

29  
111



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO

Facultad de Ingeniería

EXCAVACION DE TUNELES POR MEDIO DE UN  
ESCUDO MECANIZADO DE FRENTE ABIERTO

T E S I S  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
INGENIERO CIVIL  
P R E S E N T A :  
JESUS EDUARDO MEJIA NAVA

Director de Tesis: Ing. Hector Canseco Aragón

MEXICO, D. F.

1989

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

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

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

## INDICE

CAPITULO I	INTRODUCCION .....	1
CAPITULO II	DESCRIPCION DEL PROYECTO .....	4
CAPITULO III	ESTRATIGRAFIA DEL SUBSUELO .....	7
CAPITULO IV	PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO .....	10
4.1	Procedimiento normal .....	10
4.1.1	Instalaciones complementarias .....	19
4.2	Arranque en los primeros metros .....	24
4.2.1	Primera etapa .....	25
4.2.2	Segunda etapa .....	28
4.2.3	Estructura de atraque .....	29
4.2.4	Inicio de excavación .....	30
4.3	Ciclo de trabajo y resultados obtenidos ..	32
4.3.1	Resultados obtenidos .....	35
4.4	Características principales del escudo ....	36
4.5	Paso por la estación Camarones .....	40
4.5.1	Proceso de avance a través de la estación .	41
4.6	Control topográfico .....	42
4.6.1	Control topográfico con rayo laser .....	44
4.6.2	Pozos para control topográfico .....	46
4.7	Problemas de estabilidad .....	47
4.7.1	Caído en el tramo 5-7 .....	47
4.7.2	Caídos en el tramo 9-11 .....	48
4.7.2.1	Primer caído .....	49

4.7.2.2	Segundo caído .....	57
4.8	Tratamiento de consolidación por inyecciones	59
CAPITULO V	MOVIMIENTOS ASOCIADOS CON LA CONSTRUCCION DEL TUNEL .....	62
CAPITULO VI	CONCLUSIONES .....	66
ANEXO	FIGURAS Y GRAFICAS .....	69
BIBLIOGRAFIA	.....	127

## CAPITULO I INTRODUCCION

La Ciudad de México se ha caracterizado por tener en los últimos años un crecimiento muy acelerado, siendo necesario realizar obras de gran magnitud para su mejor funcionamiento.

Dos de los más grandes proyectos que se han llevado a efecto son:

- a) El sistema de drenaje profundo.
- b) El sistema de transporte colectivo "metro".

Para la solución de estas dos magnas obras se han utilizado diferentes procedimientos constructivos de "tuneleo". En el caso del sistema de drenaje profundo se han puesto en práctica los siguientes procedimientos:

- a) Procedimientos convencionales de excavación en suelos compactos empleando concreto lanzado como revestimiento primario. Ocasionalmente se emplearon máquinas rozadoras para el ataque del frente.
- b) Túneles convencionales con explosivos.
- c) Escudos de frente abierto manuales.
- d) Escudos de frente abierto con brazos cortadores oscilantes, cuyo movimiento es proporcionado por gatos hidráulicos que se extienden y se retraen.
- e) Escudos de frente presurizado con lodos.
- f) Escudos de frente abierto en combinación con aire comprimido.

En el caso del sistema de transporte colectivo "metro", en donde

se han usado procedimientos constructivos para el sistema elevado y excavaciones a cielo abierto entre muros colados en sitio, se vio también la necesidad de construir túneles, siendo la primera ocasión en la zona de Tacubaya durante la primera etapa (1968, línea 1), haciendo uso de un escudo de frente abierto con excavación manual y colocando dovelas de concreto precolado como revestimiento primario y definitivo (fig. 1.1).

Años más tarde (1981), en la segunda etapa y durante la construcción de las líneas 7 y 3 del metro se encontraron diferentes formaciones compactas de suelo, por lo que además del procedimiento anterior también hubo necesidad de utilizar explosivos (zona comprendida entre la estación Miguel Angel de Quevedo y la estación Ciudad Universitaria) y máquinas rozadoras (fig. 1.1).

La experiencia adquirida durante el desarrollo de estos proyectos fué muy vasta, observándose que la excavación de túneles con escudo reducen varios problemas inherentes a sistemas convencionales de excavación y se implementan otros factores de gran conveniencia para la construcción, tales como rapidéz, eficacia y seguridad.

Con todo lo anterior y existiendo la necesidad de ampliar la línea 7 hacia el norte (1985), se vió la conveniencia de emplear un procedimiento especial, haciendo uso por primera vez en México de un escudo de frente abierto totalmente mecanizado.

Ya que en México no existía un escudo de estas características se nombró una comisión técnica integrada en su totalidad por

ingenieros mexicanos, quienes determinaron adquirir un escudo de fabricación nacional, en el cual se combinara el empleo de la más moderna tecnología conocida a nivel mundial.

En el presente trabajo se describe el proyecto del túnel de la línea 7 norte-norte, que fué excavado con un escudo de frente abieto totalmente mecanizado de 9.513 m. de diámetro, entre las lumbreras 5 y 11, cuya longitud es de 2.182 m., aproximadamente.

Como parte importante se describe el propio escudo, así como las experiencias obtenidas desde su concepción, fabricación y montaje del mismo, hasta la utilización de éste en la excavación del tramo mencionado.

## CAPITULO II

### DESCRIPCION DEL PROYECTO

Dentro del marco del plan maestro del metro de la Ciudad de México, la línea 7 se ubica al poniente de la ciudad, atravesando en dirección norte-sur desde la estación Tacuba hasta la estación Barranca del Muerto. Esta línea se ha ampliado hacia el norte hasta conectarse con la línea 6 en la estación terminal El Rosario, denominándose a este tramo línea 7 norte-norte (fig.1.1).

La línea 7 norte-norte fué proyectada mediante un túnel semiprofundo y consta de 4 estaciones que son Refinería, Camarones, Aquiles Serdán y El Rosario.

El túnel excavado con el escudo de frente abierto totalmente mecanizado de 9.513 m. de diámetro, se dividió en dos tramos, los cuales se encuentran comprendidos entre las estaciones Aquiles Serdán y Refinería; el primer tramo se localiza bajo las avenidas Aquiles Serdán y Ferrocarriles Nacionales, uniendo las lumbreras 5 y 7 (Aquiles Serdán-Camarones), con una longitud de 1,316 m., y a profundidades a la clave que varían entre los 18.0 y 22.6 m., correspondiendo la profundidad menor a la salida de la lumbrera 5. Las pendientes de proyecto también varían entre 0.4% y 0.75% (fig.2.1).

El segundo tramo se localiza totalmente bajo la avenida Ferrocarriles Nacionales, uniendo las lumbreras 9 y 11

(Camarones-Refinería), con una longitud de 866 m. y a profundidades a la clave que varían de 21.7 a 19.5 m. En este tramo la pendiente de proyecto fué de 0.29% (fig. 2.1).

Considerando las restricciones derivadas del programa de construcción de la línea, fué necesario construir el túnel principal de la estación Camarones mediante el método austriaco, con una sección libre mayor al diámetro exterior del escudo, con objeto de permitir el paso del escudo a través de la estación, evitando de esta forma las complicadas maniobras de desarmado y armado nuevamente del escudo, logrando con esto abatir tiempos y costos del programa de obra.

Como parte importante del tramo fueron proyectadas las lumbreras 5, 7, 9 y 11, ubicadas sobre el eje del trazo, para satisfacer las necesidades requeridas por el procedimiento constructivo en cuanto a suministro y extracción de materiales y equipo, así como introducir y extraer el propio escudo sin tener restricciones de espacio, facilitando de esta manera las operaciones de armado y desarmado del escudo al inicio y término de la excavación del túnel.

El diámetro libre de dichas lumbreras después de considerar el revestimiento definitivo, fué de 13.0 m.

Adicionalmente, el proyecto de estos túneles está complementado con un sistema de ventilación, para el cual fué necesario ubicar dos lumbreras aproximadamente a la mitad de la longitud de cada tramo, resultando las lumbreras 6 y 10 con un diámetro interior de 10.0 m. y conectadas al túnel principal mediante túneles

cortos en los que se aloja el equipo de ventilación (fig. 2.2).

### CAPITULO III ESTRATIGRAFIA DEL SUBSUELO

Para conocer las propiedades y condiciones estratigráficas del subsuelo en la zona por la que el túnel atraviesa, se determinó realizar un estudio inicial de mecánica de suelos apoyado en sondeos de exploración con recuperación de muestras y pruebas de penetración estándar, como eléctrico, así como pozos a cielo abierto.

Para el tramo comprendido entre las lumbreras 5 y 7 se realizaron 5 sondeos de penetración estándar, 4 de cono eléctrico y 5 sondeos con recuperación de muestras inalteradas.

