es el lugar en donde se realiza la operación de prolongación de tuberías - de suministro y descarga de lodos.

### 5.- PLANTA DE TRATAMIENTO DE LODOS

Sirve para separar la mezcla de material excavado-lodo estabilizador. El proceso en general de una planta, está com puesto de tres etapas: la separación de gravas, el cribado de arenas y la separación de partículas finas en suspen--- sión.

Como la grava se sedimenta rápidamente, la mezcla de lodos se pasa por una malla vibratoria primaria, en donde se separan las gravas y pequeños boleos, enviándose por medio - de bandas transportadoras a una tolva de sólidos. La mez-- cla restante es un lodo fluido que se deposita en un tan-- que de donde se bombea a un clasificador rotatorio ó ciclón, el cual con la ayuda de una malla secundaria separa las -- arenas, para mandarlas por medio de la banda transportado-- ra a la tolva de sólidos.

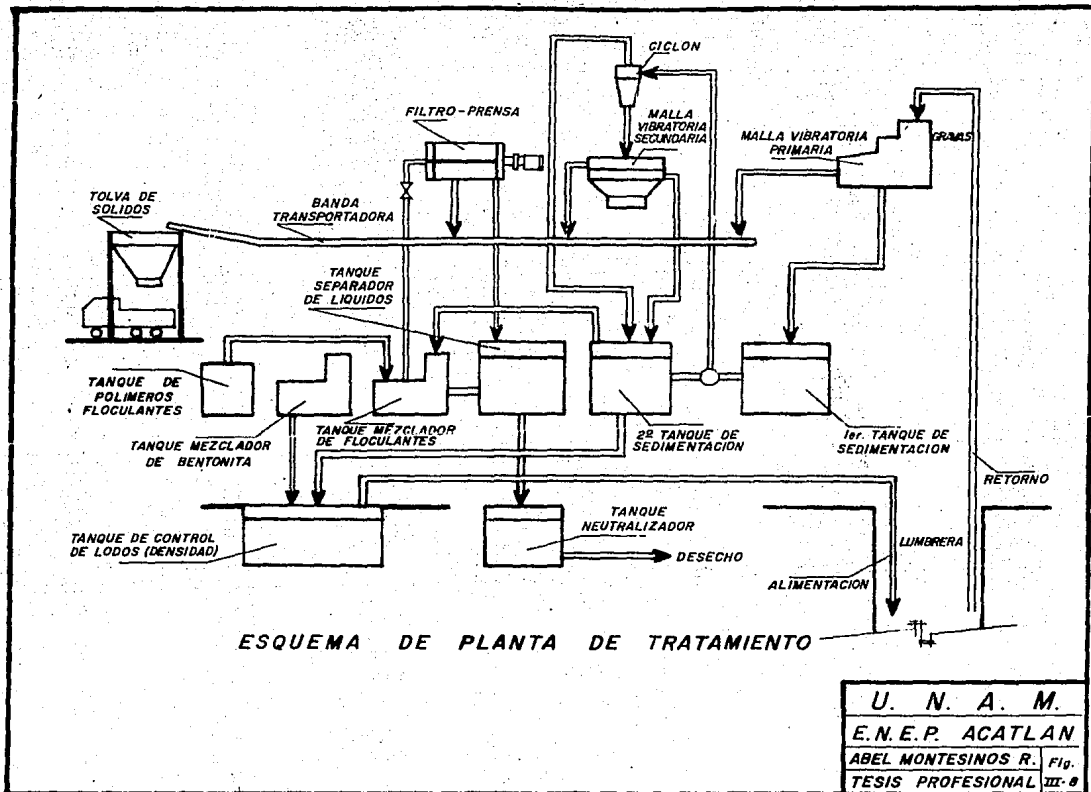
El lodo fluido de partículas finas sobrante es conducido a un segundo tanque, en el que se separa el lodo estabiliza-- dor de las partículas finas en suspensión de la mezcla. --

De aquí se envía el lodo estabilizador al tanque de control de lodos en donde se deja en condiciones óptimas para volverlo a la circulación hacia el frente. El lodo de partículas finas al tener lenta velocidad de asentamiento, es enviado a un tanque mezclador de aditivos coagulantes para acelerar dicho asentamiento, de aquí puede ser sometido a un proceso de desagüe mediante la utilización de máquinas como: filtros prensa, centrífugas, filtros de tambor, etc.

El esquema de una planta de tratamiento se aprecia en la figura III-8.

En el "Colector Semiprofundo Iztapalapa", no se utilizan todos los equipos componentes de una planta de tratamiento como la que se acaba de describir; el tratamiento que se le dá a los lodos durante la excavación de este túnel es el siguiente: para formar el lodo de suministro que mantiene presurizado el frente, se cuenta con la captación de agua tratada almacenada en un cárcamo expresamente construido para ese fin y una cantidad de lodo que proviene de la recirculación de lodos. En este caso no fué necesaria para la preparación del lodo de suministro, la utilización de bentonita.

El tratamiento del lodo que se extrae del frente de la excavación, correspondiente a la mezcla del lodo de suministro con el producto de excavación, consiste básicamente en un proceso de sedimentación por gravedad y la utilización de -



ESQUEMA DE PLANTA DE TRATAMIENTO

U. N. A. M.
E. N. E. P. ACATLAN
ABEL MONTESINOS R. Fig.
TESIS PROFESIONAL III-8

una desarenadora CAVIEM. La planta en general está integrada con los siguientes componentes.

a) Cárcamo de deshecho. - Lugar en donde se recibe el lodo proveniente del frente de excavación y en el que precisamente se inicia la sedimentación de los grumos de arcilla que han sido "acarreados" por el lodo de suministro.

b) Cárcamo de sedimentación. - Sitio en el cual continúa el proceso de sedimentación de la arcilla en suspensión y en el que se toma parte del lodo para ser enviado a la desarenadora.

c) Desarenadora. - Equipo con el que por medio de centrifugación (hidrociclones) se separa la arena que se ha incorporado en el frente de excavación.

d) Cárcamo de tratamiento. - A este cárcamo pasa el lodo -- proveniente del cárcamo de deshecho y que no fué sometido al proceso de desarenado. Este lodo se utiliza para acondicionar nuevamente el lodo de suministro.

e) Cárcamo de ajuste. - Una vez tratado el lodo de descarga (sedimentación y desarenado) es necesario reducir aún más su densidad, lo cual se logra adicionándole agua tratada - al lodo que llega a este cárcamo.

f) Cárcamo de agua tratada. - Aquí se almacena el agua que se utiliza para controlar la densidad del lodo de suministro.

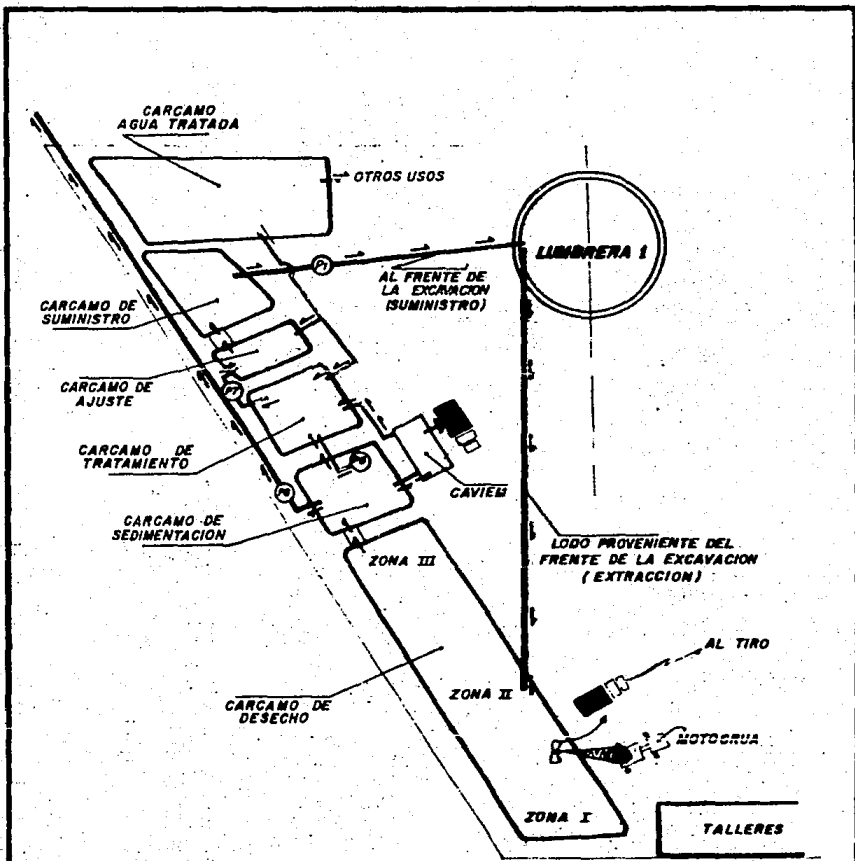
g) Cárcamo de suministro. - Cuando el lodo que se encuentra en el cárcamo de ajuste alcanza la densidad de diseño, pasa al cárcamo de suministro para ser enviado nuevamente al frente de excavación.

El sistema de circulación y tratamiento de lodos, así como la distribución de los cárcamos se observan en la figura III-9.

## 6.- SISTEMA DE CONTROL

Está constituido por una cabina central que se encuentra en superficie y en este lugar se registran todas y cada una de las variables del sistema de circulación de lodos y de las bombas de la planta de tratamiento, recibiendo adicionalmente información de los demás sistemas ubicados en el tren de equipo y del mismo escudo.

En la cabina central se tiene una consola en la que se encuentra un tablero gráfico (figura III-10), en el que se representan esquemáticamente los elementos importantes --



**SISTEMA DE TRATAMIENTO Y CIRCULACION DE LODOS**

U. N. A. M.	
E.N.E.P. ACATLAN	
ABEL MONTESINOS R.	Fig.
TESIS PROFESIONAL III-9	

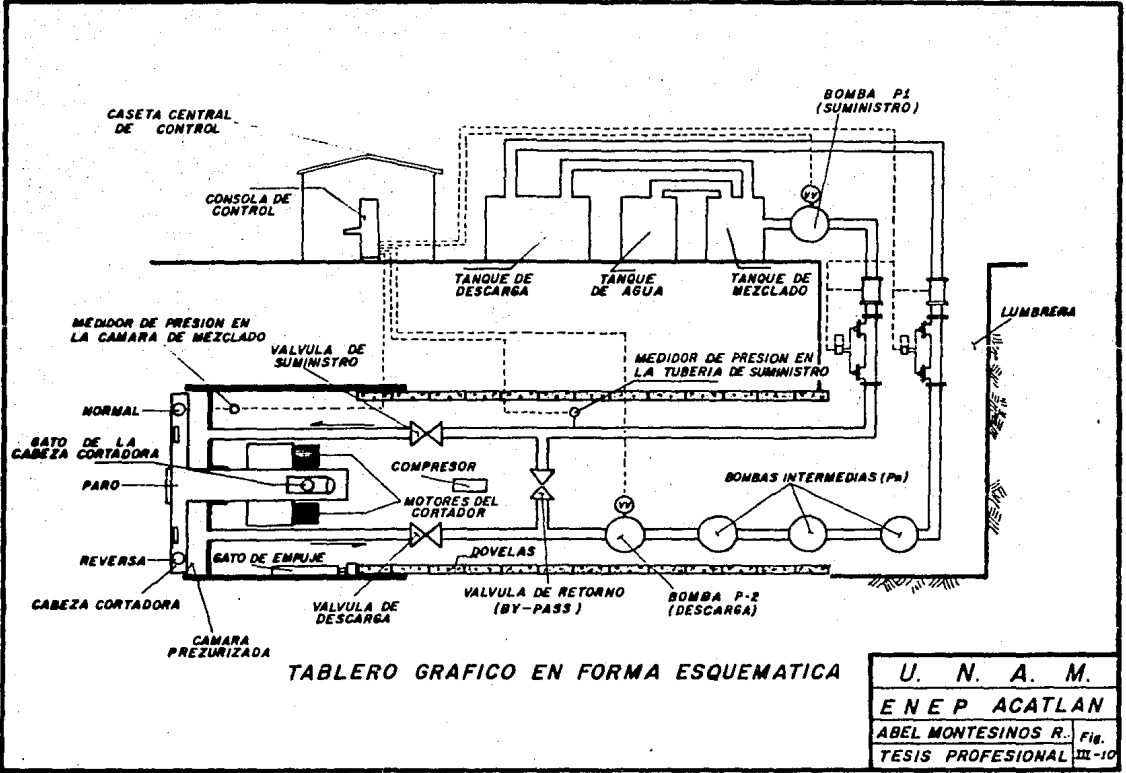


CARCAMOS



RETIRO DE LODO





TABLERO GRAFICO EN FORMA ESQUEMATICA

U. N. A. M.
ENEP ACATLAN
ABEL MONTESINOS R. Fig.
TESIS PROFESIONAL III-10

que intervienen en el funcionamiento del escudo y en el sistema de circulación de lodos.

Para poder describir las funciones de la consola central de control, la dividiremos en la forma siguiente:

a) Información sobre el funcionamiento del escudo, dada por:

- Velocidad de rotación de la cabeza cortadora
- Velocidad de avance del escudo
- Presión y carrera de los gatos de empuje
- Presión del gato de la cabeza cortadora
- Presión y carrera de los gatos de las compuertas de admisión de material a la cámara de --  
mezclado.

