



**ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES**

**ACATLAN  
UNAM**

**EXCAVACION DE TUNELES EN LA CIUDAD DE  
MEXICO.**

**Tesis Profesional**

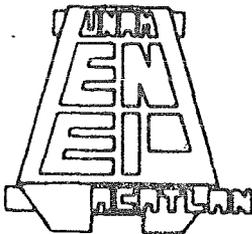
Que para obtener el título de:

**INGENIERO CIVIL**

**P r e s e n t a n :**

**JOSE ALFREDO PEÑA BAEZ Y FRANCISCO JAVIER MENA CORDOVA**

H-0031241



**Santa Cruz Acatlán, Estado de México**

**1980**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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

ENEP ACATLAN  
COORDINACION DEL PROGRAMA  
DE INGENIERIA Y ACTUARIA

CAI-C-0081-79

SEÑORES  
FRANCISCO JAVIER MENA CORDOVA  
J. ALFREDO PEÑA BAEZ  
Alumnos de la Carrera  
de Ingeniería Civil  
P r e s e n t e

De acuerdo a su solicitud presentada con fecha 22 de --  
enero de 1979, me complace notificarles que esta Coordina--  
ción tuvo a bien asignarles el siguiente tema de tesis: "Ex--  
cavación de Túneles en la Ciudad de México", el cual se desa--  
rrollará como sigue:

- I. Geología del Valle de México.
- II. Características del subsuelo de la Ciudad de México.
- III. Procedimientos convencionales de excavación de túneles--  
y sus limitaciones.
- IV. Descripción de procedimientos de excavación bajo aire -  
comprimido.
- V. Descripción de procedimientos de excavación con escudo.
- VI. Relación entre las características del suelo y el proce--  
dimiento adecuado.
- VII. Conclusiones.

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

Ruego a ustedes tomar nota que en cumplimiento de lo es--  
pecificado en la Ley de Profesiones, deberán prestar servi--  
cio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requi--  
sito básico para sustentar examen profesional, así como de --  
la disposición de la Dirección General de Servicios Escolaa--  
res en el sentido de que se imprima en lugar visible de los--  
ejemplares de la tesis, el título del trabajo realizado. Es--  
ta 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"  
Sta. Cruz Acatlán, Edo. de México a 8 de marzo de 1979.

ING. IGNACIO LIZARRAGA G.,  
Coordinador del Programa  
de Ingeniería y Actuaría.

M. 0031247

A nuestros Padres  
con gratitud y cariño

A nuestros Familiares  
y amigos, con  
amistad sincera

A nuestros Profesores  
Como reconocimiento a  
su labor Académica

Al Sr. Ing. Fernando Favela Lozoya,  
nuestra admiración y respeto

A todas aquéllas personas que nos  
ayudaron en la elaboración de este  
trabajo, nuestro agradecimiento

# C A P I T U L O I

## GEOLOGIA DEL VALLE DE MEXICO

En el extremo Sur del Altiplano Mexicano, vasta extensión continental, aproximadamente a 2,400 m.s.n.m., se encuentra una depresión tradicionalmente conocida con el nombre de Valle de México.

El Distrito Federal se localiza en la región Suroeste del Valle, y en ella se levanta la Ciudad de México, parte de la cual está desplantada en las estribaciones de la Sierra de Las Cruces y la restante sobre el fondo del Lago de Texcoco.

La designación de "Valle de México", no puede aplicarse con rigor científico a esa región, puesto que no ofrece las características necesarias; "El Valle es un área de la superficie terrestre trabajada o erosionada por una corriente fluvial o glacial. Si no existe una línea de drenaje general que esté modelando la superficie considerada, no es Valle".

No obstante la definición anterior, esta cuenca, por razones de orden histórico y uso popular, seguirá siendo conocida bajo la denominación de "Valle de México".

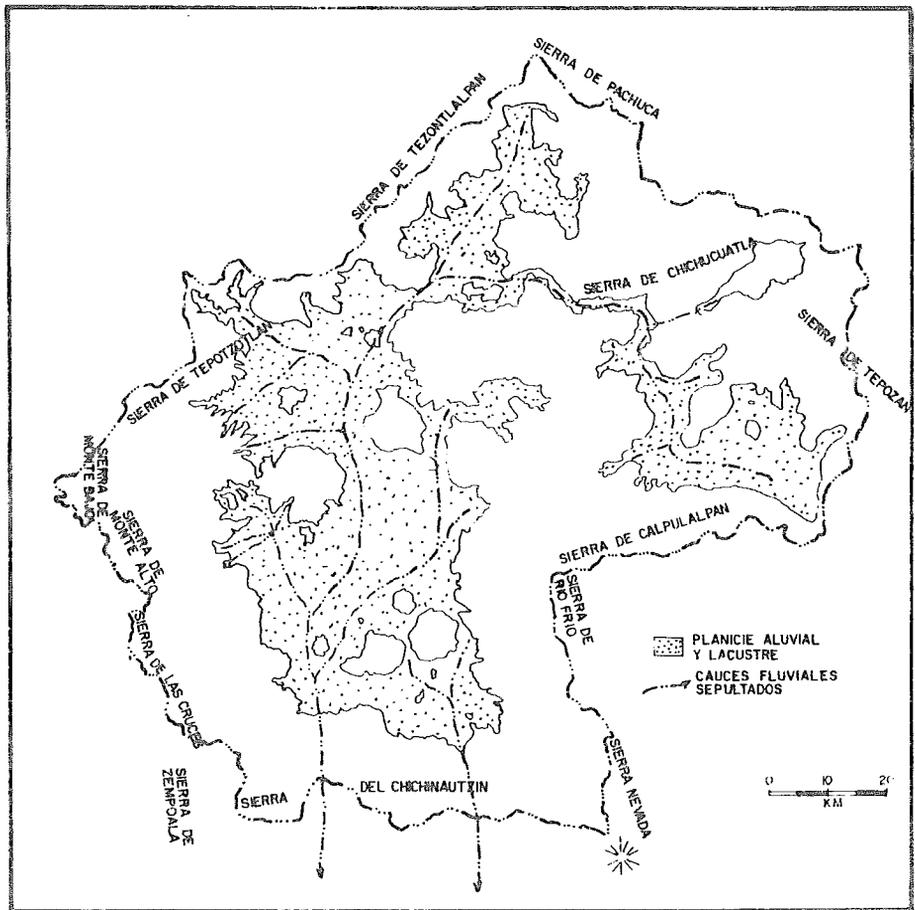
Antes del Pleistoceno, el valle drenaba libremente al Sur, hacia el Amacuzac, por dos profundas cañadas que pasaban por Cuautla y Cuernavaca; a fines del Plioceno, al producirse fracturas orientadas en dirección W-E en la zona de Puebla y al Sur de Toluca, tuvieron acceso grandes efu

siones de basalto que formaron la Sierra del Chichinautzin, en el Cuaternario (Fig. I-1). Estos eventos, producidos entre la Sierra de Zempoala y el Popocatepetl, transforman el valle en una cuenca cerrada. Por esa razón, se almacenó el agua en varios lagos, y los ríos que descendían de las sierras circundantes, depositaron en grandes conos de deyección materiales diversos al confluír a dichos lagos (Fig. I-2).

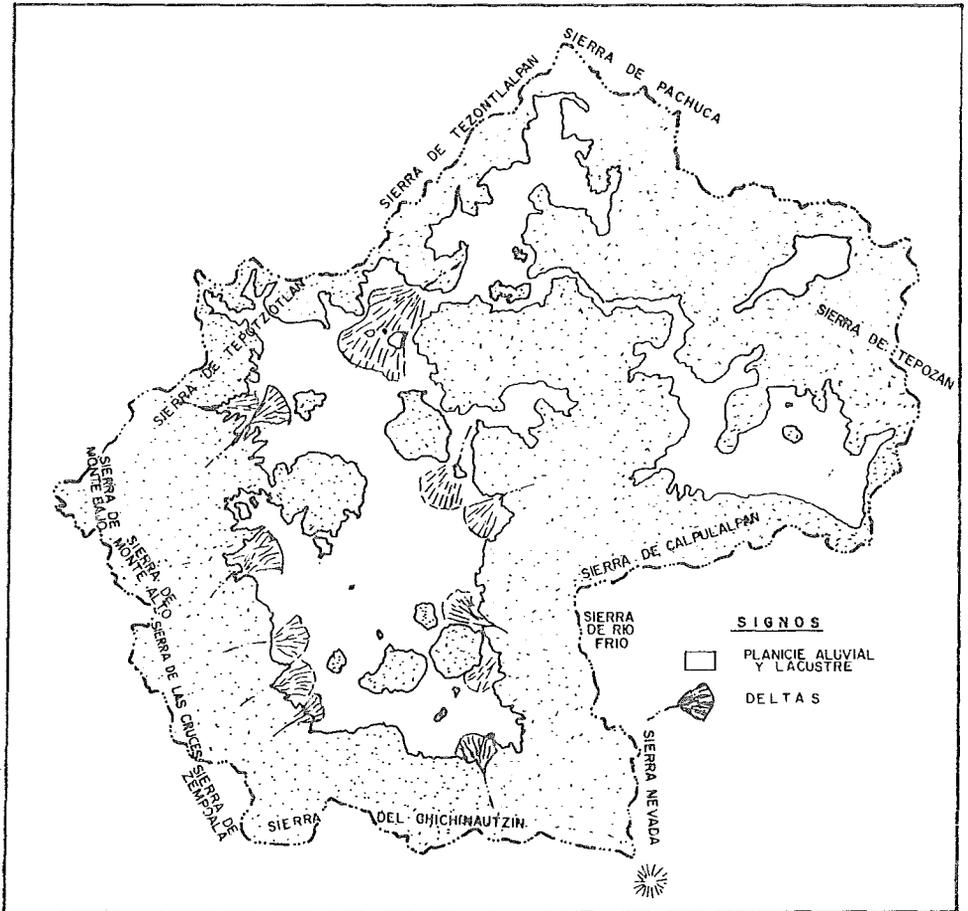
La parte Central de la Cuenca se fue llenando simultáneamente con acarreos limo-arenosos y emisiones de cenizas y pómez provenientes de los volcánes del Sur, que al sedimentarse lentamente en forma flocculante en la fase final y lacustre, constituyó a través del tiempo un suelo arcilloso sumamente compresible, conocido con el nombre genérico de Arcilla del Valle de México.

Por la morfología así constituída, las inundaciones han acaecido continuamente en la Ciudad de México. Estos problemas impulsaron la búsqueda de una solución drástica, consistente en abrir la cuenca natural cerrada del Valle de México para dar salida a las aguas excedentes. Esto fue logrado realizando obras en distintas épocas, tales como el túnel de Nochistongo, los túneles de Tequisquiac y recientemente el Sistema de Drenaje Profundo, los cuales drenan hacia el Noroeste de la cuenca.

En regiones volcánicas la historia geológica está íntimamente ligada a la tectónica, ya que por las fracturas ascienden los magmas y sobre ellas se forman los volcanes. La cuenca de México debe su formación a procesos volcánicos y tectónicos, que se han ido desarrollando, a veces



PROBABLE RED FLUVIAL  
PRE - CHICHINAUTZIN  
(F. MOOSER)  
FIGURA 1-1



ABANICOS DE CLASTICOS  
 EN LAS MARGENES DEL RELLENO ALUVIAL,  
 FORMADOS AL CIERRE DE LA CUENCA DE MEXICO  
 (F. MOOSER)  
 FIGURA I-2

lentamente, a veces intempestivamente, a partir del período de Eoceno Superior, o sea en los últimos 50 millones de años.

Tomando en cuenta las consideraciones anteriores se realizará una descripción de la morfología, tectónica y estratigrafía de la cuenca.

### Morfología.

Completamente rodeada de montañas, siendo las del Sur las más importantes, la gran planicie central tiene una altitud que oscila entre 2,240 m.s.n.m. en el Sur y 2,390 m.s.n.m. en el Norte.

De contorno irregular, la cuenca de México está alargada de Norte a Sur semejando una elipse, cuyo eje mayor de SE a NE, desde Xochimilco hasta las regiones de Pachuca, mide unos 110 kilómetros; en su eje menor de W a E, desde la Sierra de Las Cruces hasta el Iztaccihuátl, mide unos 80 kilómetros.

La extensión superficial, según la Comisión Hidrológica del Valle de México, es de 9,600 kilómetros cuadrados, de los cuales el 53.5% es plana.

Una cadena de altas montañas constituye el gran muro que rodea la cuenca (Fig. 1-3). Al SE, se encuentra la Sierra Nevada enmarcada por los grandes perfiles del Popocatepetl y del Iztaccihuátl. La Sierra Nevada se liga hacia el Sur con la Sierra del Chichinautzin y la Sierra de Ajusco. El cordón montañoso se proyecta al SW con las Sierras de Las



Cruces, Monte Alto y Monte Bajo, y sigue al NW la Sierra de Tepotzotlán, para cerrar al Norte con las Sierras de Tezontlalpan y Tolcayuca, así como por la Serranía de Pachuca.

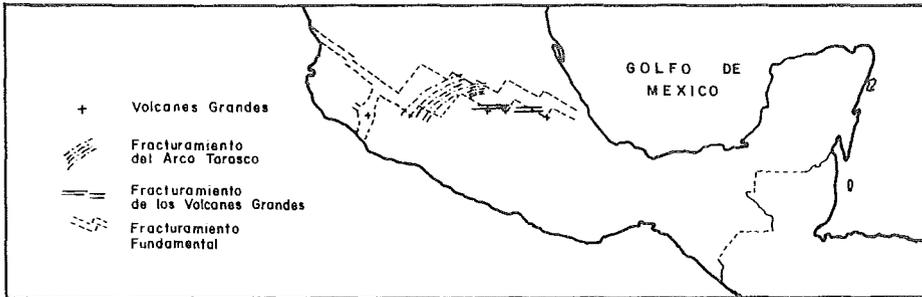
#### Tectónica y Formación de la Cuenca.

Sobre el arreglo ortogonal del fracturamiento fundamental de la Faja Volcánica Mexicana se desarrollaron los primeros acontecimientos volcánicos. Las erupciones principalmente del Terciario Medio como muchas posteriores obedecen probablemente a sus intersecciones y alineamientos (Figs. I-4 y I-5). Aparecen depósitos fluviales con cantos rodados de calizas formando rellenos en sinclinales y fosas tectónicas a la base de las vulcanitas. Estos rellenos están intercalados con depósitos de yeso y alguna que otra vez con tobas volcánicas, a menudo alteradas. Estos elementos no afloran en la cuenca de México, pero sí existen a profundidad.

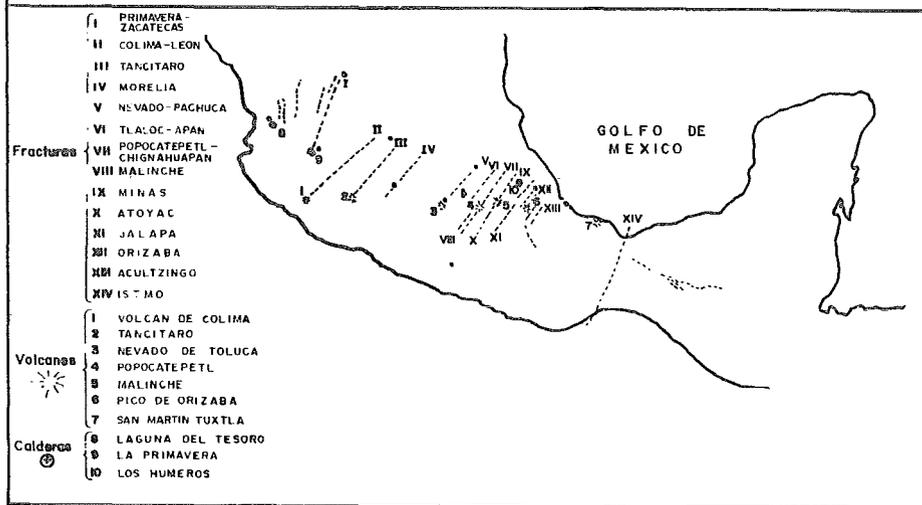
Depósitos pertenecientes a fases subsecuentes ya no contienen cantos de calizas y consisten de lavas, tobas y brechas volcánicas aunque también están asociados localmente con arcillas lacustres, travertinos y rellenos fluviales.

Las rocas volcánicas más antiguas de la cuenca afloran en el Noroeste; aquí aparecen series volcánicas compuestas de lavas intermedias y ácidas, con abundantes ignimbritas y tobas, conteniendo depósitos fluviales.

Ya en el Mioceno Superior se producen las subsecuentes vulcani



LOS TRES FRACTURAMIENTOS INDIVIDUALES DE LA FAJA VOLCANICA TRANSMEXICANA (F. MOOSER) FIGURA I-4



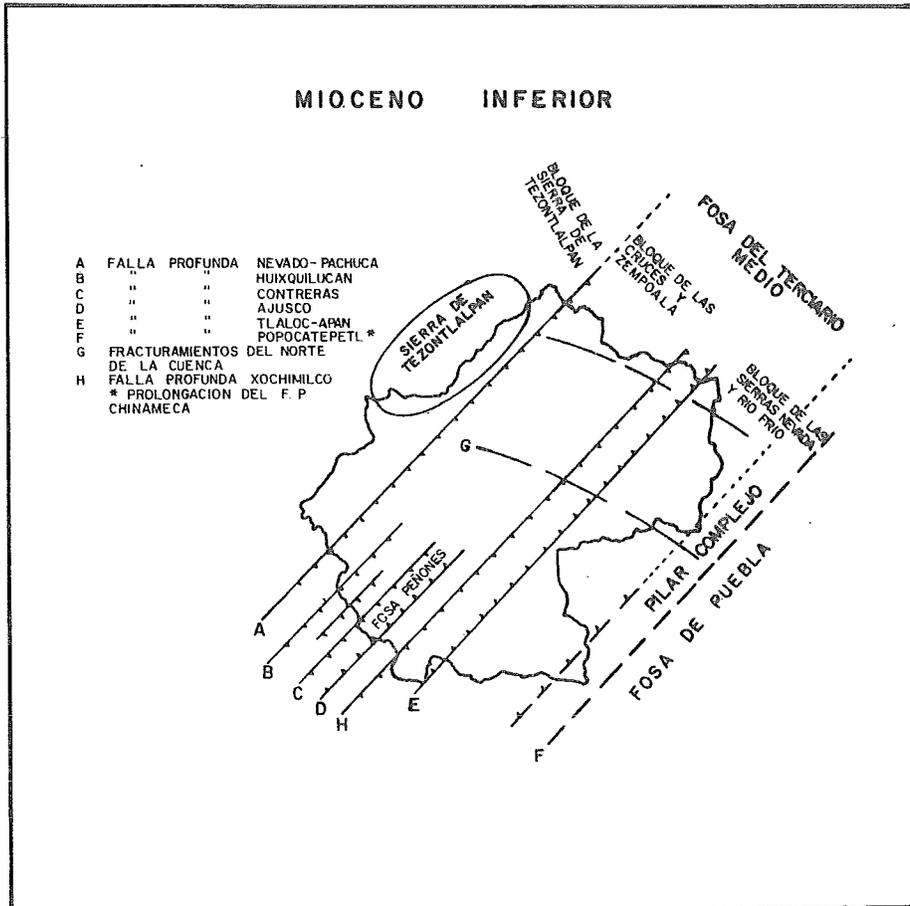
LOS FRACTURAMIENTOS MÁS IMPORTANTES DIRIGIDOS AL NE. DENTRO DE LA FAJA VOLCANICA TRANSMEXICANA (F. MOOSER) FIGURA I-5

tas; las rocas volcánicas que afloran en la parte meridional de la cuenca, -- son por lo general dacíticas, se encuentran en las bases de las Sierras Mayores al Este y Oeste: Púlpito del Diablo, Mirador y Sierra de Xochitepec. También en este período se formaron las elevaciones andesíticas del Peñón de los Baños, Cerro del Tigre, Cerro de Santa Isabel, Zacatepec y Chapultepec, las lavas andesíticas oscuras de la Serie Humaredas, así como -- las tobas lacustres pliocénicas, superpuestas, que predominan entre Hue -- huetoca y Tula.

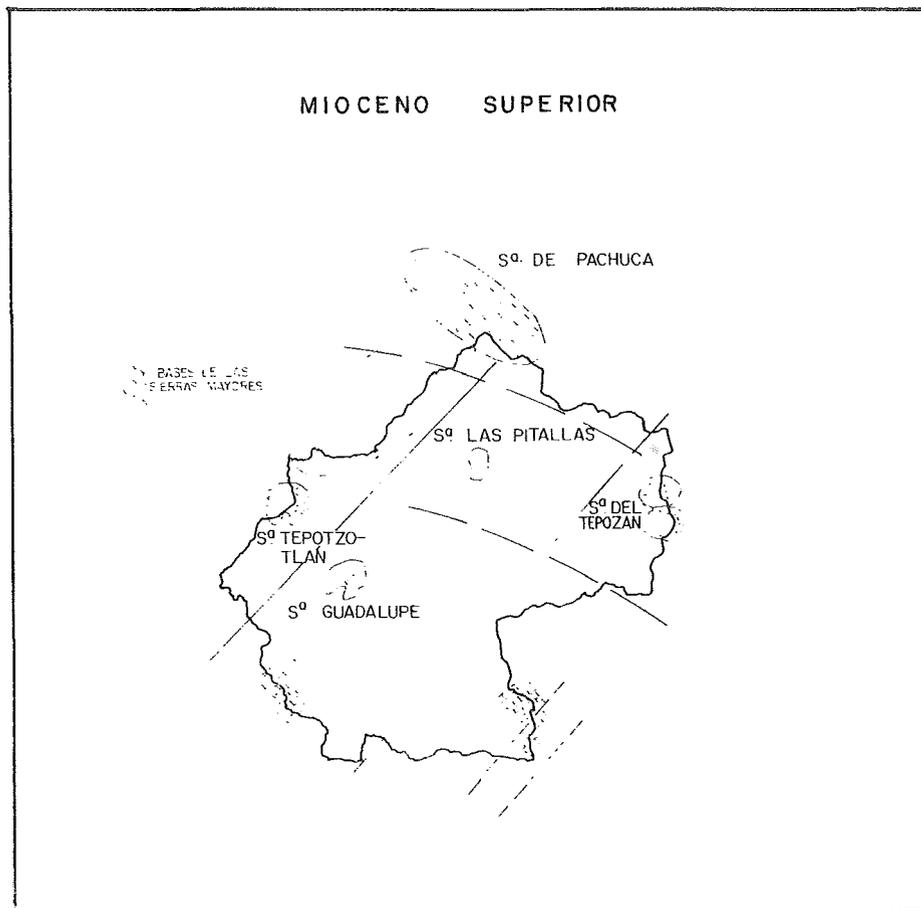
Al mismo tiempo, se desarrollaron fosas dirigidas al NE formándose así la estructura básica profunda de la cuenca; una fosa mayor con escalonamientos hacia el centro entre las fallas profundas de Tláloc - Apan y Nevado - Pachuca; el hundimiento máximo, dirigido de Xochimilco a Tecomulco, constituye la fosa central. (Fig. I-6).

Subsecuentemente, se verificaron debido a esfuerzos tectónicos horizontales leves transurrencias a la derecha a lo largo de algunas de -- las fallas dirigidas al N-E. Sobre el conjunto de escalonamientos, surgen los conos de las Sierras Menores como son Tepetzotlán, Guadalupe, Patlachique, Pitayas, Tepozán y la de Pachuca, aunque esta última principió su actividad anteriormente. Estas sierras, obstruyeron parcialmente el drenaje al N-E y S-W de la cuenca. (Fig. I-7).

A principios del Plioceno crecen los grandes volcanes del grupoo de las Sierras Mayores. En el curso de su formación se acentuó el escalonamiento profundo de la cuenca.



LA CUENCA DE MEXICO  
EN EL MIOCENO INFERIOR  
(F. MOOSER)  
FIGURA I-6



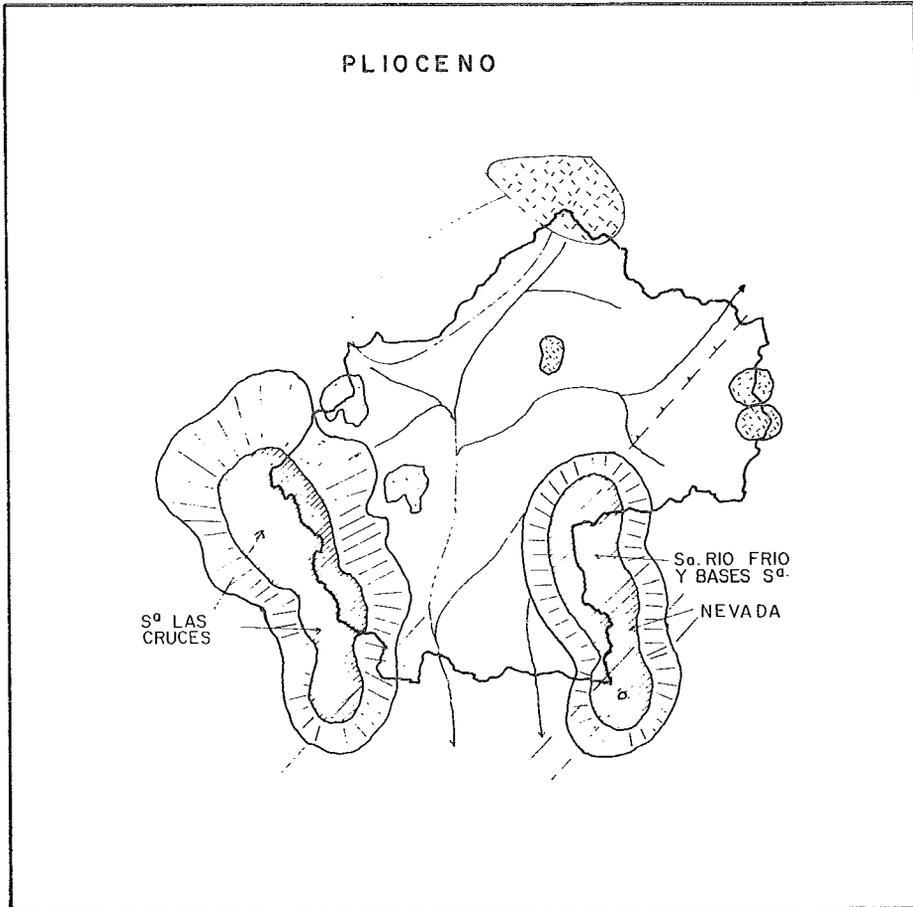
LA CUENCA DE MEXICO  
EN EL MIOCENO SUPERIOR  
(F. MOOSER)  
FIGURA I-7

La formación de las Sierras Mayores; Sierra de las Cruces, de Río Frío y la Sierra Nevada, esencialmente formadas por lavas porfido-andesíticas que son el producto de numerosos estrato-volcanes, fijaron los límites Oriente y Poniente de la cuenca. (Fig. I-8).

La fosa antigua que corta la zona de Barrientos, se prolonga hacia el SW a las lomas. Aquí la formación Tarango, consistente en piroclásticos depositados a los pies de las Sierras Mayores y que forman abanicos entrelazados, también fue afectada.

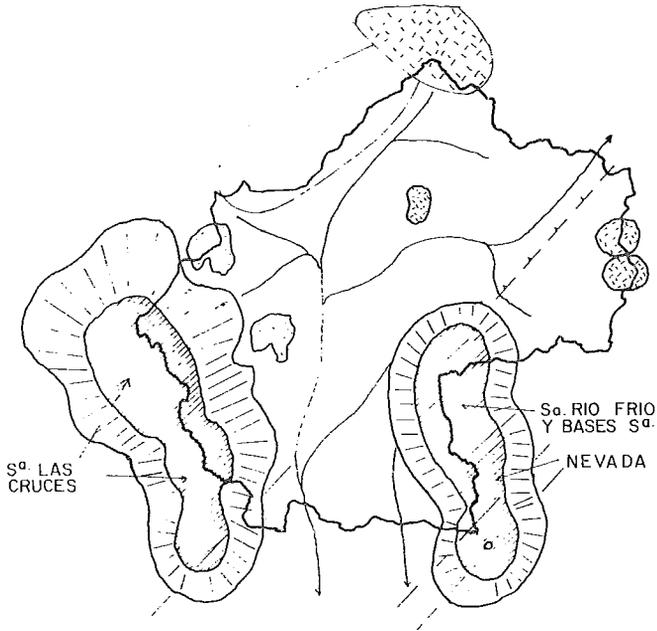
Hacia el Plioceno Superior principió el tectonismo que formarfa en el Sur de la cuenca, así como en los Valles de Puebla y Toluca, La Sierra de los Volcanes; se trata del fracturamiento de los grandes Volcanes. Sus fracturas dirigidas W-E se fallaron generando desplazamientos verticales individuales de 100 a 300 metros. Estos produjeron la moderna zona de bloques escalonados, marcando probablemente el límite Norte de una fosa moderna. Hacia fines del plioceno cambió el régimen tectónico; se formaron fracturas dirigidas esencialmente W-E en la zona de Puebla y al Sur de Toluca. Sin embargo, en el espacio de la Cuenca de México estas fracturas sufrieron una ligera deflexión, manteniendo una dirección WSN-ENE (Fig. I-9), se trata del alineamiento caracterizado por la Sierra de Santa Catarina.