Para el tramo comprendido entre las lumbreras 9 y 11 se realizaron 2 sondeos de penetración estándar, 2 de cono eléctrico, un pozo a cielo abierto y 2 sondeos con recuperación de muestras inalteradas.

Adicionalmente a la información de los sondeos antes mencionados, es importante mencionar que se realizaron estudios similares entre las lumbreras 3 y 5, las lumbreras 7 y 9 y las lumbreras 9 y 11. De esta manera se pudo elaborar un perfil estratigráfico general cuya información se complementó aún más durante la excavación de las lumbreras ubicadas a lo largo del trazo.

El perfil estratigráfico resultante para cada uno de los tramos se encuentra resumido en las figuras 3.1 y 3.2 .

Posteriormente, durante la etapa de excavación del túnel entre las lumbreras 9 y 11, al presentarse continuos problemas de estabilidad en el frente de ataque por la presencia de estratos arenosos, se decidió realizar un estudio muy completo del tramo faltante de excavar, con objeto de determinar exactamente las propiedades y condiciones del subsuelo y de esta forma definir la manera de mejorar las condiciones de los estratos origen del problema.

El perfil estratigráfico de los nuevos sondeos, 18 en total, se encuentra resumido en la figura 3.3 .

De acuerdo a los datos obtenidos con los estudios anteriores, el túnel quedó en la denominada zona de transición, según la terminología usada por Marsal y Mazari, formada por materiales limo-arenosos y areno-limosos de consistencia medianamente compacta a compacta; su eje se ubica entre 22.5 y 27.0 m., de profundidad.

En términos generales, la estratigrafía del subsuelo donde se construyó el túnel se describe en la tabla de la fig. 3.4 , que corresponde al perfil simplificado presentado en la fig. 3.5.

El nivel freático se encuentra entre 2.6 y 4.4 m. de profundidad, pero debido a que el estrato 2 actúa como barrera impermeable, los materiales por abajo de 12.0 m. no presentan escurrimientos de agua.

Los estratos 5 y 7 se han clasificado geológicamente como tobas. El estrato 6, situado en la vecindad de la clave del escudo, presentó problemas de estabilidad en algunos

cadenamientos, como en el 6+558, debido a que aunque generalmente está compacto, en ciertas zonas pierde su cohesión al ser arenoso con poco ó nada de limo. Es importante mencionar que los estratos 5, 6 y 7 son producto de la redepositación de tobas de origen volcánico, a través de los cuales se presentan suelos granulares producto de acarreo, que se asocian a viejos cauces de arroyos ahora enterrados. Esta situación explica la variación de las propiedades mecánicas del subsuelo así como la aparición de bolsas de arena y grandes boleos encontrados durante la etapa de excavación.

En la figura 3.6 se presenta el perfil estratigráfico del sondeo SM-1, ubicado en el cadenamiento 6+550, el cual nos permite apreciar claramente las diversas propiedades del subsuelo.

## CAPITULO IV

### PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO

Como ya se mencionó en capítulos anteriores, en la excavación del túnel comprendido en el tramo Camarones-Refinería de la línea 7 norte-norte del metro, se usó un escudo de frente abierto totalmente mecanizado.

Este escudo fue diseñado para atacar las formaciones tobáceas compactas de la zona de transición del Valle de México (limo-arenosas principalmente). También fue diseñado junto con un tren de equipo de apoyo de 125 m. de largo, el cual es arrastrado por el propio escudo, de manera que el ciclo de trabajo se ejecute con la mayor eficiencia, una vez que todo el equipo se ha instalado en el interior del túnel.

Tomando en consideración las restricciones impuestas por los programas de obra, así como las derivadas del ataque simultáneo de los frentes adyacentes a la construcción de los túneles (estaciones Aquiles Serdán, Camarones y Refinería), además de las características del equipo y que el ataque del túnel debió realizarse a través de lumbreras, resultaron 2 variantes al proceso constructivo, las cuales son:

- 1) Procedimiento normal.
- 2) Arranque en los primeros metros.

#### 4.1 Procedimiento normal

Las actividades ejecutadas en el ciclo general de construcción del túnel son:

- a) Excavación del frente.
- b) Retiro del frente del material excavado.
- c) Soporte del frente.
- d) Colocación del revestimiento.
- e) Avance del escudo.
- f) Inyección del relleno.
- g) Suministro y extracción de materiales y equipo.

Para la adecuada realización de dichas actividades, el escudo en sí fue diseñado como un conjunto compuesto de los siguientes sistemas:

- a) Cuerpo del escudo.
- b) Sistema de soporte frontal.
- c) Sistema excavador.
- d) Sistema de extracción del material excavado ó rezaga.
- e) Sistema de colocación del revestimiento.
- f) Sistema de empuje.
- g) Sistema de respaldo para actividades varias.

A continuación se describe el procedimiento constructivo, combinando la explicación con los diversos elementos que constituyen el escudo así como las instalaciones propias del túnel, con objeto de lograr una explicación clara y objetiva: Para el proceso normal de excavación del túnel se utilizó el escudo de 9.51 m. de diámetro exterior y 7.60 m. de longitud en su parte superior, el cual tiene en la parte frontal la visera ó cachucha inclinada en un corte de 1.20 m., acorde con el ancho

del revestimiento (constituido por 8 dovelas de concreto precolado de 1.20 m. de ancho y 0.30 m. de espesor).

La parte central o cuerpo del escudo tiene una longitud de 2.80 m. y la parte posterior o faldón, una longitud de 2.40 m. Está equipado con 31 gatos (hidráulicos) de empuje de 1.35 m. de carrera, alojados perimetralmente en la parte posterior del cuerpo del escudo, los cuales proporcionan una fuerza de empuje de 5,487 ton.a una presión de 350 kg/cm<sup>2</sup> (fig.4.1).

El cuerpo del escudo está reforzado con un conjunto de columnas y traveses metálicas en cuya disposición se diseñó un marco rígido en la parte central, en donde está alojado el equipo excavador.

El ataque del frente se realiza por medio de dos cabezas rozadoras Alpine modelo AM-50, las cuales se encuentran montadas sobre una estructura que permite el giro del conjunto excavador en ambos sentidos, movido por 3 motores eléctricos acoplados a una transmisión (fig. 4.1). Ambas cabezas abren y cierran accionadas por gatos hidráulicos para el ataque de toda el área, cortando en forma concéntrica el frente de excavación, es decir, una ataca la parte más alejada del centro del túnel hasta una abertura máxima, que permite una sobreexcavación perimetral de 10 cm. fuera de la funda circular que conforma el escudo, en tanto la otra ataca la parte central de la zona por excavar.

Adicionalmente, el mecanismo excavador puede desplazarse 1.00 m. en sentido longitudinal, mediante 3 gatos hidráulicos, permitiendo la excavación del espacio requerido para realizar el empuje del escudo, ejecutado éste mediante los 31 gatos

hidráulicos ubicados en la periferia del cuerpo del escudo, los cuales al ser seleccionados y accionados por el operador del escudo en la consola de control, se apoyan en el revestimiento colocado anteriormente, permitiendo el avance del escudo y ajustando la dirección de ataque del mismo según las necesidades de trazo y nivel requeridas (fig. 4.1).

Esta actividad puede efectuarse en forma simultánea a la excavación, no siendo así durante la colocación de las dovelas. Al término del empuje se cuenta con el espacio necesario para la colocación de un nuevo anillo de dovelas que conforman el revestimiento primario y definitivo del túnel, concluyéndose un ciclo de trabajo.

El sistema excavador ha demostrado ser muy eficiente en el corte de los suelos compactos atravesados, permitiendo reducir los ciclos de trabajo.

El material producto de la excavación, es movido en forma simultánea del frente del escudo hacia la parte posterior del mismo mediante un transportador primario de banda de hule, de 17.00 m. de longitud y 0.67 m. de ancho (fig. 4.2).

Para la alimentación de esta banda se cuenta con una pequeña retroexcavadora que acerca el material excavado y finalmente 2 brazos recolectores del tipo de brazos de cangrejo, se encargan de impulsarlo dentro de la tolva de recepción de la banda, localizada en la parte baja y central del frente del escudo (fig. 4.3).

Este transportador primario, inclinado aproximadamente 28 grados con respecto a la horizontal, descarga a su vez a un transportador secundario, también de banda de hule, totalmente horizontal, de 40 m. de longitud y 0.91 m. de ancho, el cual esta montado a lo largo de las primeras 5 plataformas del tren de equipo y deposita el material excavado en dos pequeñas tolvas de regulación, que a su vez permiten la carga controlada de las vagonetas de 5 m<sup>3</sup>. de capacidad montadas sobre vía, empleadas como medio de transporte de dicha rezaga hasta la zona de lumbrera. Para el movimiento de las vagonetas se emplearon locomotoras con motor a diesel (fig. 4.4).