Durante el avance, el operador del escudo y el de la consola verifican vía telefónica, la información anterior.

b) Información de la circulación de lodos, contemplando lo siguiente:

- Densidad del lodo de suministro y de descarga
- Presión del lodo de suministro

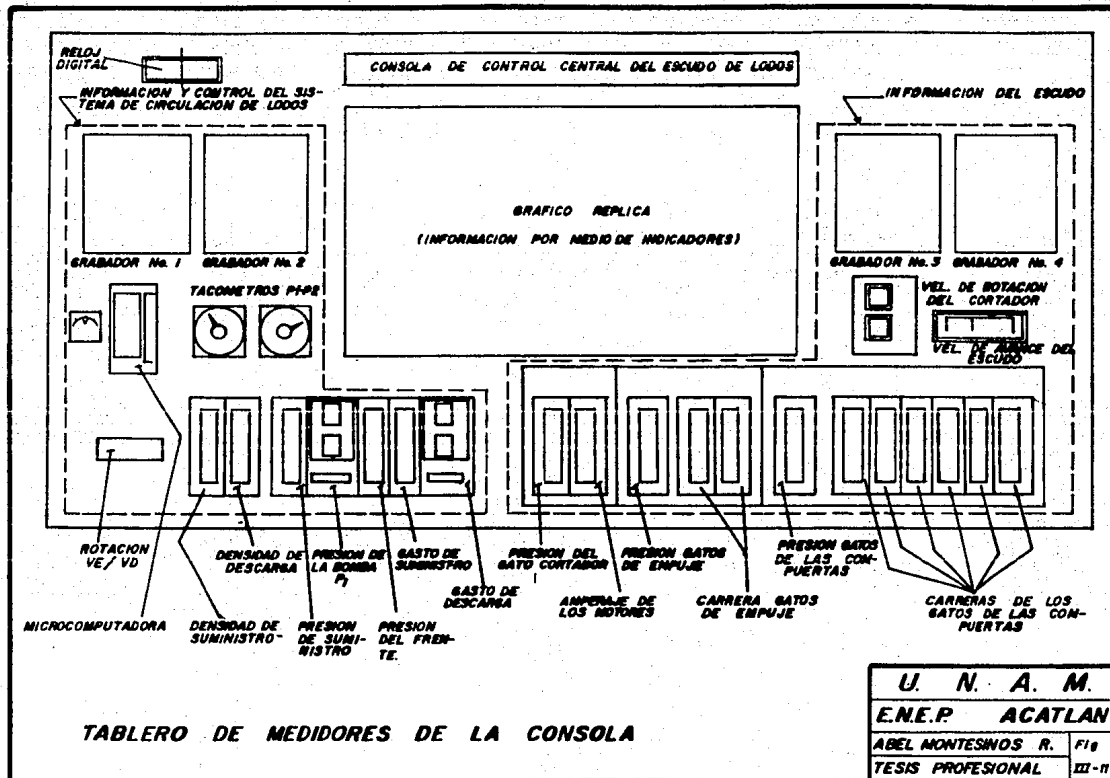
- Presión de la bomba de suministro
- Presión en la cámara de mezclado
- Gasto del lodo de suministro
- Gasto de la bomba para lodo de descarga

### c) Control de la circulación de lodos

Es muy importante observar constantemente en los indicadores respectivos, que el volumen de alimentación y descarga, la densidad del lodo, así como la presión del mismo sean los adecuados para evitar fallas en el frente. De acuerdo a la información recibida acerca del sistema de lodos y si existe alguna diferencia con respecto a los datos de proyecto, se puede controlar con una serie de botones y perillas que mediante sistemas eléctricos y electrónicos, mandan señales a las bombas y válvulas del equipo, permitiendo controlar lo siguiente:

- El encendido, velocidad y paro de las bombas de suministro, de descarga e intermedias.
- Abrir y cerrar las válvulas de suministro, de descarga y de desvío (by-pass).

En las figuras III-11 y III-12 se representan los tableros de medición y control de la consola.





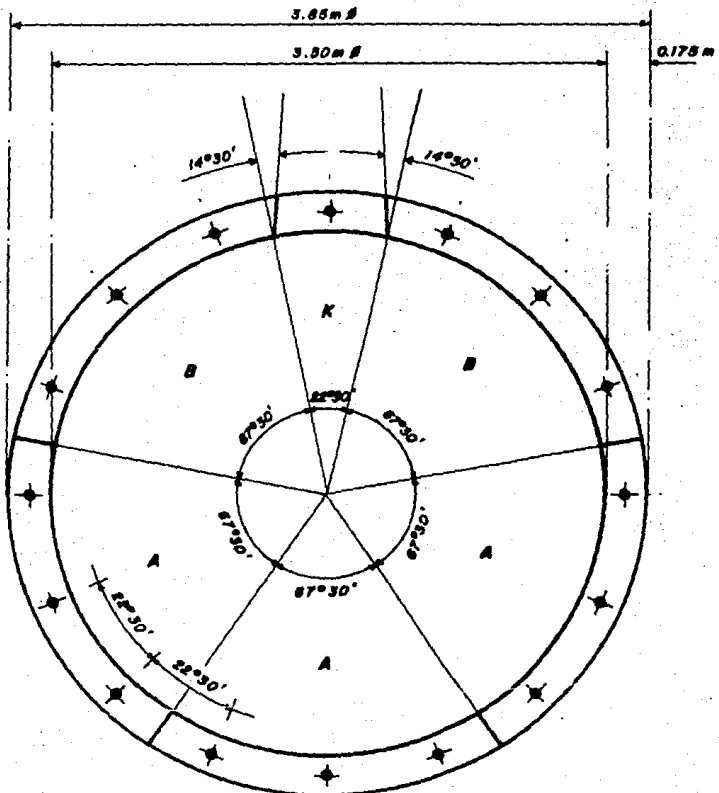
## 7.- FABRICACION DE DOVELAS

Las dovelas de concreto precoladas que forman el revestimiento primario del túnel, se fabrican con una resistencia de  $f'c = 350 \text{ kg/cm}^2$  y forman anillos de 6 piezas con 17.5cm de espesor y 1.00 m. de ancho, los cuales se van colocando en forma coordinada con el avance del escudo dejando un diámetro interno de 3.50 m., cada anillo está formado por 3 piezas normales (A), 2 tangenciales (B) y una cuña (K) - tal como se muestra en la figura III-13.

En una planta expresamente instalada en las proximidades de la obra se fabrican las dovelas utilizando moldes metálicos de alta precisión, se almacenan mientras alcanzan su resistencia de diseño y posteriormente se envían al túnel para su colocación.

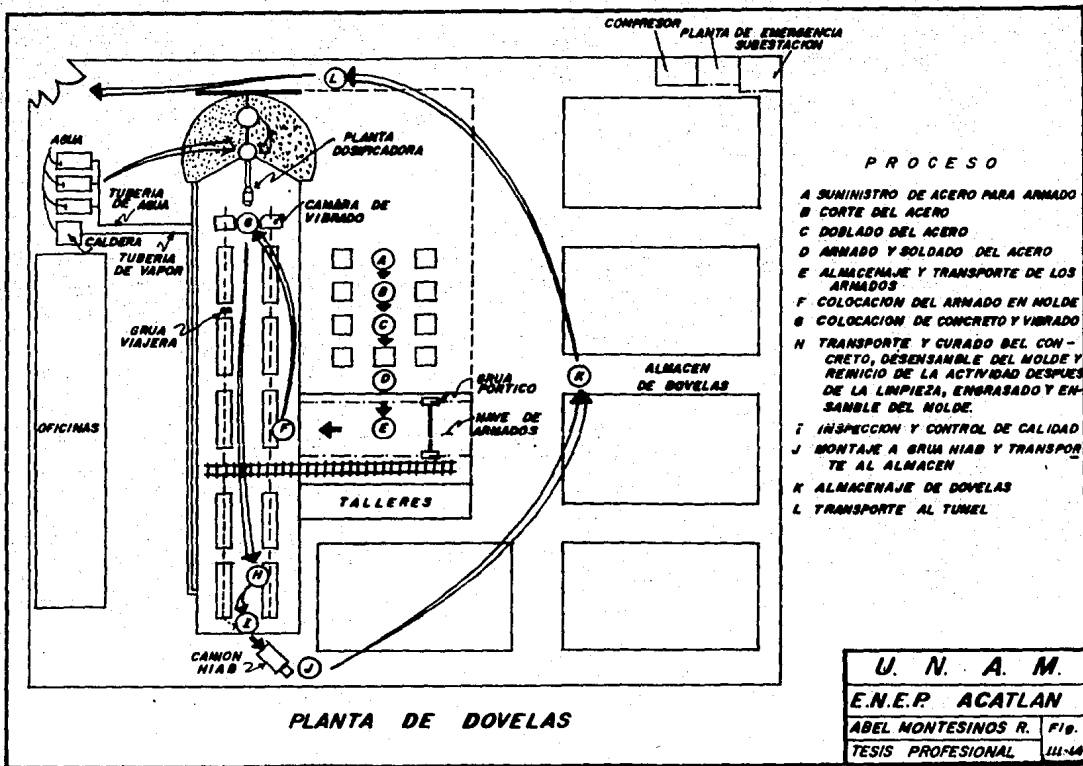
El proceso de fabricación, según se aprecia en la figura - III-14, se realiza bajo la siguiente secuencia de actividades:

- A) Suministro de acero para el armado
- B) Corte del acero
- C) Doblado del acero
- D) Soldado y armado de las parrillas
- E) Almacenaje y transporte del armado



ANILLO DE DOVELAS

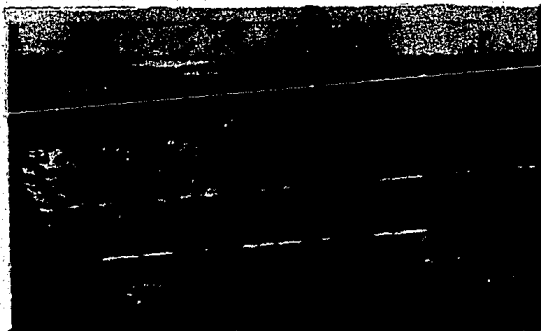
U. N. A. M.	
E.N.E.P. ACATLAN	
ABEL MONTESINOS R.	Fig.
TESIS PROFESIONAL	III-13







**CURADO DE DOVELAS**



**ALMACEN DE DOVELAS**

- F) Colocación del armado en los moldes de colado
- G) Colocación de concreto y vibrado
- H) Transporte y curado de las dovelas, desensamblaje de moldes y reinicio de la actividad después de la limpieza.
- I) Inspección y control de calidad
- J) Transporte a la zona de almacenamiento
- K) Almacén de dovelas en donde adquieren la resistencia de proyecto
- L) Transporte al túnel

#### 8.- TRATAMIENTO DEL SUBSUELO

En cada lumbrera previo al inicio de la excavación, debido a la inestabilidad del terreno tipo arcilloso, se debe realizar un tratamiento de inyección para estabilizar el suelo y evitar problemas al momento de demoler la pared de la lumbrera.

El tratamiento se realiza cubriendo un volumen con dimensiones de 6 m. de largo, 8 m. de ancho y 12 m. de profundidad - (1.5, 2 y 3 veces el diámetro del escudo).

Para realizar el tratamiento de inyección, se sigue el sistema puntual utilizando alta presión, que provoca rompimien-

to y consolidación de la estructura arcillosa del subsuelo, depositando mezclas resistentes de cemento-bentonita en las fracturas que la presión provoca.

Para la ejecución del trabajo se perforan una serie de barrenos verticales de 10 cms. de diámetro (4") dispuestos a cada metro. En cada barreno se colocan tubos de 3.8 cm. (1½") de diámetro, perforados en la zona de inyección a cada 50 cm. y cada perforación se tapa con un obturador de hule.

Los tubos colocados en la perforación previa, se inyectan con una mezcla de bentonita-cemento (vaina), cuyo proporcio namiento sea adecuado para darle una resistencia a la compresión simple a los 28 días de 6 kg/cm<sup>2</sup>, lo que se logra agregando 400 kg. de cemento en 1 m<sup>3</sup> de lodo bentonítico preparado al 13%, previamente hidratado no menos de 24 horas.

En forma ordenada se coloca el doble obturador de inyección en todos los puntos previstos en cada tubo perforado (a cada 50 cm), ejecutando dos etapas en cada estación, separadas entre sí un lapso de tiempo no menor de 48 horas.

En la primera etapa se inyecta a presión la mezcla bentonita-cemento con una proporción tal que permita alcanzar una

resistencia a la compresión simple a los 28 días de 4 kg/cm<sup>2</sup> lo cual se logra agregando 350 kg. de cemento por cada m<sup>3</sup> de lodo bentonítico preparado al 8%, previamente hidratado no menos de 8 horas.

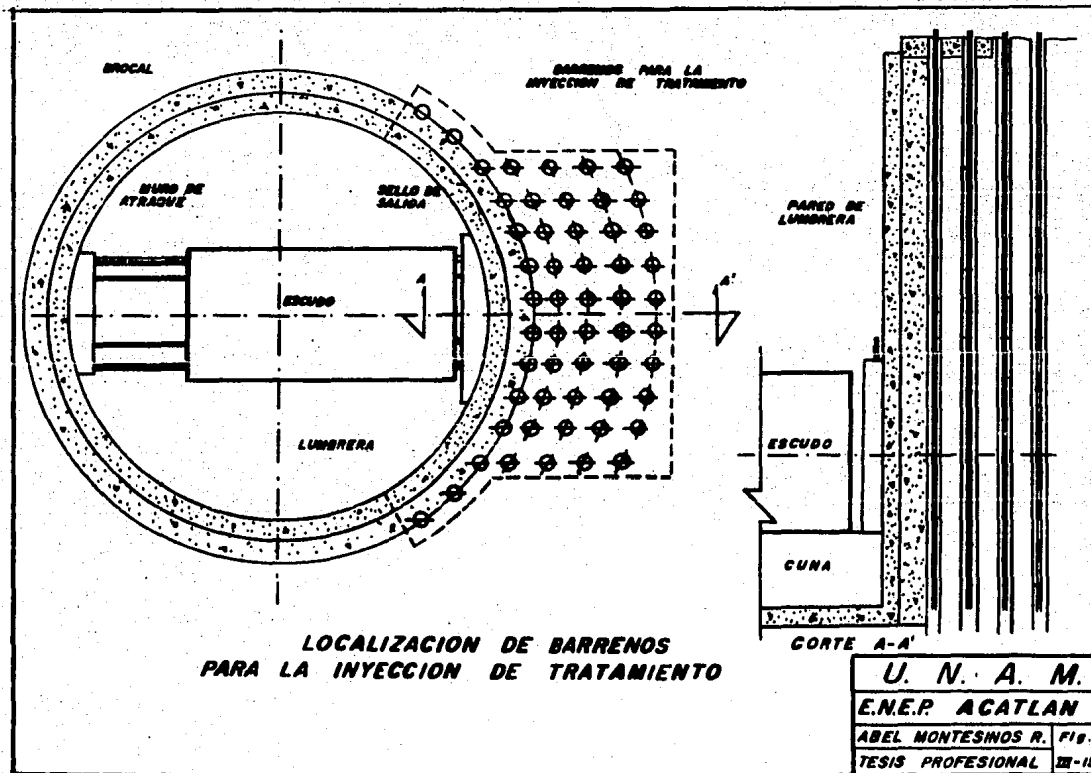
En esta primera etapa, las presiones de inyección no deben ser mayores de 5 kg/cm<sup>2</sup>. El punto se considera tratado cuando se alcanza la presión máxima establecida, o bien cuando el volumen inyectado llegue a 0.25 m<sup>3</sup>.