Este tectonismo finalmente abrió paso a las grandes masas de basalto que construyeron la Sierra del Chichinautzin entre las Sierras Nevada y Zempoala, la cual obstruyó el antiguo drenaje al Sur y creó la mo-



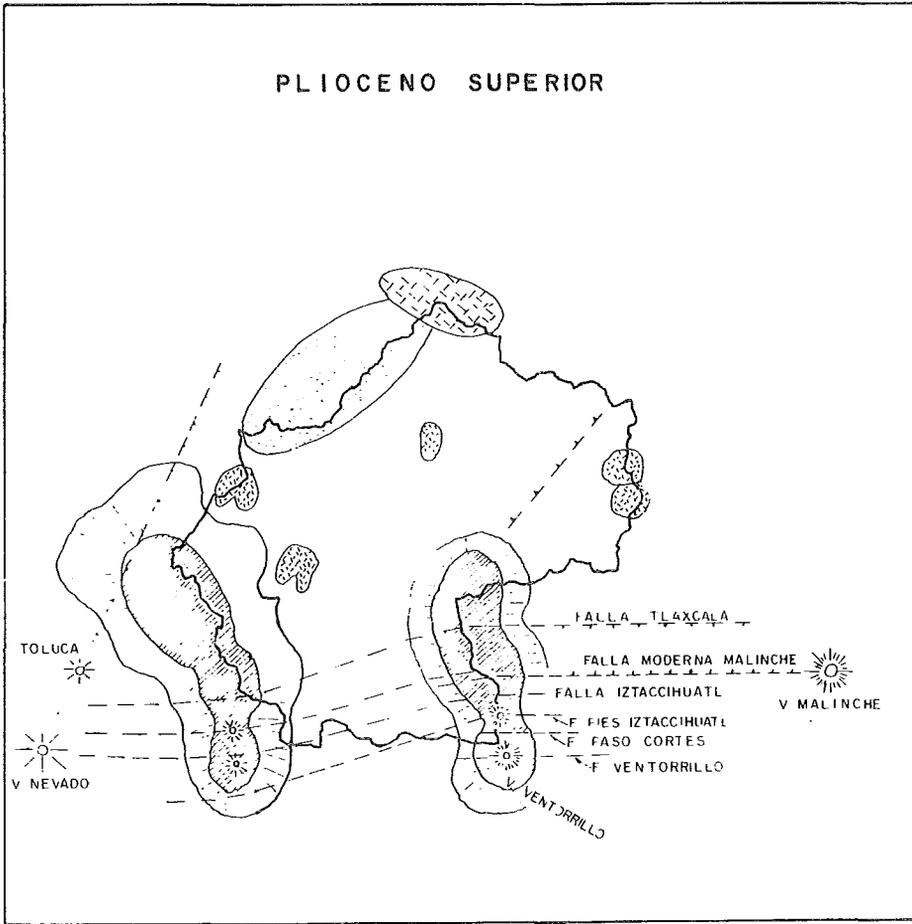
LA CUENCA DE MEXICO  
EN EL PLIO-PLEISTOCENO  
(F. MOOSER)  
FIGURA I-8

## PLIOCENO



LA CUENCA DE MEXICO  
 EN EL PLIO-PLEISTOCENO  
 (F. MOOSER)  
 FIGURA I-8

## PLIOCENO SUPERIOR



LA CUENCA A FINES  
 DEL PLIOCENO  
 (F. MOOSER)  
 FIGURA I-9

derna Cuenca Lacustre Cerrada (Fig. I-10).

En resumen, los detalles tectónicos más relevantes de la cuenca, según se desprende de las investigaciones realizadas por el proyecto Texcoco, se pueden apreciar en las figuras I-11 y I-12.

En la Figura I-11 se indica que debajo del relleno aluvial de la cuenca, existen dos sistemas de fracturas tectónicas orientadas SSW-NNE y WNW-ESE.

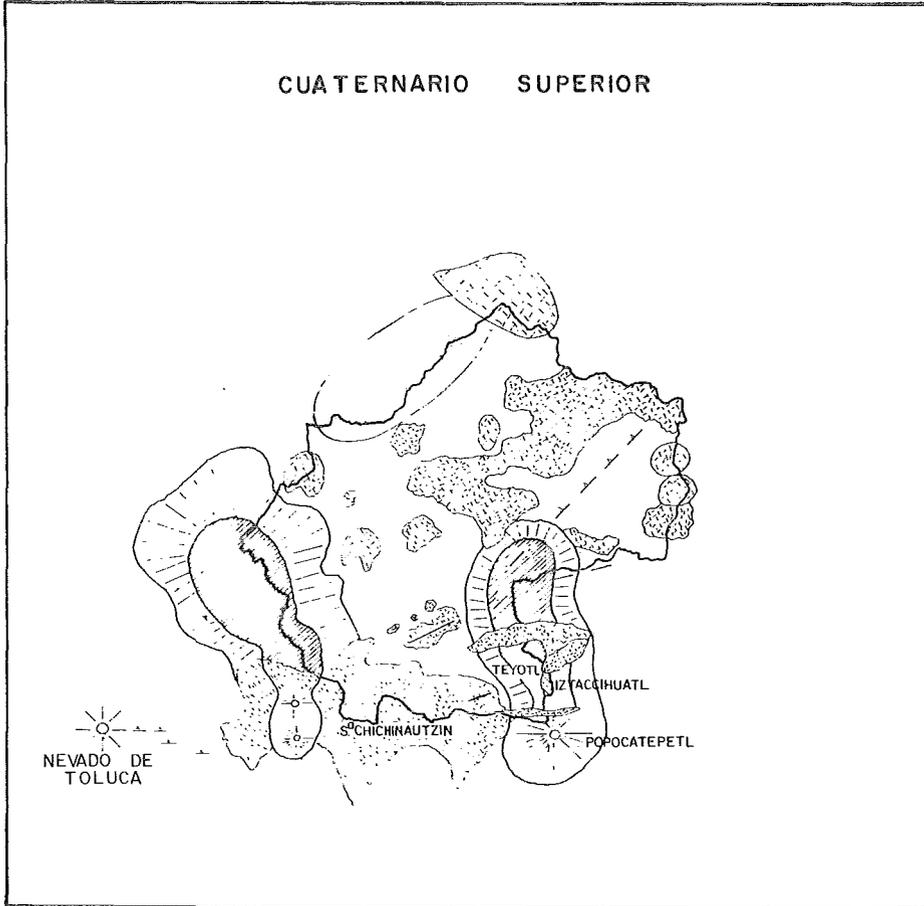
En la Figura I-12 el corte geológico nos muestra las trazas de las fallas del sistema SSW-NNE que cortan la cuenca. Nótese que la Ciudad de México se localiza sobre un graben, cortado a su vez por una falla, y que otro tanto ocurre con la planicie del Antiguo Lago de Texcoco. A uno y otro lado de estos bloques hundidos, se halla una sucesión de fallas escalonadas, y entre ambas queda el Horst del Peñón.

#### Estratigrafía.

Investigaciones geológicas recientes han permitido establecer con certeza que, hasta una profundidad de alrededor de 2,000 metros, la Estratigrafía de la cuenca está constituida por una sucesión de depósitos volcánicos, que abarcan desde el Terciario Medio hasta el presente.

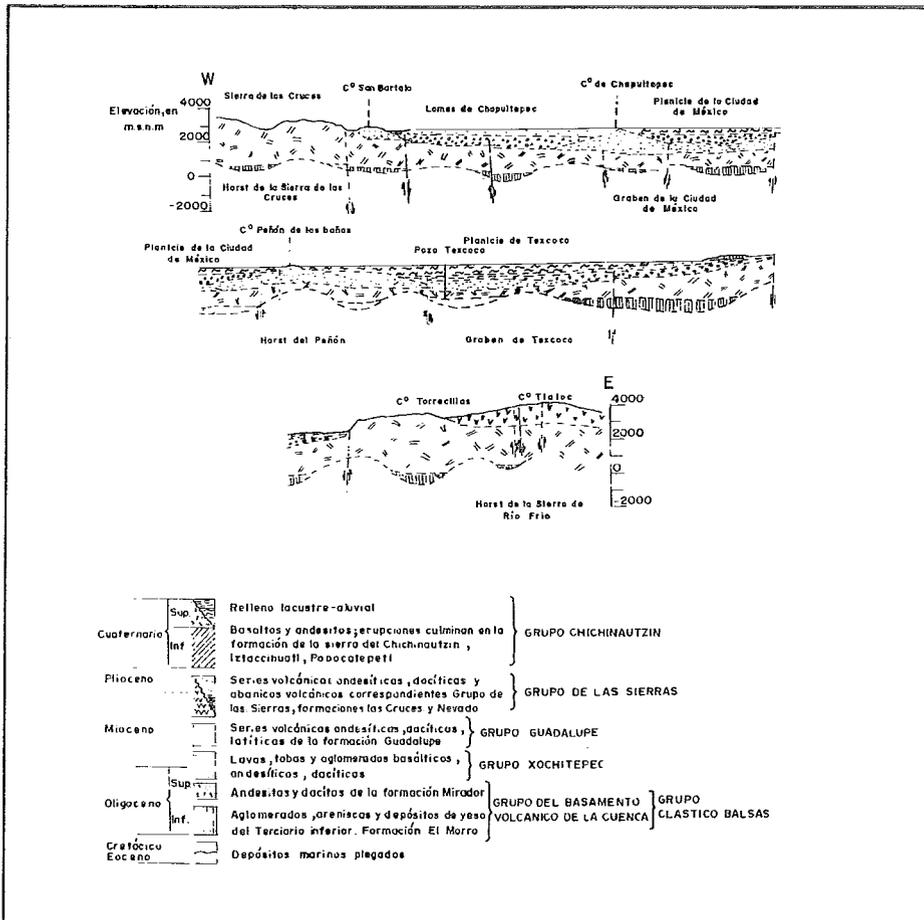
En la Figura I-13 se muestra la columna estratigráfica del pozo profundo perforado en el Lago de Texcoco, complementada con edades radiométricas. La edad de los depósitos de arcilla lacustre es mayor que la

## CUATERNARIO SUPERIOR

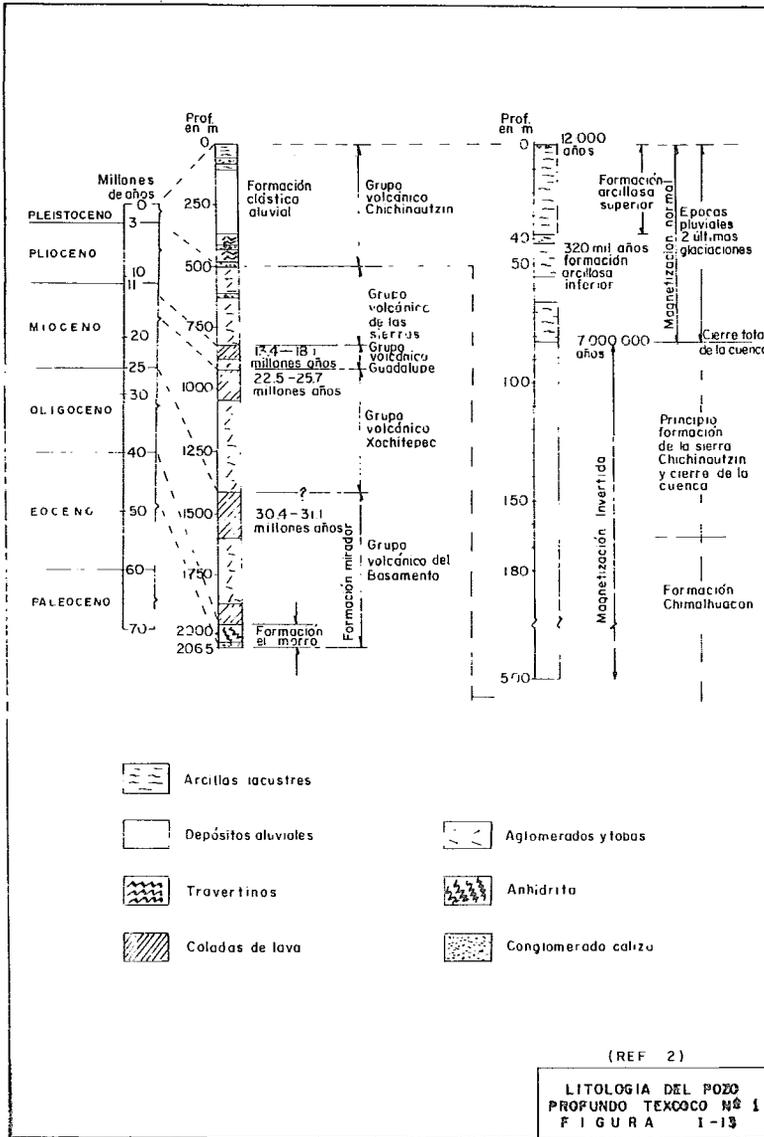


LA CUENCA DE MEXICO  
 EN EL CUATERNARIO SUPERIOR  
 (F. MOOSER)  
 FIGURA I-10





SECCION W-E A TRAVES DE LA CUENCA DE MEXICO (F. MOOSER) FIGURA 1-12



atribuída hasta hace poco tiempo, pues los primeros 40 metros de ellos -- abarcan probablemente un período de aproximadamente 320,000 años.

Desde el punto de vista de la Ingeniería Civil, las formaciones -- de mayor interés son dos: las lomas sobre las que se localizan las zonas -- Oeste y Suroeste de la Ciudad y los estratos superiores de la llamada for-- mación clástica aluvial, que se depositó durante y después del cierre de la cuenca y cuyo espesor total alcanza 500 metros aproximadamente. Esta -- última formación se acumuló en el Pleistoceno Superior, como resultado -- de la actividad volcánica más reciente ocurrida en el Sur del Valle; está -- constituída por más de 400 metros de materiales granulares aluviales y -- por los depósitos superficiales de formación lacustre que mide aproximada mente de 50 a 100 metros, principalmente arcillosos, con intercalaciones-- delgadas de pomez, arena negra y vidrio volcánico. En estas arcillas la--- custres, a profundidad variable entre 20 y 30 metros, se presenta un nota-- ble horizonte de desecación, que constituye la llamada primera capa dura-- bajo la Ciudad de México; en ciertos sitios esa capa es esencialmente gra-- nular--arenas finas y medias--, mientras que en otras predominan los limos.

Las lomas al Oeste y Suroeste de la Ciudad, según investigacio-- nes anteriores, están constituídas por tres formaciones, denominadas de -- abajo hacia arriba, Tarango, Tacubaya y Becerra. Estudios más recien-- tes descartan la existencia de la formación Tacubaya, por considerarla -- constituída por suelos producto de la meteorización de la formación Taran-- go, y sostiene muy condicionalmente la validez de la formación Becerra --

sólo en su facies lacustre, como parte de un complejo del Pleistoceno Superior.

La formación Tarango, está constituída por brechas andesíticas, arenas y limos del Plioceno. Esta formación se prolonga hacia el fondo de la cuenca, y constituye la base sobre la que se deposita, en el Pleistoceno Superior, la formación clástica aluvial que termina en los depósitos lacustres.

## C A P I T U L O   I I

### CARACTERISTICAS DEL SUBSUELO DE LA CIUDAD DE MEXICO

#### 1.-        Estratigrafía y Zonificación.

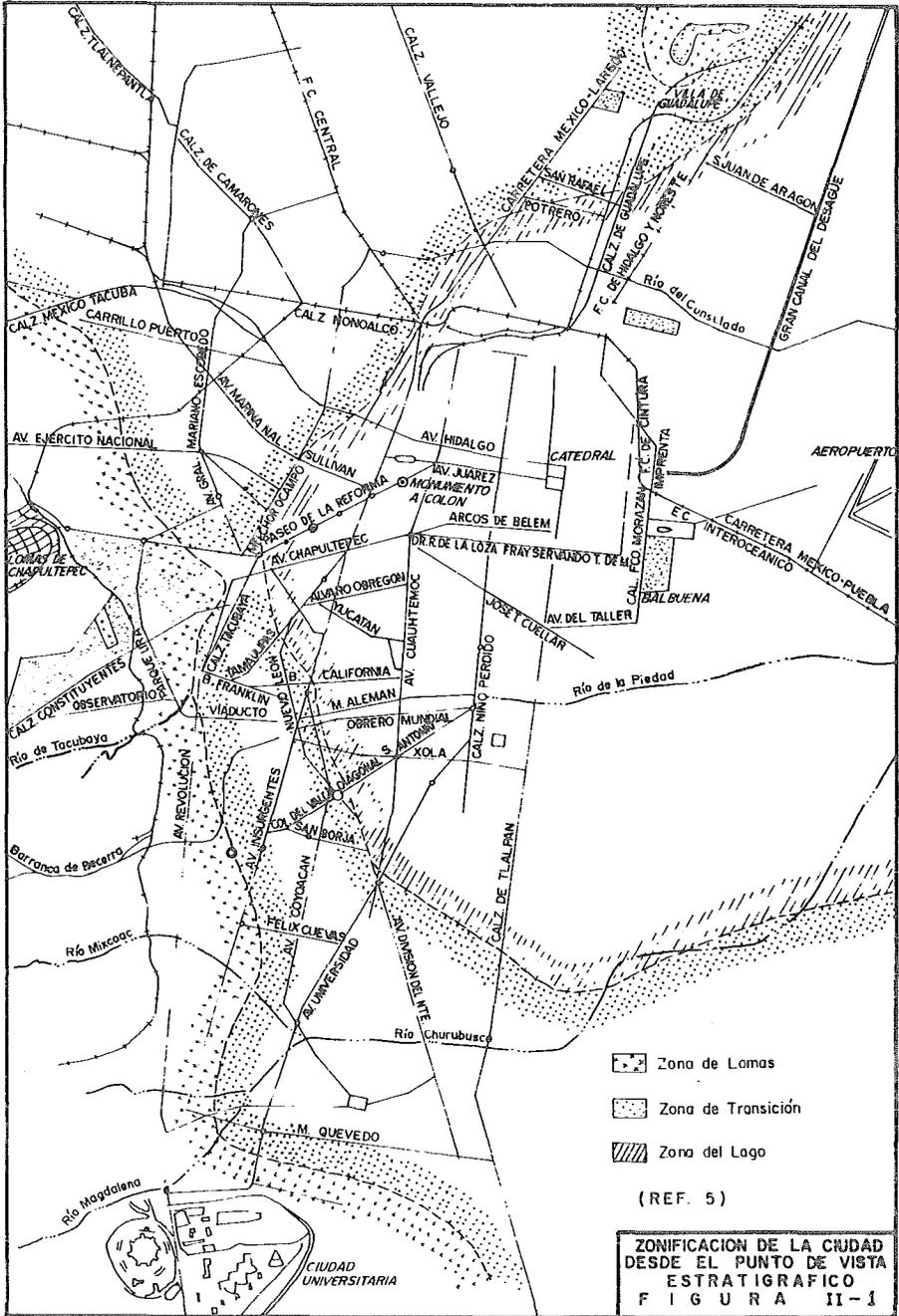
Mediante numerosos sondeos exploratorios, se ha logrado una — información bastante precisa de las características estratigráficas y mecánicas que presenta el subsuelo en el área urbana de la Ciudad de México. — Con estos datos, se ha dividido tradicionalmente en tres zonas, denominadas: A) Del Lago, B) De Lomas y C) De transición (Fig. II-1).

##### A) Zona del Lago.

Se caracteriza por tener un subsuelo con grandes espesores de — arcillas lacustres de origen volcánico muy compresibles, de baja resistencia al corte y con altos contenidos de agua. La estratigrafía en general, — es regular, aunque cada estrato suele ser de espesor variable. En esta zonna, aparecen generalmente cinco estratos principales descritos a partir de la superficie del terreno:

##### a) Manto Superficial:

Formado por rellenos artificiales heterogéneos con sucesión de — capas arenosas, limoarenosas y arcillolimosas; en ocasiones cementadas — con caliche y en general compactos; generalmente ocupa los primeros 5 metros y en algunos puntos de la ciudad hasta 10 metros de profundidad.



b) Formación arcillosa superior:

Consiste en depósitos lacustres de arcillas volcánicas extraordinariamente compresibles, de variados colores y consistencias comprendidas entre blanda y media, intercaladas con pequeños lentes de arena, su espesor aumenta de Poniente a Oriente, variando entre 15 y 32 metros. La cota inferior del contenido de agua medio es de 270%.

c) Primera capa dura:

Constituída por suelos arcillo o limo-arenosos, compactos y rígidos, se encuentra a 33 metros aproximadamente de la superficie y tiene un espesor de 3 metros. Debido a la heterogeneidad de los suelos, el contenido de agua varía entre el 20 y 100%, considerándose un contenido de agua medio general del 50%.

d) Formación arcillosa inferior:

En esta formación generalmente se observan lentes compactos de arcilla volcánica y de suelos limosos interestratificados con la arcilla, de consistencia media a dura y compresibles. Tiene un espesor entre 4 y 14 metros. El contenido de agua medio es del 170%.

e) Depósitos Profundos:

Generalmente están constituidos por suelos arenosos finos, gravas arenosas, limos arcillosos, arenas limosas en estado compacto. Se encuentran aproximadamente a 50 metros de profundidad.

Las propiedades índice de las formaciones anteriores tomadas de las curvas de regresión estadística de "El Subsuelo de la Ciudad de México" se presentan en las Tablas I, II, III.

El corte estratigráfico anterior (Fig. II-2) es característico del área urbana, tomado de diferentes sondeos realizados en la Ciudad de México.

#### B) Zona de Lomas.

El subsuelo de esta zona -faldas de serranías y lomeríos del Oeste y Suroeste de la cuenca- está formado por materiales de origen volcánico, particularmente abanicos y corrientes lávicas, y suelos producto de la meteorización de los primeros.

Esta zona se distingue de las del Lago y Transición por ser sus materiales de mayor resistencia al corte y menor compresibilidad.

Por tratarse de formaciones heterogéneas y erráticas, en esta zona es fundamental la exploración del subsuelo con miras a determinar de un modo sencillo y económico las variaciones de compacidad relativa; en algunos casos será suficiente realizar sondeos de penetración, pero en otros, debido a la alta resistencia que oponen ciertos estratos, se requerirán perforaciones ejecutadas por la vía húmeda.

La existencia de minas de arena y grava en esta región y la posibilidad de grandes grietas, obliga a una exploración minuciosa.

TABLA I  
GRUPO 1

	Wi	Ss	e <sub>i</sub>	LL	LP	Ip	a <sub>vm</sub>	a <sub>vp</sub>	a <sub>v máx</sub>	q <sub>u</sub>	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	113.2	2.5	3.0	131	59.1	72.3	-	-	-	1.14	127
Formación arcillosa superior	3446	2.4	8.4	327	902	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	228	2.5	5.9	219	69.3	144	0.37	0.77	1.11	0.91	45
Depósitos profundos	67.7	2.5	1.9	92	48.5	45	-	-	-	2.25	143

EN LA TABLA

- |  |   |
|--|---|
| Wi Contenido natural de agua inicial                     | LP Limite plástico  |
| Ss Densidad de sólidos                                   | Ip Indice de plasticidad.   |
| e <sub>i</sub> Relación de vacios                        | a <sub>vm</sub> Coeficiente de compresibilidad en recompresion.                     |
| LL Limite liquido.                                       | a <sub>vp</sub> Coeficiente de compresibilidad en el intervalo de preconsolidación. |
| a <sub>v máx</sub> Coeficiente de compresibilidad máximo | Md Módulo de deformación  |
| q <sub>u</sub> Resistencia a la compresión no confinada. |   |

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

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

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

(REF. 5)

TABLA II  
GRUPO 2

	Wi	Ss	e <sub>i</sub>	LL	LP	Ip	a <sub>vm</sub>	a <sub>vp</sub>	a <sub>vmáx</sub>	q <sub>u</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	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	0.84	1.49	61.6
Depósitos profundos	55	2.5	2.1	117	50	64	-	-	-	2.60	265

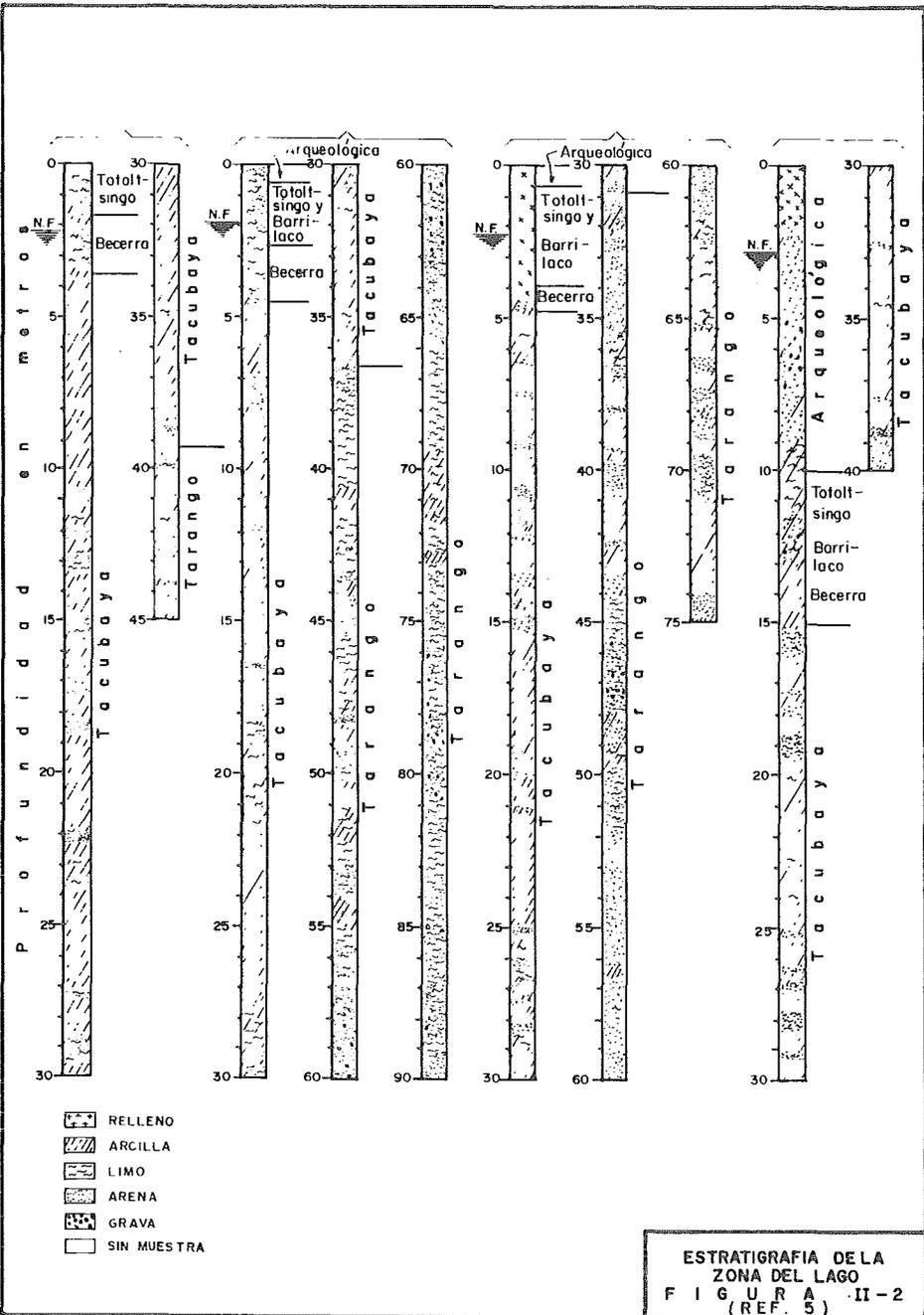
TABLA III  
GRUPO 3

	Wi	Ss	e <sub>i</sub>	LL	LP	Ip	a <sub>vm</sub>	a <sub>vp</sub>	a <sub>vmáx</sub>	q <sub>u</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	95	2.5	2.8	103	54	50	-	-	-	0.91	491
Formación arcillosa superior	263	2.4	6.4	283	86	197	0.58	1.25	1.84	0.90	402
Capa Dura	48	2.5	1.4	51	38	15	-	-	-	1.65	1044
Formación arcillosa inferior	177	2.4	4.4	214	70	144	0.19	0.39	0.57	1.94	846
Depósitos profundos	52	2.5	1.3	71	42	32	-	-	-	2.72	578

EN LAS TABLAS ANTERIORES

- Wi Contenido natural de agua inicial .      LP Limite plástico .
- Ss Densidad de sólidos .                      Ip Indice de plasticidad .
- e<sub>i</sub> Relación de vacíos .                      a<sub>vm</sub> Coeficiente de compresibilidad  
en recompresión .
- LL Limite líquido .                              a<sub>vp</sub> Coeficiente de compresibilidad  
en el intervalo de preconsolidación .
- a<sub>vmáx</sub> Coeficiente de compresibilidad      M<sub>d</sub> Módulo de deformación .  
máximo .
- q<sub>u</sub> Resistencia a la compresión no  
confinada .