La colocación del revestimiento se realiza simultáneamente con la excavación y extracción de la rezaga, mediante un anillo erector del tipo engrane con dientes interiores, accionado por dos motores hidráulicos y apoyado en un conjunto de 6 rodillos fijos al cuerpo del escudo. Este engrane tiene montado el mecanismo posicionador de dovelas (fig. 4.5), el cual esta diseñado de tal forma que 5 gatos hidráulicos integrados en su estructura, le permiten tener movimiento longitudinal y transversal al eje del túnel, así como para "pescar" la dovela en turno y para evitar el valvén de la misma durante el traslado al punto de colocación (fig. 4.6). En resumen, el mecanismo de izaje permite tomar la dovela desde la parte baja del faldón del escudo (el cual se encuentra libre después de haber realizado el empuje y la retracción de los gatos) y llevarla hasta su sitio de colocación con bastante seguridad, terminando su ciclo hasta la fijación de ésta mediante tornillería, a las dovelas del anillo anterior así

como a las dovelas del anillo en proceso (fig. 4.7).

La tornillería de unión por cada anillo de dovelas se compone de 47 piezas de 1 3/8" de diámetro y 5" de largo, de acero grado 5.

El revestimiento del túnel esta constituido por una serie de anillos los cuales están integrados cada uno por cinco dovelas tipo "B", dos dovelas tipo "C" y una dovela menor que funciona como cuña de tipo "A", según se muestra en la fig. 4.8.

#### CARACTERISTICAS DE LAS DOVELAS

TIPO	DIMENSIONES	PESO APROXIMADO
"A"	0.868 M. X 0.30 M. X 1.20 M.	800 KG.
"B"	4.00 M. X 0.30 M. X 1.20 M.	3,200 KG.
"C"	4.07 M. X 0.30 M. X 1.20 M.	3,200 KG.

Estas dimensiones son en la parte exterior de cada una de las dovelas y fueron fabricadas con concreto f'c = 350 kg/cm<sup>2</sup>. El orden de la colocación de las dovelas sigue una secuencia ascendente, es decir: se instalan en primer lugar las dovelas tipo "B" empezando por las inferiores que forman la cubeta, posteriormente se colocan las tipo "C" (una de cada lado) y en medio de estas como cuña, la tipo "A". Todo esto se realizó a través del anillo erector como ya se mencionó, contando además con la protección que brinda el faldón del escudo, cuya longitud permite alojar un anillo completo la mitad del anillo anterior. Esto da como resultado una seguridad total a los trabajos a realizarse dentro del túnel.

El suministro de dovelas al pie del anillo erector se hace con

dos polipastos eléctricos de 4 ton. de capacidad de levante, los cuales se desplazan longitudinalmente sobre dos viguetas carril y toman las dovelas de la primera plataforma del tren de equipo (fig. 4.9).

El escudo cuenta con un sistema de ademe frontal constituido por 6 compuertas abatibles colocadas en la media sección superior del frente del escudo (fig. 4.10). Este sistema fué instalado para usarse únicamente en el caso de encontrarse problemas menores de estabilidad en el frente, considerando la estratigrafía del subsuelo, obtenida previamente a la excavación del túnel.

El tren de equipo consta de un conjunto de 10 plataformas dotadas de un sistema de doble vía paralela y una rampa, que ruedan sobre una vía central que se va colocando inmediatamente atrás del escudo (fig. 4.9).

El arrastre del tren de equipo se logra mediante dos viguetas "I" unidas al escudo y se realiza cuando este avanza.

El suministro de los materiales para la vía se hace en la misma forma que el manejo de dovelas, utilizando los polipastos eléctricos, los cuales como ya se mencionó, corren longitudinalmente a lo largo de las 2 viguetas de arrastre.

Las primeras 5 plataformas cuentan con una estructura superior en forma de pórtico que soporta el transportador secundario, siendo la primera una plataforma para maniobras y almacenamiento momentáneo de las dovelas que conforman el revestimiento, así como los materiales para la vía central (entre esta plataforma y

el escudo hay una longitud de 12.00 m.). Las 2 viguetas de arrastre del equipo están prolongadas a lo largo de esta plataforma.

En la parte superior de la segunda y tercera plataforma, además del transportador secundario, se encuentran ubicados todo el equipo hidráulico requerido para los diversos sistemas del escudo y el equipo eléctrico para control incluyendo la subestación, respectivamente.

La cuarta plataforma quedó libre para usarse en instalaciones varias.

En la quinta plataforma se encuentra montado el resto del transportador secundario y las tolvas de regulación (fig. 4.9).

Para rellenar el espacio anular que se forma entre el revestimiento y el terreno natural, al salir las dovelas del faldón del escudo (fig. 4.11), se aplica una inyección de contacto en dos fases, compuestas primordialmente de agua, bentonita, cemento y arena fina, con los proporcionamientos siguientes:

		1a. FASE	2a. FASE
Agua	M3.	0.20	0.198
Cemento	Kgs.	100.00	250.00
Bentonita	Kgs.	10.00	4.5
Arena	M3.	0.270	0.067
Acelerante de fraguado	Kgs.	2.6	0.0

#### Primera fase

Su ejecución se llevó a cabo una vez que el anillo por inyectar

se encontró fuera del faldón, es decir, el que se encuentra en tercera posición con respecto al escudo (fig. 4.12) y se realizó en todos los anillos.

#### Segunda fase

Para realizar la inyección de la segunda fase, el anillo por inyectar debió contar con la inyección de la primera fase y tener entre este anillo y el escudo una distancia igual a cuatro anillos, es decir el anillo que se encuentra en la quinta posición. Cabe mencionar que esta fase únicamente se llevó a cabo en los anillos pares (fig. 4.13).

Las inyecciones se efectuaron a través de los insertos (orificios) con que cuentan las dovelas y que también sirvieron para su manejo (fig. 4.8).

Para garantizar la eficacia de la inyección el escudo cuenta con dos sellos perimetrales en la parte posterior del faldón que impiden cualquier fuga posible y permiten ejecutar la inyección inmediatamente que el anillo de dovelas colocado empieza a salir del faldón. El primero de estos sellos es de neopreno y el segundo es una especie de cepillo de alambre tipo piano (fig. 4.14).

El suministro de las mezclas de inyección, se realizó transportando desde la lumbrera hacia el frente, recipientes de 4.0 m<sup>3</sup>. de capacidad, con su equipo de bombeo instalado en carros montados sobre vía.

Las 5 plataformas restantes fueron diseñadas con el objeto de dar

espacio para alojar en una vía una corrida completa, compuesta por una locomotora, 6 vagonetas y 3 carros para transporte de dovelas, sin entorpecer el paso de una segunda corrida por la otra vía, garantizando de esta manera la continuidad en el ciclo de producción del túnel (fig. 4.4).

#### 4.1.1 Instalaciones Complementarias

Es evidente que el éxito del procedimiento constructivo depende no solamente del escudo y del tren de equipo, requiriéndose el estudio y planeación de una serie de instalaciones complementarias en el interior del túnel y en la lumbrera de acceso, que permitan el movimiento expedito en el suministro y extracción de materiales, así como los elementos necesarios para el control, la operación y el funcionamiento de otros equipos y condiciones ambientales adecuadas para el buen desempeño del personal laborando en el túnel.

Dentro de estas instalaciones podemos mencionar las siguientes:

- 1) Cambio California.
- 2) Cambios fijos o laderos.
- 3) Tubería para suministro de agua al frente.
- 4) Tubería para suministro de aire comprimido.
- 5) Tubería para bombeo del agua producto de filtraciones.
- 6) Tuberías para ventilación del frente de trabajo.
- 7) Red telefónica para intercomunicación.
- 8) Líneas eléctricas de fuerza.
- 9) Líneas eléctricas para iluminación.
- 10) Sistema de manteo.

## 1. Cambio California

Es una estructura consistente de varias plataformas metálicas moduladas de acuerdo a las necesidades del túnel en particular. Sirve para hacer la transferencia de las corridas a una distancia muy cercana al frente, reduciendo el recorrido de las locomotoras al cambiar las corridas vacías por llenas.

Esta estructura funciona en forma similar a las plataformas del tren de equipo; dotada de un sistema de doble vía con dos cambios y dos rampas (una de acceso y otra de salida), se monta y se desliza sobre la vía central del túnel mediante un conjunto de ruedas metálicas con doble ceja. Siendo una estructura ligera puede moverse fácilmente jalándola con una locomotora cuando la distancia al frente ha aumentado y requiere calzarse en el lugar en que se coloca para evitar el pandeo de sus vigas.

El cambio California usado en la excavación del túnel que nos ocupa estaba constituido de seis plataformas de 9 m. de largo y dos rampas de 6 m. de largo, resultando una pieza clave para la optimización de tiempos y movimientos en el ciclo de trabajo.