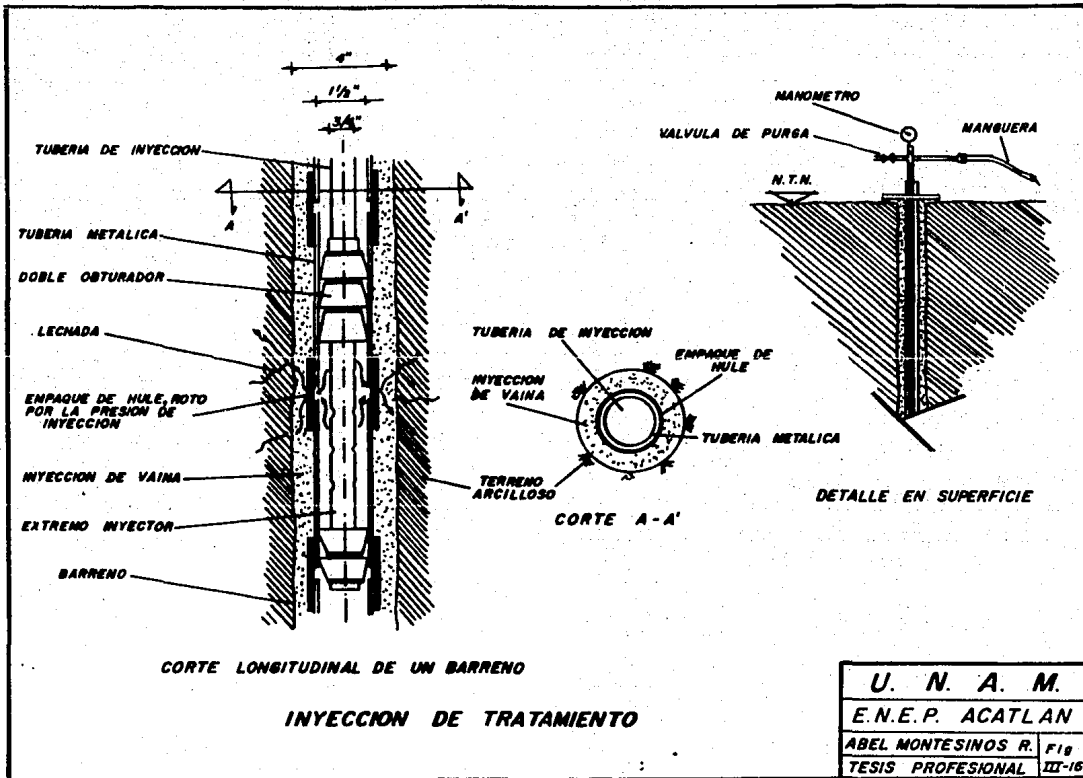
En la segunda etapa de inyección, las presiones máximas son de 10 kg/cm<sup>2</sup>, considerando que el punto ha quedado tratado cuando se alcance la presión máxima establecida, o bien cuando el volumen inyectado llegue a 0.25 m<sup>3</sup>.

Al terminar el tratamiento se retiran todos los tubos utilizados para efectuar la inyección y que interfieren con el paso del escudo, tapando los huecos que dejen con mortero de bentonita-cemento.

En las figuras III-15 y III-16 se observan la ubicación de los barrenos y la forma en que se realiza la inyección de tratamiento.

## 9.- PROCEDIMIENTO DE EXCAVACION





CORTE LONGITUDINAL DE UN BARRENO

**INYECCION DE TRATAMIENTO**

<b>U. N. A. M.</b>	
<b>E.N.E.P. ACATLAN</b>	
<b>ABEL MONTESINOS R.</b>	<b>FIG</b>
<b>TESIS PROFESIONAL</b>	<b>III-16</b>

### 9.1. Excavación de los primeros 50 m. de túnel.

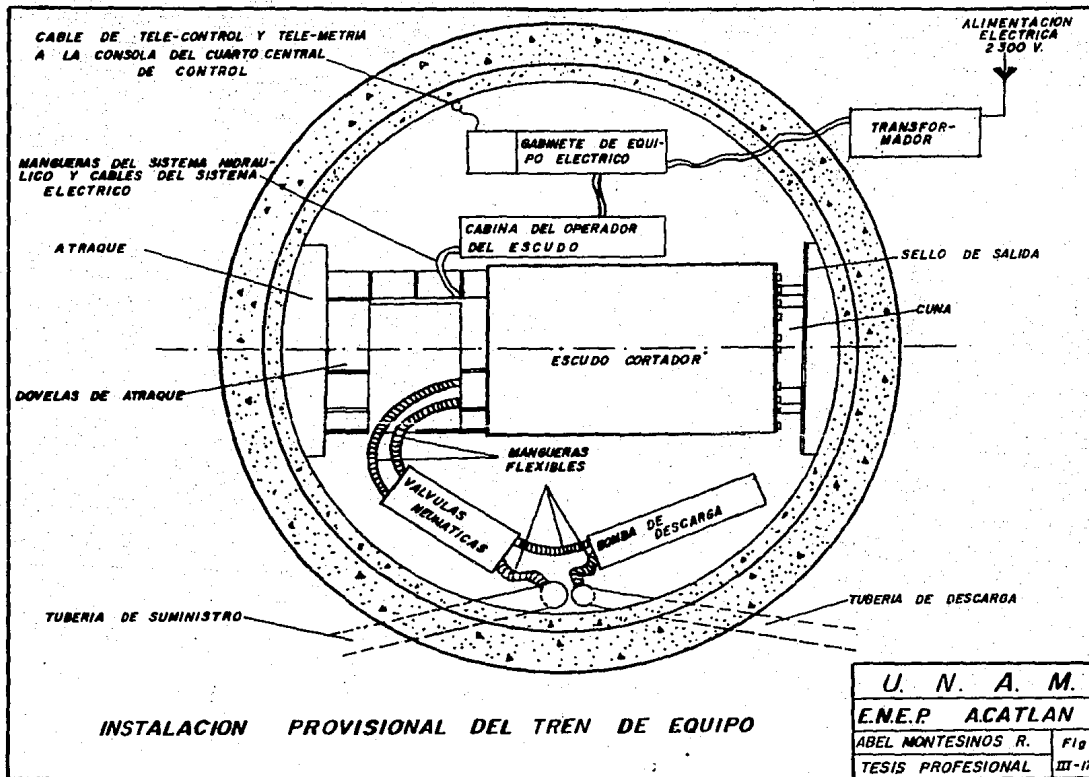
Debido a que la longitud del tren de equipo es de aproximadamente 50 m., para poder iniciar la excavación del túnel, es necesario hacer un arreglo o acomodo especial de los carros que lo integran, según se observa en la figura III-17.

Después de instalar el equipo en forma provisional, se realiza una prueba de los sistemas eléctricos e hidráulicos para detectar posibles fallas o fugas en las conexiones de cables y mangueras, así como para checar la intercomunicación entre la cabina del operador y la cabina central de control.

#### Inicio de la excavación

Primeramente el escudo se coloca en el fondo de la lumbrera sobre una cuna de recepción en posición para iniciar la excavación, enseguida se coloca frente a él un sello de salida que consiste en un conjunto de anillos metálicos y de hu-  
le de diferentes diámetros, con el propósito de proporcionar un elemento de contención que no permita la circulación de lodos, del frente hacia la lumbrera, a través de la pared externa del escudo cortador al inicio de la excavación.

La excavación se inicia al demoler con martillos neumáticos la pared de la lumbrera y en forma simultánea a esta operación, se colocan las dovelas de atraque para formar el - -



INSTALACION PROVISIONAL DEL TREN DE EQUIPO



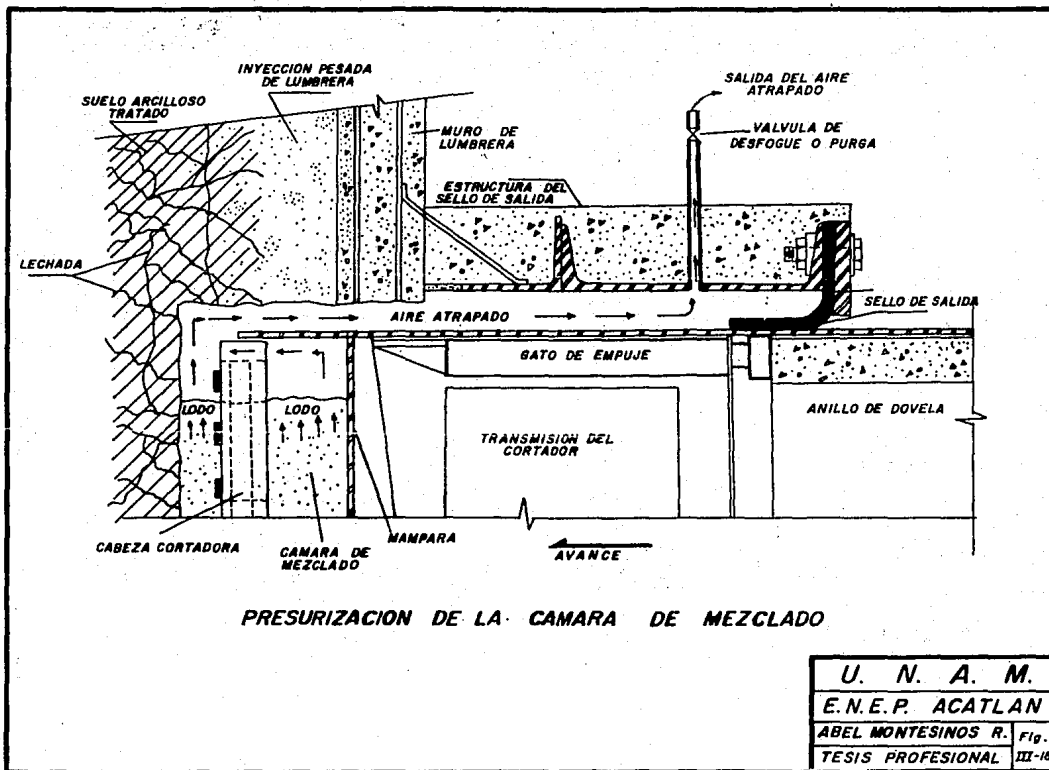
primer apoyo del escudo. Al reaccionar los gatos del escudo sobre las dovelas de atraque, éste comienza a deslizarse sobre la cuna hasta que la cabeza cortadora hace contacto con el terreno inyectado, en ese momento el avance se detiene para proceder a presurizar la cámara de mezclado con lodo estabilizador.

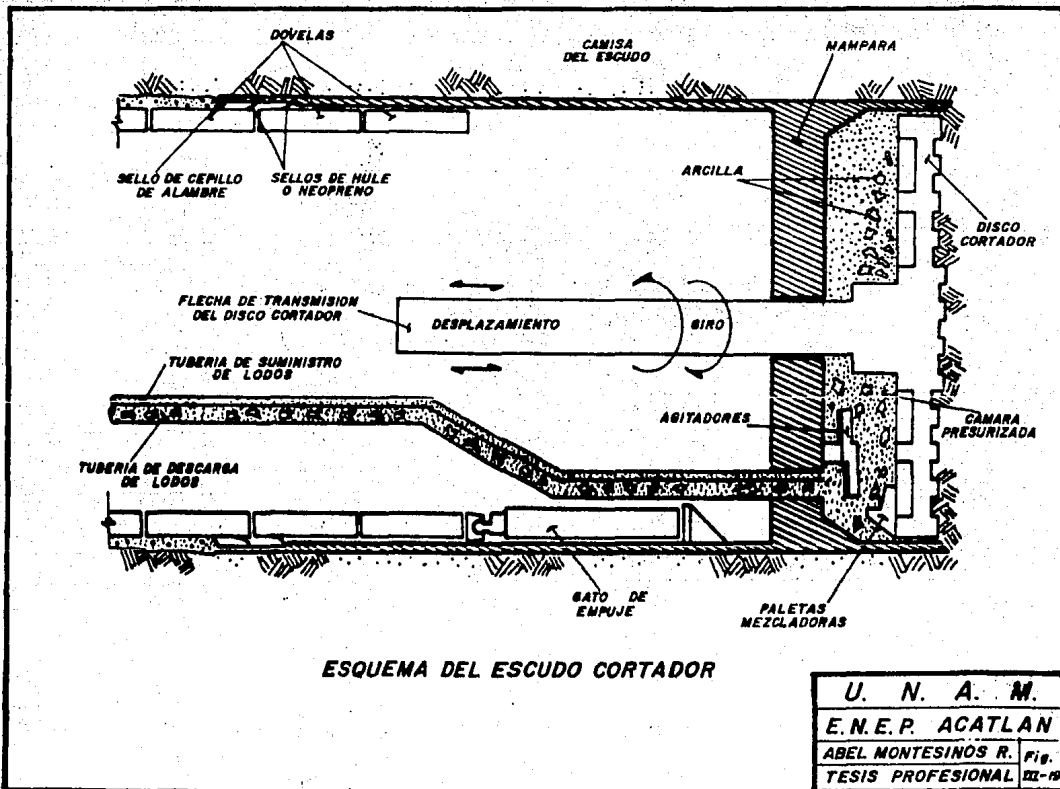
En la figura III-18 se muestra el proceso de presurización del frente, así como el sello de salida que impide el paso del lodo durante dicha presurización.

La excavación del túnel, se inicia propiamente al empezar a girar el cortador del escudo con las ranuras abiertas y al expandirse los gatos de empuje.

El suelo excavado pasa a la cámara de mezclado en donde se incorpora a la circulación del lodo estabilizador, con la ayuda de los agitadores y las paletas colocadas en la parte posterior de la cabeza cortadora, para ser enviado a la superficie a través de la tubería de descarga de lodos (figura III-19).

Cuando los gatos de empuje se han extendido totalmente, el movimiento del cortador se detiene y se cierran las compuertas de las ranuras para evitar que el material del frente fluya hacia la cámara de mezclado. La recirculación de lodos a través del frente se mantiene hasta que





la densidad del lodo de descarga se iguala a la del lodo de suministro. Esto garantiza que ha sido desalojado de la cámara de mezclado todo el material producto de la excavación.