( REF. 5 )



### C) Zona de Transición.

Se localiza entre las dos antes descritas, es errática en estratigrafía y, por lo tanto, en propiedades mecánicas. En general, se tienen superficialmente los depósitos arcillosos o limosos orgánicos de la formación Becerra, cubriendo a estratos de arcilla volcánica muy compresibles y de espesores variables, intercalados con capas de arena limosa compacta o arena limpia, los cuales descansan sobre potentes mantos, en los que los materiales que predominan son la grava y la arena.

Las propiedades índice de la zona anterior se presentan en la -- Tabla IV.

En la Figura II-3 se ilustran las discrepancias que cabe esperar en esta zona de la ciudad.

Los cortes estratigráficos bajo el área urbanizada, según dos -- ejes normales con dirección N-S y W-E (Fig. II-4) dan una idea aproximada de la disposición de los estratos principales ya descritos. Se observa que al Oeste, afloran los depósitos clásticos aluviales de la formación, los que con una pronunciada pendiente penetran profundamente hacia el centro de la ciudad, y quedan fuera del alcance de los sondeos realizados en el Lago de Texcoco.

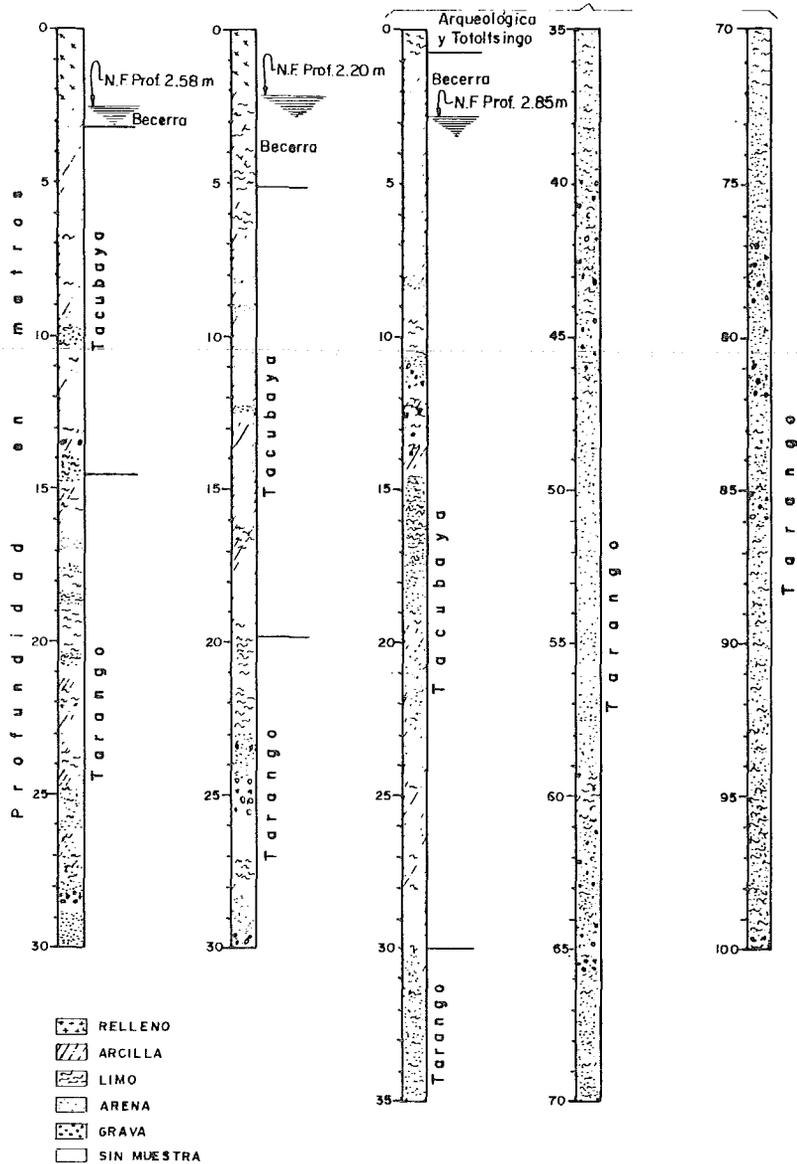
Estos restos de los abanicos aluviales, están cubiertos por las -- gravas y arenas del Pleistoceno Superior y los estratos compresibles constituidos por las cenizas volcánicas.

TABLA IV  
GRUPO 4

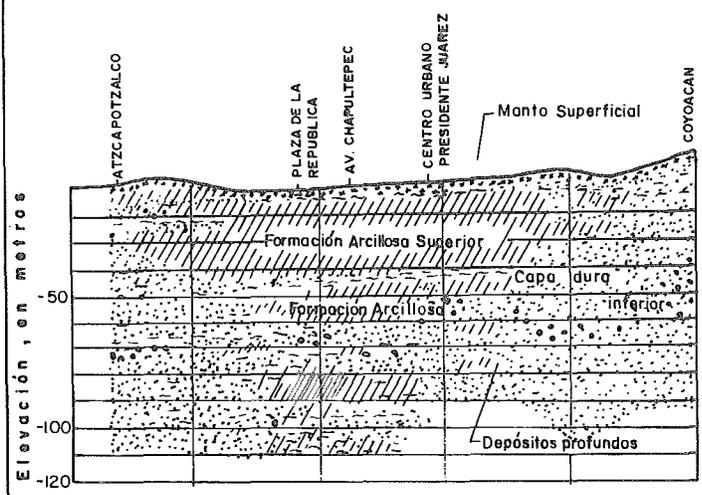
	Wi	Ss	e <sub>i</sub>	LL	LP	Ip	a <sub>vm</sub>	a <sub>vp</sub>	a <sub>v,max</sub>	q <sub>u</sub>	M <sub>d</sub>
	%	-	-	%	%	%	cm <sup>2</sup> /kg	cm <sup>2</sup> /kg	cm <sup>2</sup> /kg	kg/cm <sup>2</sup>	kg/cm <sup>2</sup>
Manto Superficial	74	2.5	2.1	87.3	43	38.4	-	-	-	0.84	52.1
Formación arcillosa superior	225	2.4	5.6	243	78.1	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	
Depósitos profundos	70	2.5	2.2	104	50.5	53.5	-	-	-	1.48	72.1

EN LA TABLA

Wi	Contenido natural de agua inicial	LP	Límite plástico
Ss	Densidad de sólidos	Ip	Índice de plasticidad
e <sub>i</sub>	Relación de vacíos	a <sub>vm</sub>	Coefficiente de compresibilidad en recompresión.
LL	Límite líquido	a <sub>vp</sub>	Coefficiente de compresibilidad en el intervalo de preconsolidación
a <sub>v,max</sub>	Coefficiente de compresibilidad máximo	M <sub>d</sub>	Módulo de deformación
q <sub>u</sub>	Resistencia a la compresión no confinada		

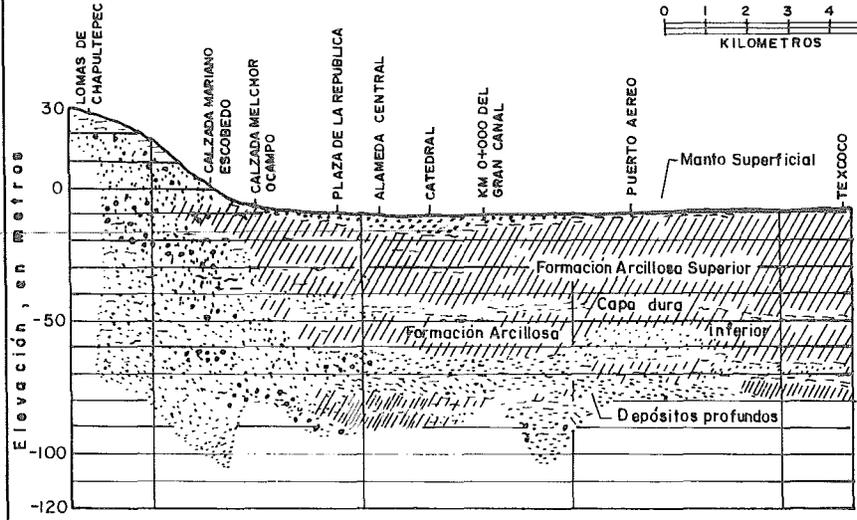


ESTRATIGRAFIA DE LA ZONA DE TRANSICION FIGURA II - 3 (REF. 5)



NOTA:  
La elevación 0, corresponde a la cota del Banco de Atzacalco = 2244.5 m

CORTE N-S POR EL MONUMENTO A COLON



CORTE W-E POR EL MONUMENTO A COLON

SIGNOS CONVENCIONALES

- RELLENO
- LIMO
- GRAVA
- ARCILLA
- ARENA
- ARCILLA COMPACTA

Tanto al Norte como al Sur del área urbana, los mantos de arcilla blanda y de gran plasticidad, se reducen de espesor, descubriéndose en la zona de El Pedregal los depósitos arenosos del Pleistoceno Superior y - los derrames de lava basáltica.

a.- Escudo de Frente Abierto.

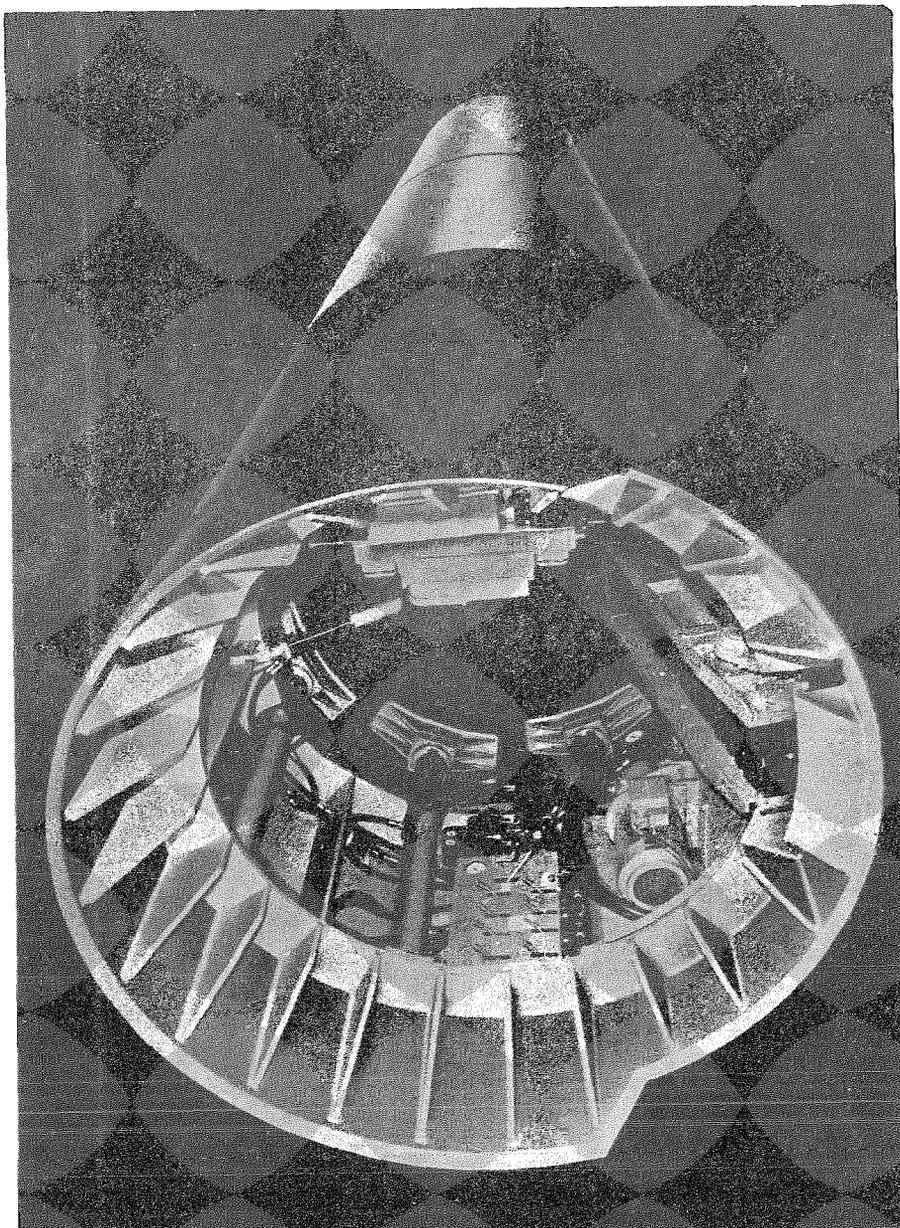
Este tipo de escudo es un cilindro de acero rígido abierto en sus dos extremos longitudinales; presenta grandes facilidades en el frente de ataque para realizar la excavación del terreno y, hace menos difíciles los trabajos de erección del revestimiento prefabricado, ya que cuenta con "un brazo erector" colocado en la parte posterior.

Aunque existe una gran variedad de escudos en cuanto a la forma, los circulares son los más utilizados debido a que presentan mayor resistencia a las presiones externas que, como ya se mencionó, es la función principal del escudo. Las valiosas experiencias en cuanto a diseño de escudos circulares han dado como resultado que una relación de longitud a diámetro con valores entre 1 y 1.5 sean los adecuados para facilitar su manejo.

La parte principal de la estructura del escudo recibe el nombre de "camisa" o "forro", la cual está constituida de placas de acero que unidas entre sí le dan la forma cilíndrica.

La camisa o forro, a su vez, se divide en tres partes, que son:

1.- La cuchilla cortadora o "cachucha", colocada en el extremo delantero de la camisa y cuyo diámetro es ligeramente mayor que el diámetro del escudo. Tiene la capacidad de penetrar un suelo blando bajo el impulso de una serie de gatos hidráulicos apoyados contra el revestimiento final. Es sumamente reforzada y su rigidez interna se incrementa



Escudo de Frente Abierto. Máquina típica para el tuneleo en -  
suelos blandos.

con anillos atezados. Las funciones que tiene encomendadas son las siguientes:

- a) Facilitar uniformemente el avance y conducción del cuerpo del escudo cortando el frente, y proveer una distribución hasta donde sea posible de las presiones inducidas que lo empujan hacia atrás.
- b) Proteger a los trabajadores que realizan la excavación, y resistir la presión del terreno en el frente.

2.- El "tronco" o parte intermedia de la camisa sirve para alojar la maquinaria que permite impulsar hacia adelante al escudo, tales como gatos hidráulicos, así mismo, tableros de operación, plataformas de trabajos montadas sobre postes atezadores, etc.

3.- La cubierta trasera del escudo se le conoce con el nombre de "faldón", está diseñada de tal manera que pueda soportar las presiones verticales ejercidas por el terreno. Es en esta parte donde se realizan las maniobras necesarias para ir colocando el revestimiento prefabricado del túnel a medida que avanza la excavación.

La estructura total del escudo se complementa con maquinaria especial para la excavación, rezaga y transporte del material, montaje e inyección. El escudo está equipado con cuatro plataformas de rastras en las cuales están colocados: el brazo erector; bombas para proporcionar el fluido hidráulico a los gatos; equipo hidráulico de emergencia; y el control eléctrico para protección y operación del equipo, incluyendo un transformador de energía eléctrica. Todo esto es indispensable en la tunelización

con escudos.

Las Figuras IV-1 y IV-2 nos muestran las partes del escudo.

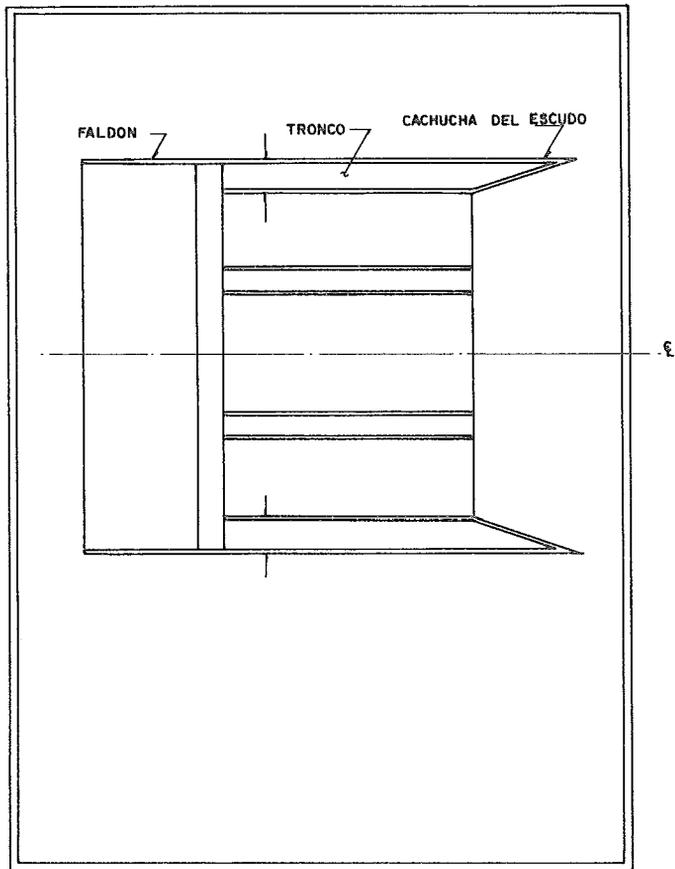
Ciclo de Operación.

La excavación de un túnel se realiza estableciendo un "Ciclo de Operación" (Figs. IV.3 y IV.4), cuyo propósito es el de llevar a cabo una comparación de costos entre cada fase de un proyecto. También permite conocer si la ejecución del trabajo con respecto al tiempo se está efectuando tal y como se planeó, para que, en caso contrario, se preste atención especial a aquéllas fases del trabajo que van retrasadas.

Dentro de las operaciones del túnel el ciclo de trabajo se compone de las siguientes etapas:

- a) Excavación.
- b) Ademe del frente.
- c) Bajar mampara.
- d) Rezaga.
- e) Levantar mampara.
- f) Empujar el Escudo.
- g) Limpiar la plantilla.
- h) Colocar segmentos.
- i) Apretar tornillos entre dovelas.

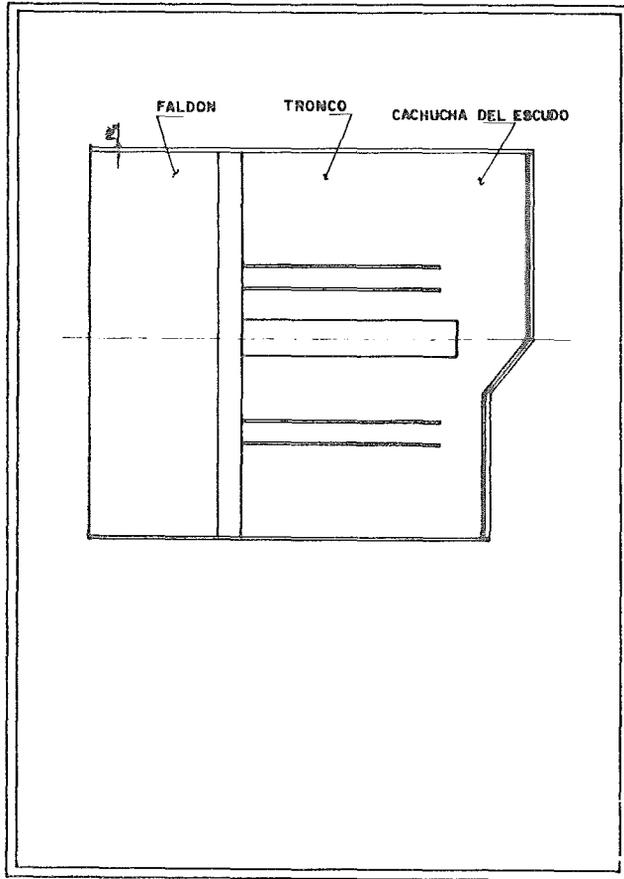
La excavación se realiza en el frente mediante el uso de martillo



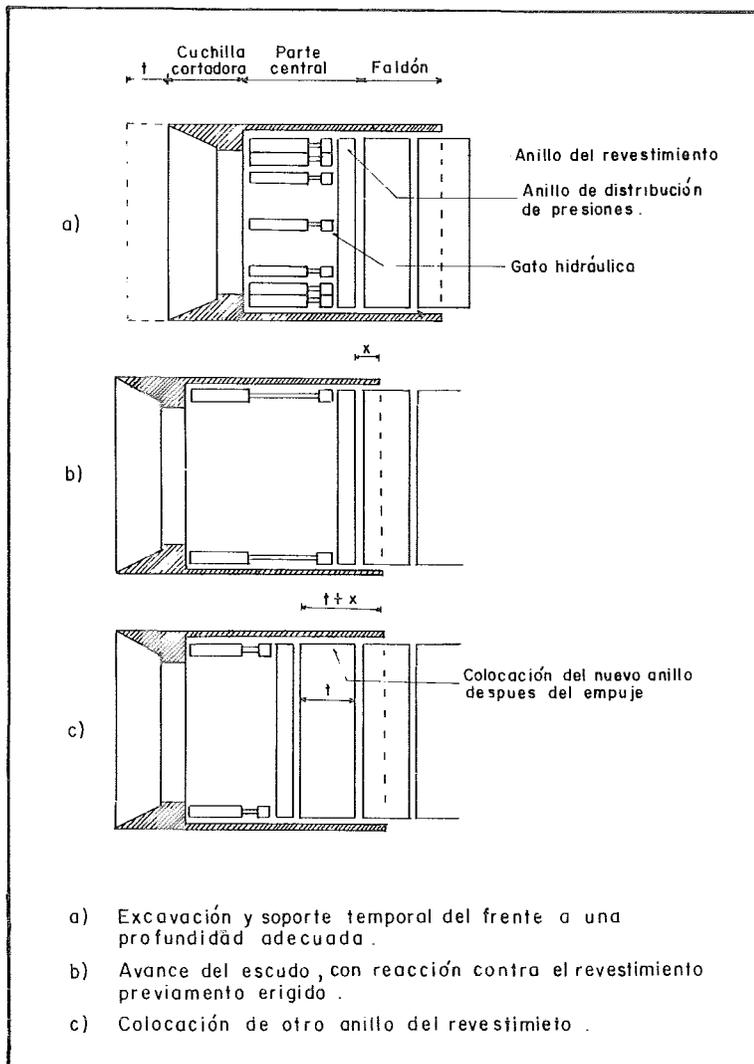
PLANTA DEL ESCUDO

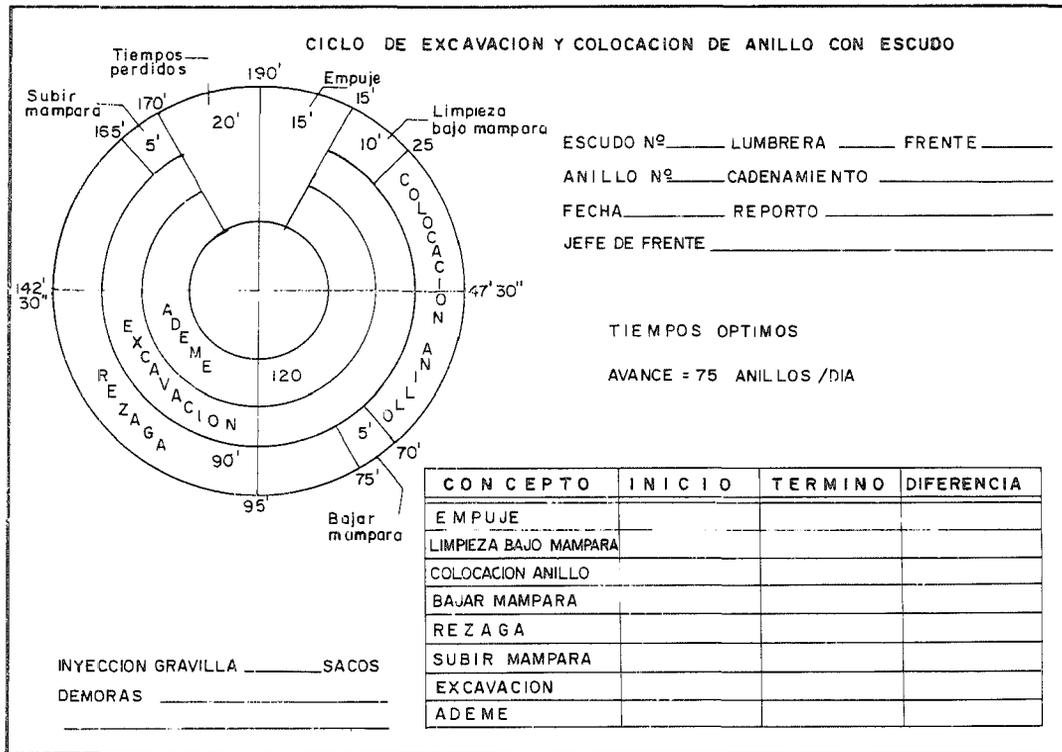
FIGURA IV - 1

(Ref 13)



ELEVACION DE UN ESCUDO  
FIGURA IV-2  
(Ref 13)





CICLO DE EXCAVACION SEGUIDO DURANTE  
LA CONSTRUCCION DEL DRENAJE PROFUNDO

FIGURA IV - 4

(Ref 3)

neumático, brazos excavadores u otro tipo de herramienta adecuada. Normalmente el frente se divide en 6 partes: tercio superior; derecha e izquierda; tercio medio; derecha e izquierda y tercio inferior; derecha e izquierda. (Fig. IV.5).

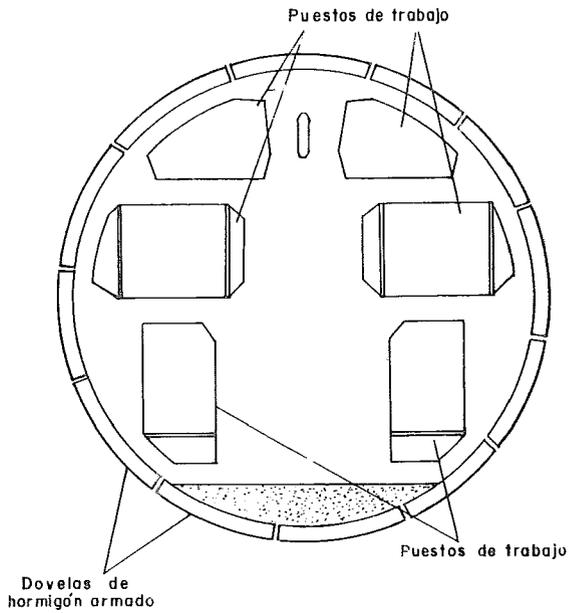
Cada sección se "banquea" de arriba hacia abajo en una profundidad equivalente a un empuje. Además, se ejecuta una ranura en forma de punta de flecha de 60-80 cm. de profundidad y 20-40 cm. de ancho en la clave, para facilitar el avance del escudo. El material "banqueado" cae a la parte inferior del escudo en el tramo del "Tronco" donde es retenido por una mampara.

Esta operación se inicia al terminar un empuje del escudo y es simultánea a la colocación del último anillo de dovelas.

El ademado del frente consiste en colocar tableros de madera inmediatamente después de terminar el "banqueo" de cada parte. Los tableros son detenidos por los gatos frontales que el escudo lleva en la parte de lantera. Estos gatos tienen además la cualidad de retraerse al avanzar el escudo, manteniendo una presión constante en el frente de ataque. (Fig. IV.6).