La instalación de esta estructura fué ejecutada al término de la instalación de las plataformas del tren de equipo, sin causar demoras adicionales a los paros programados.

## 2. Cambios fijos o laderos

Son sistemas de varias vías que se instalan principalmente en las inmediaciones de la lumbrera de arranque del túnel, para facilitar las labores de manto, suministro de dovelas, equipo y materiales varios que se emplean en el túnel. Para este túnel en

particular, dichos cambios se hicieron con una longitud variable entre 90 y 120 m. dependiendo de la disponibilidad de áreas que se tuvo para cada lumbrera.

Estos cambios también se instalan en el interior del túnel, cuando la longitud del túnel excavado ya es bastante grande y no se cuenta con cambios California adicionales. De esta manera se reducen los movimientos de las corridas en el ciclo y se optimizan las maniobras.

En el tramo del túnel comprendido entre las lumbreras 5 y 7 (1,316 m. de longitud) solamente se instaló un cambio fijo de 90 m. de longitud.

Generalmente la instalación de estos cambios representan algunas demoras, porque en túneles circulares debe colocarse un relleno y modificar totalmente la vía existente. Su instalación requiere de un paro programado.

### 3. Tubería para suministro de agua

Una tubería de fierro galvanizado de 2" de diametro fué suficiente para proveer del agua necesaria para limpieza de los equipos. Dicha tubería se instaló dentro de unas ménsulas colocadas en la pared del túnel, por tramos de 6.4 m. de longitud a medida que el frente de excavación progresaba.

4 y 5. Tuberías para suministro de aire comprimido y para bombeo. De fierro negro cédula 40 y de 6" de diámetro, se colocaron en forma similar a la anterior.

Para el bombeo se requirió instalar cárcamos metálicos con bombas

para traspaleo, según la presencia de aportaciones.

#### 6. Tubería para ventilación del frente de trabajo.

Considerando que el grueso de las actividades se realizan en el frente de excavación del túnel se optó por suministrar aire fresco a dicha zona.

Analizando el volumen de aire requerido por el personal laborando, así como por el equipo de combustión interna (locomotoras a diesel) se determinó la instalación de dos líneas de 36" de diámetro para suministro, con ventiladores a cada 250 m. de distancia, suministrando 563 m<sup>3</sup>/min. Estas líneas se colgaron en la parte superior del túnel.

#### 7. Red telefónica para intercomunicación.

De suma importancia para el control de movimientos, esta red contaba con teléfonos ubicados en los puntos clave como son:

- a) Frente del túnel (escudo)
- b) Cambio California
- c) Fondo de la lumbrera
- d) Caseta del malacate de manteo
- e) Oficinas de superintendencia
- f) Caseta de inyección en superficie.

#### 8 y 9. Líneas eléctricas de fuerza e iluminación.

Para el suministro de energía al escudo se empleó una línea trifásica de 13,200 volts empalmada mediante interruptores tripolares especiales a cada 250 m. La conexión del pórtico eléctrico al último interruptor se realizó con un cable superflexible (también de fabricación especial), con objeto de

evitar inducción en las líneas y algún posible accidente.

Para el suministro de energía al sistema de ventilación y equipos adicionales al escudo, se empleó una alimentación trifásica a 440 v. con algún transformador para evitar la caída de voltaje.

Para el alumbrado se empleó exclusivamente una alimentación trifásica a 220 v. con lámparas de 2 x 74 w. a cada 9 m.

#### 10. Sistema de manteo.

Dentro de la planeación de la obra y del ciclo de trabajo en especial se seleccionó al sistema de manteo más adecuado para lograr los rendimientos máximos, eliminando por completo la posibilidad de que el sistema de manteo constituyera un cuello de botella. Por esta razón se empleó un sistema de doble skip de 5 m<sup>3</sup>. de capacidad cada uno, izados por un malacate de doble tambor a través de una torre metálica de 27 m. de alto con capacidad de descarga directa a dos tolvas de almacenamiento de 45 m<sup>3</sup>. cada una, las cuales a su vez permitían la carga controlada a los camiones encargados de transportar la rezaga a los tiraderos.

Analizando tiempos y movimientos se observó que este sistema tenía una capacidad mínima para extracción de rezaga de 200 m<sup>3</sup>/hr., prácticamente superior en un 100% al volumen que se podría desalojar si se excavaran 20 m/día.

Para la descarga rápida de la rezaga a los skips contenidos en las alcancias, se determinó el usar vagonetas de descarga lateral y dos gatos con una unidad hidráulica para volteo de las mismas.

En el proyecto de las alcancias se consideró la construcción de

des tolvas receptoras y de almacenamiento con una compuerta en cada tolva, logrando la descarga de las vagonetas sin necesidad de tener el skip dentro de la alcancía (cuando un skip está llenándose, el otro esta vaciando en la parte alta de la torre).

La torre de manteo contaba con un sistema de guías a base de cables de acero, que conectaban hasta el fondo de las alcancias para conducir los skips en forma segura. También contaba con un sistema de guías metálicas curvas en la parte superior, en las que al entrar el skip se abría automáticamente y descargaba en las tolvas de superficie.

#### 4.2 Arranque en los primeros metros

En esta primera etapa se construyó la longitud de túnel necesario para alojar el escudo con todo su tren de equipo en el interior del túnel. Obviamente el proceso constructivo resultó diferente del proceso normal, porque al no contar con el tren de equipo hubo necesidad de modificar el sistema de extracción de rezaga, así como la carga del mismo y el movimiento de las corridas en general; no se contó con el transportador secundario, ni con las tolvas de regulación, ni con el sistema de doble vía para hacer más expedito el suministro y extracción de materiales del frente de ataque a la lumbrera (fig. 4.15).

Adicionalmente, para el arranque de la excavación se requirió el ensamble del escudo en el fondo de la lumbrera, su emportalamiento con una estructura de reacción y las instalaciones mínimas permitidas por la falta de espacio. A este respecto conviene hacer mención sobre la existencia de un tramo

de túnel de 40 m. de longitud hacia la estación Aquiles Serdán, el cual permitió alojar parte del tren de equipo del escudo y dio algunas facilidades en las maniobras (fig. 4.16).

El montaje del escudo y tren de equipo se realizó en dos etapas:

#### 4.2.1 Primera Etapa. Ensamble del escudo y pórticos hidráulico y eléctrico.

Para el descenso y armado del escudo en el fondo de la lumbrera, fué necesario planear las dimensiones de la misma; con objeto de poder ejecutar las maniobras para introducir cada una de las piezas del escudo en forma segura, así como para construir ó ubicar todas las instalaciones requeridas durante la etapa de construcción del túnel.

##### \* Lumbrera

Esta estructura de sección circular, se construyó con un diámetro interior libre de 13.00 m. y hasta una profundidad aproximada de 28.30 m., a partir de la cual se desplató la losa de fondo, de 0.60 m. de espesor de concreto reforzado y la cubeta para recibir el escudo.

La cubeta consiste en una estructura circular de concreto reforzado, con radio igual al del escudo, en la que se ahogan algunos rieles sobre los que descansa y se desliza el escudo al moverse en cada empuje para penetrar en el túnel.

Los 13.00 m. de diámetro, permitieron que con una holgura mínima, el escudo pudiera ser armado totalmente en el fondo de la lumbrera. Adicionalmente la lumbrera se profundizó

parcialmente para la construcción de la alcancia, la cual permite la operación del sistema de manto o extracción del material producto de la excavación (rezaga), mediante el uso de skips ó botes rezagadores y una torre de manto (fig. 4.17).

\* Armado del Escudo y Pórticos.

Previo al armado del escudo se analizó la conveniencia de alojar en el interior del túnel de transición existente dos plataformas rodantes, conteniendo los sistemas hidráulico y eléctrico, evitando de esta manera el prolongar continuamente las líneas de los sistemas mencionados a lo largo de los primeros 180 metros de túnel.

Debido a la diferencia de niveles del túnel de transición con la cubeta de la lumbrera, fué necesario armar una estructura metálica falsa sobre la cubeta, para apoyar las plataformas durante la maniobra de descenso e introducir las al túnel de transición antes de bajar la primera pieza del escudo (fig. 4.16).

Concluido el armado de dicha estructura, se procedió a bajar la primera plataforma para así soldar en sus cuatro esquinas vigas de sección IPR de longitudes cortas, con el objeto de que estas sirvieran de apoyo al pórtico del sistema eléctrico (fig. 4.18).

Una vez que se terminó de ensamblar el sistema eléctrico sobre su plataforma, se procedió a deslizar ésta al túnel de

transición antes mencionado, para dar cabida en la estructura falsa a la plataforma siguiente, a la que se le hicieron las mismas preparaciones que a la anterior para recibir el sistema hidráulico, siguiéndose el mismo proceso. Después que quedaron instaladas las dos plataformas con los respectivos sistemas, se realizó el retiro de la estructura falsa del fondo de la lumbrera dejando la zona en condiciones de recibir la estructura (por secciones) del escudo e iniciar su ensamble.