Posteriormente, con ayuda del anillo erector, se procede a colocar un nuevo anillo de dovelas, retrayendo los gatos de empuje para dejar el espacio necesario y facilitar la operación, convirtiéndose este anillo en el nuevo apoyo del escudo.

Durante la excavación de estos primeros 50 m. el avance no es continuo, ya que a medida que el escudo va introduciéndose, el espacio que deja atrás, es aprovechado para ir colocando todos y cada uno de los integrantes del tren de equipo.

## 9.2. Excavación de los metros subsecuentes

Una vez superados los 50 m. iniciales, se procede a realizar la excavación en forma cíclica, teniéndose las siguientes actividades críticas.

### Excavación

La excavación se realiza de acuerdo a las siguientes actividades:

a) Establecida la recirculación de lodo a través de la cámara presurizada y controlada la presión de suministro y el gasto de descarga, se hace girar la cabeza cortadora - para iniciar la excavación.

b) Las compuertas de las ranuras de admisión de material son abiertas, para permitir la entrada de éste a la cámara de mezclado.

c) Simultáneamente a la apertura de las compuertas, se comienzan a extender los gatos de empuje previamente seleccionados para controlar la línea y nivel del escudo.

d) El material que penetra a través de las ranuras es mezclado y enviado a la superficie para su tratamiento inmediato con el fin de volver a enviarlo al frente.

e) Cuando la carrera de los gatos de empuje es de 1.15 m. aproximadamente, se para el avance del escudo y el giro - de la cabeza cortadora al mismo tiempo que se cierran las compuertas de las ranuras.

f) La recirculación de lodo por el frente se mantiene, -- hasta lograr que las densidades del lodo de suministro y - descarga se igualen. Enseguida la circulación de lodo es a través de la ruta alterna, lo cual se logra abriendo la

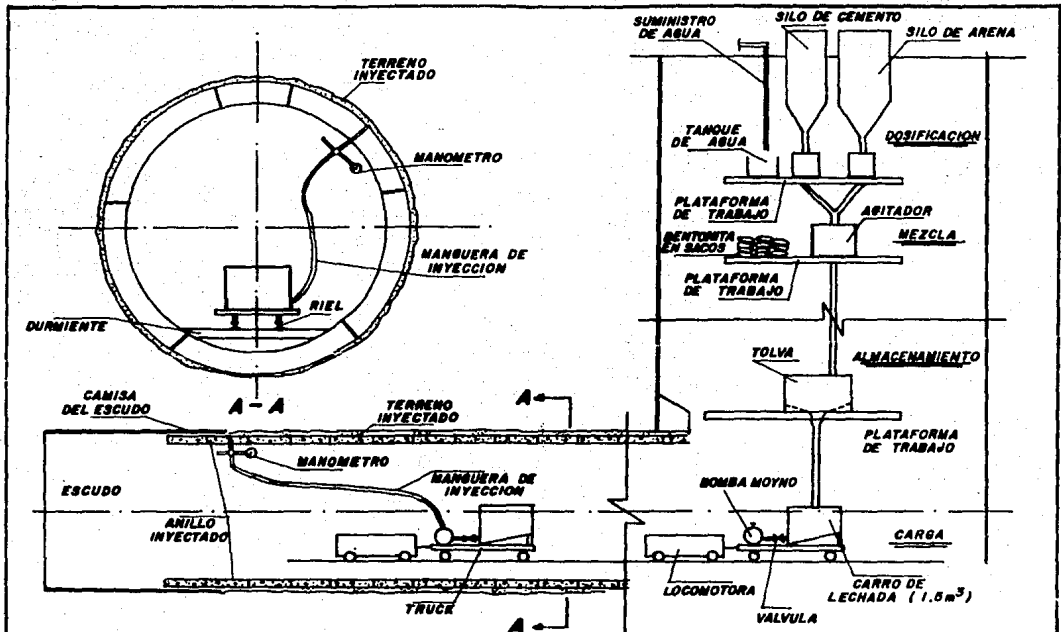
válvula de desvío (by-pass) y cerrando las válvulas de su ministro y descarga. Esto se hace para mantener la cámara de mezclado a la presión de diseño.

### Inyección de contacto. (Figura III-20)

La inyección de contacto se realiza para rellenar el hueco entre dovelas y el terreno natural y evitar así, las filtraciones hacia el túnel y reducir los asentamientos superficiales.

La secuencia que se sigue para inyectar los anillos de dovelas es el siguiente: el primer anillo se inyecta en la clave, el segundo en la parte media del lado derecho, el tercero en la clave, el cuarto en la parte media del lado izquierdo, el quinto en la clave y así sucesivamente durante toda la excavación. La inyección se realiza a través de los insertos que tienen las dovelas para este fin, además de ser utilizados para su manejo y colocación.

El transporte de la mezcla se hace en un carro tanque de 1.5 m<sup>3</sup> de capacidad, que se encuentra equipado con una bomba capaz de proporcionar la presión de inyección especificada. El mortero es recibido por el carro tanque en el fondo de la lumbrera, ya que en la pared de la misma se encuentra la planta dosificadora que elabora la mezcla. Enseguida el carro tanque es remolcado por una locomotora



**INYECCION DE CONTACTO**

U. N. A. M.	
E.N.E.P. ACATLAN	
ABEL MONTESINOS R.	Fig.
TESIS. PROFESIONAL	III-20

hacia el frente de trabajo.

El proporcionamiento para la mezcla de inyección depende - de si se vá a inyectar en la clave 6 en el inserto lateral.

Para inyección de anillos en la clave se tiene el siguiente proporcionamiento por bacha:

	Peso (Kg)	Densidad	Vol. (M <sup>3</sup> )
Agua	142.70	1.0	0.143
Bentonita	125.00	2.6	0.048
Cemento	500.00	3.1	0.161
Arena	450.00	1.4	0.321
			<u>0.673</u> =====

Para inyección de anillos en los insertos laterales el proporcionamiento es el siguiente:



	Peso (Kg)	Densidad	Vol. (M <sup>3</sup> )
Agua	114.36	1.0	0.114
Bentonita	100.00	2.6	0.039
Cemento	400.00	3.1	0.129
Arena	360.00	1.4	0.257
			-----
			0.539
			====

La presión de inyectado por especificación es de 1.5 kg/cm<sup>2</sup> y cada anillo se inyecta con dos bachas.

### Colocación de dovelas

Las dovelas son bajadas al fondo de la lumbrera con la ayuda de una grúa pórtico y transportadas al frente de trabajo en unos trucks que son remolcados por una locomotora. Cuando las dovelas llegan al frente se utiliza un polipasto - - eléctrico que corre sobre una viga carril de 11 m. de longitud, que se encuentra integrada al tren de equipo. El polipasto toma las dovelas del truck y las conduce hasta el faldón del escudo, en donde el erector las toma para su colocación final. La colocación de las dovelas se hace una por -- una, siendo las primeras las normales, enseguida las tangenciales y por último la cuña; finalmente se aprietan todos - los tornillos de ensamble y se apoyan ligeramente todos los



TRANSPORTE DE DOVELAS

gatos en el anillo colocado para estar listos a realizar un nuevo empuje.

### Dirección del escudo

Cuando se ha terminado la colocación del anillo de dovelas, se seleccionan los gatos a utilizarse en el siguiente empuje, ésto se obtiene conociendo la línea y nivel que guarda el escudo en dicho anillo, con respecto a los datos de proyecto.

Además de las actividades críticas del ciclo de excavación, existen otras actividades secundarias durante el mismo proceso, que son las siguientes:

- Prolongación de vías
- Prolongación de tuberías
- Prolongación de líneas eléctricas para alumbrado y alimentación de los equipos.

### 10.- ASENTAMIENTOS EN SUPERFICIE

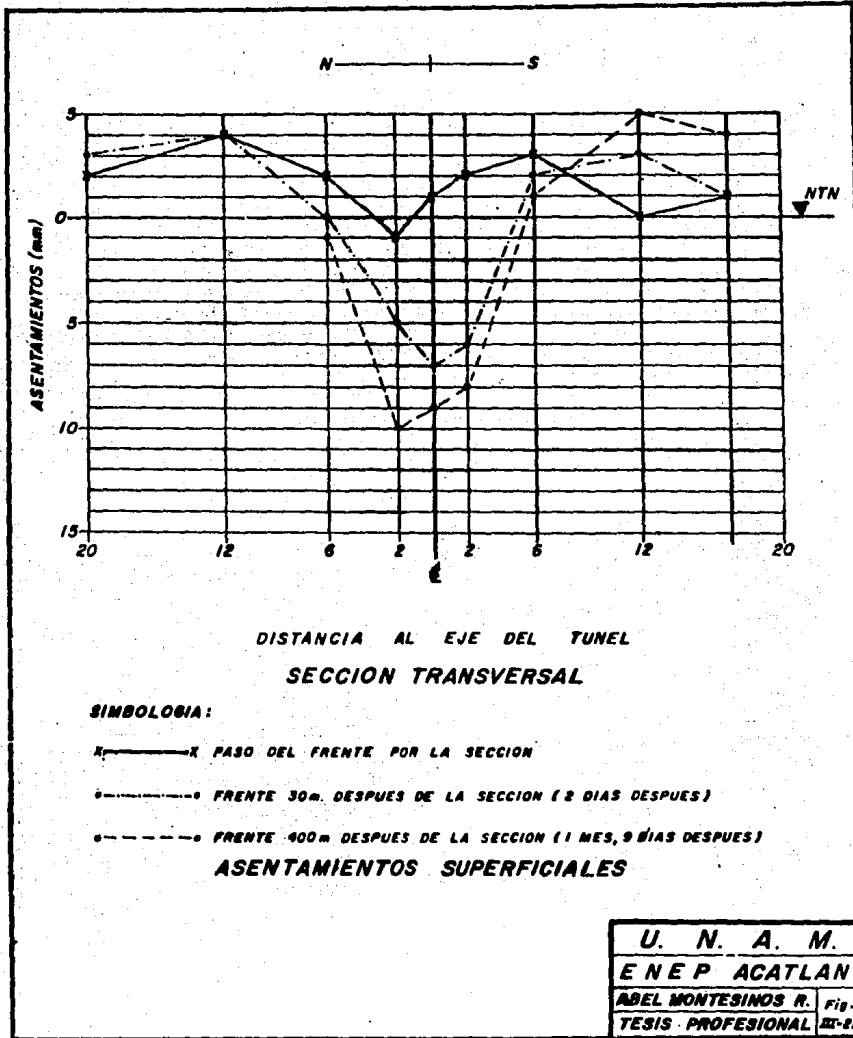
Durante la excavación de un túnel, se inducen asentamientos en la superficie ocasionados por la relajación de es

fuerzas en el frente y por el desplazamiento radial de las paredes para llenar el espacio dejado por el paso del escudo, los cuales se incrementan por el asentamiento producido por el abatimiento del nivel freático.

Para observar la influencia del método del escudo de lodo en los movimientos superficiales, se instalaron puntos de control a lo largo del trazo del túnel.

Los asentamientos producidos por la construcción del túnel han sido mucho menores que los registrados en otros túneles de la Ciudad de México. El hundimiento promedio sobre el eje del túnel Iztapalapa es de 12 mm. y el registrado como máximo de 25 mm.

La depresión formada por la excavación del túnel en una sección transversal se puede observar en la figura III-21, así como los leves bufamientos presentados por el terreno lateral del túnel.



## CAPITULO IV

### OTRAS ALTERNATIVAS DE EXCAVACION EN ARCILLAS

#### 1. SISTEMA HYDROSHIELD.

El sistema Hydrosshield consiste en esencia en un escudo de frente cerrado y estabilización con lodo bentonítico.

Sus características principales son las siguientes:

- Capacidad de soportar el frente del túnel que se excava por medio de un fluido a presión.
- Control de la presión del fluido estabilizador mediante aire a presión.
- Mezcla del material excavado con el fluido estabilizado para su transporte y extracción.
- Sellado de las cámaras de excavación a presión para tener al túnel a la presión atmosférica sin infiltraciones.

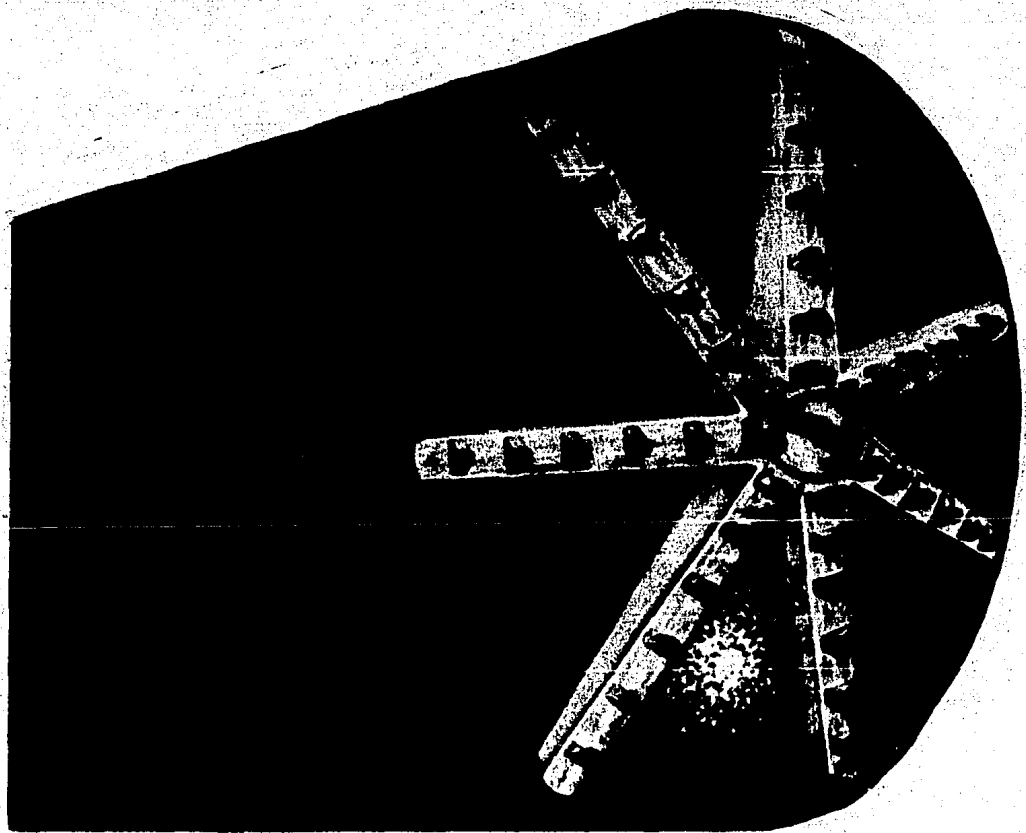
#### 1.1. DESCRIPCION DEL ESCUDO HYDROSHIELD

El Hydrosshield es prácticamente una cabeza cortadora de longitud reducida. Está constituido por un cilindro metálico con longitud menor que su diámetro y cuya relación entre ambas dimensiones es de 0.85 aproximadamente, a diferencia de otros escudos cuya longitud es vez y media mayor que su diámetro.