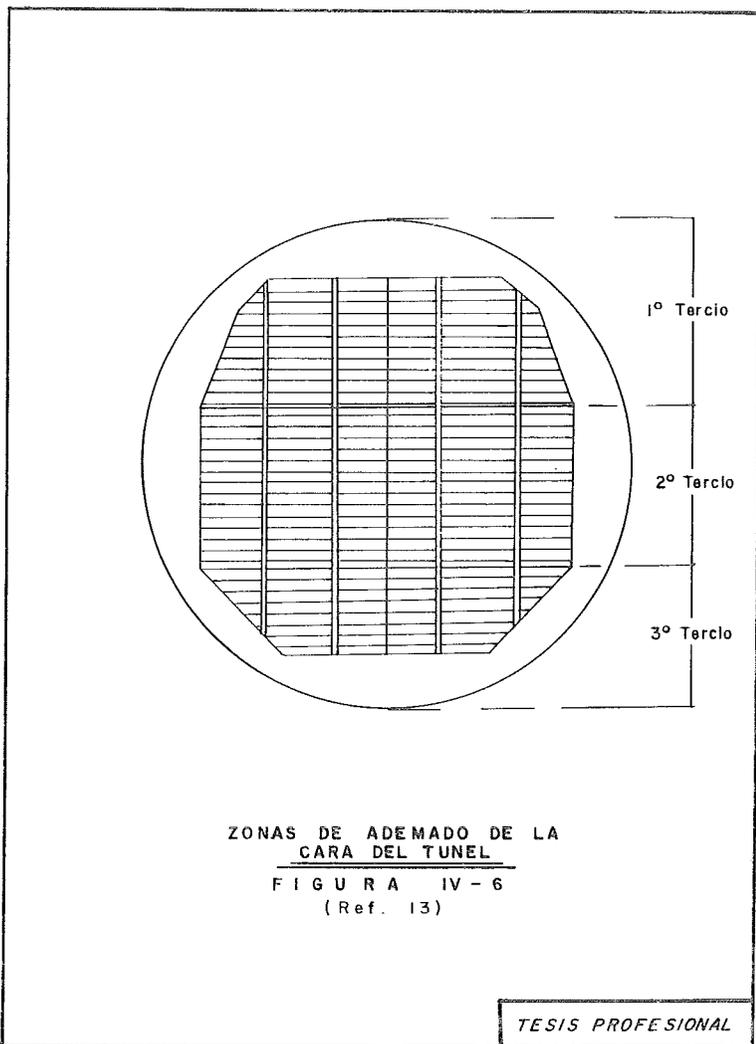
Simultánea a la excavación y al ademe frontal, se inicia la extracción del material cortado. Para esto, primero se baja la mampara que retiene a los escombros y después se permite el acceso a una máquina rezagadora con banda transportadora, la cual deposita el material en vago-

CORTE DEL ESCUDO



DIVISION DEL FRENTE  
DE TRABAJO

FIGURA IV - 5  
(REF. 13)

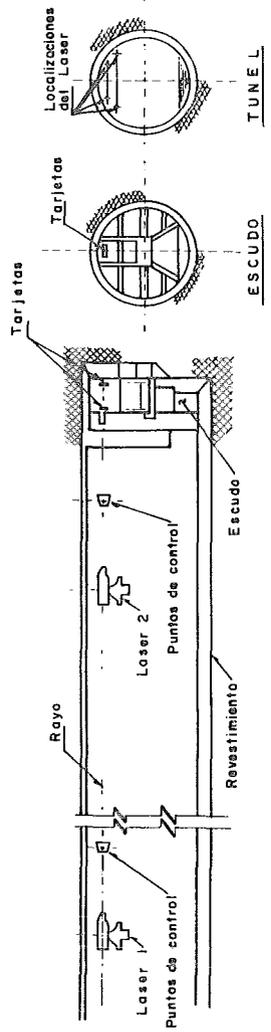


netas que, arrastradas por una locomotora, se encargan de llevarlo a la lumbrera. De ahí la rezaga es elevada a la superficie por medio de un malacate y vaciado a una tolva, hasta donde llegan los camiones de volteo encargados de acarrear los escombros a la zona de tiro elegida.

Terminadas las excavaciones, ademe del frente y rezaga, se levanta la mampara con el objeto de impedir que el suelo que pudiera desprenderse del frente durante el empuje, caiga dentro de la zona del faldón donde se hará la erección del anillo. Acto continuo, se accionan los gatos de empuje y se hace avanzar el escudo, hincándolo en forma de cuña en el terreno. Los gatos frontales permanecen presionando al suelo del frente gracias a la acción automática de retracción que poseen.

El empuje define los alineamientos y pendientes del proyecto con la ayuda de un sistema combinado laser-teodolito. Esta combinación se monta en un soporte especialmente diseñado, fijo al revestimiento primario. La posición del laser-teodolito y la orientación de la luz laser se calculan con equipo de procesamiento electrónico de datos y es registrado en una computadora. La luz laser se dirige continuamente a dos tarjetas fijas en el escudo, en las intersecciones de la luz con las tarjetas, aparecen puntos rojos brillantes. Conforme el escudo se mueve, los puntos rojos trazan trayectorias en las tarjetas. (Fig. IV.7).

La posición relativa de la trayectoria marcada por el punto comparada con la trayectoria calculada, indica la desviación del escudo de la posición deseada.



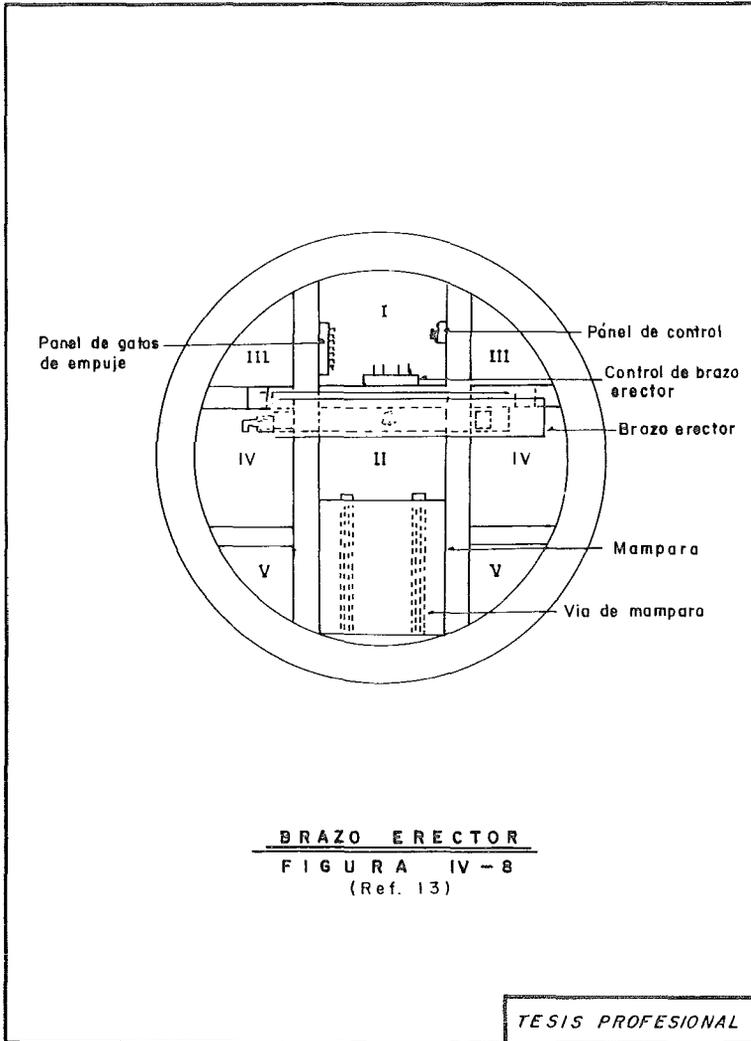
SISTEMA DE DIRECCION DEL ESCUDO  
FIGURA IV-7  
(Ref. 15)

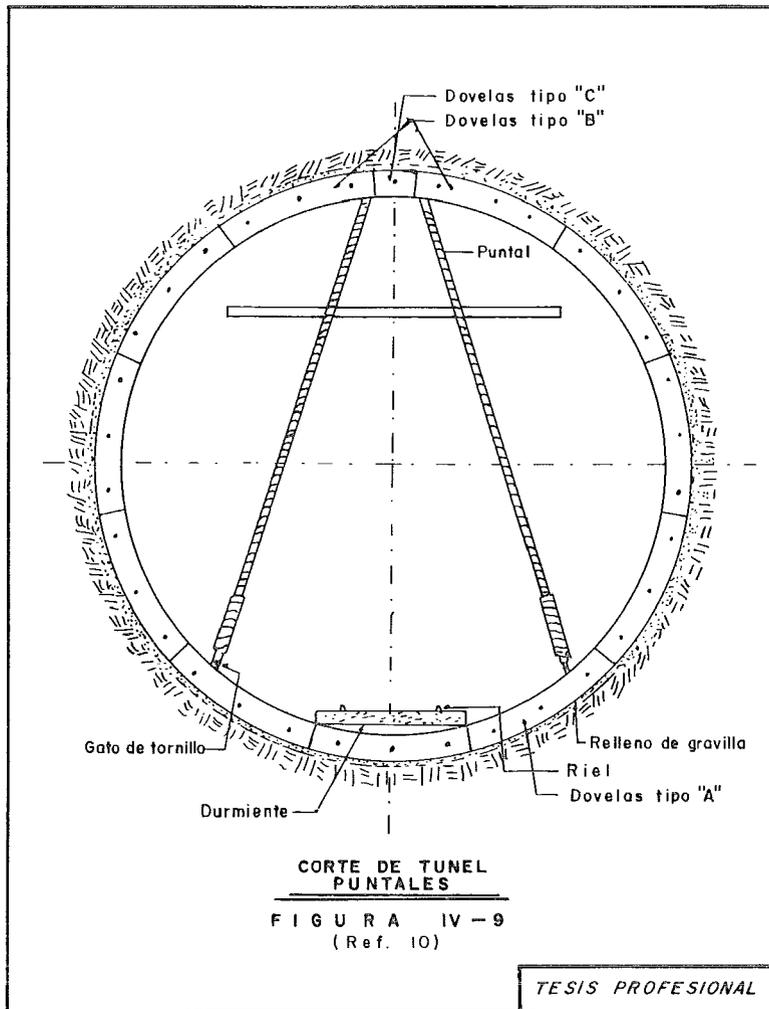
El uso del laser con tarjetas elimina mucho tiempo de comprobación después de cada empuje ayudando a acelerar el ciclo.

Como el movimiento del escudo es una operación muy importante, su avance se debe realizar con el número de gatos adecuados. Estos se apoyan en el último anillo de dovelas, colocado en el propio faldón del escudo.

Terminado el avance se limpia la plantilla dentro del faldón para proceder a colocar el ademe primario formado por dovelas. Estas pueden ser de concreto reforzado, acero o hierro fundido, y sus dimensiones dependerán principalmente, del peso que pueda ser manejado y de las dimensiones del faldón. El montaje de los segmentos se hace mediante un "brazo erector" que está colocado en la parte posterior del escudo (Fig. IV.8);- el brazo tiene facilidad de girar, desplazarse o retraerse longitudinalmente y acoplarse a la dovela para ponerla en su posición final. La colocación de segmentos se empieza del piso hacia los lados y en la clave se coloca una pieza de cierre o llave. Muchas veces, los anillos formados tienden a adoptar una forma oval y no circular como se proyecta, por lo que es necesario colocar un par de puntales para evitar su deformación. Este apuntalamiento se conserva hasta después del inyectado, tratado más adelante. (Fig. IV.9).

A continuación se aprietan los tornillos que sirven de unión entre segmentos y con esto se cierra el ciclo de la excavación.





### Inyecciones.

Al realizar un empuje queda un espacio vacío entre las dovelas y el terreno natural, el cual se llena mediante inyecciones de materiales para reducir los asentamientos en la superficie y para disminuir al mínimo las filtraciones de agua hacia el túnel. Comúnmente la inyección se ejecuta en cuatro etapas:

#### Primera Etapa.

El espacio vacío se rellena con gravilla inyectada a presión. La gravilla es colocada mediante el uso de una lanzadora neumática que se conecta a una manguera, la cual se introduce en perforaciones previamente dejadas en las dovelas. El tamaño de la gravilla varía entre 4 y 6 mm y su colocación se puede hacer simultáneamente con el avance del escudo.

#### Segunda Etapa.

Tapón.- En los últimos tres anillos del tramo a tratar se inyecta un mortero de fraguado rápido, cuya finalidad es evitar que la lechada de las etapas siguientes se prolonguen a la zona del escudo.

#### Tercera Etapa.

Esta inyección es menos densa que la anterior, consiste de un mortero más fluido y sin acelerante que se usa para llenar los vacíos dejados por la gravilla.

#### Cuarta Etapa.

Finalmente, se inyecta una mezcla fluida formada de agua, cemento y bentonita, su función principal es la de sello e impermeabilización. La Fig. IV.10, nos muestra el procedimiento de inyección.

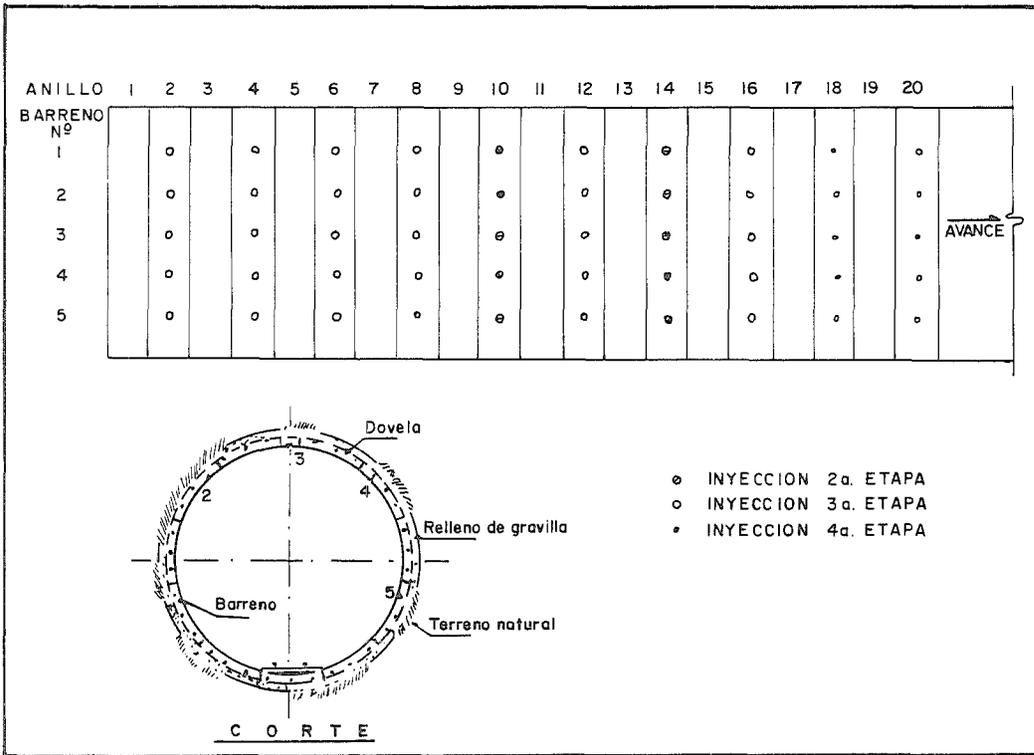
#### Abatimiento del Nivel Freático.

Cuando la excavación de un túnel se realiza en suelos situados bajo el nivel freático, es necesario ejecutar un abatimiento del mismo con el objeto de facilitar las operaciones de construcción y para mejorar las condiciones de estabilidad del frente.

Generalmente, el sistema de abatimiento consiste en perforar pozos hasta una profundidad bajo la plantilla del túnel igual a dos veces el diámetro de éste; y en ellos instalar bombas sumergibles.

Los pozos se colocan en dos líneas separadas 6 metros del eje del túnel y dispuestos a tresbolillo con espaciamientos que, según experiencias acumuladas, pueden variar de 15 a 20 metros y en una longitud aproximada de 100 metros atrás y 100 metros adelante del escudo.

Los pozos se deben diseñar de tal forma que se logre su máxima eficiencia permitiendo la mayor extracción del agua que se encuentra en la zona a tratar y que, además, impide la entrada de materiales finos durante el bombeo y la consecuente formación de cavernas en la línea a seguir por el escudo. (Fig. IV.11).



PROCEDIMIENTO DE INYECCION  
 FIGURA IV-10  
 (Ref. 10)



b.- Escudo de Frente Cerrado.

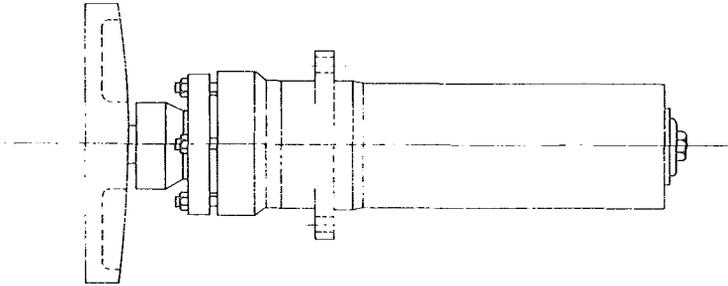
Un segundo tipo de escudo es aquél que lleva en todo su frente -- una estructura metálica, conocida con el nombre de "mampara", que con -- tiene al suelo delante de la excavación. La mampara está compuesta de vi -- guetas de acero en forma de rejilla cubiertas con placas dobles, igualmen -- te de acero reforzado. La obstrucción frontal es el motivo por el cual a -- esta máquina se le conoce como "Escudo de Frente Cerrado".

La máquina tradicional del tipo mencionado, va realizando la ex -- cavación del túnel mediante simple desplazamiento del suelo, al penetrar -- el escudo por la acción de empuje de los gatos hidráulicos. Estos están lo -- calizados dentro de la camisa del escudo para dar fuerza a la mampara apo -- yándose en las dovelas que integran el revestimiento primario. Los gatos -- de empuje deben ser diseñados para vencer las siguientes resistencias:

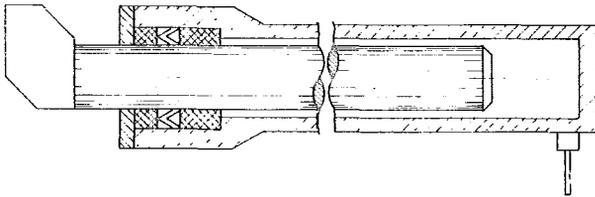
- a) La fricción del terreno sobre la superficie exterior de la camisa del escudo.
- b) La fricción del anillo de dovelas en el faldón del escudo.
- c) La resistencia del terreno que no ha sido desplazado -- en el frente del escudo.

La Figura IV.12, nos muestra los gatos típicos usados en el tu -- neleo con escudos.

Sobre el túnel se sobreeleva la superficie del terreno por el sue -- lo desplazado, que puede posteriormente dragarse, si así se desea (Fig. -- IV.13).



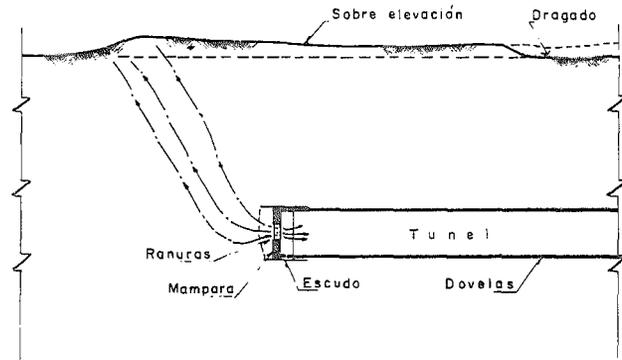
GATO DE DOBLE ACCION



GATO DE ACCION SIMPLE

GATOS HIDRAULICOS TIPICOS USADOS  
EN EL TUNELEO CON ESCUDOS

FIGURA IV-12  
(Ref. 12)



ESCUDO DE FRENTE CERRADO

FIGURA IV-13

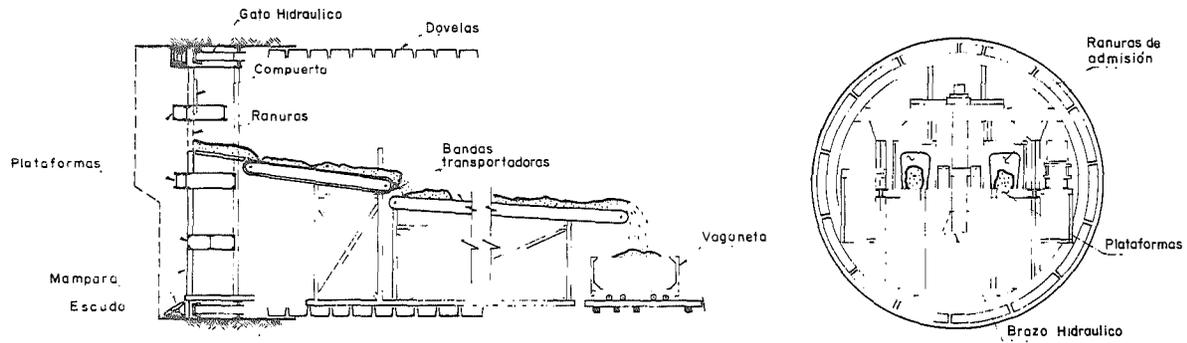
(Ref 13)

Algunas veces resulta ventajoso permitir el flujo de algo de material hacia el interior del escudo, esto se puede conseguir mediante una o más aberturas muy pequeñas realizadas previamente en la mampara. El flujo de material se puede mantener a un mínimo ajustando las ranuras entre el 5 y 20% del área total del frente, conforme van variando las condiciones del suelo, con esto se logra reducir los costos de operación del movimiento de tierras a través del túnel. Las ranuras de admisión son controladas por operación de compuertas y gatos hidráulicos. Las Figuras IV.14 y IV. 15, nos muestran este tipo de escudo.

En la parte posterior del escudo se dispone de un brazo hidráulico con el propósito de colocar el revestimiento primario del túnel, formado generalmente por dovelas que unidas entre sí van integrando anillos. Las dovelas son transportadas en el interior del túnel a través de vagones que son tiradas por una locomotora; son llevadas hasta el brazo elevador el cual posee en su extremo un dispositivo especial que toma a la dovela y la coloca en el lugar deseado.

Unos metros atrás del escudo se cuenta con una estructura metálica provista de ruedas y que se desplaza sobre rieles. En ella se tienen los motores para las bombas del sistema hidráulico que accionan los gatos de empuje, motorreductores de las bandas que transportan el material que se permite pasar hacia el interior, un transformador que alimenta a los motores y otro que se usa para la iluminación y uso de herramientas eléctricas, y el equipo de inyección de materiales.

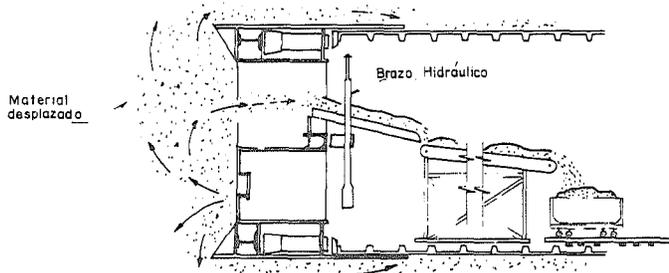
ESCUDO DE FRENTE CERRADO



CORTE LONGITUDINAL

FIGURA IV-14

SECCION TRANSVERSAL



CORTE LONGITUDINAL (Ref 12)

FIGURA IV-15

El alineamiento del escudo se lleva por medio de un rayo laser, siguiendo el mismo sistema que para escudos de frente abierto.

#### Ciclo de Excavación.

El ciclo de excavación de un escudo de frente cerrado consiste - de las operaciones siguientes:

- a) Empuje del escudo.
- b) Operación de compuertas.
- c) Rezaga.
- d) Erección de dovelas.
- e) Apretar tornillos entre dovelas.

#### a) Empuje del Escudo.

El empuje se realiza por la simple acción de expansión de los gatos hidráulicos que se apoyan en el último anillo del revestimiento primario colocado. El empuje de los gatos debe de ser uniforme para impedir que - el escudo tienda a salirse de la línea proyectada. La dirección correcta - del escudo se controla mediante un sistema combinado de rayo laser-teo - dolito.

#### b) Operación de Compuertas.

Conforme el escudo avanza, las compuertas de las ranuras frontales se abren para permitir el flujo de material hacia el interior. Cuando ya ha penetrado el material necesario, las compuertas se vuelven a cerrar

impidiendo el flujo. Su manejo se realiza mediante gatos hidráulicos que las hacen accionar.

c) Rezaga.

Simultáneamente a la operación de las compuertas, una banda transportadora se encarga de ir recogiendo el material que fluye al interior y lo va depositando en una tolva, de ahí pasa directamente a las vagonetas encargadas de llevar los escombros a la lumbrera.

d) Erección de Dovelas.

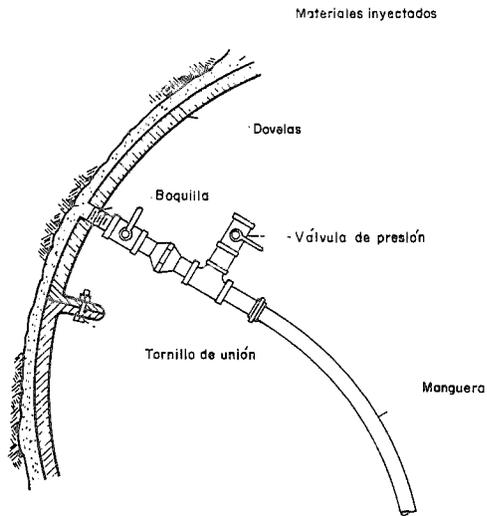
Una vez terminada la expansión de los gatos de empuje del escudo, se procede a retraerlos uno por uno para dar espacio a la colocación de las dovelas. El brazo erector es utilizado en esta operación. La colocación se empieza del piso hacia los lados y en la clave se coloca una pieza de cierre de llave.

e) Apretar tornillos entre dovelas.

Formado ya el anillo de dovelas, se procede a apretar los tornillos que las unen entre sí, con esto se cierra el ciclo de la excavación.

El hueco existente entre el revestimiento primario y el terreno natural, formado al avanzar el escudo, es rellenado por gravilla y lechada de cemento, tal y como se muestra en la Figura IV.16.

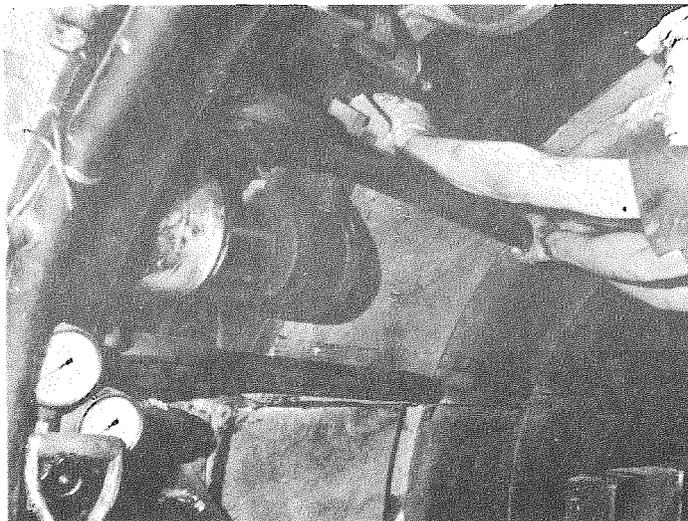
Algunos escudos de frente cerrado están diseñados de tal mane -



**INYECCION DE MATERIALES**

**FIGURA IV-16**

(Ref. 12)



Retracción de los gatos hidráulicos para la colocación de las dovelas.

ra que delante de la mampara se puede adaptar un sistema mecanizado de excavación. Entre los sistemas de este tipo se tienen:

- a) El Disco Excavador Rotatorio.
- b) El Disco Excavador Oscilante.
- c) La Draga con Cabeza Excavadora.

En muchos casos, además de la máquina excavadora, se requiere de un método estabilizador del frente, que contenga al suelo e impida el flujo de agua hacia el interior. Los principales métodos de estabilización de la cara se resumen en la tabla IV-1

La Figura IV.17 nos muestra un procedimiento de excavación en que se combinan: escudo de frente cerrado - excavador mecánico - estabilización del frente.