La primera sección que se colocó sobre la cubeta fue la S-6, a la que se le soldaron en su parte inferior vigas IPR con el fin de que ésta quedara fija y no se tuvieran problemas al ensamblar las siguientes secciones.

El ensamble de las 11 secciones, se realizó de manera ascendente en ambos lados, con la ayuda de una draga (LS-338 de 90.7 ton. de capacidad) desde la superficie.

En cuanto se tuvieron ensambladas las secciones S-6, S-7 y S-5 con su delantal, se instaló el transportador primario con dos de sus cuatro secciones y los brazos recolectores (fig. 4.19).

Al concluirse el ensamble de las secciones S-4, S-5, S-6, S-7 y S-8, se procedió a descender el marco central, formado por dos vigas y dos columnas, en donde quedó alojado el cabezal del sistema excavador (mencionado en capítulos anteriores), posteriormente se llevó a cabo la colocación de las secciones faltantes hasta formar el cilindro del escudo, realizándose simultáneamente todas las instalaciones hidráulicas y

eléctricas en el escudo y en los pórticos.

El anillo erector se terminó de instalar al último, cuando se concluyeron los trabajos anteriormente descritos; este anillo necesitaba que el faldón se armara para poderlo acoplar al cuerpo del escudo. Con esto quedó cubierto el ensamble del escudo y el tren de equipo en su primera etapa.

#### 4.2.2 Segunda Etapa. Ensamble de tren de equipo con el escudo.

Concluidos los primeros 180 m. de túnel, se interrumpieron las actividades en el frente para poder realizar el ensamble de todo el tren de equipo de respaldo con el escudo, taniéndose la siguiente secuencia de actividades:

Lo primero que se realizó en esta etapa fué desconectar todo el equipo que alimentaba al escudo, para así poder bajar los pórticos que complementarían el total del tren de equipo. Estos pórticos fueron movidos hasta el frente mediante una de las locomotoras que se habían usado para arrastrar los primeros pórticos conforme el escudo avanzaba en la excavación del túnel.

Una vez que se tuvieron estos pórticos en el frente de excavación se iniciaron las interconexiones hidráulicas y eléctricas entre los mismos y el escudo.

El acoplamiento quedó concluido con el montaje de las vigas monorriel que unen el primer pórtico con el escudo. Esta actividad se dejó al final debido a que existía una diferencia de niveles entre el pórtico y el escudo, quedando solucionado

este problema cuando se decidió bajar las vigas una altura de 0.20 m. en el pórtico No. 1.

#### 4.2.3 Estructura de Atraque

Para poder garantizar el buen arranque de la excavación del tunel hubo necesidad de diseñar una estructura de atraque a través de la cual el escudo pudiera apoyarse y lograr la reacción necesaria para irse encajando en el terreno en su etapa inicial.

La estructura de atraque consta de un semianillo de concreto hidráulico colado sobre la cubeta, en la pared opuesta de la lumbrera (del lado del túnel existente). Este semianillo permite tener una superficie plana contra la que se apoya al resto del sistema de atraque, que generalmente se constituye con el revestimiento formado por dovelas y que es colocado con el anillo erector del escudo, como si se tratara de un proceso normal (fig. 4.20).

Adicionalmente, siguiendo el contorno del túnel se colaron unos dados de concreto con placas de acero embebidas, los cuales permitieron la colocación de troqueles metálicos tubulares coincidentes con la posición de los gatos de empuje del escudo en la parte superior. De esta manera, durante el proceso inicial de hincado del escudo se pudieron emplear gatos de cualquier zona, que facilitaron la guía del escudo de acuerdo al proyecto de trazo y nivel (fig. 4.21).

El sistema de atraque normalmente no se constituye de anillos completos, los cuales impiden la extracción del material producto

de excavación por la lumbrera. En la mayor parte de los casos resulta conveniente el combinar segmentos o dovelas metálicas que se puedan poner y quitar fácilmente en la parte superior de los semianillos, cumpliendo con los requisitos necesarios para el empuje correcto del escudo, así como para la extracción y suministro de materiales a través de dicha estructura (fig. 4.21).

#### 4.2.4 Inicio de la Excavación

Concluido el ensamble e instalaciones del escudo y tren de equipo (en el túnel de transición), se procedió a armar el primer semianillo de atraque, además de dar inicio simultáneamente en el lado opuesto, a la demolición del revestimiento en la proyección del túnel sobre la pared de la lumbrera.

Después de armar el tercer semianillo de atraque (incluyendo las dovelas metálicas), y habiendo terminado la demolición del revestimiento de la lumbrera, se realizó el primer empuje de 1.30 m. dando espacio suficiente para la colocación del siguiente semianillo y realizando de igual manera la misma operación para la colocación de los subsecuentes (fig. 4.21).

La colocación del primer anillo del túnel, se realizó cuando el escudo había desaparecido prácticamente de la lumbrera; esto ocurrió cuando se tenían colocados ocho semianillos de atraque.

Durante este periodo se tuvieron que remover las dovelas metálicas cuantas veces fué necesario, para poder extraer la rezaga y suministrar materiales (fig. 4.22).

De aquí, hasta llegar a los primeros 180 m. de avance, la excavación se llevó a efecto en la misma forma que el proceso normal ya descrito anteriormente, sin embargo, en lo que se refiere a la extracción de la rezaga y en el movimiento entre la lumbrera y el frente, hubo las siguientes variantes:

La falta de espacio para maniobras determinó la colocación de un relleno en la cubeta del túnel, al mismo nivel que el túnel de transición, aprovechando el propio material producto de excavación que era depositado por el transportador primario en el piso del túnel.

Empleando un cargador frontal de descarga lateral (Cat. 955), a medida que el túnel avanzaba se iba tendiendo el material, creando una plataforma de trabajo y el excedente del material se cargaba a las vagonetas para sacarlo hacia la lumbrera (fig. 4.15).

Junto con la colocación del relleno se fué colocando una vía lateral (del lado izquierdo del túnel), la cual permitía el movimiento de las corridas compuestas por vagonetas, carros para transporte de dovelas y locomotoras, hacia el frente de trabajo y de regreso a la lumbrera. En la zona de lumbrera y túnel de transición se implementó un sistema de espuelas de vía, facilitando de esta manera las maniobras.

Para el deslizamiento de las plataformas del equipo hidráulico y eléctrico se fué instalando otra vía lateral alejada 50 m. del frente.

Durante esta etapa inicial solamente se usaron tres secciones del

transportador primario (consta de cuatro), porque, debido a su longitud, no podía instalarse completo.

Para el suministro de dovelas al pie del anillo erector se instaló en el escudo una vigueta carril curva, con el objeto de que el polipasto las tomara desde el carro para transporte ubicado en la vía lateral.

La colocación y empleo como relleno del material producto de excavación resultó muy problemático, debido a que desde el inicio se atravesó en la media sección superior del frente, un estrato limo-arcilloso con presencia de filtraciones, el cual proporcionaba un material de relleno desfavorable para el tránsito del cargador y ocasionaba retrasos en el ciclo de trabajo. Para solucionar el problema se substituyó parte del material por tepetate clasificado, suministrado de un banco cercano a la obra.

#### 4.3 Ciclo de Trabajo y Resultados Obtenidos

Analizando el proceso constructivo tal como fué concebido en el diseño original, puede observarse que las actividades principales del ciclo productivo deben ejecutarse en forma simultánea para lograr la capacidad teórica de avance de 20 m/día; esta concurrencia de eventos permite reducir notablemente el tiempo del ciclo y en solo 86.4 minutos se puede avanzar y colocar un anillo de dovelas de 1.20 m. de ancho, traslapándose la excavación, la extracción de la rezaga, la colocación del revestimiento y las inyecciones, aún el caso en que la excavación y el avance se realice por etapas cortas, porque las condiciones

de estabilidad del frente o el control de hundimientos en la superficie así lo ameriten (fig. 4.23).

Incluyendo un factor de eficiencia o uso del 60%, que por regla general se considera el 50% como satisfactorio a nivel mundial, la capacidad real de producción podría reducir a 12 m/día, con un tiempo de 144 minutos por ciclo de 1.20 m. (fig. 4.24).

El factor de eficiencia depende de la disponibilidad del equipo durante las 24 horas del día, a lo largo de la construcción del túnel y comprende las actividades de mantenimiento de cada uno de los sistemas así como la reparación de los mismos, descartando las eventualidades que pudieran ocurrir ajenas al escudo y su tren de equipo. También se descartan los eventos de la etapa inicial de arranque y los primeros metros, en los que el escudo no cuenta con el tren de equipo diseñado como espina dorsal del proceso constructivo.