El cilindro tiene cerca del frente de ataque una tapa ó mampara metálica con dispositivos que permiten el paso, en su parte inferior, del tubo de inyección de lodo bentonítico y del lodo extractor de la mezcla del lodo con el material excavado, cuya entrada está rodeada por rejillas para impedir taponamientos por trazos grandes del material cortado en el frente.

En el centro de la mampara se encuentra la chumacera por donde pasa el eje de la cabeza cortadora; en la parte superior se localizan las esclusas de la cámara de aire a presión. En el hueco comprendido entre la mampara y el filo perimetral de corte de ataque del escudo se aloja la cabeza cortadora.

Entre la cabeza cortadora y la mampara se encuentra una placa divisoria ó diafragma que cubre aproximadamente el 65% de la superficie del cilindro, dejando un espacio libre en la parte inferior. Su finalidad es formar dos cámaras que son llenadas por el lodo bentonítico: La frontal que cubre toda la superficie del cilindro y cuyo lodo ahoga la cuchilla cortadora y hace contacto con el frente del túnel y la cámara posterior que es parcialmente llenada por el lodo, quedando en la parte superior un espacio con el aire comprimido que mantiene la presión del lodo bentonítico contra el frente. El aire proviene de una compresora instalada en el exterior y es conducido mediante tubería hasta la cámara de presión.



CABEZA CORTADORA



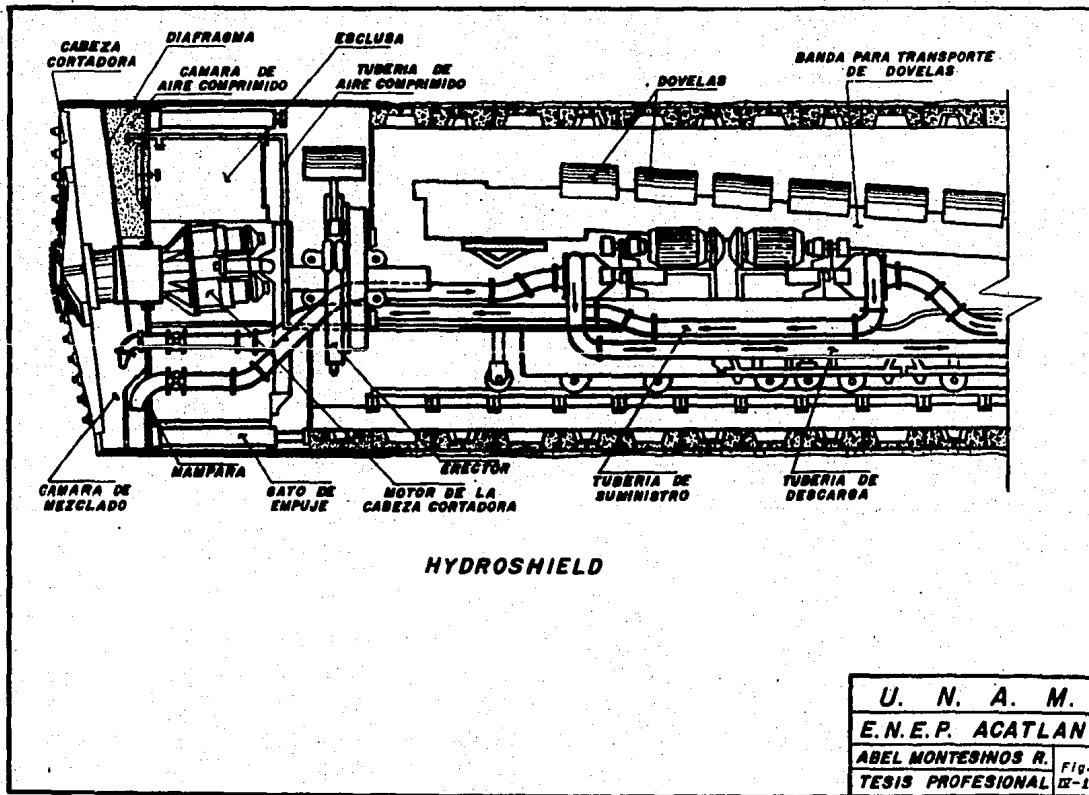
En la figura IV-1 se muestra la máquina Hydroschild con las características antes expuestas.

### 1.1.1. Cabeza cortadora.

Está constituida por una estrella de varios brazos cuyo número varía según el diámetro del escudo y el material por excavar. Hay máquinas Hydroschild con 3, 4, 5, 6 y 7 brazos en los cuales se insertan las cuchillas de corte, aproximadamente seis de éstas por cada brazo. En el centro de la estrella la máquina Hydroschild tiene una barra giratoria de menor tamaño con 8 cuchillas de corte en promedio. La cabeza cortadora completa puede girar en ambos sentidos, así como adelantar y retroceder.

### 1.1.2. Parte central y faldón del escudo.

En la parte central del escudo se encuentran los mecanismos de fuerza que accionan la cabeza cortadora. Esta estructura también sostiene los gatos hidráulicos perimetrales que apoyándose en el ademe de dovelas de concreto del túnel, empujan el escudo contra el terreno que se está excavando. El número de gatos depende del diámetro del túnel; en términos generales son dos gatos los que se apoyan en cada una de las dovelas que constituyen el anillo de cierre.



En el faldón del escudo que ocupa un tercio de su longitud - está instalado el brazo erector que coloca en su posición a las dovelas de ademe. Los mecanismos accionados por motores eléctricos permiten el giro del brazo erector en  $360^\circ$  así como su movimiento hacia adelante, hacia atrás y longitudinalmente para prolongarse o retraerse. La longitud del faldón - permite que en ese espacio se alojen el brazo erector de dovelas, así como dovela y media y es que el diámetro exterior del anillo constituido por las dovelas es menor que el diámetro interior de la camisa metálica del escudo. Esta diferencia de diámetro es necesaria para que sea permisible construir el ademe del túnel dentro del escudo y bajo su protección.

La misma figura IV-1 nos enseña la parte central y el faldón del escudo, así como el tren móvil que más adelante se describirá.

El espacio anular que queda entre las dovelas y el terreno natural, se rellena de inmediato con mortero de cemento para evitar la deformación de las paredes del túnel recién excavado. Como el mortero es inyectado a presión, esto exige la colocación de un sello que impida que el mortero se introduzca hacia la parte interna del escudo, lo cual perjudicaría a todos los mecanismos e instalaciones que se encuentran dentro del escudo. Estos mismos sellos son también necesarios para impedir que el lodo bentonítico, que se encuentra bajo presión, entre también atrás del escudo.

## 1.2. TREN MOVIL.

Una de las características del Hydroschild consiste en que los sistemas de transportación y carga de las dovelas, así como la turbina de inyección del lodo bentonítico hacia el frente y la de extracción de la mezcla del lodo en el material excavado, los motores eléctricos que las accionan y los ductos, se encuentran instalados en un tren móvil dentro del túnel ya ademado. Esta ventaja permite que el propio túnel recién ademado sirva de zona de trabajo y aún de almacén de dovelas en los carros que las transportan en do ble capa.

El tren de operación consta de brazos mecánicos para el ma nejo de las dovelas y banda sin fin para su transporte del carro al brazo de colocación de las dovelas en su sitio de finitivo.

Las dovelas son de concreto reforzado de alta resistencia que se atornillan unas con otras mediante pernos y tuercas colocadas con herramienta neumática. La sujeción de las do velas es tanto en el sentido tangencial como longitudinal, constituyendo anillos rígidos y sólidamente afianzados entre sí. Este sistema dá como resultado un ademe cilíndrico muy resistente que puede considerarse como definitivo en túneles que no sean para conducción de aguas, como por ejemplo para obras del "Metro".

En general se usan siete dovelas, más una dovela pequeña que sirve de cuña y cuyo largo es de cerca de 1/6 del de las demás.

Las dovelas usadas por el Hydroshield son nervuradas con dos huecos trapeziales que sirven para disminuir su peso y para permitir la colocación de los pernos de acero y sus tuercas. Tienen además pernos fijos que sirven para que de allí las sujete el brazo de colocación mediante las mordazas que tiene en su extremo.

### 1.3. INSTALACIONES

Para el sistema Hydroshield se conectan 3 ductos principales: El del aire comprimido, el de la alimentación del lodo bentonítico y el de la descarga de la mezcla lodo-material excavado. Estos ductos se instalan a lo largo del túnel y salen -- por la lumbrera hacia el exterior, donde se encuentran los equipos que se encargan de suministrar tanto el aire comprimido como el lodo bentonítico.

Para el suministro del aire se cuenta con una compresora y el tanque que lo almacena y para el lodo es necesario instalar los recipientes que almacenan la bentonita, las tolvas, los dosificadores, los tanques de agua, los equipos - - -

mezcladores y el tanque de almacenamiento del lodo. Todos estos sistemas tienen bombas, válvulas y equipos de medición, motores eléctricos, bandas transportadoras, sistemas automáticos de control de flujo de aire y lodo, conforme se requiere en el frente del escudo según el avance de la excavación y el suelo encontrado.

#### 1.4. PLANTA DE TRATAMIENTO

El sistema de excavación en el cual se utiliza el lodo bentonítico, tiene instalaciones adicionales para aprovechar nuevamente el lodo ya empleado en la extracción del material excavado. El procedimiento consiste en hacer la separación de la mezcla "lodo-rezaga". El propósito es buscar economía en los costos de la excavación, aprovechando el lodo varias veces.

La máquina Hydroschild tiene como equipo complementario la planta reemplazadora de bentonita. Esta planta consiste en sujetar a la mezcla "Lodo-rezaga" a un proceso de separación constituido por 3 etapas: La primera etapa consiste en una separación primaria por medio de cribas vibratorias inclinadas que dejan pasar el lodo y retienen el material grueso, la segunda etapa consiste en un separador intermedio rotatorio de forma cónica, con cedazos internos que separan las partículas de tamaño medio y la tercera etapa que

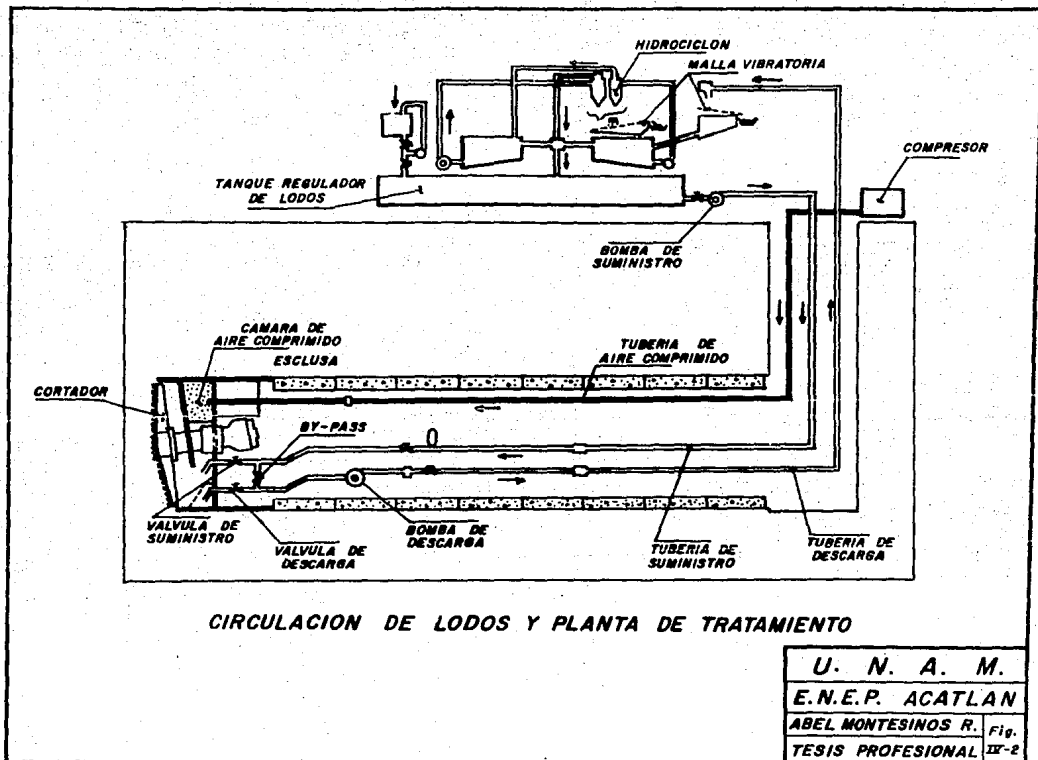
consiste en la separación centrífuga de las partículas pequeñas. El lodo bentonítico ya libre de sólidos se dosifica nuevamente con bentonita y agua para que adquiera nuevamente -- las características especificadas y se bombea hacia el frente de excavación del túnel. El ciclo se repite hasta que sea necesario desechar el lodo por su elevada contaminación.

En la figura IV-2 se muestra en forma esquemática el sistema de circulación del lodo bentonítico y la planta de tratamiento del mismo. Se puede observar además, que la diferencia -- con el escudo cortador de frente presurizado (capítulo III), es la línea de aire comprimido para mantener el lodo a la -- presión de diseño.

#### 1.5. APLICABILIDAD DEL METODO.

Algunos de los trabajos realizados con el Hydroschild son -- los siguientes:

<u>LUGAR Y PROPOSITO</u>	<u>LONGITUD</u>	<u>DIAMETRO DEL TUNEL</u>
Wilhemsburg, Interceptor	4.50 Km.	4.50 M.
Hamburg-Harburg, Interceptor	1.17 Km.	3.60 M.
Antwerp, Metro 1ra. etapa	4.10 Km.	6.56 M.
Antwerp, Metro 2da. etapa	4.00 Km.	6.56 M.
Berlín-Spandan, Metro	1.14 Km.	6.56 M.
Roma, Tunel Aurelia, Vialidad	1.20 Km.	10.64 M.