#### c.- Escudo con Presión al Frente.

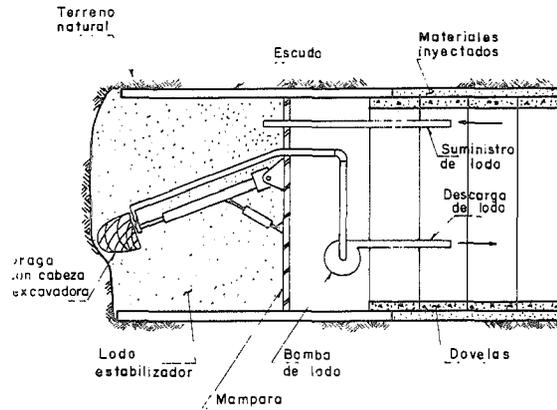
En los años recientes se ha desarrollado en varios países una nueva técnica de tuneleo, cuya utilización puede resultar prometedora para controlar las arcillas más malas de la Ciudad de México. Los técnicos japoneses son los que han logrado los mayores adelantos de esta técnica conocida como "Escudo con Frente de Lodo".

Generalmente, para poder aplicar este método se requiere de los siguientes elementos:

- 1.- Un escudo que mantiene estables las paredes del túnel

TABLA IV-1 (Ref. 16)

METODOS DE ESTABILIZACION DEL FRENTE		
DESARROLLADOS	MECANICOS	MAMPARA
		ESCUDO
		GALERIA Y BANCO
		AIRE COMPRIMIDO
		MORTERO QUIMICO
		MORTERO CEMENTADO
		POZOS PUNTA Y POZOS PROFUNDOS
		CONGELACION
		BALANCEO AGUA Y SUELO
	NO DESARROLLADOS	ESTABILIZADORES QUIMICOS
ESPUMA DE POLIURETANO		
RESINA EPOXICA		
ACIDO ACRILICO COPOLIMER		
LATEX URETANO		
ALCOHOL TURBULENTO		
FENOL Y UREA FORMALDEHIDA		
RESINA EPOXICA SOLUBLE EN AGUA		
ETER POLIVINILICO		
GOMA SOLUBLE EN AGUA		
HIDRON S.		
		AIRE SOLO EN EL FRENTE
		COMPACTACION VIBRATORIA
		CONGELAMIENTO CRIOGENICO
		ELECTRO - OSMOSIS



PROCEDIMIENTO DE EXCAVACION COMBINADO

F I G U R A IV - 17

(Ref 16)

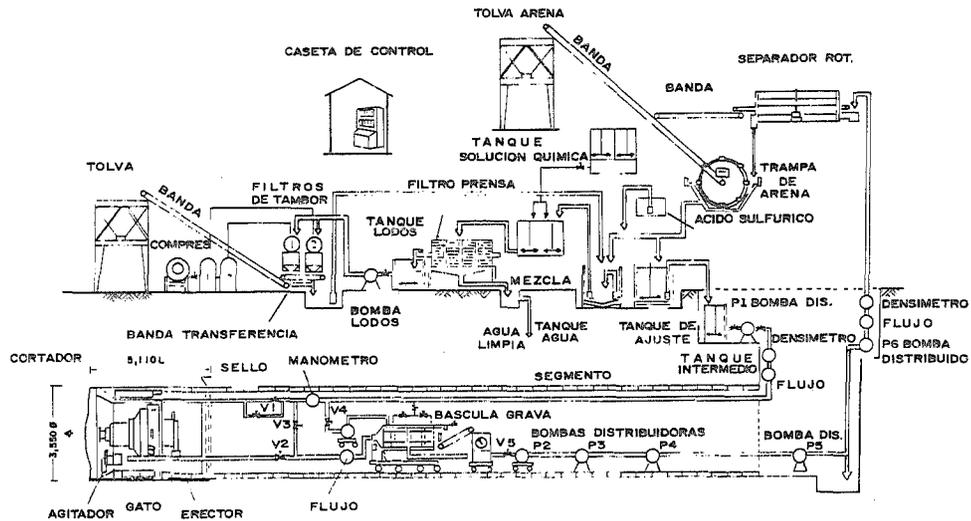
y ayuda en la estabilidad del frente.

- 2.- Una cámara de presión al frente llena de lodo presurizado que estabiliza la cara de la excavación.
- 3.- Un disco cortador rotatorio sumergido en la cámara de presión que se mueve por medio de motores eléctricos o hidráulicos para cortar el suelo.
- 4.- Un sistema de agitación que desmenuza el material cortado y lo mezcla con el lodo estabilizador, dentro de la cámara de presión.
- 5.- Un sistema de bombeo que extrae la mezcla suelo-lodo de la cámara de presión y la envía a la superficie para su posterior tratamiento y eliminación.
- 6.- Una planta de tratamiento instalada fuera del túnel, se encarga de separar el lodo estabilizador de la mezcla descargada y lo deja en condiciones para recircular en el frente.

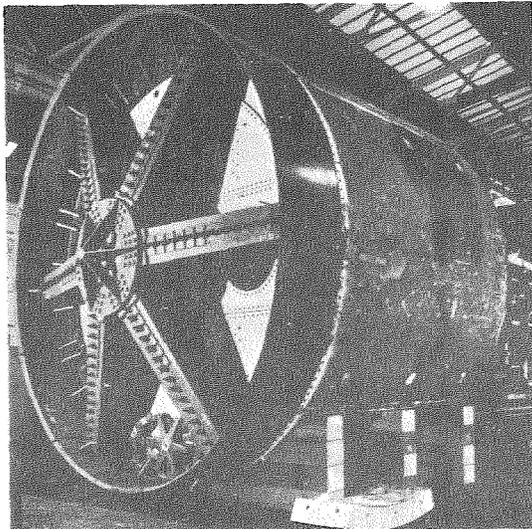
La Figura IV-18, nos muestra los elementos que integran la maquinaria del Método del "Escudo con Frente de Lodo".

La Máquina del Escudo.

La máquina del escudo con frente de lodo es un cilindro abierto en sus extremos, pero dividido en dos partes de tal forma que se tienen igual número de zonas de trabajo en condiciones distintas; la parte delantera forma la cámara de presión y la parte trasera es la zona de erección del revestimiento. Tiene un cortador plano o achatado, con uno o varios ejes diametrales en donde van colocadas las navajas cortadoras, se mueve por motores aleohidráulicos o eléctricos y posee un eje central o flecha que lo hace rotar y le permite desplazarse cierta longitud. La cara del cortador tiene unas compuertas de escape por donde pasan los escombros



ELEMENTOS QUE INTEGRAN  
 LA MAQUINARIA  
 FIGURA IV-18  
 (TUSA)



Máquina del Escudo con Frente de Lodo

Incluye el escudo, el cortador y el sistema de agitación.

a la cámara de lodo.

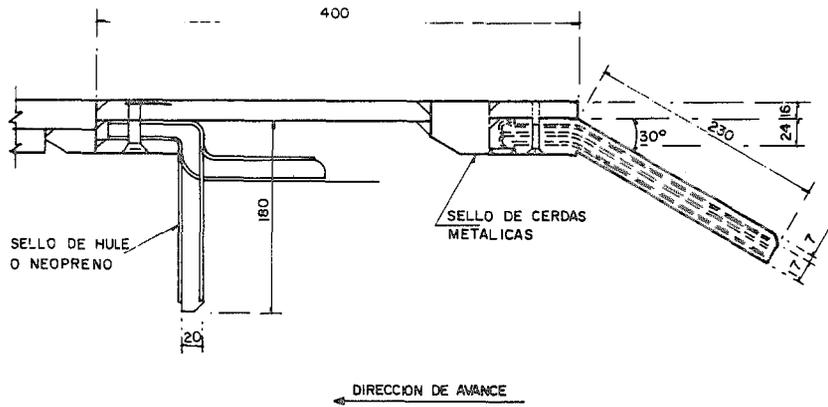
La parte posterior de la máquina es de una longitud donde pueden caber dos segmentos circulares formados por dovelas. En el faldón del escudo se tiene un sello con apariencia a un cepillo de cerdas de alambre, el cual impide que las posibles fugas de lodo que puedan acontecer en el frente y se desplacen a lo largo del escudo, lleguen al lugar donde se colocan los segmentos y perturben las maniobras de erección. Al sello de cerdas de alambre suelen seguirle dos más de hule o neopreno muy resistente, -- desempeñando la misma función del primero (Fig. IV-19).

En la mitad superior del escudo y pegada a la mampara que limita a la cámara de presión, se tiene una pequeña esclusa de personal que se presuriza con aire, cuando se utiliza para revisión del cortador y de los agitadores.

Dentro de la cámara de presión se tiene un sistema de agitación que se encarga de revolver el suelo excavado con el lodo. A un lado de los agitadores se tiene una tubería por donde se descarga la mezcla y se manda a la superficie con la ayuda de bombas, similares a las usadas por las dragas marinas de succión. Una tubería más que sale de la parte superior de la cámara de presión, es la encargada de inyectar lodo a presión, proveniente de la superficie, a la cámara.

A una distancia conveniente atrás del escudo y jalado por éste, se tiene una estructura formada por marcos metálicos y plataformas que

14-0037241



SELLOS DEL ESCUDO  
CON PRESION AL FRENTE  
FIGURA IV-19  
(TUSA)

desliza sobre rieles, se le conoce como "tren de equipo". En él, se encuentran instaladas las bombas de lodo, transformadores de energía eléctrica, sistema de comunicación, maquinaria para la inyección de lechadas y demás herramientas que se requieren.

La capacidad de la máquina del escudo dependerá principalmente de las propiedades del suelo y del diámetro del túnel a construir.

De la literatura japonesa presentamos la siguiente tabla que nos señala la capacidad del escudo según las propiedades del suelo.

	Par de Torsión del Cortador T. m.	Velocidad del Cortador m/min.	Velocidad de Movimiento del Escudo cm/min.
Arcilla, limo N: Inferior a 5	$0.4 - 0.6 D^3$	15 - 30	3 - 10
Arena, arena y grava. N: 20 a 50	$1.0 - 1.4 D^3$	8 - 15	2 - 6

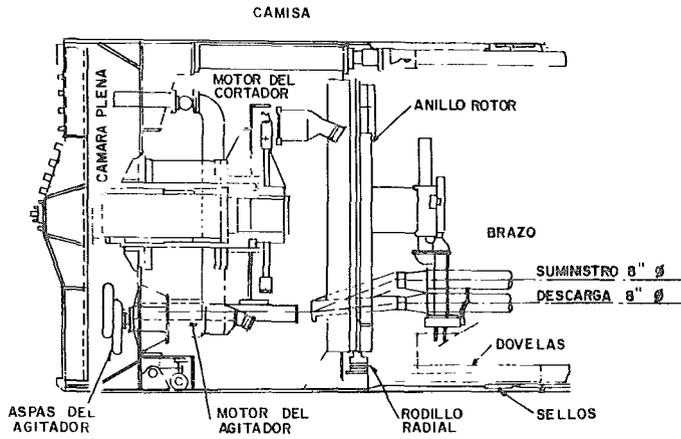
En donde:

N = Número de golpes en prueba de penetración Stándar.

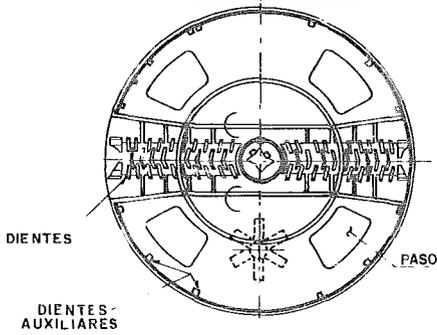
D = Diámetro del Escudo.

La Figura IV-20, nos muestra la máquina del escudo con presión al frente.

MAQUINA DEL ESCUDO CON PRESION AL FRENTE



FRENTE CORTADOR



UNIDAD DE ACCIONAMIENTO DE ACOTADURAS

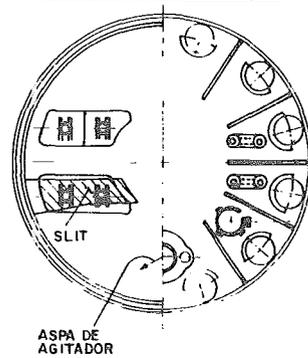


FIGURA IV-20  
(TUSA)

### Soporte de la Cara de Corte.

Para soportar el frente durante la excavación, se trabaja con lodo a presión con el fin de prevenir un colapso por la pérdida de agua. El papel principal para lograr la estabilización, lo desempeñan la densidad y la presión del lodo.

La densidad del lodo varía de acuerdo con las propiedades del suelo; las experiencias en otros países indican que los valores de la densidad deben ser de 1.2 a 1.3.

Los trabajos de soporte del frente son, relativamente, fáciles en las capas de arcilla y limo con coeficiente de permeabilidad  $K$  inferior a  $10^{-4}$  cm/seg.

En suelos que tienen un  $K$  aproximado de  $10^{-3}$  cm/seg. se requiere incrementar la presión del lodo para lograr soportar la excavación.

Cuando el suelo tiene un  $K$  mayor de  $10^{-2}$  cm/seg. puede haber filtraciones de lodo en el sitio, si ésto ocurre, el disco cortador es usado para presionar el frente ayudando en el soporte, con lo cual se evitan posibles desprendimientos del terreno. Por esto, para prevenir dificultades semejantes es necesario que la densidad del lodo sea alta y que se cuente con técnicas de control sofisticadas.

Con respecto a la presión del lodo para soportar la cara de corte, se deberán establecer las siguientes relaciones:

- a) Presión del lodo > presión del suelo en el frente + presión del agua del suelo (En terreno donde la cara no se puede autosoportar).
- b) Presión del lodo > presión del agua del suelo (En terreno donde la cara se puede autosoportar).
- c) Presión del lodo >  $\gamma H - 4C$

El profesor Murayama de la Universidad de Kyoto, propone las siguientes ecuaciones para determinar la presión del lodo:

$$P_o = \frac{l}{l_p} \left[ (W l_w) + (q B) \left( l_a + \frac{B}{2} \right) - \frac{C}{2 \tan \phi} (\gamma_c^2 - \gamma_d^2) \right]$$

$$P = P_o \cdot H$$

donde:

$P_o$  = Presión del suelo aplicada al escudo.

$W$  = Peso del terreno.

$q$  = Presión del suelo en el escudo.

$B$  = Longitud superior del arco de falla.

$C$  = Cohesión del suelo.

$\phi$  = Angulo de fricción interna del suelo.

$H$  = Diámetro del escudo.

$l_p, l_w, l_a, \gamma_c, \gamma_d$  = Distancia desde el punto O a  $P_o$ ,

$w, a, c$  y  $d$  = Tal como se muestra en la Figura siguiente:



- g) Tanque separador de líquidos.
- h) Tanques mezcladores.
- i) Tanque de control de lodos.
- j) Tanque neutralizador.
- k) Tanque de agua limpia.
- l) Bombas para la inyección de lodo.
- m) Válvulas reguladoras.
- n) Tolva de sólidos.

#### Funcionamiento de la Planta;

El suelo excavado, es mezclado con el lodo estabilizador dentro de la cámara de presión, y transportado por bombeo hidráulico a la superficie.

Fuera del túnel, la mezcla pasa primeramente por una malla vibratoria primaria, donde se separan las gravas y boleos, y se envían por medio de la banda transportadora a la tolva de sólidos, el material restante es un "atole lodoso" que se deposita en un tanque, de éste, se bombea al Ciclón el cual, con la ayuda de la malla vibratoria secundaria logra apartar las arenas para enviarlas a la tolva de sólidos; la mezcla fina que queda es conducida a un segundo tanque. En éste se logra separar el lodo estabilizador de la mezcla fina excavada. El lodo se traslada al tanque de control de lodos en donde se deja en condiciones óptimas para volverlo a la circulación en el frente; el atole lodoso se conduce al tanque mezclador de floculantes y de ahí pasa al filtro prensa, encargado de cerrar el tratamiento

de separación, pues logra apartar la rezaga fina del líquido que contenía. – El material fino es trasladado a la tolva de sólidos, el líquido es conducido al tanque separador de líquidos en donde, si se requiere, se puede separar el agua de las sustancias químicas que se agregan a la mezcla cuando pasa por el tanque de floculación.

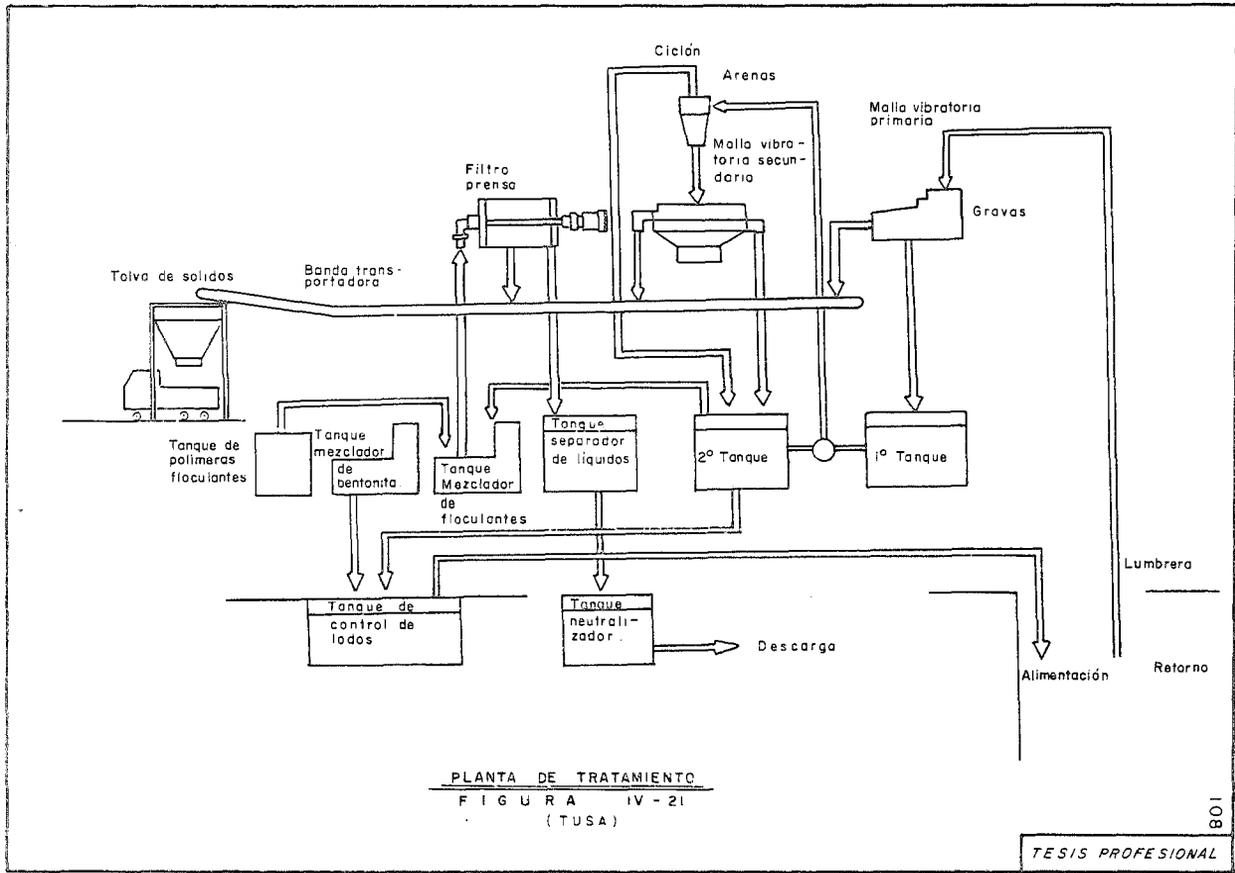
El funcionamiento de la planta está representado en la Fig. --- IV.21.

#### Ciclo de Operación.

Antes de iniciar el Ciclo de Excavación, el frente del túnel está soportado por lodo presurizado confinado en la cámara de presión.

El ciclo se inicia al poner en movimiento el disco cortador me diante sus motores eléctricos o hidráulicos, y realizar la excavación del – material con sus navajas cortadoras. El material excavado va cayendo a la cámara de presión en donde, con la ayuda de los agitadores, se mezcla con el lodo estabilizador para ser extraídos ambos por el conducto de descarga. A la vez que se está realizando la descarga, por un segundo conducto de -- diámetro mayor al primero se inyecta lodo a presión. De esta manera se mantiene, en todo momento de la excavación, repleta de lodo la cámara de presión para evitar un colapso.

Conforme el cortador va avanzando, los gatos hidráulicos del – escudo, apoyados en el último anillo del revestimiento primario, se van -- abriendo y empujando a toda la estructura cilíndrica hacia adelante. El es



PLANTA DE TRATAMIENTO  
 FIGURA IV-21  
 (TUSA)

cudo avanza llevando en su interior al cortador, cámara de presión, agitadores, motores y erector de dovelas; y jalando al tren de equipo que lo sigue metros atrás.

Cuando los gatos de empuje se abren totalmente, se suspende de inmediato el movimiento del cortador y se cierran las válvulas de los conductos de carga y descarga. Posteriormente, los gatos de empuje se retraen y se colocan los segmentos necesarios para formar un anillo; el brazo erector es el encargado de ésta tarea. Es aquí donde se cierra un ciclo de excavación con un avance equivalente al ancho de un anillo.

Simultáneamente a las actividades del ciclo de excavación, se desarrollan otras, tales como:

- Inyección de gravilla y lechada.
- Colocación de dispositivos para mantener la geometría de los anillos.
- Colocación de líneas de conducción para aire comprimido, ventilación, agua, teléfono y alumbrado.
- Colocación de la vía para el deslizamiento del tren de equipo.
- Ajuste de los tornillos de las dovelas y
- Bajada de materiales.

Control de los Trabajos de Tuneleo.

Durante la ejecución de los trabajos de tuneleo por el método del Escudo con Lodo al Frente, es necesario observar constantemente en

los indicadores respectivos que el volumen de alimentación y volumen de descarga, presión y densidad del lodo, tratamiento suelo-lodo y regulación de la densidad, sean los adecuados para evitar fallas en el frente. Por tal motivo es necesario contar con los siguientes procesos de control:

#### 1.- Control del Volumen de Excavación.

Como no es posible ver las condiciones que prevalecen en el frente de trabajo, es esencial el confirmar cuando no se está realizando normalmente la excavación. Esto se logra mediante la medición de volumen y peso tanto del lodo de alimentación como del lodo de descarga. En general, la medición de flujo electromagnético y la medición de densidad por rayos  $\gamma$  son combinados, los informes que se obtienen se alimentan automáticamente a una computadora la cual se encarga de generar señales de la central de control al panel de control de lodo. Cuando el volumen de excavación se excede de un valor designado, se asume que el colapso en el frente puede ocurrir. El volumen excavado debe ser igual al volumen teórico avanzado por la máquina.

#### 2.- Control de Calidad del Lodo.

El material seleccionado para formar el lodo estabilizador debe cumplir con el requisito de densidad adecuado. El lodo preparado a base de bentonita es más conveniente para la estabilización del frente, aunque las dificultades en el tratamiento son mayores. Por esto, en los sitios de áreas urbanas cuando se utiliza planta de tratamiento, el uso de bentoni

ta no es recomendable.

Los suelos cohesivos evaluados en el sitio de la excavación pueden ser apropiados para usarse. Los suelos tipo kaolín de menor plasticidad requieren de aditivos para hacer el requerimiento de lodo estabilizador.

### 3.- Control de Presión del Lodo.

La presión del lodo es muy importante para soportar el frente de trabajo. Su valor se determina de acuerdo a la condición de la naturaleza del material que formará el lodo.

Para controlar la presión del lodo se usan las válvulas de control de la presión del agua, las bombas de velocidad variable y el regulador automático de la velocidad de rotación de las bombas.

### 4.- Control de Dirección.

La dirección del Escudo se controla mediante un sistema combinado de rayo laser-teodolito, de la misma manera que la seguida en escudos de frente abierto, descritos con anterioridad.

#### Sistema de Control.

Consiste de un tablero visual instalado en la superficie, en él se presentan los componentes más relevantes del conjunto, a través de una réplica para que de una simple observación se pueda conocer el estado de funcionamiento del equipo. Este sistema nos da información confiable me-

diante la cual se confirma que el volumen excavado coincide con el volumen teórico avanzado por la máquina. Además, coordina todas las operaciones del sistema en forma automática o semiautomática según se requiera.

Los instrumentos que forman este sistema son:

- a) Medidor de presión del lodo.
- b) Medidor del flujo del lodo y escombros.
- c) Medidor de la densidad del lodo.
- d) Equipo para controlar el impulso del cortador.
- e) Medidor de la velocidad del cortador.
- f) Bombas de carga y descarga.
- g) Válvulas de control.
- h) Otros.

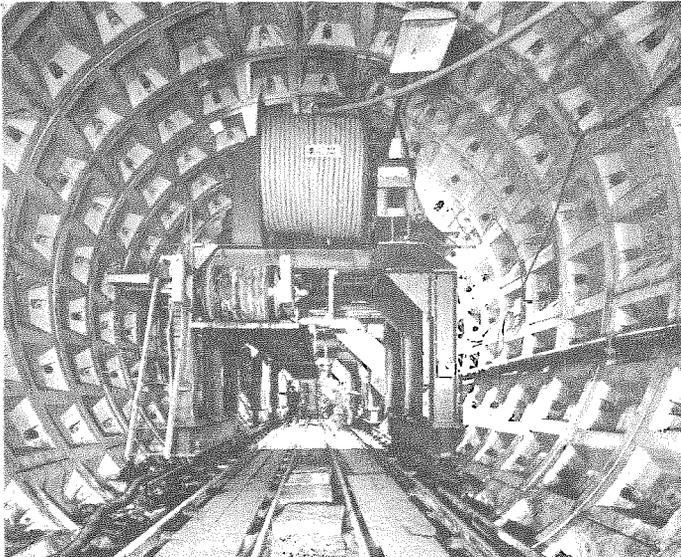
Equipo Auxiliar.

El equipo auxiliar incluye todas aquellas herramientas que se utilizan en los movimientos complementarios del tuneleo, como son:

- a) Gatos hidráulicos.
- b) Motores hidráulicos y eléctricos.
- c) Sistema neumático.
- d) Plataformas de trabajo.
- e) Transformadores de energía eléctrica.
- f) Sistema de comunicación.
- g) Maquinaria para la inyección de gravilla.

- h) Indicadores del sistema de control.
- i) Otros.

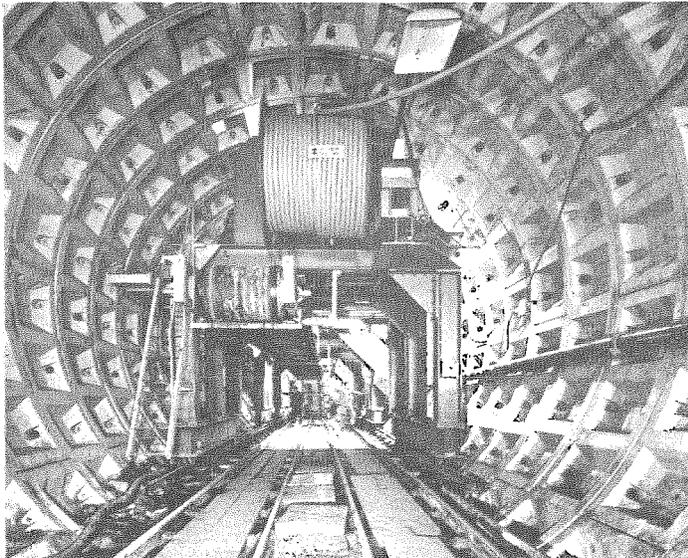
La mayoría de este instrumental se encuentra en el tren de equipo, el cual puede ser de una longitud de aproximadamente 48 metros. El tren se desplaza con el empuje del escudo, pues se encuentra unido a éste por medio de tensores.



Vista posterior del tren de equipo.

- h) Indicadores del sistema de control.
- i) Otros.

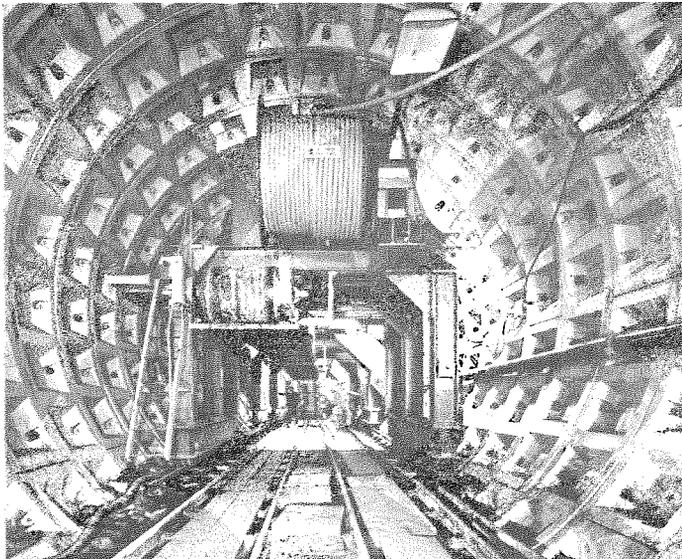
La mayoría de este instrumental se encuentra en el tren de equipo, el cual puede ser de una longitud de aproximadamente 48 metros. El tren se desplaza con el empuje del escudo, pues se encuentra unido a éste por medio de tensores.