Dentro de las eventualidades observadas durante la etapa de excavación, ajenas al escudo y su tren de equipo podemos mencionar como las más importantes, las siguientes:

- 1) Caidos en el frente en presencia de arenas sueltas en la clave del túnel: fué necesario emplear las compuertas de ademe del escudo, retraer uno de los brazos cortadores (el que corta la sección central) o excavar manualmente en el peor de los casos.
- 2) Suministro tardío de dovelas al frente.
- 3) Suministro tardío de vagonetas vacías al frente.
- 4) Suministro tardío de los carros con la mezcla de inyección.

- 5) Descarrilamiento de las plataformas del tren de equipo por ruptura de los rieles de la vía central, especialmente en las curvas horizontales de trazo, originados por el excesivo peso de las plataformas, las cuales fueron lastradas por recomendación del diseñador para evitar el pandeo de la estructura. Originados también por la poca holgura existente entre las cejas de las ruedas metálicas sobre las que ruedan las plataformas, con respecto al hongo del riel.
- 6) Fallas en el sistema de manto por descomposturas del equipo (malacate, skips, etc.) y por acumulación de rezaga en las alcancias.
- 7) Fallas en el ensamble de las dovelas por no coincidir los orificios de las placas de unión dejadas expresamente para la colocación de tornillos, especialmente en las curvas horizontales del trazo.

Durante el proceso de armado, cada dovela debe ajustarse a la correspondiente al anillo anterior, el cual está saliendo del faldón y está sujeto a mayores deformaciones respecto a su configuración inicial, originadas principalmente por su gran diámetro. Esta situación obliga a colocar un anillo "colgado" y deformado en el que la más mínima variación ocasiona serios problemas para meter los tornillos de unión. Este problema se agudiza por las curvas y por el "cabeceo" continuo del escudo al ser guiado, proporcionándose diferencias de paralelismo de las caras de contacto de los anillos.

- 8) Limpieza en la parte baja del faldón del escudo por presencia de lodo y agua producto de filtraciones.

Las eventualidades 2,3 y 4 están muy ligadas con la número 5, la cual dejó la vía en muy malas condiciones en algunos tramos, originando descarrilamientos continuos de locomotoras, carros de transporte y vagonetas.

Adicionalmente hubo algunos problemas de coordinación y fallas de equipo en la superficie, particularmente en los camiones que transportaban la rezaga a los tiraderos.

#### 4.3.1 Resultados Obtenidos

En la figura 4.25 se presenta la gráfica de avance tal como se llevó a cabo la excavación de los dos tramos de túnel, desde su inicio en la lumbrera 5 hasta su terminación en lumbrera 11.

En dicha gráfica se observan tres tipos de paros en la excavación, clasificados de la forma siguiente:

- a) Paros sistemáticos.
- b) Paros por descomposturas del equipo.
- c) Paros por problemas de estabilidad del frente.

Los paros sistemáticos tienen su origen en la construcción de las instalaciones para la extracción del material excavado, así como la instalación del tren de equipo que el escudo necesita para excavar normalmente, el cual fué colocado después de haber excavado 180 m. del primer túnel comprendido entre las lumbreras 5 y 7.

El paso en la estación Camarones, fué resuelto construyendo el túnel principal de tal manera que permitiera el avance del escudo con el tren de equipo libremente, tal como se explica más

adelante como caso particular.

Los paros por descomposturas del equipo se deben primordialmente al periodo de pruebas y modificaciones que se realizaron en el arranque de la excavación. Posteriormente durante el transcurso de la excavación se presentaron fallas en el equipo, las cuales se solucionaron con mantenimiento continuo.

Referente a los problemas de estabilidad, se observaron dos paros importantes originados por la presencia de caídos considerables al atravesar estratos arenosos sueltos y compactos sin ningún cementante y de lo cual se hablará en el tema correspondiente.

Con el objeto de evitar problemas mayores en el tramo 9-11, se determinó realizar exploraciones detalladas del subsuelo y consolidar los estratos arenosos desde la superficie mediante inyecciones, las cuales también se tratan en otro tema de este trabajo.

Después de realizar lo antes mncionado se obtuvieron resultados altamente satisfactorios, siendo los avances máximos obtenidos los siguientes:

Mejor día	18.0 m
Mejor turno (12 horas)	9.6 m.
Mejor semana	85.2 m.
Mejor mes	258.0 m.

#### 4.4 Características principales del escudo

Con objeto de proporcionar mas información que ayude a entender claramente el proceso constructivo, a continuación se enlistan

las principales características de los diversos elementos que integran el escudo.

### 1. Estructura del escudo.

#### Características:

Diámetro exterior .....	9,513 mm.
Diámetro interior en el faldón.....	9,351 mm.
Longitud en la parte superior.....	7,600 mm.
Longitud en su parte inferior.....	6,400 mm.
Longitud del faldón.....	2,400 mm.
Longitud del cuerpo central.....	2,800 mm.
Espesor de la camisa en el faldón.....	54 mm.
Tipo de acero empleado.....	A 36
Tolerancia entre dovelas y faldón.....	60 mm.

### 2. Sistema de empuje.

#### Características de los gatos hidráulicos.

Número total de gatos.....	31 pzas.
Area de apoyo de zapata.....	0.20 m2.
Fuerza máxima por gato.....	177 ton.
Diámetro del pistón.....	(10") 250 mm.
Presión de trabajo.....	350 kg/cm2
Carrera.....	1350 mm.
Velocidad de extensión.....	20 cm/min
Empuje total.....	5,487 ton.
Factor de diseño.....	2.5 a 3.0

### 3. Sistema Excavador.

#### Brazos rozadores.

Gatos hidraulicos (90 ton).....	3 pzas.
Desplazamiento longitudinal (gatos hid)	1.25 m.
Número de brazos.....	2 pzas.
Cabezas de corte por brazo.....	1 pza.
Rendimiento.....	118.69 m3/hr.

#### Brazo corto.

Longitud.....	2.70 m.
Picas en la cabeza de corte.....	100 pzas.
Motor eléctrico (134 H.P.).....	1 pza. (mov. de cabeza)
Gato hidráulico (60 ton).....	1 pza. (mov. del brazo)

#### Brazo largo.

Longitud.....	3.25 m.
Picas en la cabeza de corte.....	64 pzas.
Motor eléctrico (134 H.P.).....	1 pza. (mov. de cabeza)
Modelo de las picas.....	U-47

#### Brazos cargadores.

Motor hidráulico (40.23 H.P.).....	1 pza.
Marca.....	STAFFA

### 4. Sistema erector

#### Anillo erector.

Velocidad de rotación.....	0 a 1 R.P.M.
----------------------------	--------------

Desplazamiento angular.....	320 grados
Gato de izaje de descenso (1 pza.).	
Presión de trabajo.....	122 Kg/cm2.
Carrera.....	400 mm.
Gato deslizante (1 pza.)	
Presión de trabajo.....	122 Kg/cm2.
Carrera.....	375 mm.
Gatos estabilizadores (2 pzas.).	
Presión de trabajo.....	122 Kg/cm2.
Carrera.....	291 mm.
Motores del erector.	
Número de motores.....	2 unidades
Presión de operación.....	200 Kg/cm2.
Operación del sistema.....	Control remoto
Peso máximo por dovela.....	3.35 ton.

## 5. Sistema de Rezaga

### Características de los transportadores

#### Transportador Primario (inclinado)

Tipo.....	De Regletas Metálicas
Ancho.....	0.676 m.
Longitud.....	17.0 m.
Inclinación respecto a la horizontal...	28 grados
Rendimiento.....	118.69 m3/hr.
Velocidad máxima.....	1.1 m/seg.
Marca.....	VOEST-ALPINE
Motores eléctricos (45 H.P.).....	2 pzas.

\* Nota (Este transportador fué substituido por uno de banda de hule).

Transportador Secundario (horizontal).

Tipo.....	De Banda de Hule
Ancho.....	0.914 m.
Longitud.....	39.815 m.
Velocidad máxima.....	1.5 m/seg.
Capacidad.....	640 m <sup>3</sup> /hr.
Marca.....	BARBER GREEN
Motores eléctricos (15 H.P.).....	1 pza.

#### 4.5 Paso por la Estación Camarones

Esta ingeniosa solución permitió mover el escudo con todo el tren de equipo, entre las lumbreras 7 y 9 sin desarmar una sola pieza. De esta forma se pudo conservar el tren de producción requerido para cumplir los programas de obra y elevar el rendimiento de avance promedio.