De acuerdo a las experiencias en otros países, el escudo Hydroshield podría ser adecuado para el tuneleo en la zona - - oriente de la Ciudad de México, en el que los estratos de arcilla y elevada saturación del suelo son los constituyentes de su geología. Máquinas de este tipo podrían excavar los túneles para el sistema de colectores en el alcantarillado de esa zona, así como los túneles de las líneas del Metro allí localizadas.

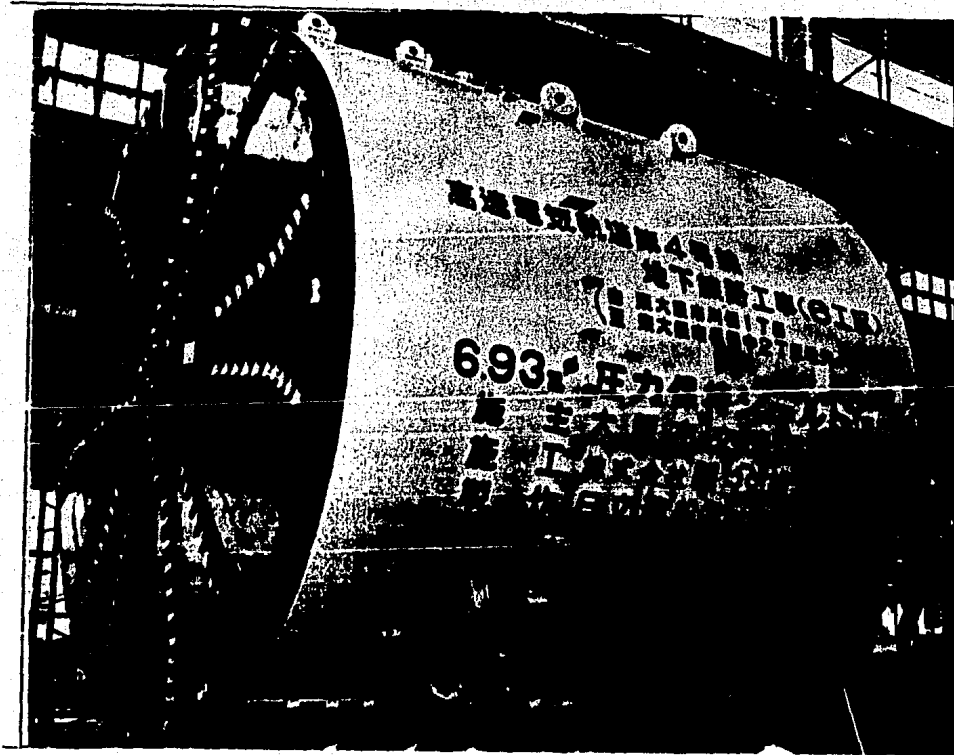
## 2. ESCUDOS DE PRESION DE TIERRA BALANCEADA.

Esta técnica de tuneleo se desarrolló en Japón y se utiliza para controlar el agua del subsuelo y prevenir el colapso -- del frente de excavación.

El principio básico de operación de un escudo de presión de tierra balanceada, consiste en igualar la presión horizontal del terreno con la presión del material excavado que se aloja en una cámara detrás del cortador para minimizar los efectos causados por el tuneleo.

### 2.1. Descripción del sistema.

La idea fundamental del escudo de presión de tierra balanceada es que el suelo en el frente puede ser controlado para --

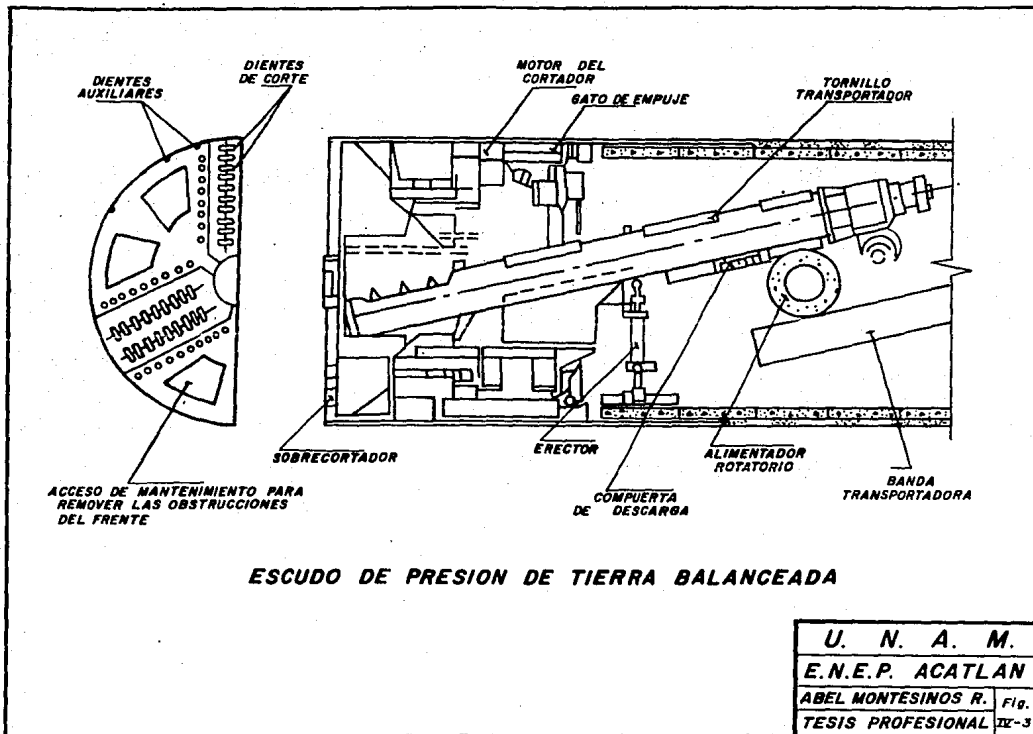


ESCUDO DE PRESION DE TIERRA BALANCEADA

evitar los hundimientos, regulando la descarga de la rezaga de la cámara de suelo a presión y el ingreso en la cámara - del suelo excavado a través de las ranuras de la cabeza cortadora, impidiendo el flujo del agua subterránea. Para proteger el frente del túnel contra la falla, el material excavado rellena la cámara del escudo a presión y balancea el empuje pasivo del suelo en el frente. La apertura de la compuerta para la descarga del material excavado es ajustado - para mantener la presión de balance cuando el material es - retirado.

En la figura IV-3 se muestra la estructura típica de un escudo de presión balanceada con un montaje perimetral del -- sistema de soporte de la cabeza cortadora, el cuál presenta la ventaja de que se puede proporcionar una mayor capacidad del par de corte del disco y se permite que las obstrucciones en la cámara sean retiradas más fácilmente debido a un mayor ancho de la cámara.

La forma, tamaño y disposición de las ranuras del disco cortador dependen entre otras cosas, del diámetro del escudo y de las condiciones geológicas. Sin embargo, por lo general el ancho de las ranuras es de 20 a 50 cm. y la relación del área total de las ranuras con respecto del área total del frente es del 15 al 40%.



La disposición de los dientes de corte en el disco es en forma concéntrica, de tal manera que con una sola rotación del disco se produce el completo barrido del área total del frente. Además en el perímetro del disco cortador a menudo se -- instalan dispositivos de sobrecorte para facilitar la ejecución de curvas en el túnel.

La cámara a presión es una zona de circulación de la rezaga, en donde el material cortado penetra en ella mediante el giro del disco cortador y es removido simultáneamente por la acción del tornillo transportador en forma cuidadosamente -- controlada. La cámara es uno de los elementos de mayor importancia en el funcionamiento propio del escudo de presión balanceada.

La forma y tamaño de la cámara deben ser especificados para que el suelo pueda penetrar suave y efectivamente a través -- de las ranuras del disco cortador sin obturar el interior -- de la cámara. Esto dependerá de las condiciones geológicas y de la estructura mecánica del escudo. En la cámara a presión existe una placa de barrido que facilita la descarga del suelo por el tornillo transportador; esta placa gira en forma -- similar a la cabeza cortadora.

El tornillo transportador funciona para descargar en forma --

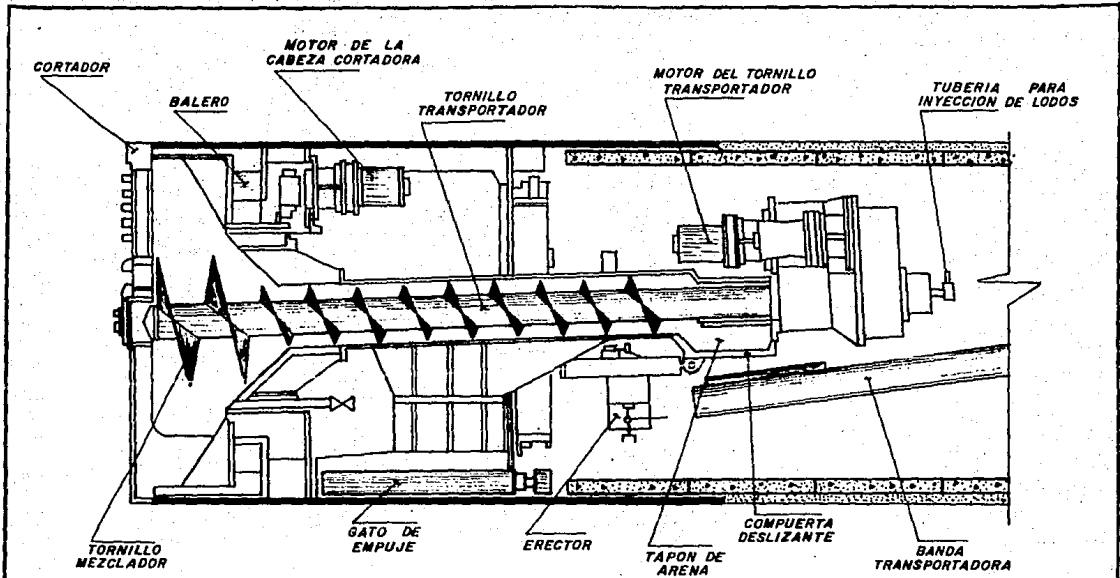
controlada la rezaga introducida en la cámara y para evitar la fuga de la rezaga en condiciones de alta presión del agua subterránea. La figura IV-3 muestra el tipo más común de tornillo transportador. En otra versión, conocida como banda espiral (figura IV-4) se elimina el eje central del transportador para facilitar la descarga de boleos.

## 2.2. Control del tuneleo.

Se debe cumplir que los volúmenes de excavación y descarga sean iguales. Para cumplir con esta condición el avance del escudo es controlado monitoreando, ya sea el volumen de rezaga descargado ó la presión de tierra en el frente. El volumen de descarga puede medirse por medio de escalas en el malacate de rezaga ó a la salida del transportador de tornillo. En la figura IV-5 se aprecia la operación de rezaga.

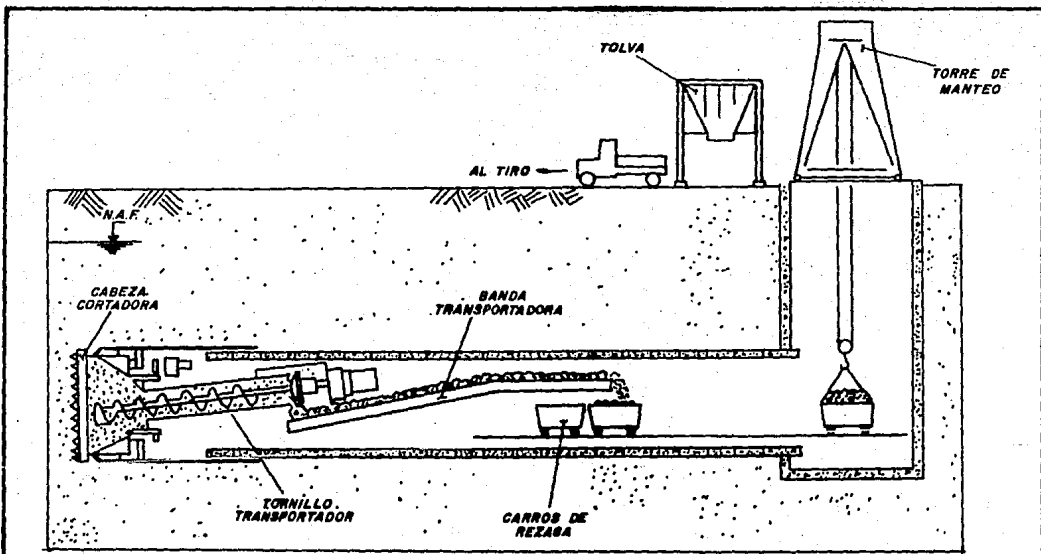
La presión del suelo en la cámara de presión se controla mediante la observación de la carrera de los gatos del escudo, del par y de la velocidad de rotación de la cabeza cortadora y del transportador del tornillo.

El avance del escudo y la rotación del transportador están sincronizados para igualar la presión existente en el frente de excavación con aquella de la rezaga en la cámara de presión.



**ESCUDO DE PRESION DE TIERRA BALANCEADA  
CON TORNILLO TRANSPORTADOR TIPO ESPIRAL**

U. N. A. M.	
E.N.E.P. ACATLAN	
ABEL MONTESINOS R.	Fig.
TESIS PROFESIONAL	IX-4



**OPERACION DE REZAGA**

U. N. A. M.	
E.N.E.P. ACATLAN	
ABEL MONTESINOS R.	Fig.
TESIS PROFESIONAL	IX-5



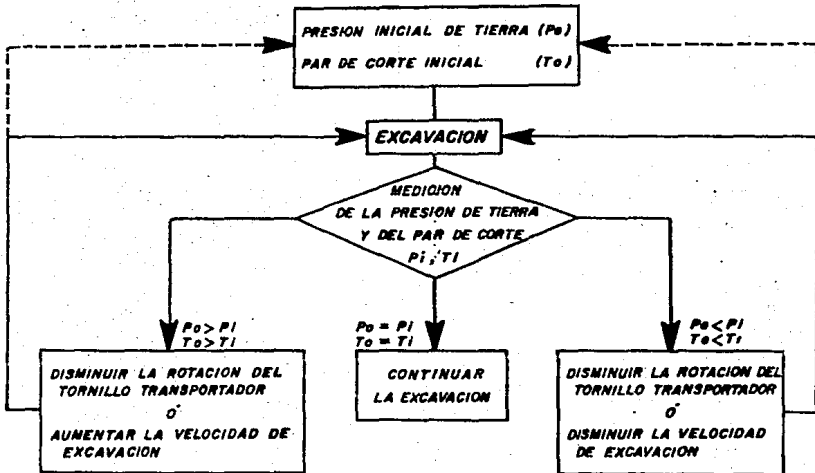
El método de control del tuneleo difiere con el tipo de escudo de presión balanceada. La figura IV-6 muestra el método más general de control de tuneleo que puede ser resumido como sigue:

- Ajustar la velocidad de avance del túnel, usualmente de 3 a 5 cm/min.
- Medir la presión del suelo en la cámara  $P_i$  y el par del disco cortador  $T_i$  para asegurar el llenado de la cámara con la rezaga.
- Ajustar la rotación del tornillo transportador, la apertura de la compuerta de salida y la rotación del alimentador rotatorio de la banda transportadora para hacer que  $P_i$  y  $T_i$  se aproximen gradualmente a  $P_o$  y  $T_o$  respectivamente. La presión  $P_o$  y el par  $T_o$  óptimos para la ejecución del túnel, serán determinados por aproximaciones sucesivas desde el comienzo del avance de la excavación del túnel.
- Cuando las condiciones geológicas cambian bruscamente, la velocidad de desarrollo del túnel debe ser reajustada.