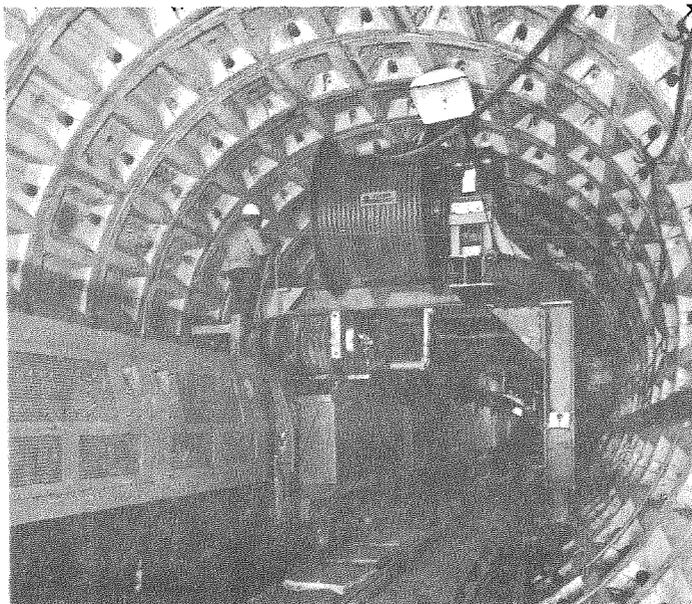
Vista posterior del tren de equipo.

- h) Indicadores del sistema de control.
- i) Otros.

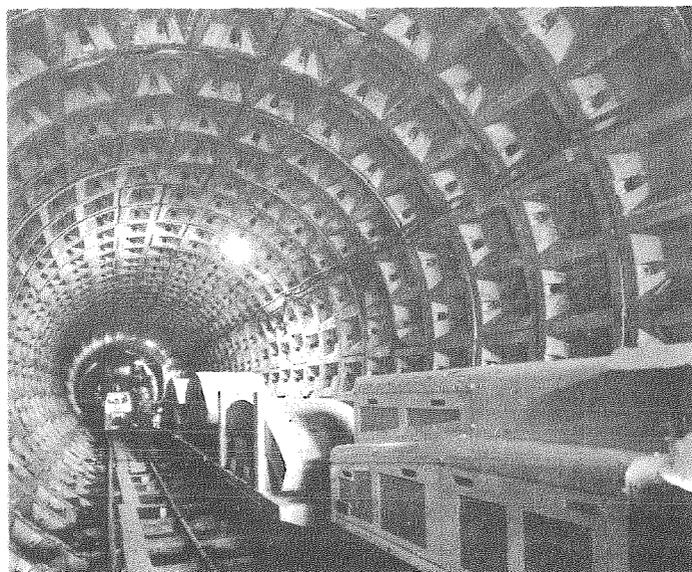
La mayoría de este instrumental se encuentra en el tren de equipo, el cual puede ser de una longitud de aproximadamente 48 metros. El tren se desplaza con el empuje del escudo, pues se encuentra unido a éste por medio de tensores.



Vista posterior del tren de equipo.



Forma como se realiza la carga y el acarreo de la -  
rezaga.



Transporte interior de las dovelas de concreto refor-  
zado.

## C A P I T U L O V

### DESCRIPCION DE PROCEDIMIENTOS DE EXCAVACION BAJO AIRE COMPRIMIDO

La construcción de túneles en suelos blandos como los de la Ciudad de México, plantea entre otros, el problema de la estabilidad del frente de ataque, cuya solución requiere de técnicas especiales. El aire comprimido es una solución que se ha empleado con éxito en otros países. Sin embargo, su adaptación a las condiciones de altitud del Valle de México -- exige una revisión cuidadosa del comportamiento físico del elemento humano.

Por aire comprimido a baja presión, se entiende aire comprimido a una presión algo mayor que la atmosférica, introducido al túnel y confinado ahí dentro durante la construcción, para contrarrestar la tendencia del agua y del terreno a fluir dentro de la excavación.

El procedimiento de excavación de túneles mediante el uso combinado de escudo de frente abierto -aire comprimido- abatimiento del nivel freático, es una de las más valiosas experiencias adquiridas en los trabajos que aún en la actualidad se realizan para dotar a la Ciudad de México de un sistema de drenaje profundo.

Este sistema combinado asegura realizar una excavación en seco, ya que el abatimiento a base de pozos profundos disminuye considerablemente la aportación de agua hacia el túnel. El aire comprimido contro-

la las presiones persistentes en los mantos arenosos y en el caso de arcillas extruibles las estabiliza o por lo menos, aumenta su factor de seguridad en la estabilidad del frente; también contrarresta el flujo de agua hacia la excavación. Por su parte el escudo sirve para resistir las presiones del terreno y facilita el montaje del ademe, a la vez que ofrece protección a los trabajadores que laboran en su interior.

Antes de dar inicio a los trabajos de excavación, se hace necesario realizar pruebas de bombeo, de laboratorio y médicas.

a) Las pruebas de bombeo ayudarán a determinar la profundidad de perforación de los pozos, su diámetro, diámetro del ademe, la clase del filtro y el tipo y capacidad de las bombas.

b) Las pruebas de laboratorio tienen como objeto analizar las propiedades mecánicas del medio donde será excavado el túnel y, en función de ellas, verificar el procedimiento constructivo más adecuado. Las recomendaciones dadas por la mecánica de suelos para las pruebas correspondientes se hacen presentes en este tipo de estudios.

c) El fin de las pruebas médicas es el de investigar el comportamiento físico de los trabajadores bajo condiciones semejantes a las que tendrán durante las labores. Dichas pruebas consisten en calcular los tiempos de descompresión para distintas presiones de trabajo y diferentes períodos de labor. Afortunadamente la Ciudad de México, cuenta ya con tablas de descompresión, que pueden ser aplicadas en excavaciones futuras-

cuando se tengan condiciones semejantes. Las tablas mencionadas se obtuvieron a partir de las Tablas de Washington, D.C. de 1971. Estas hubo la necesidad de modificarlas ya que sólo sirven para trabajos al nivel del mar y la Ciudad de México se encuentra a 2,246 m.s.n.m. La modificación se llevó a cabo con la siguiente fórmula:

$$P_c = \frac{P.n.m.}{P_B} P_t$$

Donde:

$P_B$  = Presión brométrica del lugar de trabajo.

$P.n.m.$  = Presión barométrica al nivel del mar.

$P_t$  = Presión de trabajo.

$P_c$  = Presión corregida por altitud.

Además:

$P_t$  =  $H - 4C$

Siendo:

$H$  = Presión total a la profundidad media del túnel

$C$  = Cohesión de la arcilla en prueba no drenada.

Al final de este capítulo se anexan tablas de descompresión para las Ciudades de Washington y México, así como resultados obtenidos en -- nuestra Ciudad de pruebas de compresión en cámara médica realizadas con el fin de investigar el comportamiento físico de los trabajadores bajo condi\_

ciones semejantes a las que se podrán tener en casos futuros.

#### Sistema de aire comprimido.

El sistema de aire comprimido a baja presión debe ser diseñado con base a las condiciones de estabilidad del frente, el equipo con que se cuenta y las dimensiones del túnel.

El sistema está integrado por los siguientes elementos:

- 1.- Planta de compresores.
- 2.- Sistema de enfriamiento.
- 3.- Separador de aire-aceite.
- 4.- Tuberías para la conducción del aire comprimido.
- 5.- Válvula reguladora.
- 6.- Mampara.
- 7.- Esclusa de personal.
- 8.- Esclusa de rezaga.
- 9.- Panel de instrumentos.
- 10.- Instalaciones para pruebas médicas.
- 11.- Planta de emergencia.

La planta de compresores suministra aire comprimido al túnel. El volumen de aire requerido se calcula en términos de fórmulas empíricas que relacionan las características del suelo con el diámetro del túnel, y en base a esta relación, se determina el número y capacidad de los compresores.

De estudios efectuados en otros países, se ha determinado que la capacidad de una instalación para trabajos de túneles bajo aire comprimido, puede expresarse con la siguiente relación:

$$C = 12 D^2$$

para terrenos arcillosos.

En terrenos formados por arenas, gravas y similares, la capacidad requerida se obtiene de la fórmula:

$$C = 24 D^2$$

Donde:

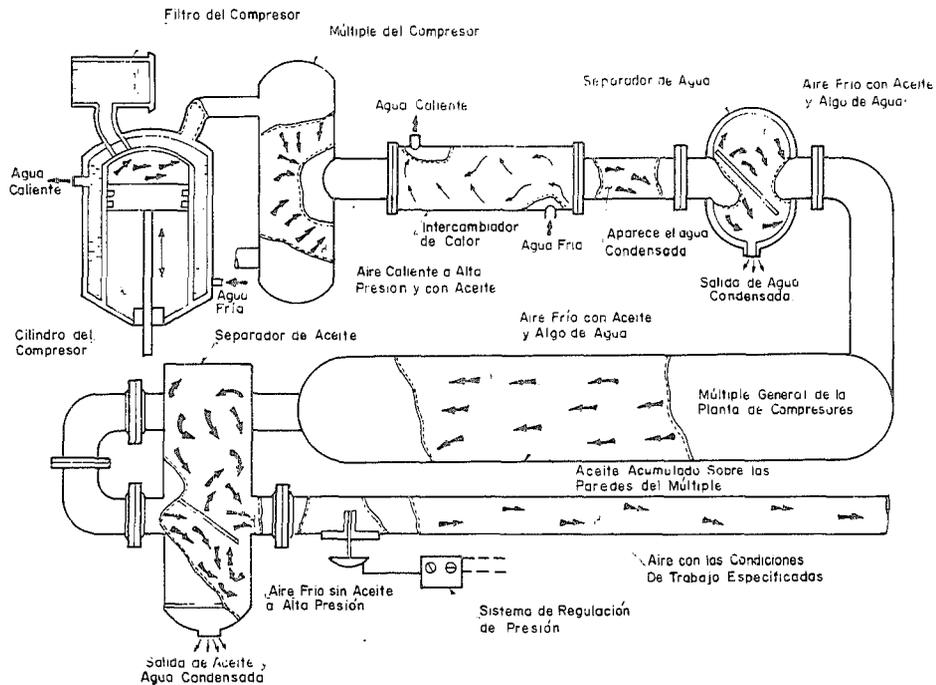
C = Capacidad en pies cúbicos de aire libre por minuto.

D = Diámetro exterior del túnel en pies.

El aire al ser comprimido se calienta a elevadas temperaturas por lo que es necesario conducirlo a un intercambiador de calor y posteriormente, a la salida de la instalación, a un separador de aceite, dejando así al aire en condiciones óptimas de salubridad. La Fig. V.1, presenta el arreglo de este equipo.

La válvula reguladora tiene como objeto, mantener constante la presión en el túnel, de tal manera que si hay pérdidas a través del terreno u otras, el mecanismo de dicha válvula sube la presión automáticamente, al límite que se haya establecido.

La mampara es una placa de acero que se instala dentro del túnel



EQUIPO DE PURIFICACION DEL AIRE COMPRIMIDO

FIGURA V-1

(Ref 15)

nel y se sella perfectamente a él para mantenerla hermética. Dicha mampara sirve como tapón y delimita la zona presurizada de la zona de aire libre.

Empotradas a la mampara, se tienen dos cámaras cilíndricas de dimensiones desiguales. La menor de ellas se coloca en la parte superior de la mampara y recibe el nombre de "Esclusa de Personal". La segunda se denomina "Esclusa de Rezaga" y se sitúa abajo de la primera. Por medio de las esclusas es posible mantener el tráfico de personal y materiales sin necesidad de variar la presión en el túnel. Ambas cámaras cuentan -- con líneas de alimentación de aire, escape de aire, iluminación, agua contra incendio e intercomunicación. Cada esclusa tiene dos accesos que --- abren hacia el lado del aire comprimido con el objeto que la presión mayor les haga cerrar. La Fig. V.2, nos muestra una vista de la mampara y la colocación de las esclusas.

Las esclusas pueden ser operadas desde el exterior o interior -- ya que cuentan con tableros de control en ambos lados, los cuales están -- equipados con manómetros, reloj, graficador de presión, termómetro y te\_ léfono con comunicación a los puntos claves del sistema. A un lado del ta\_ blero se encuentran las válvulas de alimentación y escape de las esclusas -- y la válvula de ventilación de la cámara de trabajo.

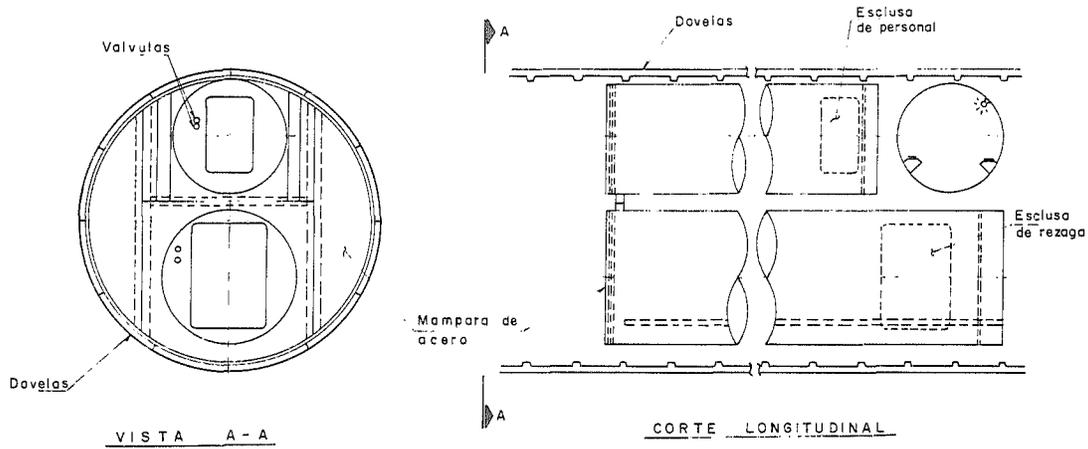
El control médico del personal es el aspecto más importante en este tipo de obras, ya que el trabajar en ambiente hiperbarico expone al -- cuerpo a enfermedades por descompresión. Por tal motivo, es indispensa\_

nel y se sella perfectamente a él para mantenerla hermética. Dicha mampara sirve como tapón y delimita la zona presurizada de la zona de aire libre.

Empotradas a la mampara, se tienen dos cámaras cilíndricas de dimensiones desiguales. La menor de ellas se coloca en la parte superior de la mampara y recibe el nombre de "Esclusa de Personal". La segunda se denomina "Esclusa de Rezaga" y se sitúa abajo de la primera. Por medio de las esclusas es posible mantener el tráfico de personal y materiales sin necesidad de variar la presión en el túnel. Ambas cámaras cuentan -- con líneas de alimentación de aire, escape de aire, iluminación, agua contra incendio e intercomunicación. Cada esclusa tiene dos accesos que ---- abren hacia el lado del aire comprimido con el objeto que la presión mayor les haga cerrar. La Fig. V.2, nos muestra una vista de la mampara y la colocación de las esclusas.

Las esclusas pueden ser operadas desde el exterior o interior -- ya que cuentan con tableros de control en ambos lados, los cuales están -- equipados con manómetros, reloj, graficador de presión, termómetro y teléfono con comunicación a los puntos claves del sistema. A un lado del tablero se encuentran las válvulas de alimentación y escape de las esclusas -- y la válvula de ventilación de la cámara de trabajo.

El control médico del personal es el aspecto más importante en este tipo de obras, ya que el trabajar en ambiente hiperbarico expone al -- cuerpo a enfermedades por descompresión. Por tal motivo, es indispensable



ESCLUSAS DE PERSONAL - REGAZA  
 Y MAMPARA DE ACERO  
 FIGURA V-2  
 (Ref 16)

ble contar con un servicio médico especializado cuyas funciones principales sean:

- a) Selección de trabajadores.
- b) Vigilancia médica.
- c) Tratamiento de enfermedades.
- d) Elaborar las normas de seguridad.

En términos generales la selección del personal debe cumplir con los siguientes requisitos:

- a) Integridad física.
- b) Capacidad para desarrollar ejercicio físico.
- c) No rebasar el 20% de sobrepeso.
- d) Edad inferior a los 35 años.
- e) Aptitud para igualar presiones en los senos paranasales y oídos.
- f) No padecer enfermedades de pulmón, oídos o articulaciones.

Para prevenir una falla de energía eléctrica se debe instalar, en el sistema de aire comprimido, una planta de emergencia, tal que permita restablecer la energía en pocos minutos para poner en funcionamiento los compresores, la iluminación del túnel, el malacate de personal, y todo aquél equipo que requiera de energía eléctrica para funcionar.

Dentro del túnel se instala un sistema de luces de emergencia, el cual consta de una serie de lámparas alimentadas por acumuladores,

que entran en funcionamiento al cortarse la energía eléctrica proveniente - de la subestación.

#### Procedimiento de construcción.

El procedimiento de construcción cuando se emplea aire comprimido en la excavación de túneles, prácticamente es el mismo que se sigue cuando se utiliza únicamente escudo de frente abierto que, como se recordará, tiene como actividades críticas en su ciclo de operaciones a la reza- ga, el empuje del escudo y la colocación de un anillo formado por dovelas, y como actividades secundarias tiene la excavación, ademe del frente, ajus- te de tornillos de los segmentos, manteo, bajada de materiales e inyección de gravilla y lechada.

El empleo del aire comprimido requiere, además de las activida- des anteriores, de tiempos de compresión para poder entrar a la cámara - de trabajo; y tiempos de descompresión al salir de la misma. Estos tiem- pos son de gran importancia, sobre todo, cuando la compresión o descom- presión se realiza con personal, por tal motivo, se requieren estudios --- exhaustivos para determinarlos, pues tiempos inadecuados originarían des- de simples dolores de cabeza, hasta graves enfermedades que pondrían en- peligró la vida de la persona. Cuando se trata con la rezaga u otros mate- riales, los tiempos referidos deben ser lo más cortos posible para acele- rar el ciclo de excavación.

La compresión o descompresión tanto de personal como de mate

riales se lleva a cabo en las esclusas correspondientes, las cuales funcionan de la misma manera y conforme a los siguientes pasos:

Si se desea llegar a la cámara de trabajo.

- a) Se entra a la esclusa y se cierra la compuerta A.
- b) Se comienza a presurizar la esclusa hasta que se nivela a la presión del frente de ataque.
- c) Igualadas las presiones se puede abrir la compuerta B que permite el acceso a la zona de excavación. La compuerta A queda en este momento prácticamente imposibilitada para abrirse, ya que la presión aplicada a la esclusa no lo permite.

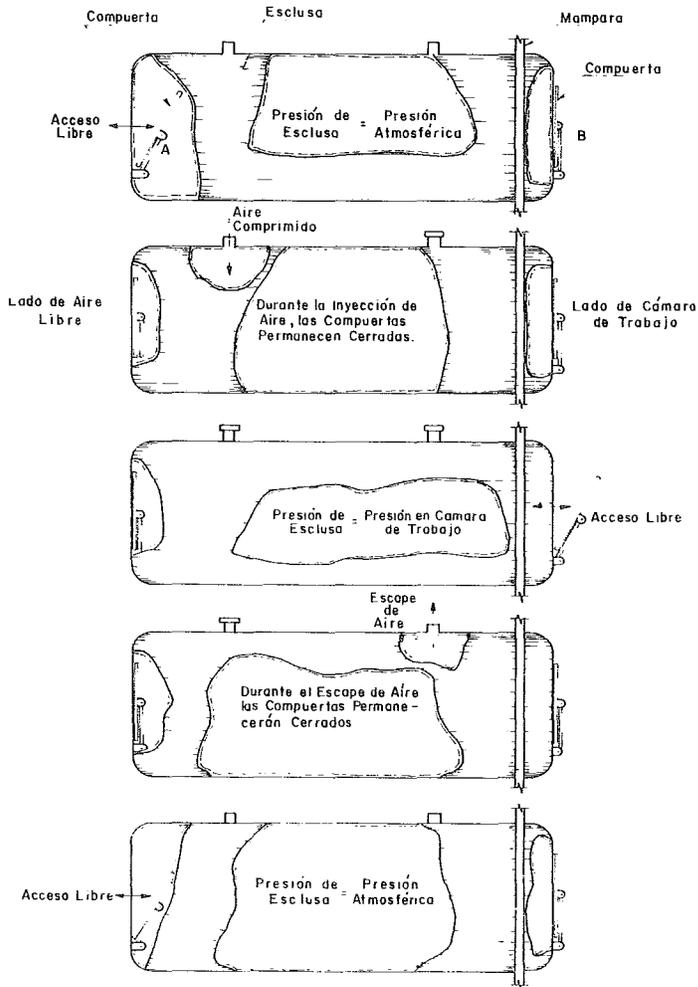
La Figura V.3 nos muestra la forma como se logra entrar o salir de la zona de aire comprimido.

Si se desea salir de la cámara de trabajo:

- a) Se entra a la esclusa por la compuerta B y se cierra ésta.
- b) Se descomprime la esclusa conforme a los intervalos de tiempo, calculados previamente. La descompresión se logra abriendo la válvula de escape.
- c) Lograda la descompresión total, se puede abrir la compuerta A para pasar a la zona de aire libre.

Fuera del túnel se cuenta con una cámara médica, recipiente cilíndrico que funciona igual que la esclusa de personal.

Se utiliza para someter a tratamiento a aquellos trabajadores que después de ser descomprimidos presentan alguna molestia producto de

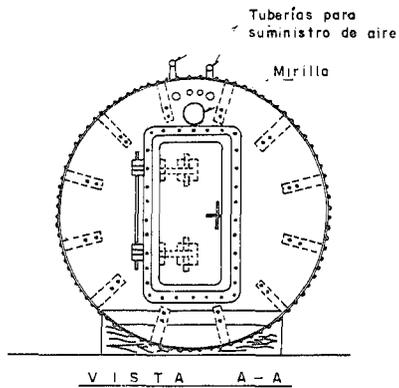
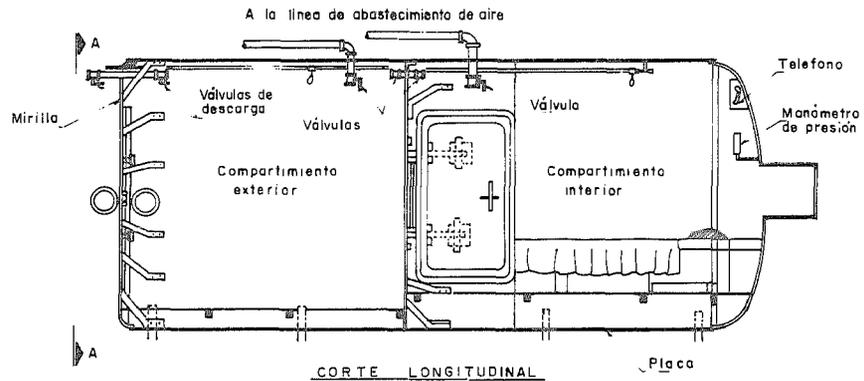


**FUNCIÓNAMIENTO DE LAS ESCLUSAS**

F I G U R A V - 3  
(Ref 13)

su permanencia dentro del túnel. Las instalaciones de la cámara médica – se muestran en la Figura V.4.

Las instalaciones en general se muestra en la Fig. V.5.

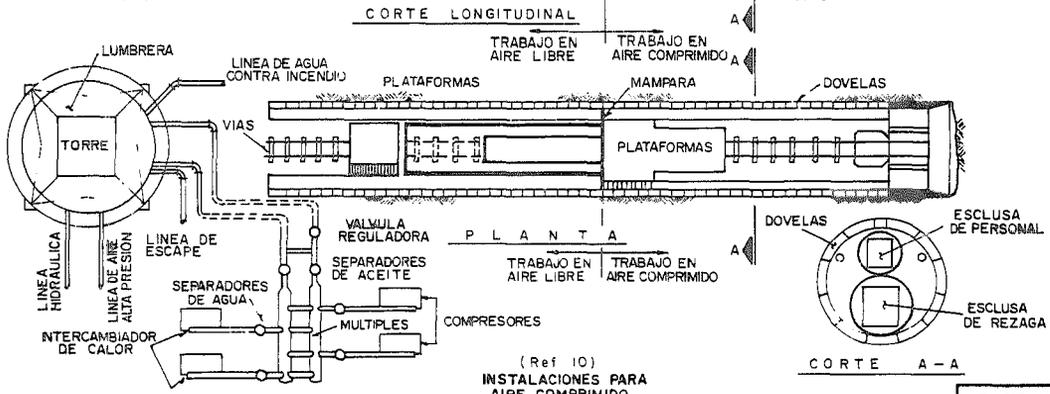
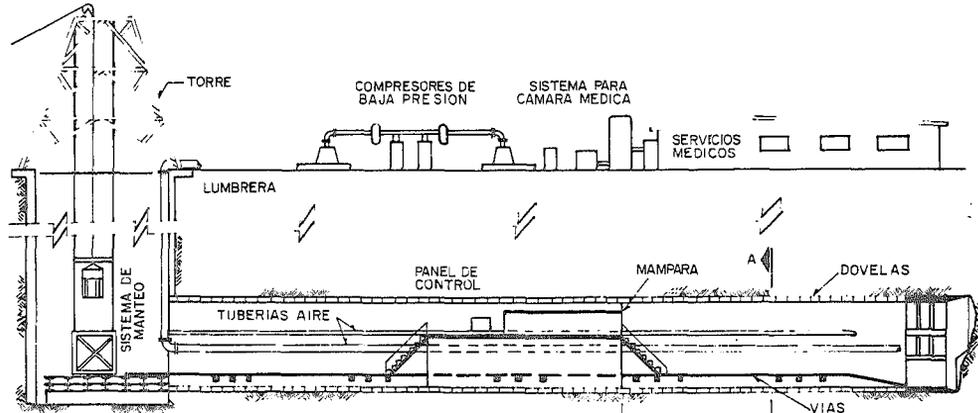


C A M A R A M E D I C A  
F I G U R A V - 4

(REF. 15)

TESIS PROFESIONAL

FIGURA V-5



(Ref 10)  
INSTALACIONES PARA  
AIRE COMPRIMIDO

## PRUEBAS DE COMPRESION EN CAMARA MEDICA

México, D.F., 1978.

P	Pe	T	N	E	I
1	0.8	8	22	0	0
2	0.9	8	20	0	0
3	1.0	4	11	0	0
4	1.0	8	20	0	0
5	1.0	8	21	0	0*
6	1.1	3	12	0	0
7	1.1	8	20	0	0
8	1.2	4	10	0	0
9	1.2	6	29	0	0
10	1.3	4	10	0	0
11	1.3	6	32	0	0
12	1.4	4	11	0	0
13	1.4	6	22	0	0
14	1.5	4	11	0	0
15	1.5	5	46	0	0
16	1.5	6	30	1	1
17	1.6	4	9	0	0
18	1.6	6	22	0	0
19	1.7	4	5	0	0
20	1.7	6	32	1	3
21	1.8	4	10	0	0
22	1.8	5	21	1	1
23	1.8	6	35	3	3
24	1.9	3	5	0	0
25	1.9	6	22	0	1
26	2.0	3	5	0	3
27	2.0	4	39	1	2
28	2.0	5	20	4	2
29	2.0	6	26	1	3*

donde:

P : Prueba

Pe : Presión en kg/cm<sup>2</sup>.

T : Exposición en Horas.

N : Número de Personas.

E : Número de casos de enfermedades por Descompresión.

I : Número de casos de intolerancia al aire comprimido.

\* : Se usó máscara de oxígeno.

T A B L A D E T I E M P O S D E D E S C O M P R E S I O N  
Washington, D. C. 1971

PRESION DE TRABAJO p i s g	P E R I O D O D E L A B O R ( H O R A S )										MAS DE 8
	1/2	1	1 1/2	2	3	4	5	6	7	8	
0-12	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
14	6	6	6	6	6	6	6	6	6	16	33
16	7	7	7	7	7	7	17	33	48	48	62
18	7	7	7	8	11	17	48	63	63	73	87
20	7	7	8	15	15	43	63	73	83	103	113
22	9	9	16	24	38	68	93	103	113	128	133
24	11	12	23	27	52	92	117	122	127	137	151
26	13	14	29	34	69	104	125	141	142	142	163
28	15	23	31	41	98	127	143	153	153	165	183
30	17	28	38	82	105	143	165	168	178	188	204
32	19	35	43	85	126	163	178	193	203	213	226
34	21	39	58	98	151	178	195	218	223	233	248
36	24	44	63	113	170	198	223	233	243	253	273
38	28	49	73	128	178	203	223	238	253	263	278
40	31	49	84	143	183	213	233	248	258	278	288
42	37	56	102	144	189	215	215	260	263	268	293
44	43	64	118	154	199	234	254	264	269	269	293
46	44	74	139	171	214	244	269	274	289	299	318
48	51	89	144	189	229	249	299	309	310	319	---
50	58	94	164	209	249	279	309	329	---	---	---

(Tiempo de descompresión en minutos)

T A B L A D E T I E M P O S D E D E S C O M P R E S I O N

México, D.F., 1978.