El paso por la estación solamente tomó 17 días calendario, que comparativamente con la alternativa de desarmar el escudo en la lumbrera 7, transportarlo y armarlo en la lumbrera 9 (hubiera tomado 75 días como mínimo), resultó una solución sumamente ventajosa desde el punto de vista que se le vea: economía, tiempo de ejecución, facilidad, continuidad, uso adecuado del escudo en el proceso normal, menor interferencia con los trabajos de otros frentes, etc.

El paso del escudo por la estación Camarones se resolvió

construyendo el túnel principal de la estación previamente a la llegada del escudo y de las dimensiones requeridas para alojar el escudo con holgura. También fué necesario colar en toda su longitud una cubeta de concreto hidráulico con rieles embebidos para deslizar el escudo a través del tramo comprendido entre los cadenamientos 5+989 (lumbrera 7) y 6+222 (lumbrera 9), en la misma forma que se realizó en la etapa inicial de arranque.(fig. 4.26).

#### 4.5.1 Proceso de avance a través de la estación

Una vez que el escudo llegó a la lumbrera 7 y que se hubo instalado el último anillo de dovelas completo, se procedió a realizar con los gatos el empuje necesario para poder instalar el primer anillo incompleto.

Después de colocar el primer anillo incompleto se realizó un nuevo empuje, apoyándose contra dicho anillo, para colocar el segundo anillo constituido por dos dovelas normales y haciendo coincidir los orificios de las placas para fijar las dovelas de este anillo con las del primero.

En la misma forma se llevó a cabo la colocación del tercer anillo, también constituido por dos dovelas normales y colocado en forma alternada con respecto al segundo ya instalado.

Este procedimiento se repitió las veces necesarias hasta completar 160 espacios de 1.20 m. cada uno, llegando a la cabecera sur del túnel principal de la estación Camarones. A partir de este punto y hasta el cadenamiento 6+222 el número de

dovelas que constituyeron un anillo incompleto fué de cinco dovelas normales, colocadas en forma alternada con la finalidad de evitar desviaciones durante el empuje del escudo; las dovelas que quedaron fuera de la cubeta fueron fijadas contra el revestimiento definitivo del túnel por medio de troqueles de tubo metálico.

Estos anillos son los que constituyeron en última instancia el sistema de atraque para introducir el escudo en el siguiente tramo de túnel por excavar (L-9 a L-11).

Durante la excavación de los primeros 210 m. del túnel 9-11 el sistema de manto y suministro de materiales continuo efectuándose por la lumbrera 5, manteniendo la estación Camarones ocupada por el tren de equipo del escudo y las diversas instalaciones que se consideraron necesarias para no suspender la excavación del frente.

Cuando se construyeron los 210 m. mencionados, se suspendió la excavación para terminar de instalar el sistema de manto en la lumbrera 9 y retirar las dovelas y las vías de la zona de estación.

#### 4.6 Control Topográfico.

Dentro de las actividades complementarias importantes para la construcción de un túnel, el control topográfico requiere especial atención; en las obras subterráneas generalmente se requiere apoyar las actividades topográficas para el control del frente de excavación con una buena topografía de superficie,

mediante la cual se refieren los puntos de control para ser introducidos al túnel por las lumbreras de acceso, o para la verificación del trazo mediante pozos de control ubicados estratégicamente a lo largo del mismo.

Ya establecidos los puntos de apoyo y llevado el trazo al frente de excavación se requiere proporcionar información continua de la posición del escudo respecto al trazo de proyecto en cuanto a línea y nivel, con objeto de programar su empuje en cada uno de sus movimientos, seleccionando los gatos adecuados para corregir cualquier desviación y mantenerlo en la línea. Toda esta información debe estar disponible en cualquier momento para ser analizada por el ingeniero encargado de la obra y debe estar contenida en formas especiales diseñadas para el escudo de 9.51 m. de diámetro, apreciándose información adicional en cuanto a las presiones empleadas en el sistema hidráulico, así como el número de gatos usados (fig. 4.27).

El control topográfico del frente puede lograrse por método directo, empleando tránsito y nivel de la mejor precisión (WILD T2 y NA2 por ejemplo), sin embargo el uso de técnicas más modernas y completas tales como el uso del rayo laser y tarjetas computadas permiten disminuir costos de operación en campo, mejorar la exactitud en el control del escudo y proporcionar mayor seguridad en cuanto a la veracidad de la información que se está suministrando.

A continuación se describe brevemente la bondad del método del rayo laser así como lo referente a los pozos de control.

#### 4.6.1 Control topográfico con rayo laser

El corazón de un laser (light amplification by stimulated emission of radiation), consiste en un tubo de plasma helio-neón que produce una poderosa viga monocromática de luz concentrada.

El tubo está sellado de fábrica protegiéndolo así contra basura, polvo humedad vibración y otros problemas asociados con el uso bajo del terreno. Los lasers pueden operarse con corriente eléctrica de 12 volts A. C.

Una multitud de lasers y montajes se consiguen comercialmente, pero la combinación mas conveniente proyecta la luz del laser a través del sistema óptico de un teodolito, de manera que ángulos horizontales y verticales pueden girarse convenientemente con precisión.

La combinación del laser-teodolito se monta en un soporte especialmente diseñado, fijo al revestimiento primario (fig. 4.28). El soporte se diseña de manera que el laser-teodolito se coloque en tres dimensiones y la luz laser precisamente orientada en azimuth (dirección), y deflección (pendiente). 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 (fig. 4.29). En las intersecciones de la luz de las tarjetas, aparecen puntos rojos brillantes, conforme el escudo se mueve, los puntos rojos trazan trayectorias en las tarjetas. La

posición relativa de la trayectoria marcada por el punto, comparada con la trayectoria calculada, indica la desviación del escudo de la posición deseada (fig. 4.30).

En una sección del túnel en tangente o en línea recta, la trayectoria calculada es la línea recta inclinada (fig. 4.31). En la sección del túnel en curva, la trayectoria calculada se aproxima a una hipérbola. A lo largo de la trayectoria gráfícada, se marcan estaciones a ciertos intervalos para referencia (fig. 4.32).

En el techo del compartimiento del operador del escudo se montan dos tarjetas (se usan dos tarjetas en lugar de una por la misma razón que un rifle tiene una mira delantera y una trasera), las tarjetas se colocan en soportes con pasadores y pueden moverse lateralmente alrededor del centro del escudo para compensar el giro del mismo (fig. 4.33).

El movimiento del escudo puede ser verificado fácilmente en forma directa sobre las tarjetas por el operador o el ingeniero encargado del frente, y el turno de topógrafos debe concentrar su atención a comprobar constantemente la colocación del laser, tarjetas y puntos intermedios (o puntos de control), sin presión de ninguna especie y sin interferir en las actividades del ciclo.

Para un rápido chequeo del giro y pendiente del escudo, el operador puede usar la plomada y una placa graduada en grados de giro y porcentaje de pendientes (fig. 4.34).

Si por alguna razón el laser se mueve debido a movimientos del

revestimiento o por accidente, la luz no pasa a través de los puntos de control y el operador no verá el punto rojo. Un punto de control es una placa perforada que se coloca entre el laser y el escudo; la luz del rayo debe pasar en todo momento a través del orificio y se colocan normalmente tres puntos de control.

Ocasionalmente la luz puede alcanzar las tarjetas debido al movimiento de los puntos de control. En cualquier caso, ambos, el laser y los puntos de control deben ser revisados para corregir la adecuada posición y orientación.

#### 4.6.2 Pozos para Control Topográfico

En el tramo 5-7 se instalaron 7 pozos y en el tramo 9-11 se instalaron 5.

En el proyecto del metro estos pozos tienen como función principal alojar las tuberías contra incendio, aprovechando su ubicación para el control topográfico y para algunas otras aplicaciones relativas a la construcción y uso del túnel, entre las que podemos citar; bombeo de concreto, instalación de equipos de comunicación, etc.

La profundidad de estos pozos varía de acuerdo al trazo y su construcción consta de los siguientes pasos:

- 1) Movimiento del equipo de perforación del almacén de la obra al sitio de perforación.
- 2) Demolición de carpeta asfáltica y excavación de calas previas a la construcción de pozos para evitar posibles interferencias.
- 3) Suministro y colocación de boquilla metálica de 22" de

diámetro ced. 40 por 2.00 m. de longitud, así como colado de concreto de 150 Kg/cm<sup>2</sup>. para su fijación en cada uno de los pozos.

4) Perforación de pozos de 16" de diámetro empleando lodo bentonítico como fluido de perforación, para esto se emplea broca de carbotungsteno.

5) Suministro y colocación de tubería de 12 " de diámetro ced. 40 en cada pozo de acuerdo a la longitud perforada, incluyendo corte, biselado y aplicación de soldadura para unir la tubería.

6) Suministro habilitado y colocación de tapas de ademe de pozos (una pieza por pozo), de 12" de diámetro por 1/4" de espesor.