### 2.3. Aplicabilidad del método.

El método de escudo de presión balanceada es ampliamente --

CONCEPTO A MEDIR	CONCEPTO A CONTROLAR
PRESION DE TIERRA ( P )	ROTACION DEL TORNILLO TRANSPORTADOR
PAR DEL DISCO CORTADOR ( T )	ABERTURA DE LA COMPUERTA, ROTACION DEL ALIMENTADOR ROTATORIO
	VELOCIDAD DE AVANCE



**DIAGRAMA DE FLUJO DE OPERACION**

U. N. A. M.  
 E. N. E. P. ACATLAN  
 ABEL MONTESINOS R. Fig.  
 TESIS PROFESIONAL IX-6

usado en estratos acuíferos en donde el frente del túnel es altamente inestable ó en estratos de suelo suelto, por lo que puede pensarse que es factible utilizarlo en los suelos tipo arcillosos de la Ciudad de México.

Los méritos del escudo de presión de tierra balanceada seguramente se incrementarán cuando sean aplicables a túneles de mayores longitudes. La prolongación de la vida de los dientes de corte, sellos mecánicos, sellos de cola y demás partes sujetas al desgaste es un requisito para túneles de gran longitud. La extensión de la capacidad del escudo para excavar mayores distancias, reducirá la parte correspondiente a los costos del equipo del costo total del proyecto.

Finalmente y aunque en la tesis se habla de excavación en arcillas, con este método aún no se ha encontrado una solución completamente satisfactoria al problema del manejo de boleos y de piedras de gran tamaño. Una solución en la cual los boleos y piedras sean triturados a tamaños más reducidos y descargados adecuadamente, podría hacer que el escudo de presión de tierra balanceada fuera aplicable a prácticamente cualquier clase de terreno.

## ANALISIS DE PRECIOS UNITARIOS

Tomando como base el alto grado de avance tecnológico logrado en materia de obras subterráneas, puede afirmarse que éstas son ya totalmente programables en cuanto a su tiempo de ejecución y costo; es posible evaluar detalladamente cada uno de los diferentes aspectos de construcción y ya no es admisible suponer simplemente costos sumamente elevados e incertidumbres en programas.

No obstante la veracidad de lo anteriormente expuesto, podemos considerarlo válido para túneles construídos con sistemas tradicionales, que han permitido estandarizar los elementos que intervienen en el análisis del precio unitario. El sistema de excavación de túneles utilizando escudos de frente presurizado, es como ya se dijo con anterioridad, un método utilizado por primera vez en México, por lo que los datos con que se contaban antes de iniciar el túnel en cuanto a cuadrillas de personal, cantidad y tipo de maquinaria, así como los rendimientos alcanzados eran en base a experiencias de túneles excavados en Japón, país de donde se adquirió el escudo para construir el Colector Iztapalapa.

Tomando en cuenta estas consideraciones, para la obtención del precio unitario de excavación, se llegó a un acuerdo entre contratista y cliente, el cuál consistió en levantar datos de los recursos utilizados en un tramo de túnel excavado y en esa forma obtener un precio por metro lineal de excavación.

Para ésto, se contó previamente con la asesoría técnica - de Ingenieros Japoneses, con el objeto de familiarizarse con la máquina excavadora y que durante el tramo en estudio las actividades ya fueran cíclicas.

El análisis del precio de excavación se presenta a continuación:

P.U. EXCAVACION DE TUNEL EN SUELOS BLANDOS, UTILIZANDO  
UN ESCUDO CORTADOR DE FRENTE PRESURIZADO CON LODOS  
DE 4.00 M. DE DIÁMETRO EXTERIOR.  
UNIDAD DE MEDICION: ML.

77

I. - MANO DE OBRA

C A T E G O R I A	TNOS. 8 HRS	SALARIO REAL	I M P O R T E	TNOS. 12 HRS.	SALARIO REAL	I M P O R T E
I TOPOGRAFIA						
TOPOGRAFO	--	- o -	- o -	27	6,097.93	164,644.11
CADENERO	4	1,516.35	6,065.40	97	2,832.40	274,742.80
AUXILIAR TOPOGRAFO	--	- o -	- o -	29	4,163.12	120,730.48
		SUB-TOTAL:	\$ 6,065.40			\$ 560,117.39
II EXCAVACION						
CABO ESPECIALIZADO	3	2,254.69	6,764.07	42	4,211.56	176,885.52
CABO "B"	3	2,103.66	6,310.98	52	3,929.46	204,331.92
MANIOBRISTA	1	1,516.35	1,516.35	90	2,832.40	254,916.00
AYTE. MANIOBRISTA	1	1,380.58	1,380.58	99	2,578.80	255,301.20
OP. ESCUDO	5	1,874.84	9,374.20	112	3,502.04	392,228.48
AYTE. OP. DE ESCUDO	3	1,380.58	4,141.74	90	2,578.80	232,092.00
OP. DE PLANTA	--	- o -	- o -	28	3,268.38	91,514.64
COMPRESORISTA	1	1,749.75	1,749.75	49	3,268.38	160,150.62
OP. LOCOMOTORA	9	1,749.75	15,747.75	107	3,268.38	349,716.66
AYTE. OP. LOCOMOTORA	9	1,380.58	12,425.22	99	2,578.80	255,301.20
		SUB-TOTAL:	\$ 59,410.64			\$21372,438.24
III VIA Y TUBERIA						
CABO "B"	--	- o -	- o -	51	3,929.46	200,402.46
RIELERO	--	- o -	- o -	33	2,832.40	93,469.20
AYTE. RIELERO	1	1,380.58	1,380.58	48	2,578.80	123,782.40
TUBERO	--	- o -	- o -	41	2,832.40	116,128.40
AYTE. TUBERO	1	1,380.58	1,380.58	40	2,578.80	103,152.00
		SUB-TOTAL:	\$ 2,761.16			\$ 636,934.46

P.Ú. EXCAVACION DE TUNEL EN SUELOS BLANDOS, UTILIZANDO  
UN ESCUDO CORTADOR DE FRENTE PRESURIZADO CON LODOS  
DE 4.00 M. DE DIAMETRO EXTERIOR.  
UNIDAD DE MEDICION: ML.

78

I.- MANO DE OBRA

C A T E G O R I A	TNOS. 8 HRS	SALARIO REAL	I M P O R T E	TNOS. 12 HRS.	SALARIO REAL	I M P O R T E
<b>IV LIMPIEZA PLANTA DE LODOS</b>						
CABO "B"	3	2,103.66	6,310.98	49	3,929.46	192,543.54
OP. CAVIEM	3	1,996.88	5,990.64	43	3,730.00	160,390.00
AYTE. OP. CAVIEM	1	1,380.58	1,380.58	46	2,578.80	118,624.80
OP. MOTOGRUA	-	- o -	- o -	45	3,952.26	177,851.70
AYTE. OP. MOTOGRUA	1	1,380.58	1,380.58	48	2,578.80	123,782.40
CHOFER VOLTEO	4	1,800.09	7,200.36	141	3,362.41	474,099.81
AYTE. GENERAL	4	1,380.58	5,522.32	141	2,578.80	363,610.80
		SUB-TOTAL	\$27,785.46			\$ 1'610,903.05
<b>V MANTEO</b>						
CABO "B"	1	2,103.66	2,103.66	50	3,929.46	196,473.00
MANIOBRISTA	6	1,516.35	9,098.10	139	2,832.40	393,703.60
AYTE. MANIOBRISTA	4	1,380.58	5,522.32	146	2,578.80	376,504.80
OP. GRUA PORTICO	3	1,749.75	5,249.25	49	3,268.38	160,150.62
AYTE. OP. GRUA PORTICO	1	1,380.58	1,380.58	49	2,578.80	126,361.20
OP. CAMION HIAB	-	- o -	- o -	51	3,952.26	201,565.26
AYTE.OP. CAMION HIAB	-	- o -	- o -	104	2,578.80	268,195.20
SEÑALERO	-	- o -	- o -	42	2,578.80	108,309.60
		SUB-TOTAL	\$23,353.91			\$ 1'831,263.28
<b>VI INYECCION</b>						
CABO ESPECIALIZADO	3	2,254.69	6,764.07	28	4,211.56	117,923.68
CABO "B"	4	2,103.66	8,414.64	45	3,929.46	176,825.70
OP. DOSIFICADORA	5	1,516.35	7,581.75	43	2,832.40	121,793.20
AYTE.OP. DOSIFICADORA	7	1,380.58	9,664.06	82	2,578.80	211,461.60
INYECTISTA	6	1,516.35	9,098.10	89	2,832.40	252,083.60
AYTE. GENERAL	12	1,380.58	16,566.96	178	2,578.80	459,026.40
		SUB-TOTAL	\$58,089.58			\$ 1'339,114.18

P.U. EXCAVACION DE TUNEL EN SUELOS BLANDOS, UTILIZANDO  
UN ESCUDO CORTADOR DE FRENTE PRESURIZADO CON LODOS  
DE 4.00 M. DE DIAMETRO EXTERIOR.

79

UNIDAD DE MEDICION: ML.

I.- MANO DE OBRA

C A T E G O R I A	TNOS. 8 HRS	SALARIO REAL	I M P O R T E	TNOS. 12 HRS.	SALARIO REAL	I M P O R T E
<b>VII CARPINTERIA</b>						
CABO ESPECIALIZADO	1	2,254.69	2,254.69	10	4,211.56	42,115.60
OFICIAL CARPINTERO	6	1,691.78	10,150.68	120	3,160.10	379,212.00
AYTE.OF.CARPINTERIA	6	1,380.58	<u>8,283.48</u>	113	2,578.80	<u>291,404.40</u>
		SUB-TOTAL:	\$ 20,688.85			\$ 712,732.00
<b>VIII TALLER MECANICO</b>						
CABO ESPECIALIZADO	-	- 0 -	- 0 -	22	4,211.56	92,654.32
OFICIAL MECANICO	1	1,885.52	1,885.52	82	3,521.98	288,802.36
AYTE. MECANICO	1	1,380.58	1,380.58	98	2,578.80	252,722.40
ELECTROMECHANICO	-	- 0 -	- 0 -	15	3,408.00	<u>51,120.00</u>
		SUB-TOTAL:	\$ 3,266.10			\$ 685,299.08
<b>IX TALLER DE SOLDADURA</b>						
CABO ESPECIALIZADO	-	- 0 -	- 0 -	47	4,211.56	197,943.32
OF. SOLDADOR	4	1,839.75	7,359.00	185	3,436.50	635,752.50
AYTE. SOLDADOR	1	1,380.58	<u>1,380.58</u>	170	2,578.80	<u>438,396.00</u>
		SUB-TOTAL:	\$ 8,739.58			\$ 1,272,091.82
<b>X CAMPAMENTO</b>						
OF. ALBANIL	3	1,818.40	5,455.20	51	3,396.60	173,226.60
AYTE. ALBANIL	3	1,380.58	<u>4,141.74</u>	49	2,578.80	<u>126,361.20</u>
		SUB-TOTAL:	\$ 9,596.94			\$ 299,587.80



P.U. EXCAVACION DE TUNEL EN SUELOS BLANDOS, UTILIZANDO  
 UN ESCUDO CORTADOR DE FRENTE PRESURIZADO CON LODOS  
 DE 4.00 M. DE DIAMETRO EXTERIOR.  
 UNIDAD DE MEDICION: ML.

80

I.- MANO DE OBRA

C A T E G O R I A	TNOS. 8 HRS	SALARIO REAL	I M P O R T E	TNOS. 12 HRS.	SALARIO REAL	I M P O R T E
XI TALLER ELECTRICO						
OF. ELECTRICISTA	4	1,824.50	7,298.00	82	3,408.00	279,456.00
AYTE. ELECTRICISTA	3	1,380.58	<u>4,141.74</u>	87	2,578.80	<u>224,355.60</u>
		SUB-TOTAL:	\$ 11,439.74			\$ 503,811.60
		T O T A L:	\$231,197.36			\$11'824,292.90
				T O T A L:	\$ 12'055,490.26	
				HERRAMIENTA :	361,664.71	
					\$ 12'417,154.97	
		CARGO MANO DE OBRA =	$\frac{\$12'417,154.97}{349.47 \text{ M.}}$			= \$ 35,531.39/M.L.

P.U. EXCAVACION DE TUNEL EN SUELOS BLANDOS, UTILIZANDO  
UN ESCUDO CORTADOR DE FRENTE PRESURIZADO CON LODOS  
DE 4.00 M. DE DIAMETRO EXTERIOR.

81

UNIDAD DE MEDICION: ML.