PRESION DE TRABAJO kg/cm2.	P E R I O D O D E L A B O R ( H O R A S )										MAS DE 8	
	1/2	1	1 1/2	2	3	4	5	6	7	8		
0.6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
0.7	6	6	6	6	6	6	6	6	12	12	24	24
0.8	7	7	7	7	7	7	13	21	35	35	51	51
0.9	8	8	8	8	9	12	33	48	56	61	73	73
1.0	8	8	10	12	13	28	56	68	77	88	112	112
1.1	8	8	12	19	24	53	76	86	96	116	125	125
1.2	11	11	19	25	43	76	102	111	120	133	140	140
1.3	12	14	25	29	58	96	121	128	134	140	156	156
1.4	14	17	30	36	76	111	132	145	147	150	171	171
1.5	16	24	33	45	101	132	149	159	160	172	188	188
1.6	18	29	39	65	109	147	169	172	184	192	208	208
1.7	20	36	44	86	123	167	182	197	207	218	231	231
1.8	22	40	59	99	152	181	197	220	226	236	254	254
1.9	24	44	64	113	172	200	224	236	244	256	277	277
2.0	28	49	73	128	180	207	227	241	256	266	281	281
2.1	32	50	83	142	185	215	235	249	261	272	293	293
2.2	36	55	99	147	191	218	245	260	265	272	297	297
2.3	43	63	115	154	200	232	255	268	271	273	297	297
2.4	44	70	130	164	207	240	262	269	280	285	310	310
2.5	48	80	146	183	224	256	280	292	---	---	---	---
2.6	55	89	160	201	244	274	303	319	---	----	---	---

(Tiempo de descompresion en minutos)

## C A P I T U L O   V I

### RELACION ENTRE LAS CARACTERISTICAS DEL SUELO Y EL PROCEDIMIENTO ADECUADO

El método de excavación de un túnel depende principalmente de la naturaleza del material a través del cual se va a perforar. Los procedimientos de excavación se pueden dividir en dos grandes grupos: "Procedimientos de Excavación en Rocas" y "Procedimientos de Excavación en Suelos Blandos". El primero requiere de voladuras a base de explosivos o energía equivalente para romper el terreno y puede o no necesitar algún tipo de ademe. El segundo se relaciona con suelos compuestos generalmente de limo, arena, grava y arcilla; mezclados comúnmente con agua, por lo que las paredes de la excavación requieren de un ademe temporal inmediato para evitar un colapso.

"Métodos de Excavación en Roca".

Actualmente los métodos de excavación en rocas son muy variados, pero prácticamente los más desarrollados son los siguientes:

- a) Excavación con Explosivos.
- b) Excavación con Perforadora Integral (TOPO)
- c) Excavación con Máquinas de Pluma.

Para definir el método de excavación a usar, deben ser cuantificadas dos grandes características que posee la roca; fragmentación y con-

sistencia.

La Universidad de Illinois, desarrolló el coeficiente R.Q.D. --- (Rock Quality Designation), que refleja parcialmente los grados de altera -- ción y fisuramiento de la roca. El R.Q.D. es la suma de las longitudes -- mayores o iguales a 10 cm. de los tramos de una muestra, en estado sano\_ o compacto, dividida entre la longitud total avanzada y expresada la rela -- ción en porcentaje. En base a este coeficiente se logró la clasificación de -- la calidad de la roca, mostrada en la tabla siguiente:

INDICE DE CALIDAD R.Q.D. (%)	CALIDAD
0 - 25	Muy Mala
25 - 50	Mala
50 - 75	Regular
75 - 90	Buena
90 - 100	Excelente

TABLA VI.1 (Deere, 1967).

Al analizar los corazones de roca, producto de los sondeos de -- exploración, es conveniente el empleo de una terminología descriptiva pa -- ra definir el espaciamiento de juntas y el espesor de los estratos. La Ta -- bla VI.2. nos puede servir de base para tales propósitos.

Término Descriptivo	Espesor del Estrato	Espaciamiento (cm)
Muy Cerrado	Muy Delgado	5
Cerrado	Delgado	5 - 30
Moderadamente Cerrado	Medio	30 - 100
Abierto	Grueso	100 - 300
Muy Abierto	Muy Grueso	300

TABLA VI.2 (Deere)

La consistencia de la roca se basa para su clasificación en el esfuerzo de ruptura a la compresión simple. La Tabla VI.3 nos proporciona la clasificación de la segunda característica que nos ayuda en la selección del método de excavación más adecuado.

Grado de Resistencia	T i p o d e R o c a	$Q_{uc}$ (Kg/cm <sup>2</sup> )
Muy Alta Resistencia	Cuarzita, Diorita, Granito	2250
Alta Resistencia	Gneiss, Basalto	1125 - 2250
Resistencia Media	Calizas, Mármol	550 - 1125
Resistencia Baja	Areniscas, Lutitas	275 - 550
Resistencia Muy Baja	Pizarras, Limolitas	- 275

TABLA VI.3 (Deere y Miller).

Ya que con frecuencia los túneles se localizan a grandes profundidades, no siempre es posible conocer el R.Q.D. a lo largo de la línea proyectada, sin embargo, cuando la profundidad de las exploraciones lo permita, esto será de mucha utilidad. Con objeto de tener una idea remota, la Tabla VI.4 nos da la separación de los sondeos en función de la profundidad del túnel.

Profundidad del Túnel (m)	Espaciamiento de los Sondeos De Exploración (m)
227	304 - 760
91 - 227	152 - 304
91	30 - 152

TABLA VI.4 (Ref. 13).

Después de haber presentado los parámetros que definen a las dos características principales de la roca, estamos en condiciones ya, de relacionarlas, con los métodos de excavación enunciados anteriormente.

a) Excavación con Explosivos.

Los explosivos son un método extremadamente primitivo de excavación de túneles en formaciones rocosas. Pueden ser utilizados en cualquier tipo de roca, ya sea ésta competente o incompetente. La variante que existe en este método con respecto al tipo de roca es el sistema de soporte que se utilice, el cual puede ser a base de marcos metálicos, anclas

o concreto lanzado. En la Tabla VI.5 se presenta una relación entre el R.Q.D. y el ademe necesario para túneles en roca.

En general, las formaciones de roca clasificadas por la Tabla VI.1, como excelente o buena y que presentan muy alta resistencia o alta resistencia (Tabla VI.3), debido a las fuerzas de cohesión tan grandes que las mantienen en su estado original, requieren de fuerzas externas muy superiores para romperlas, por lo que los explosivos constituyen el medio más adecuado para proporcionarlas obteniéndose óptimos resultados.

En zonas urbanas, principalmente si la formación rocosa pertenece a una roca mala o muy mala, el uso de los explosivos no es muy recomendable, ya que la acción indebida de los mismos puede hacer cambiar las características de resistencia de la formación en una o varias direcciones, lo que puede traer como consecuencias daños en las estructuras vecinas.

#### b) Excavación con Perforadora Integral.

Cuando el material por atacar consiste en una roca competente y buena capacidad para autosoportarse, el método de excavación se basa en máquinas perforadoras de agarre lateral. Las paredes de la excavación deben tener la capacidad de carga necesaria para soportar el empuje de los gatos de agarre que permiten el avance longitudinal de la máquina, y el empuje de los gatos que producen presión a los cortadores de la cabezadora giratoria sobre la frente que está atacando.

TABLA VI.5 (Conn, 1968) RECOMENDACION PARA LOS SISTEMAS DE SOPORTE EN TUNELES EN ROCA

HOJA 1 DE 3

CALIDAD DE LA ROCA	METODO CONSTRUCTIVO	S I S T E M A D E S O P O R T E		
		MARCOS METALICOS 2	A N C L A S	CONCRETO LANZADO
EXCELENTE 1 RQD 90	A. Perforadora Integral.	Ninguno a ligero. carga de roca --- (0.0 a 0.2) B	Ninguna	Ninguno o aplicaciones locales
	B. Convencional	Ninguno a ligero- Carga de roca --- (0.0 a 0.3) B	Ninguna	Ninguno o aplicación - local 2 a 3 pulg.
BUENA 1 75 RQD 90	A. Perforadora Integral	Ocasionalmente Marcos ligeros colocados entre 1.5 y 1.8 m. carga de roca - (0.0 a 0.4) B	Ocasionalmente - anclas separadas a 1.50 ó 1.8 m.- centro a centro.	Ocasional aplicación - local 2 a 3 pulg.
	B. Convencional	Marcos colocados a 1.5 ó 1.8 m. carga de roca (0.3 a 0.6) B.	Plantilla de anclas separadas a 1.5 ó 1.8 m. centro a centro.	Ocasionalmente aplicación local 2 a 3 pulg.
REGULAR 50 RQD 75	A. Perforadora Integral	Marcos ligeros a - mediano 1.5 a 1.8- m. c.a.c. carga de roca (0.4 a 1.0) B	Plantilla de anclas de 1.2 a 1.8 m. c.a.c.	2 ó 4 pulg. en la clave.

TABLA VI.5 (Conn, 1968) RECOMENDACION PARA LOS SISTEMAS DE SOPORTE EN TUNELES EN ROCA

CALIDAD DE LA ROCA	METODO CONSTRUCTIVO	S I S T E M A D E S O P O R T E		
		MARCOS METALICOS 2	A N C L A S	CONCRETO LANZADO
MALA 25 RQD 50	B. Convencional	Marcos ligeros a medianos con 1.20- a 1.5 mts. c.a.c.- carga de roca ---- (0.6 a 1.3) B	Plantilla de 0.9 a 1.5 m. c.a.c.	4 Pulg. o más en la -- clave y en las pare -- des.
	A. Perforadora Integral.	Marcos circulares- medianos separados entre 1.20 y 1.60- mts. carga de roca (1.0 a 1.6) B	Plantilla de 0.9 a 1.5 mts. c.a.c.	4 a 6 pulg.en clave y paredes combinado con- anclas.
MUY MALA RQD 25	B. Convencional	Marcos de medianos a pesados coloca- dos entre 0.6 y -- 1.20 mts. c.a.c. - carga de roca ---- (1.3 a 2.0) B	Plantilla de 0.6 a 1.20 mts. c.a.c.	6 Pulg. o mas en la -- clave y paredes, combi- nado con anclas.
	A. Perforadora Integral.	Circulares medianos a pesados colocados a 0.60 m. c.a.c. - carga de roca ----- (1.6 a 2.2)B	Plantilla de 0.60- a 1.20 m.	6 pulg. o más en toda- la sección combinado - con marcos medianos

TABLA VI.5 (Conn, 1968) RECOMENDACION PARA LOS SISTEMAS DE SOPORTE EN TUNELES EN ROCA

HOJA 3 DE 3

CALIDAD DE LA ROCA	METODO CONSTRUCTIVO	S I S T E M A D E S O P O R T E		
		MARCOS METALICOS 2	A N C L A S	CONCRETO LANZADO
MUY MALA 4 (roca que fluye o expansiva).	B. Convencional	Circulares pesados - a 0.60 m. c.a.c. - carga de roca ---- (2.0 a 2.8) B	Plantillas de 0.90 m. c.a.c.	6 pulg. o más en toda la sección combinado - con marcos medianos o pesados.
	A. Perforadora Integral.	Circulares muy pesados 0.60 mts. -- c.a.c. carga de roca arriba de 75 m.	Plantillas 0.60 a- 0.90 m. c.a.c.	6 pulg. o mas combinado con marcos pesados.
	B. Convencional	Circulares muy pesados 0.60 mts. -- c.a.c. carga de roca arriba de 75 m.	Plantillas de 0.60 a 0.40 c.a.c.	6 Pulg. o más combinado con marcos pesados.

- NOTAS: 1.- En roca buena y excelente, el soporte requerido en general es mínimo pero puede depende de la -- geometría de los factores, del diámetro del túnel y de la orientación relativa de las fracturas.
- 2.- El retaque de madera usualmente es igual a cero en la roca excelente y varía entre 25% en roca - buena y 100% en roca muy mala.
- 3.- La necesidad de poner malla usualmente es cero en roca excelente y ocasional en roca buena hasta 100% en roca muy mala.
- 4.- B = ancho del túnel.

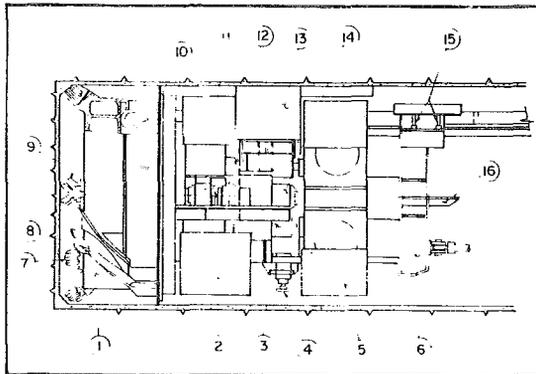
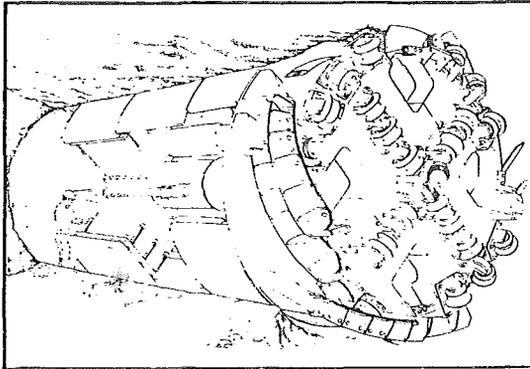
A este tipo de máquinas tuneleras se les conoce con el nombre - de TOPOS (Mole en Inglés).

Un topo consiste básicamente de:

- 1.- Un cuerpo metálico muy robusto que se atraca contra las - paredes de la excavación por medio de gatos hidráulicos.
- 2.- Una cabeza giratoria con un número variable de cortadores troncocónicos, que también giran sobre su propio eje.
- 3.- Un sistema de gatos que producen presión a los cortadores de la cabeza giratoria.
- 4.- Un sistema de motores eléctricos o hidráulicos, que accio\_ nan sobre una flecha ligada a la cabeza.
- 5.- Elementos auxiliares tales como banda transportadora, -- canjilones, erector de dovelas y tren de equipo.

La Figura VI.1.1. nos ilustra los componentes del Topo.

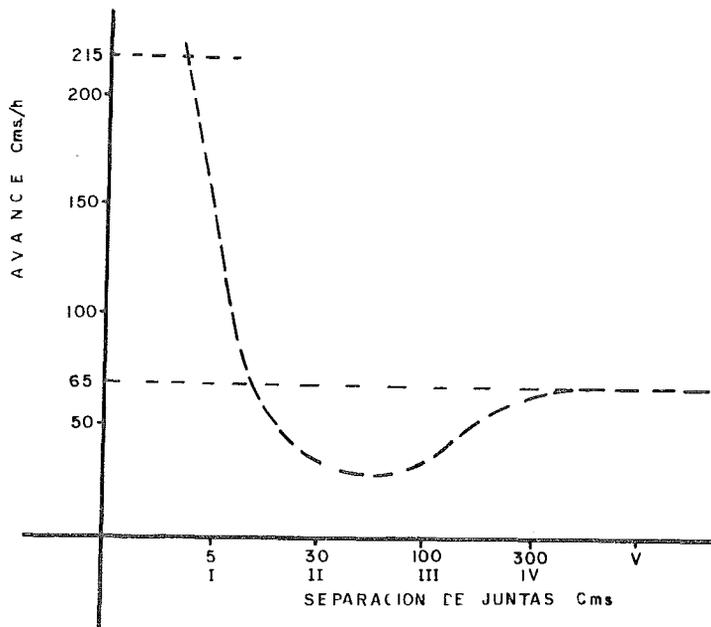
El método de excavación con topo puede competir con ventaja con el método convencional cuando se trate de rocas con resistencia media, baja o muy baja en el rango inferior  $T_c = 550 \text{ kg/cm}^2$ . (Tabla VI.3), sobre - todo si el espaciamiento de las fracturas no corresponde al denominado por la Tabla VI.2 como moderadamente cerrado, ya que en ese caso durante el ataque se desprenden trozos de roca que no pueden pasar por los canjilones o banda del topo ocasionando daños y pérdidas continuas de tiempo por re - paraciones de la máquina. De una manera general, al elegir un Topo para excavar este tipo de materiales deberá tomarse muy en cuenta el tamaño - máximo de roca que puede extraer. La importancia del grado de fractura- miento se pone de manifiesto en la gráfica VI.1.2. en la que se comparan-

COMPONENTES DEL TOPOELEVACION DEL TOPO.

1 Cabeza cortadora. 2 Coraza de mando. 3 Gatos de empuje. 4 Soporte inferior. 5 Anclaje. 6 Erector de dovelas. 7 Disco cortador. 8 Rascador. 9 Diente Cortador. 10 Protector del polvo. 11 Caja de engranes. 12 Conexión Hidráulica. 13 Escudo del techo. 14 Conductor eléctrico principal. 15 Gatos del erector. 16 Plataformas de trabajo.

FIGURA VI-1-1

( Ref. 13 )



COMPARACION DE LA VELOCIDAD DE AVANCE  
CON LA SEPARACION DE JUNTAS

F I G U R A VI-1-2  
(Ref. 13)

ROCA B ALTA RESISTENCIA  
 $\tau_c = 2000 \text{ kg/cm}^2$

las velocidades de avance en cm/hr., atacando con el mismo tipo de máquina y en rocas de resistencia aproximadamente de  $2000 \text{ kg/cm}^2$ , pero con diferencias en la separación de las juntas.

En el caso de rocas con resistencia media, alta o muy alta, en su rango superior y si el espaciamiento entre juntas corresponde a los términos descriptivos abierto o muy abierto (Tablas VI.3 y VI.2), se ha observado que la excavación con topo no compite ni en tiempo ni en costo con el método convencional. Esto es debido, en forma prácticamente determinante, a que los cortadores no resisten durante mucho tiempo las condiciones severas impuestas por el corte en este tipo de rocas. Sin embargo, hay casos en que resulta ser el único medio de excavación, sobre todo en ciudades con subsuelos de estas características, en donde el uso de los explosivos presenta graves inconvenientes.

c) Excavación con Máquinas de Pluma.

Estas máquinas básicamente consisten en un aparato autopropulsado, mediante motores eléctricos, que posee una pluma oscilante en todas direcciones en cuyo extremo se encuentra un cortador; el material desprendido cae en una charola de donde es empujado por unos brazos móviles hacia una banda transportadora. De esta última, puede pasar a un sistema de carga de vagonetas o bien a otro tipo de rezagadora.

Debido a su peso, las máquinas pueden clasificarse en tres clases:

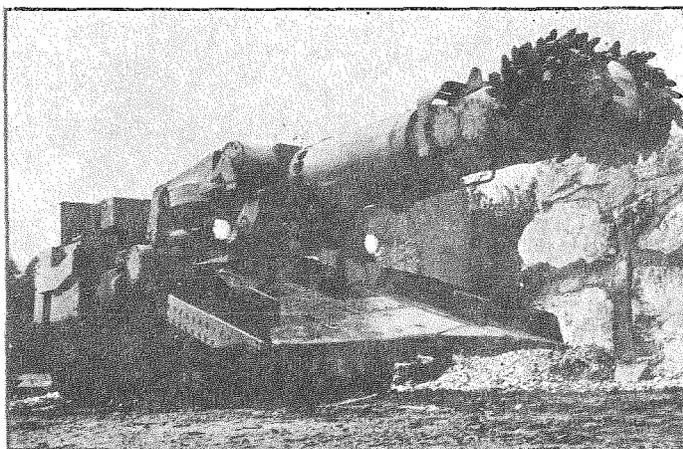
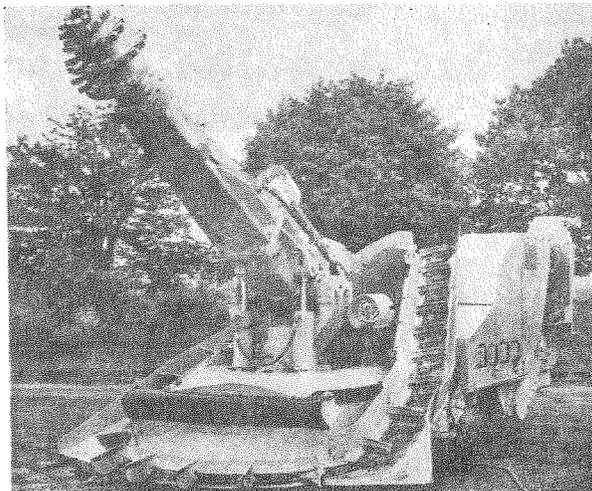
- a) Superpesadas: con peso de 70 - 90 toneladas.
- b) Pesadas: pesan entre 30 - 60 toneladas.
- c) De peso Medio: su peso varía entre 20 - 30 toneladas.

Dependiendo del cortador las tuneadoras de pluma pueden ser de dos tipos:

i) Cortador Tipo Fresa.- El cortador es cilíndrico o cónico y gira sobre el eje mismo de la pluma, ejerciendo la fuerza de corte hacia los lados, por lo que no se usa el peso total de la máquina en el ataque. El diámetro de estos cortadores es más pequeño que el del tipo siguiente, por lo que se recomienda cuando se trata de atacar estratos delgados o muy delgados. Cuando la roca es relativamente dura la máquina necesita ser empujada lateralmente con gatos especiales. El cortador de fresa arroja los trozos cortados en el frente hacia los lados lo que complica el acarreo de la rezaga hacia la banda transportadora.

ii) Cortador Desgarrador.- El eje del cortador es normal al eje de la pluma, por lo que el peso total de la máquina puede utilizarse para efectuar el ataque. Además, un 80% del material excavado es arrojado a la charola y dejado en la banda transportadora. Se recomienda para atacar estratos gruesos o muy gruesos.

Tanto el cortador de fresa como el desgarrador, producen polvo durante el ataque; este problema aún no se ha resuelto en forma satisfactoria ya que no puede colocarse una pantalla que aisle el frente y aunque la



En la Figura Superior, se muestra un cortador tipo - Fresa.

En la parte inferior, se ilustra el cortador Desgarrador.

pluma tiene en el extremo un colector de polvo es necesaria una excelente-ventilación.

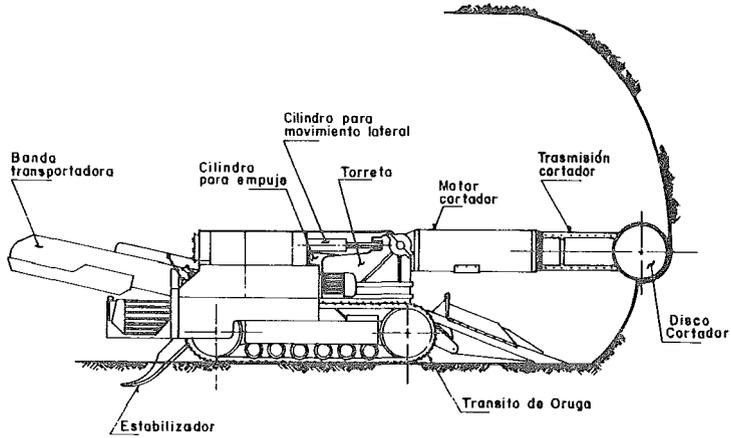
En términos generales, este tipo de máquinas de pluma, también conocidas como rozadoras, son recomendables a usarse en rocas con resistencia muy baja, baja o media y cuyo R.Q.D. varía de Excelente a mala.

Si la roca es suave un buen número de dientes están en contacto simultáneo con el frente de la excavación y el avance es mayor. Si la dureza de la roca aumenta, el operador de la máquina puede hacer que sea un solo diente el que esté en contacto con el frente, por lo que el avance será menor.

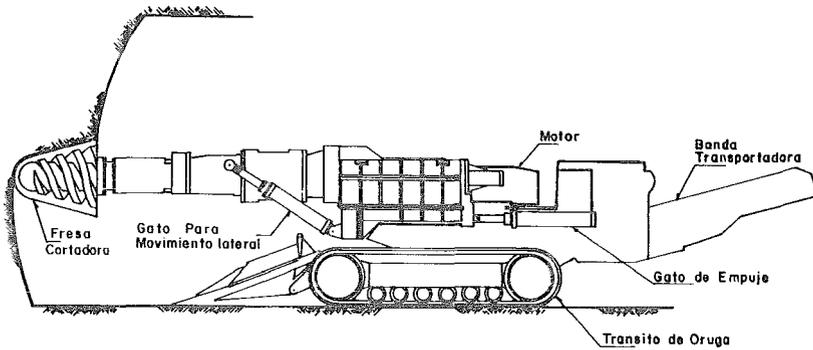
Como en el caso del Topo, el rendimiento de la máquina depende principalmente del grado de fracturamiento y de la resistencia a la compresión de la formación a excavar. La Figura VI.1.3. nos muestra estos tipos de máquinas.

La excavación mecanizada, ya sea con Topo o con máquina de pluma, va dejando al túnel con la apariencia de revestido, no hay sobreexcavaciones apreciables, es posible el uso de revestimientos prefabricados y, en buen número de casos, se puede prescindir de éstos; la seguridad es máxima en comparación con el método convencional.

La elección del procedimiento de excavación más adecuado debe hacerse contemplando, no sólo las características del terreno a excavar, sino también debe considerar otros parámetros tales como tiempo, costos-



CORTADOR TIPO DESGARRADOR



CORTADOR TIPO FRESA

TUNELERAS DE PLUMA

FIGURA VI.1.3  
(Ref. 13)

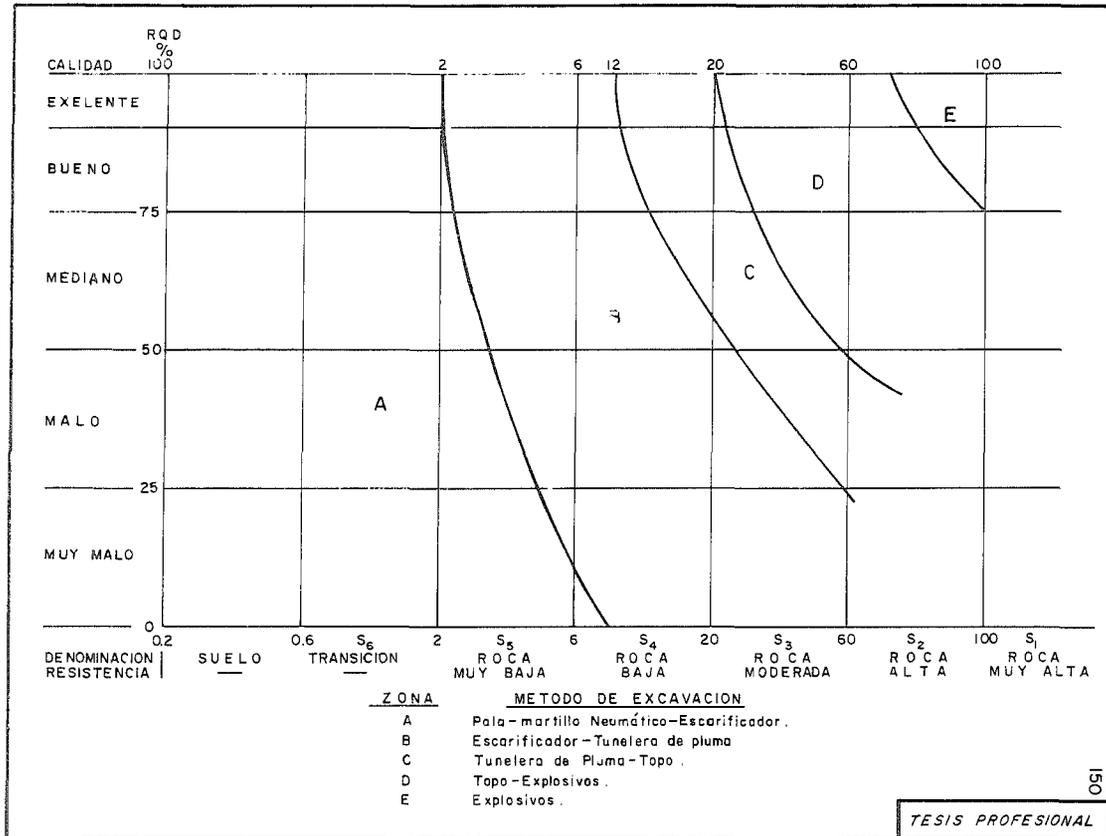
y beneficios sociales. La comparación entre el costo de un túnel usando uno u otro método, tomará en cuenta todos estos factores, lo que conduce prácticamente a comparar el costo por metro lineal de túneles equivalentes en cuanto al servicio a prestar, pero quizá diferentes en cuanto a sección, volúmenes extraídos, revestimientos y tiempo de avance.