II.- MAQUINARIA

DESCRIPCION	CANT.	ACTIVAS			INACTIVAS		
		No. HRS	COSTO/HR	IMPORTE	No. HRS.	COSTO/HR.	IMPORTE
<b>I TOPOGRAFIA</b>							
1. TRANSITO WILD-2	1	333.01	137.97	46,945.39	393.66	88.35	34,779.86
2. NIVEL WILD-NA-2	1	328.24	40.66	13,346.24	399.51	25.78	10,299.37
			SUB-TOTAL	\$ 59,291.63			\$ 45,079.23
<b>II EXCAVACION</b>							
1. ESCUDO CORTADOR	1	349.47M	66,893.13	23'377,142.14	- o -	- o -	- o -
2. VENTILADOR DE TUNEL	1	121.68	274.15	33,358.57	604.28	172.15	104,026.80
3. BOMBA PARA LODOS	3	711.69	746.87	531,539.91	1,516.27	468.99	711,115.47
4. BOMBA SUMERGIBLE	2	158.14	812.79	128,534.61	1,347.90	519.19	699,816.20
5. AGITADOR DE LODOS	3	657.20	355.48	235,621.46	1,506.74	223.48	336,726.26
6. BOMBA OCELCO	3	804.30	95.69	76,963.47	1,290.59	61.59	79,487.44
7. COMPRESOR 600 PCM	1	812.82	1,623.98	1'320,003.42	- o -	- o -	- o -
8. TRUCK PARA VIA 24"	2	934.38	33.03	30,862.57	519.79	22.23	11,554.93
9. BOMBA WILDEN 2" Ø	2	567.68	61.51	34,918.00	691.02	39.29	27,150.18
10. LOCOMOTORA	2	628.79	4,259.18	2'678,129.79	1,272.09	2,866.53	3'646,484.15
11. CARGADOR DE BATERIAS	2	1,027.09	546.25	561,047.91	819.99	340.42	279,141.00
12. PLANTA DE EMERGENCIA	1	27.464	6,812.80	187,106.74	- o -	- o -	- o -
			SUB-TOTAL	\$29'193,228.59			\$ 5'895,502.43
<b>III LIMPIEZA PLANTA DE LODOS</b>							
1. MOTOGRIA HC-68	1	293.38	9,298.55	2'728,008.60	424.49	6,090.55	2'585,377.57
2. CAMION DE VOLTEO	3	851.52	1,882.54	1'603,020.46	1,198.00	533.44	639,061.12
3. ALMEJA DE 3/4" YD3	1	211.80	165.88	35,133.38	534.93	129.88	69,476.71
4. DESARENADORA CAVIEM	1	220.56	9,233.26	2'036,487.83	523.78	5,942.63	3'112,630.74
			SUB-TOTAL	\$ 6'402,650.27			\$ 6'406,546.14
<b>IV MANTEN</b>							
1. GRUA PORTICO 5 TON.	1	727.20	666.29	484,526.09	51.72	448.43	23,192.80
2. CAMION GRUA HIAB	1	496.72	2,122.30	1'054,188.86	243.08	752.49	182,915.27
			SUB-TOTAL	\$1'538,714.85			\$ 206,108.07

P.U. EXCAVACION DE TUNEL EN SUELOS BLANDOS, UTILIZANDO  
UN ESCUDO CORTADOR DE FRENTE PRESURIZADO CON LODOS  
DE 4.00 M. DE DIAMETRO EXTERIOR

82

UNIDAD DE MEDICION: ML.

II.- MAQUINARIA

DESCRIPCION	CANT.	ACTIVAS			INACTIVAS		
		No. HRS	COSTO/HR	IMPORTE	No. HRS.	COSTO/HR.	IMPORTE
<b>V INYECCION</b>							
1. PLANTA DOSIFICADORA	1	28.56	1,079.19	30,821.67	140.64	726.32	102,149.64
2. AGITADOR DE LECHADA	2	103.74	87.08	9,033.68	740.21	64.67	47,869.38
3. BOMBA MOYNO 3L-10	2	270.22	149.08	40,284.40	846.69	95.23	80,630.29
4. TANQUE MOVIL DE LECHADA	1	357.08	279.80	<u>99,910.98</u>	365.63	207.80	<u>75,977.91</u>
			SUB-TOTAL:	\$ 180,050.73			\$ 306,627.22
<b>VI TALLER DE SOLDADURA</b>							
1. SOLDADORA ISSA	1	390.75	65.51	24,942.93	380.86	49.09	18,696.42
2. SOLDADORA LINDE	1	401.82	65.51	26,323.23	392.22	49.09	19,254.08
3. SOLDADORA CHAMPION	1	9.86	65.51	645.93	31.291	49.09	1,536.08
4. EQUIPO OXIACETILENO	4	1,204.23	18.65	<u>22,458.89</u>	894.163	11.62	<u>10,390.06</u>
			SUB-TOTAL:	\$ 74,370.98			\$ 49,876.64
			TOTAL:	\$37'448,307.15			\$12'909,739.78
					TOTAL:	\$50'358,046.88	
			CARGO MAQUINARIA = $\frac{\$50'358,046.88}{349.47 \text{ M.}}$				= \$ 144,096.34/M.L.

P.U. EXCAVACION DE TUNEL EN SUELOS BLANDOS, UTILIZANDO  
UN ESCUDO CORTADOR DE FRENTE PRESURIZADO CON LODOS  
DE 4.00 M. DE DIAMETRO EXTERIOR

83

UNIDAD DE MEDICION: ML.

III.- MATERIALES

D E S C R I P C I O N	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO UNITARIO	I M P O R T E
<b>I TOPOGRAFIA</b>				
<b>II EXCAVACION</b>				
1. TORN.CAB.HEXAGONAL 7/8" Ø X 9" GRAD 2	PZA	6,139	171.00	1'049,769.00
2. TORN.CAB.HEXAGONAL 7/8" Ø X 9" GRAD 5	PZA	4,562	213.10	972,162.20
3. ROLDANA PLANA 7/8" Ø	PZA	21,260	5.00	106,300.00
4. EMPAQUE DE HULE 7/8" Ø	PZA	21,260	18.50	393,310.00
5. TUERCA HEXAGONAL 7/8"	PZA	10,966	162.50	1'781,975.00
		SUB-TOTAL		\$ 4'303,516.20
<b>III VIAS Y TUBERIAS</b>				
1. RIEL DE 40 LB/YD	ML	394	2,725.25	1'073,748.50
2. PLANCHUELA PARA RIEL	PZA	1,159	875.00	1'014,125.00
3. CLAVO 9/16" X 5 1/2"	PZA	3,092	137.50	425,150.00
4. TORNILLO 5/8" X 11"	PZA	1,138	100.00	113,800.00
5. TUERCA 5/8" X 11"	PZA	1,137	190.00	216,030.00
6. TUBERIA DE ACERO DE 6" Ø	ML	91	5,080.00	462,280.00
7. TUBERIA DE ACERO DE 8" Ø	ML	101	6,020.00	608,020.00
8. JUNTA VITAU LIC 6" (COMPL)	PZA	62	8,100.00	502,200.00
9. JUNTA VITAU LIC 8" (COMPL)	PZA	64	10,125.00	648,000.00
10. TUBERIA DE VENTILACION DE 18"	ML	162	3,800.00	615,600.00
		SUB-TOTAL		\$ 5'678,953.50
<b>IV PLANTA DE LODOS</b>				
<b>V MANTEO</b>				
1. JUNTA DE NEOPRENO 1 X 2 CM	ML	13,611.56	343.00	4'668,765.08
		SUB-TOTAL		\$ 4'668,765.08

P.U. EXCAVACION DE TUNEL EN SUELOS BLANDOS, UTILIZANDO  
UN ESCUDO CORTADOR DE FRENTA PRESURIZADO CON LODOS  
DE 4.00 M. DE DIAMETRO EXTERIOR

84

UNIDAD DE MEDICION: ML.

III. - MATERIALES

D E S C R I P C I O N	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO UNITARIO	I M P O R T E
<b>VI INYECCION</b>				
1. CEMENTO	TON	171.05	10,106.00	1'728,631.30
2. BENTONITA	TON	42.76	12,500.00	534,500.00
3. ARENA SILICA	M3	122.15	2,775.00	338,966.25
4. TAPON DE PLASTICO	PZA	2,317.00	120.00	278,040.00
5. EMPAQUE 70 mm Ø	PZA	2,316.593	9.25	21,428.49
6. PLACA 1/4" X 25 X 25	KG	275	110.00	30,250.00
7. TUBO DE ACERO DE 2" Ø	ML	184	1,900.00	349,600.00
8. COPLA DE 2" Ø	PZA	31	281.00	8,711.00
		SUB-TOTAL		\$ 3'290,127.04
<b>VII CARPINTERIA</b>				
1. DURMIENTES 8" X 8" X 2.50 MTS	PZA	274	2,288.00	626,912.00
2. TABLON 2" X 12" X 2.00 MTS	ML	169	1,133.33	191,532.77
3. CLAVO 4"	KG	107	140.00	14,980.00
		SUB-TOTAL		\$ 833,424.77
<b>VIII TALLER MECANICO</b>				
<b>IX TALLER DE SOLDADURA</b>				
1. SOLDADURA 7018 1/8"	KG	433	369.00	159,777.00
2. SOLDADURA 6010 5/32"	KG	255.82	369.00	94,397.58
3. OXIGENO	CARGA	87.04	1,411.00	122,813.44
4. ACETILENO	CARGA	44.50	3,662.00	162,959.00
		SUB-TOTAL		\$ 539,947.02

P.U. EXCAVACION DE TUNEL EN SUELOS BLANDOS, UTILIZANDO  
UN ESCUDO CORTADOR DE FRENTE PRESURIZADO CON LODOS  
DE 4.00 M. DE DIAMETRO EXTERIOR

85

UNIDAD DE MEDICION: ML.

III.- MATERIALES

D E S C R I P C I O N	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO UNITARIO	I M P O R T E
X CAMPAMENTO				
XI TALLER ELECTRICO				
1. LAMPARA FLOURESCENTE 2 X 74 W	PZA	39	550.00	21,450.00
2. CABLE CALIBRE 2/0	ML	1,202.10	100.97	121,376.04
3. ALAMBRE TW CAL 12	ML	375	23.73	8,898.75
4. AISLADOR TIPO CARRETE	PZA	244	94.00	22,936.00
5. BASTIDOR	PZA	78	1,257.00	98,046.00
6. OREJA PARA BASTIDOR	PZA	157	150.00	23,550.00
7. CABLE USO RUDO 3 X 100	ML	308	1,463.00	450,604.00
8. CABLE TRIFASICO 3500 V	ML	304	1,924.00	584,896.00
		SUB-TOTAL		\$ 1'331,756.79
		T O T A L		20'646,490.40
		CARGO MATERIALES = $\frac{\$20,646,490.40}{349.47 \text{ M}} = \$59,079.44/\text{ML}$		

P.U. EXCAVACION DE TUNEL EN SUELOS BLANDOS, UTILIZANDO  
UN ESCUDO CORTADOR DE FRENTE PRESURIZADO CON LODOS  
DE 4.00 M. DE DIAMETRO EXTERIOR.

86

UNIDAD DE MEDICION: M.L.

R E S U M E N

A) MANO DE OBRA	\$ 35,531.39/ M.L.
B) MAQUINARIA	144,098.34/ M.L.
C) MATERIALES	<u>59,079.44/ M.L.</u>
COSTO DIRECTO	\$ 238,709.17/ M.L.
IND. Y UTILIDAD (31%)	<u>73,799.84/ M.L.</u>
PRECIO UNITARIO	\$ 312,709.01/ M.L.

El precio aquí presentado, es el autorizado en el año de 1984, fecha en que se iniciaron los trabajos de excavación; a lo largo de todo el proyecto (aprox. 2 años) se han obtenido una serie de factores de escalación que han modificado de la siguiente forma el precio:

ESCALACION	AÑO	P.U. AUTORIZADO
- o -	1984	\$ 312,709.01/M.
24.95 %	1985	390,729.91/M.
17.36 %	1985	458,560.62/M.
12.84 %	1985	517,439.80/M.
7.00 %	1985	553,660.59/M.
24.83 %	1986	691,134.51/M.
34.21 %	1986	927,571.63/M.



## CONCLUSIONES

Dada la importancia que tendrán los túneles en el futuro y tomando en cuenta que proseguirá el hundimiento de la Ciudad, es necesario continuar el desarrollo de nuevas técnicas y capacitar al personal para que los trabajos que se realicen se hagan con eficiencia y seguridad, garantizando el buen funcionamiento de los sistemas.

El uso de escudos como herramienta principal para la excavación de túneles en terrenos blandos se ha generalizado en las últimas décadas. En la Ciudad de México ha sido la herramienta básica para resolver los problemas que representa excavar túneles en suelos blandos, generalmente en las zonas de transición y del lago.

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

El escudo cortador de frente presurizado a base de lodos, se desarrolló en respuesta a los problemas que presentaban cierta clase de suelos al ser atacados con otros métodos

de excavación. Existen en el mercado un gran número de máquinas de este tipo, diseñadas principalmente en base a -- las condiciones geológicas del subsuelo por excavar y las características propias del proyecto.

En comparación con los métodos conocidos para la excava--- ción de túneles en suelos blandos, el uso de escudo cortador de frente presurizado es el más adecuado en la actuali--- dad en la Ciudad de México, puesto que ofrece seguridad en el frente de la excavación, reduce la plantilla de personal y la productividad en el túnel es mayor. Además el uso de equipos electrónicos, hacen del método un sistema prácticamente automatizado, lo cuál obtiene sus mejores ventajas cuando se trata de túneles de pequeño diámetro.

La experiencia constructiva adquirida durante la construcción del Colector Semiprofundo Iztapalapa, con el método - de escudo de frente presurizado, hacen que éste sea un via--- ble candidato para la construcción de varios túneles pro--- yectados para la zona del lago de la Ciudad de México.

Como último comentario es importante mencionar, que la experiencia en México con este sistema ha sido muy valiosa y positiva, lo que motiva a pensar que su futuro es brillante en el ámbito tunelero nacional.

## REFERENCIAS

- 1.- Raúl J. Marsal y Marcos Mazari. "El Subsuelo de la Ciudad de México". 2a. Edición 1969.
- 2.- Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos. "Túneles en suelos blandos y firmes". México, D.F. 1981.
- 3.- D.D.F. Dirección General de Obras Hidráulicas. "Interceptores Profundos y el Emisor Central". México, D.F. 1969.
- 4.- Memorias de las obras del Sistema de Drenaje Profundo del Distrito Federal. D.D.F. Tomos I y II.
- 5.- Asociación Mexicana de Ingeniería de Túneles y - - Obras Subterráneas, A.C. "Trascendencia futura, estado del arte y desarrollo de las obras subterráneas en México". 1983.
- 6.- Asociación Mexicana de Ingeniería de Túneles y - - Obras Subterráneas, A.C. "Túneles y excavaciones - - subterráneas". Curso Victor Hardy. México, D.F. 1985.
- 7.- Memorias de la obra "Colector Semiprofundo Iztapalapa".
- 8.- Apuntes del Seminario de Escudos y Topos. México, D.F. 1986.