En la actualidad ya no estamos sujetos a la limitación que existía años atrás de excavar con explosivos. Los métodos de excavación sin dinamita, con corte o fresado mecánico de la roca, que rompen allí donde queremos y no dañan al resto de la formación, son una bendición para el constructor de túneles. Así lo hace notar D. Manuel Romana Ruíz, y de él presentamos una propuesta para seleccionar el método posible de excavación, basada en la resistencia a compresión simple y en la fragmentación medida con el factor RQD. (Fig. VI.1.4.).

#### Procedimientos de Excavación en Suelos Blandos.

Debido a las ventajas que presenta, el escudo se ha convertido en el método de excavación preferido por el constructor de túneles, cuando se trata de atacar suelos blandos. A tal grado que en la actualidad existe una gran variedad, en cuanto a su tamaño y forma, de este tipo de máquinas que tienden a producir la mínima alteración del terreno en torno al túnel. Pero prácticamente todas ellas se utilizan en uno o más de los cuatro métodos de excavación con escudos enunciados a continuación.

##### a) Escudo de Frente Abierto.



150

TESIS PROFESIONAL

SELECCION DEL METODO DE EXCAVACION  
DE TUNELES SEGUN LA CALIDAD DE ROCA  
(ROMANA 1976)

FIGURA VI-1-4

- b) Escudo de Frente Abierto con Aire Comprimido.
- c) Escudo de Frente Cerrado.
- d) Escudo de Frente Cerrado con Presión al Frente.

Cada uno de estos procedimientos de excavación fue descrito previamente en páginas anteriores, por lo que resulta innecesario tratarlos nuevamente. Simplemente nos limitaremos a relacionar cada procedimiento con las características de los suelos en que puede ser aplicado.

#### Características de los Suelos.

La excavación de túneles en suelos blandos está controlada principalmente por la resistencia al esfuerzo cortante del suelo o por su relación con la presión sobre el techo, la cual afecta directamente la estabilidad de las paredes y el frente de la excavación. El agua en el suelo es otro factor que juega un papel importante para definir el comportamiento del túnel y por ende, el procedimiento de excavación a seguir sobre todo en los materiales friccionantes.

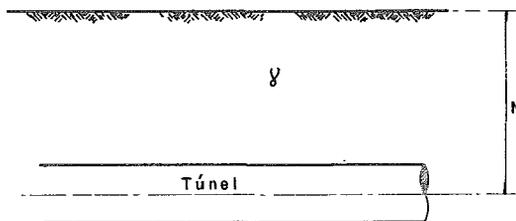
Una baja resistencia del suelo puede provocar plastificación y falla de la excavación. El fenómeno se presenta cuando el material de paredes, piso y techo fluye lentamente y tiende a cerrar la excavación, como consecuencia de un ademe inadecuado del túnel. Por lo tanto, el hecho de que la falla se presente o no dependerá del procedimiento de construcción, de la resistencia del suelo y de la relación  $\frac{\gamma H}{C}$  en donde:

$\sigma_H = \gamma H$  = Presión vertical total a la profundidad media del túnel.

$\gamma$  = Peso volumétrico del material.

$H$  = Profundidad al eje del túnel.

$C$  = Cohesión del suelo en prueba no drenada.



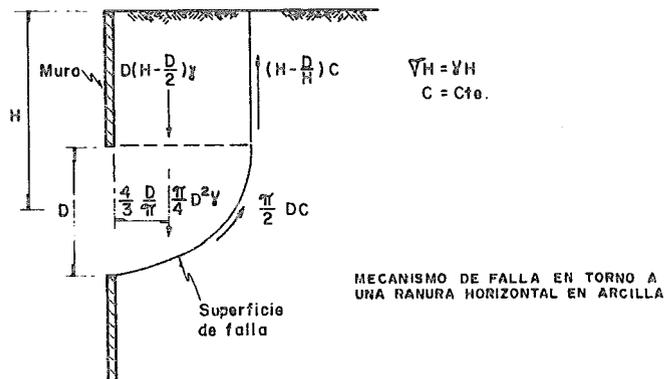
Las evidencias experimentales indican que en suelos arcillosos blandos la falla de la excavación ocurre cuando  $\sigma_H > 6.28 C$ . En la práctica este valor continúa siendo válido, pero además es muy importante el tiempo que se deja sin ademar el frente de ataque. En el momento de la excavación se inducen generalmente en la arcilla presiones de poro negativas, de manera que al paso del tiempo se manifiestan expansiones y disminución de la resistencia en el suelo próximo a las paredes del túnel. La velocidad de expansión aumenta rápidamente con las dimensiones de la parte del túnel no ademada, por lo que suele bastar llevar el ademe suficientemente cerca del frente de la excavación para prevenir problemas de expansión.

Las arcillas duras y fisuradas pueden presentar signos de inestabilidad en el frente para valores  $\frac{\gamma H}{C} < 6$ , como resultado de los pro -

cesos de deformación causados por la redistribución de esfuerzos.

Si el diámetro del túnel es grande en comparación a la profundidad a la que está situado, el valor crítico de la relación mencionada se calcula con la siguiente expresión:

$$\frac{\sigma_H}{C} \text{ crit} = \frac{2 \frac{H}{D} + \pi - 1}{1 + 1/6 D/H}$$



Si la resistencia de la arcilla aumenta con la profundidad la falla en el túnel ocurre cuando:  $\frac{\sigma_H}{C} \geq 6$ , para valores de  $\frac{H}{D} < 4$  ó  $5$ .

Cuando  $\frac{\sigma_H}{C} < 2$  ó  $3$  los movimientos suelen ser pequeños y de naturaleza más bien elástica; para valores mayores a ese límite comienzan las grandes deformaciones plásticas.

En los materiales friccionantes como las arenas, las gravas y las rocas totalmente fracturadas, la inestabilidad de las paredes no se manifiesta por grandes desplazamientos o flujos plásticos. El elemento esencial para definir las condiciones de estabilidad del frente en este tipo de suelos es la presencia del agua en el subsuelo. Sobre el nivel freático, estos materiales estando secos carecen de capacidad para soportarse, cuando se excavan con un talud mayor que el natural de equilibrio ( $\phi$ ), pero por el contrario resultan muy estables si se permite que adopten un talud de inclinación igual a  $\phi$ . En ocasiones, las arenas presentan cohesión aparente por capilaridad, que puede aprovecharse, siempre y cuando el ademe se coloque antes de que se disipe. A veces, la resistencia de la arena en las paredes disminuye con el tiempo, pues al secarse se disipa la cohesión aparente del material, lo que trae como consecuencia, derrumbes en las paredes si éstas no se ademan anticipadamente. En los materiales granulares bajo el N.A.F. la estabilidad del frente de la excavación depende sobre todo de la existencia de algo de cohesión, que contrarreste las fuerzas de filtración producidas por la tendencia del agua subterránea a fluír hacia el interior del túnel, por lo que el método constructivo debe ser tal que proporcione esa cohesión aparente o fuerzas similares contrarias al flujo que mantengan la estabilidad.

Hay ocasiones en que la excavación se realiza en dos o más tipos de suelos. Las formaciones con estratos de arena y grava limpia sobreyaciendo a otros muchos más impermeables, y ambos bajo el N.A.F., resultan muy difíciles de drenar y se hace preciso sostenerlos desde los prime-

ros momentos de la excavación. Cuando las formaciones consisten de un estrato permeable confinado entre estratos muy impermeables, hay ocasiones en que se producen flujos horizontales de agua hacia el túnel, de consideración. Estos casos requieren los más cuidadosos procedimientos de excavación, con los cuales el suelo esté siempre bien sostenido.

Con respecto a los asentamientos, íntimamente ligados con la pérdida de suelo producida durante la excavación, éstos dependen mucho de la naturaleza del terreno por excavar, en interacción con los procedimientos de excavación.

En arcillas que fluyen plásticamente las pérdidas de suelo son grandes si el ademado es deficiente. En los limos compactos las pérdidas de suelo tienden a ser pequeñas, pero si no se evita durante la excavación el corrimiento y flujo del material, los asentamientos superficiales pueden llegar a ser muy grandes.

En las gravas y arenas la predicción de los asentamientos es muy incierta, pues depende sobre todo del método de excavación; también influye la compacidad de la arena, lo seca que esté, etc. Si el material tiene cohesión aparente por capilaridad (suelos sobre el N.A.F.), los asentamientos pueden reducirse considerablemente. En los túneles bajo el N.A.F. los asentamientos tienden a ser mayores debido al flujo y pérdidas del material.

Las arcillas firmes no expansivas tienen un comportamiento muy

favorable desde el punto de vista de la pérdida de suelo y de los asentamientos. Tampoco suelen ser muy sensibles al flujo de agua. En cambio en las arcillas blandas saturadas las pérdidas de suelo que tienen lugar tienden a ser de magnitudes catastróficas, a causa de un flujo plástico poco perceptible, pero continuo hacia el centro de la galería.

En aquellos tipos de suelo con cohesión y fricción tales como arenas arcillosas, arcillas arenosas, limos plásticos, loess, arcillas calcáreas y la mayoría de los suelos residuales y las pérdidas de suelo y los asentamientos suelen ser pequeños. Por otro lado, existe el peligro de deslizamiento de material hacia la galería y de tubificación, pues estos materiales suelen ser muy sensibles a las presiones de filtración. En estos tipos de terreno el control del agua subterránea es esencial.

Según se desprende del análisis anterior, para seleccionar el método de excavación adecuado resulta necesario clasificar los tipos de suelo, definir sus propiedades y estudiar los problemas que ellos pueden causar durante el tuneleo. Afortunadamente se cuenta ya con diversos criterios de clasificación del suelo, de los cuales el más efectivo es el propuesto por Arturo Casagrande y conocido con el nombre de Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS). Otro criterio de clasificación es el propuesto por la Universidad de Illinois, basado en una clasificación hecha por Terzaghi con tres adiciones, y que, presentamos en la Tabla VI.6. El sistema es conocido como Tunnelman's.

Los nombres típicos de los suelos usados en el SUCS, pueden

## SISTEMA DE CLASIFICACION DEL SUELO "TUNNELMAN'S".

TABLA VI.6

No.	CLASIFICACION DEL TERRENO	CONDICIONES DE TRABAJO EN EL TUNEL	TIPOS DE SUELOS REPRESENTATIVOS
1	Duro *	El frente del túnel puede avanzar sin ademar las paredes	Arcillas calcáreas muy duras; arena cementada y grava.
2	Firme	El frente del túnel puede avanzar sin soporte en la bóveda, y el soporte permanente puede ser construido antes de que el terreno comience a moverse.	Loess encima del N.A.F.; varias arcillas calcáreas con baja plasticidad semejante a las margas (Cal, arcilla y arena).
3	Inestable	Los materiales gruesos o finos se comienzan a desprender por los costados de la bóveda, algunas veces después de que el terreno es excavado. En terreno estable el proceso comienza dentro de algunos minutos; por otra parte esto es referido para terreno inestable.	El terreno estable se encuentra en los suelos residuales, en arenas arcillosas o en arcillas arenosas bajo el N.A.F. Encima del N.A.F. algunos suelos pueden ser inestables o aun firmes.
4	Estable		
5	Comprimido	El terreno avanza lentamente en el túnel sin fracturamiento y sin aumento perceptible del contenido de agua en el terreno que rodea al túnel. (No puede ser observado en un túnel, pero no obstante, causa subsidencias en la superficie).	Arcillas blandas  o  Medio blandas.
6	Hinchado	En terreno semejante al comprimido, el movimiento en el túnel es lento, sin embargo es asociado con un considerable incremento	Arcillas precomprimidas pesadas con un índice de plasticidad mayor o cercano a 30; -

## SISTEMA DE CLASIFICACION DEL SUELO "TUNNELMAN'S".

TABLA VI.6

No.	CLASIFICACION DEL TERRENO	CONDICIONES DE TRABAJO EN EL TUNEL	TIPOS DE SUELOS REPRESENTATIVOS
6	Hinchado (Expansivo)	to de volumen en el terreno que rodea al túnel.	formaciones sedimentarias conteniendo capas de anhidrita.
7	Cohesivos que Fluyen	La remoción del soporte lateral en cualquier superficie nueva en un ángulo de más de 34° con la horizontal está acompañado por un desplazamiento, por lo cual los materiales -- fluyen igual que granos de azúcar hasta que la inclinación del ángulo pasa a ser igual o aproximado a 34°. Si el desplazamiento es precedido por un breve período de desmoronamiento, el terreno es llamado <u>Cohesivo</u> que <u>fluye</u> .	Cohesivos que fluyen se encuentran limpios, finos, arenas húmedas.
8	Que fluyen		Que fluye ocurren en suelos limpios cuarzo o arenas medias encima del N.A.F.
9	Muy Blandos Comprimidos. *	El terreno avanza rápidamente dentro del túnel en un flujo plástico.	Arcillas y limos con alto índice de plasticidad.
10	Suelto	En terreno suelto el movimiento es igual que un líquido viscoso. Este puede invadir el túnel no solamente por entre la bóveda y los costados sino también a través del piso. Si el flujo no es detenido continua hasta que el túnel es completamente llenado.	Cualquier terreno bajo el N.A.F. -- que tenga la mayoría de sus granos de un tamaño cercano a 0.075 mm.

## SISTEMA DE CLASIFICACION DEL SUELO "TUNNELMAN'S".

TABLA VI.6

No.	CLASIFICACION DEL TERRENO	CONDICIONES DE TRABAJO EN EL TUNEL	TIPOS DE SUELOS REPRESENTATIVOS
11	Boleos o * Guijarros.	Los problemas incurren anteponiéndose en el avance del escudo.	Algunos suelos residuales; algunos depósitos derrumbados. Unos suelos intermedios a los gujarros pueden ser las gravas, arenas, limos, arcillas o combinaciones de estos materiales.

Basada en las categorías principales del suelo de Terzaghi, con 3 adiciones.

\*:- Adiciones.

ser correlacionados con los nombres de la tabla anterior , dicha correlación se presenta en la Tabla VI.7.

#### Relación Suelo-Procedimiento de Excavación.

##### a) Excavaciones con Escudo de Frente Abierto.

Las necesidades de mantener un soporte continuo en paredes y frente del túnel para evitar plastificación y fallas, llevar el ademe provisional tan cerca como sea posible del frente de excavación para prevenir problemas de expansión y de caídos, y la de crear una situación favorable en el frente de ataque para acelerar el ciclo de excavación, son razones que influyen para que el método del escudo de frente abierto sea uno de los procedimientos más utilizados cuando se trata de atacar suelos blandos. A lo anterior hay que agregar las ventajas que por sí mismo ofrece el propio método, como son:

- 1.- La excavación del túnel puede realizarse a sección completa.
- 2.- Ofrece un soporte constante al terreno en todas direcciones.
- 3.- Facilita el trabajo de construcción.
- 4.- Evita deformaciones excesivas del terreno y reduce los asentamientos en la superficie.

Este procedimiento de excavación es recomendable para cuando se tratan de excavar arenas, gravas, limos, arcillas o cualquier otro tipo de suelo, tal que se cumpla la relación:

TABLA VI.7 (Ref. 16)

NOMBRES TÍPICOS DADOS POR EL SISTEMA UNIFICADO DE CLASIFICACION DE SUELOS (SUCS) (1)	CLASIFICACION DEL SUELO "TUNNELMAN'S" (2)										
	DURO	FIRME	INESTABLE	ESTABLE	COMPRIMIDO	EXPANSIVO	COHESIVO QUE FLUYE	QUE FLUYE	MUY BLANDO COMPRIMIDO	SUELTO	BOLEOS O GUIJARROS
GRAVA Y CUARZO											
ARENA							a				
LIMO		b							f		
ARCILLA	c	d			e	d					
GRAVA CON ARCILLA	e	d									
GRAVA CON LIMO											
ARENA CON ARCILLA	c	d									
ARENA CON LIMO											
ARENA Y GRAVA CEMENTADAS											
SUELOS ALTAMENTE ORGANICOS											

- a.- Húmedo  
 b.- Loess  
 c.- Duro o muy duro  
 d.- Duro  
 e.- Medio Blando  
 f.- Muy blando

NOTAS:- Los nombres típicos del suelo se refiere al tipo de suelo - que se observa predomina, o - según su conducta en el túnel

(1)

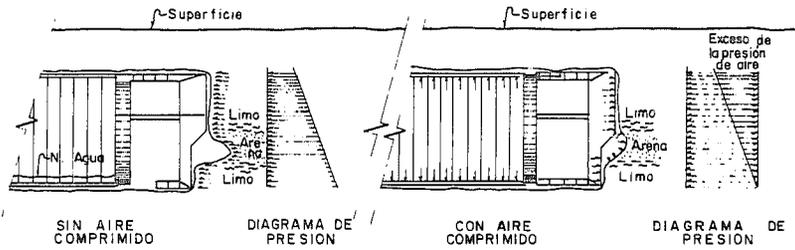
(2) El cuadro sombreado indica los tipos de suelo que usualmente causan las condiciones del terreno descritos por los términos del Tunnelman's.

$$\frac{\gamma H}{C} < 5$$

Cuando el túnel se ejecuta en suelos situados bajo el nivel freático, es frecuente combinar a la excavación con escudo el abatimiento del N.A.F., con el objeto de facilitar las operaciones del ciclo de excavación, evitar las tubificaciones y pérdidas de suelo y en general para mejorar las condiciones de estabilidad del frente.

- b) Excavaciones con Escudo de Frente Abierto y Aire Comprimido.

Cuando el suelo es muy blando, el valor de la cohesión disminuye, trayendo como consecuencias que la relación  $\frac{\gamma H}{C} < 5$  no se cumpla y por lo tanto se origine el fenómeno conocido como extrusión. Esta 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 formada con el túnel. La extrusión ocurre cuando el peso propio del terreno a nivel del centro del túnel, es mayor que 6 veces la cohesión de la arcilla, o sea cuando  $\frac{\gamma H}{C} > 6$ . En tales condiciones se requiere la aplicación de una contrapresión graduada, que evite la intrusión del material en forma incontrolada y el flujo del agua subterránea hacia el interior. Una forma práctica de aplicar tal contrapresión es mediante aire comprimido, de manera que actúe en todas las paredes y el frente de la excavación. La Figura VI.1.5. nos muestra las condiciones que prevalecen en el túnel al utilizar aire comprimido.



En la excavación sin aire comprimido, pueden — presentarse problemas de arrastre en materiales permeables bajo una carga hidrostática ó — extrusión en materiales blandos, que afectan — la estabilidad del frente

El uso de aire comprimido en los materiales del frente de ataque, evita el flujo de los mismos y mejora las condiciones de estabilidad.

**E F E T O S   D E L   A I R E   C O M P R I M I D O**

**F I G U R A   V I - 1 - 5**

(Ref. 15)

El aire comprimido se emplea sobre todo en excavaciones que se realizan bajo el N.A.F., en suelos granulares sin cohesión (gravas y arenas limpias), en suelos con cohesión y fricción (arenas arcillosas, arcillas arenosas, limos plásticos, loess, etc.), en formaciones integradas por estratos fricciónantes confinados entre estratos cohesivos impermeables, o en casos especiales donde se dificulta el drenaje de los suelos.

La presión que debe tener el aire para lograr condiciones de estabilidad en el túnel, se puede calcular con la siguiente expresión:  $P_a = \gamma H - 5C$ , y puede variar, según experiencias, de 0.6 a 1.5 kg/cm<sup>2</sup>, manteniendo la incidencia de las enfermedades por descompresión e intolerancia al aire comprimido a niveles recomendables.

A partir de presiones  $\geq 1.6$  kg/cm<sup>2</sup>, el porcentaje de enfermedades por descompresión empieza a aumentar notablemente, lo mismo sucede para la intolerancia al aire comprimido. Otro problema que origina el empleo del aire a presiones  $> 1.5$  kg/cm<sup>2</sup>, son los altos tiempos de descompresión que se requieren para no tener enfermedades. Estos aspectos constituyen una seria limitación del procedimiento desde el punto de vista médico y económico.

c) Excavaciones con Escudo de Frente Cerrado.

Este procedimiento de excavación es usado principalmente cuando la presión de aire requerida rebasa las 15 Ton/m<sup>2</sup>, ya que como se mencionó anteriormente, para presiones mayores a 1.5 kg/cm<sup>2</sup>, se requie-

rirían tiempos elevados de descompresión, además de que el porcentaje de enfermedades aumenta, según resultados de pruebas médicas.

El escudo de frente cerrado se puede usar en suelos muy blandos situados bajo el N.A.F. Preferentemente en zonas rurales, donde el efecto de los asentamientos no implica graves consecuencias.

Si al escudo de frente cerrado se le adapta algún tipo de excavador mecánico, este debe ser seleccionado de acuerdo con el tipo de terreno por excavar. En la tabla siguiente se muestra la relación entre el tipo de terreno y el tipo de máquina.

- d) Excavaciones con Escudo de Frente Cerrado y Lodo al Frente.

Este procedimiento es recomendable a utilizarse en zonas urbanas donde se requiere que los asentamientos superficiales sean relativamente pequeños. Se emplea sobre todo en aquéllos tipos de suelos donde predominan las arenas, gravas o arcillas totalmente saturadas. En suelo arcilloso se requiere de una revisión detallada del sistema a fin de no "remoldear" el suelo durante el proceso constructivo. Los boleos pueden causar serios problemas, por ejemplo: taponamiento del conducto de reza, desgaste de los dientes cortadores, ruptura de los agitadores, dificultad en el avance del escudo, etc. Es deseable que la estratigrafía del terreno sea uniforme.

Actualmente es el procedimiento que sustituye al Aire Comprimi

METODOS DE EXCAVACION	CLASIFICACION DEL SUELO										
	DURO	FIRME	INESTABLE	ESTABLE	COMPRIMIDO	EXPANSIVO	COHESIVO QUE FLUYE	QUE FLUYE	MUY BLANDO COMPRIMIDO	SUELTO	BOLEOS O GUIJARROS
DISCO ROTATORIO	X	X	X	X	X	X					X
DISCO OSCILANTE	X	X	X	X	X	X					X
CABEZA DRAGADORA		X	X	X	X	X	X	X	X	X	

TABLA VI.8. (Ref. 16)

Aplicable

No Aplicable

do cuando la presión rebasa el valor de  $1.5 \text{ Kg/cm}^2$ , o para aquéllos casos en que la presión del terreno al eje del túnel sea mayor a 6, esto es cuando:  $\frac{YH}{C} > 6$ .

El lodo a presión estabiliza el frente e impide el flujo de agua hacia el interior del túnel, reduciendo el riesgo de colapso o falla. Además, origina un ambiente de trabajo bueno y rapidez en la construcción, así como problemas de contaminación e interferencias poco importantes. Por otro lado el costo del equipo mecánico es alto y requiere de grandes espacios y fuertes inversiones si se desea tratar la rezaga.

## C A P I T U L O   V I I

### C O N C L U S I O N E S

Las conclusiones derivadas del presente trabajo son las siguientes:

a) En la Ciudad de México los métodos convencionales de excavación de túneles pueden ser aplicados en la denominada "Zona de Lomas" principalmente en estratos que presentan una gran resistencia al corte. -- Las excavaciones pueden realizarse a sección completa, media sección o mediante un túnel piloto.

b) Los métodos de excavación mecanizados (con topo o máquinas de pluma), son aplicables en la "Zona de Lomas" en aquéllos estratos formados por suelos compactos, o rocas con resistencia al corte muy baja. Preferentemente se recomiendan en áreas habitadas donde se tratan de evitar las explosiones, pues las vibraciones que producen podrían dañar las edificaciones.

c) El procedimiento de excavación con escudo de frente abierto tiene un amplio campo de aplicación en el subsuelo de la Ciudad de México, sobre todo en las arcillas de las zonas "de Transición" y "del Lago", para presiones totales  $\gamma h$  al eje del túnel con valores  $\leq 4C$  a  $5C$ .

d) El procedimiento conocido como "Proceso Pleno" o simplemente "Aire Comprimido", es aplicable en suelos formados por arcillas --

solas o con estratos arenosos pertenecientes a la "Zona del Lago", en aquellos casos en que se tiene peligro de "extrusión", esto es, para cuando  $\frac{\gamma H}{C} \geq 6$ . Las presiones de trabajo recomendables para el aire comprimido varían de 0.6 a 1.5 Kg/cm<sup>2</sup>, y deben cumplir con la relación:  $\frac{\gamma H - Pa}{C} \leq 5$

e) La construcción de túneles en el área urbana de la Ciudad de México requiere de procedimientos de excavación que lleven un estricto control de los asentamientos y pérdidas de suelo, de tal manera que el volumen teórico avanzado sea igual al volumen excavado o introducido en el frente. El procedimiento que utiliza un escudo de Frente Cerrado carece de estos sistemas de control, además de que origina sobreelevaciones superficiales del terreno, por tal motivo, resulta no aplicable en la Ciudad de México. Sin embargo, cuando se trate de atacar suelos muy blandos, como por ejemplo los localizados bajo ríos, en áreas portuarias o bajo el mar, puede resultar prometedor.

f) El procedimiento del Escudo de Frente Cerrado, complementado con un excavador mecánico y lodo estabilizador en el frente, es el método de excavación de túneles que promete proporcionar las mayores ventajas para atacar las arcillas muy blandas de la Ciudad de México, localizadas en la "Zona del Lago".

En nuestro país este método aún no se ha utilizado, pero ya se realizan estudios para su futura aplicación en la construcción del Interceptor Oriente (obra que forma parte del Drenaje Profundo del Distrito Federal).

ral). No obstante su elevado costo, este procedimiento podría suplir al del aire comprimido.

## R E F E R E N C I A S

- 1.- Mooser, F. "Informe sobre la Geología de la Cuenca del Valle de México y Zonas Colindantes". Secretaría de Recursos Hidráulicos México D.F. 1961.
- 2.- Mooser, F. "Consideraciones Geológicas acerca del Pozo Texcoco P.P-1" Informe presentado a Proyecto Texcoco, 1970.
- 3.- Memorias de las obras del Sistema de Drenaje Profundo del Distrito Federal D.D.F. Tomos 1, 3.
- 4.- Arellano, A.D.V. "La Composición de las Rocas Volcánicas en la parte Sur de la Cuenca del Valle de México". Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. Vol. 13 . 1948.
- 5.- Marsal, R.J. y Mazarí, M. "El Subsuelo de la Ciudad de México"- Universidad Nacional Autónoma de México. 2 Vols. 2a. Edición --- 1969.
- 6.- Resendiz, D., Springall, G. Rodríguez, J.M. Esquivel, R. "Información reciente sobre las características del subsuelo y la práctica de la Ingeniería de Cimentaciones en la Ciudad de México". Universidad Nacional Autónoma de México. Nov. 1970.
- 7.- Simposio sobre el subsuelo y la Ingeniería de Cimentaciones en el Area Urbana del Valle de México; Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos. Marzo de 1978.
- 8.- D.D.F. Dirección General de Obras Hidráulicas. "Interceptores profundos y el Emisor Central". México 1969.
- 9.- Peurifory, R.L. "Procedimientos de construcción".
- 10.- Memorias de TU, S.A.
- 11.- Wahlstrom, E.E., "Tunneling in Rock". Development in Geotechnical Engineering. Vol. 3 , 1973.
- 12.- Szechy, K. "The art of tunneling" Published by tankonyukiado. Budapest., 1966.
- 13.- Apuntes Centro de Educación Continua; División de Estudios Superiores, Facultad de Ingeniería, U.N.A.M. "Construcción de Túneles" 1978.

- 14.- Hisashi Takahasi and Hironabu Yamazaki "Slurry Shield Method in Japan". Proceeding ASCE-AIME Rapid Excavation and Tunneling - Conference. Junio 1976.
- 15.- Farjeat E.P. Schmitter J.J., "Aire Comprimido en Túneles" IX - Congreso Nacional de Ingeniería Civil, México 1973.
- 16.- Fenix & Scisson, Inc. Arthur D.Little, Inc. "A System Study of -- Soft Ground Tunneling" Mayo 1970.