7) Inyección de contacto para fijación de tubería de 12" de diámetro en cada pozo de acuerdo a especificaciones.

8) Perforaciones guía con broca de 4" de diámetro en las dovelas para ubicar los pozos en el interior del túnel.

9) Emboquillado de cada pozo en el interior del túnel.

#### 4.7 Problemas de estabilidad

##### 7.1 Caído en el Tramo 5 - 7

Durante la excavación de este tramo solamente se presentó un problema de estabilidad en el frente, cuando el escudo atravesó en la zona correspondiente a la clave del túnel por una bolsa de arena suelta. Este percance obligó a suspender la excavación por un tiempo muy corto, en el que se analizaron las causas del problema y se determinaron las medidas necesarias para continuar el avance en forma segura.

El caído fue desarrollándose en forma gradual, a medida que la cachucha del escudo fué atravesando la bolsa de arena; originando desprendimientos pequeños inicialmente, causados básicamente por las vibraciones transmitidas por el escudo al terreno en el momento de su avance, hasta generar un caído en forma de cono de una altura aproximada a 3.00 m. en el centro de la clave al frente de la excavación.

Las medidas tomadas para controlar el caído y continuar el avance fueron las siguientes:

- a) Recibir y rellenar con madera el frente de excavación especialmente en la zona de clave; se colocaron polines y tabloncillos troquelados contra el escudo para soportar la clave.
- b) Se aplicó concreto lanzado en el talud del frente de la excavación y en la clave, con objeto de evitar mayores desprendimientos y para asegurar el ademe y retaque de madera así colocado.
- c) Se determinó emplear en todo momento las compuertas de ademe frontal para evitar en lo mayor posible que la falla continuara progresando hacia adelante.
- d) El avance se reanudó con extremo cuidado, realizando excavaciones cortas, con el empleo de los brazos cortadores al mínimo y moviendo el escudo sin demora, una vez que se tenía el espacio para avanzar.
- e) Al pasar el cuerpo del escudo por la zona del caído se realizó una inyección de relleno desde el interior del túnel, para garantizar que no continuarían los desprendimientos en dicha zona.

#### 4.7.2 Caídos en el tramo 9 - 11

En este tramo en particular se presentaron continuos problemas por pequeños caídos, prácticamente desde el inicio de la excavación, obligando a modificar el procedimiento constructivo cuando las condiciones de estabilidad así lo ameritaron. Finalmente se tuvieron dos caídos importantes.

#### 1. Primer Caído

Destacando por su magnitud a continuación se describe el caído sucedido en el cadenamiento 6+545 (aproximadamente).

##### \* Antecedentes

Durante la excavación del túnel 9-11 se presentaron bastantes problemas de estabilidad en el frente, derivados de una estratigrafía muy errática, en la cual predominó la presencia de estratos arenosos sueltos en la sección media superior hasta ocupar aproximadamente el 50% de la sección del túnel. En tales condiciones fue necesario cambiar radicalmente el procedimiento de ataque del frente, suprimiendo el uso de uno de los brazos excavadores con que está equipado el escudo y se determinó el uso de las plataformas de ademe para soportar la parte superior de la sección excavada en todo momento (fig. 4.35). También se determinó realizar parcialmente el ataque del frente, es decir que el empuje del escudo para avanzar un anillo completo de 1.20 m. fuera por etapas.

Para permitir el avance suave del escudo, cuyo efecto básicamente estaba originando los desprendimientos de la arena, se acordó inyectar una mezcla de bentonita con aceite soluble entre el

escudo y el terreno natural.

El procedimiento de la inyección de contacto atrás del escudo, fué modificado tratando de lograr una mayor rapidez en el relleno del espacio anular que se forma entre dovelas y terreno y con la finalidad de reducir los movimientos superficiales a lo largo del trazo.

Considerando la gravedad del problema que se estaba presentando, se planteó la necesidad de realizar un tratamiento de inyecciones de consolidación desde la superficie, para poder mejorar las propiedades del subsuelo en la zona cercana al túnel. dicho procedimiento había sido discutido ampliamente y fué autorizado para su ejecución en un tramo de prueba, desafortunadamente durante los primeros preparativos para la instalación de los equipos de inyección se presentó la falla en el frente.

Aunadas a las precarias condiciones de estabilidad del frente, se estuvo observando en días anteriores al caído la presencia de un limo arcilloso blando y quebradizo en la sección media inferior, el cual estaba originando desprendimientos del banco durante la excavación (fig. 4.36).

Por otra parte, también es importante mencionar que el trazo del túnel se encuentra abajo de la avenida Ferrocarriles Nacionales, en la cual corre un tren de carga que transmite vibraciones al terreno, mismas que originaron desprendimientos en algunas ocasiones en que se estaba excavando el frente, al momento en que el ferrocarril transitaba en superficie.

#### \* Descripción del caído

La excavación del túnel se había estado realizando siguiendo estrictamente las medidas de seguridad ya mencionadas. Sin embargo se tenían problemas de estabilidad en toda la sección del túnel debido, a la presencia del estrato arenoso suelto en la sección media inferior (fig. 4.36).

Durante la excavación del día del caído, en los anillos 261 y 262 se presentaron caídos en la clave y en la parte central del banco, que provocaron sobre-excavaciones en la clave de 0.3 a 0.5 m. de altura como máximo.

Al iniciar el primer empuje de 0.30 m. para colocar un nuevo anillo (el número 263) se presentó un desprendimiento del banco y una pequeña sobre-excavación en la clave. El material alcanzó la altura de la base de la retroexcavadora y hubo necesidad de extraer dicho material. Al término de esta actividad se inició la excavación de la parte inferior del frente para formar la ranura que permitiera un nuevo avance del escudo de 0.30 m. y de esta forma poder recuperar paulatinamente el frente. Inmediatamente se inició el empuje, sin embargo al avanzar los primeros 5 cms. se presentó el primer caído importante, cuyo volumen formó un talud que en su parte superior llegó a la altura de las compuertas de ademe (se calculó que este volumen fué de aproximadamente 43 m<sup>3</sup>. en estado suelto).

En este momento se intentó "rezagar" de inmediato a fin de empujar el escudo lo más pronto posible y lograr que las plataformas de ademe sostuvieran totalmente el frente, tratando

de evitar un caído mayor. Cabe hacer la aclaración que el material que hasta el momento se había desprendido no presentaba signos de agua producto de filtraciones. Al estar rezagando el material producto del caído se trató de inspeccionar el frente (para determinar la magnitud del mismo), a través de una de las compuertas, presentándose en ese momento desprendimientos importantes de material que fluyó por abajo de las compuertas hasta llenar totalmente el espacio entre el escudo y el frente de excavación, cubriendo la retroexcavadora y el brazo (fig. 4.37).

Cuando esto sucedía se observó que el material que fluía entre las compuertas era una arcilla negra con arena y partes remoldeadas, acompañadas de pequeños escurrimientos de agua que salían por el espacio entre las compuertas 2-3 y 3-4 (fig. 4.30), por lo que se tomó la decisión de suspender totalmente las actividades de excavación del frente, considerando que el escudo excavador no había sido diseñado para este tipo de suelos, en condiciones tan difíciles y que podría causarse un problema mayor.

#### \* Medidas de emergencia

Después de los sucesos anteriores, fué necesario adoptar las primeras medidas de seguridad que deberían ejecutarse a fin de evitar un colapso mayor en el frente. Considerando especialmente que esto sucedió en un fin de semana y por la influencia tan importante que podía ejercer el paso del ferrocarril en la superficie.

Estas medidas fueron las siguientes:

1. Apuntalar perfectamente las compuertas de ademe con tubería de 6" de diámetro.
2. Ademar todos los huecos entre compuertas.
3. Inyectar bentonita-aceite soluble entre el terreno y el escudo.
4. Verificar las líneas de drenaje y agua potable sobre el eje del túnel en superficie.
5. Inspeccionar en superficie la zona donde se localizaba el escudo, para detectar visualmente las fallas en el terreno.

La ejecución de los trabajos realizados ese mismo día (sábado), relativos a las medidas señaladas se describen a continuación:

1. Verificación de las líneas de drenaje y agua potable.

En superficie se inspeccionó visualmente la zona de influencia debida al caído, en donde se pudo observar algunas grietas a un lado de la vía del ferrocarril.

Se verificaron los pozos de visita de la red de drenaje existente sobre la sección del túnel cuantificando la aportación de la línea; así se encontró que en el colector de la calle Ferrocarriles Nacionales y 5 de Febrero la aportación era normal de un pozo a otro y que el colector de 5 de Febrero a L-10 se encontraba seco. La tubería de agua potable en toda la zona del caído no presentaba fuga alguna, por lo que se ordenó a la brigada de topografía efectuar la nivelación de la zona de influencia del escudo para conocer los movimientos ocasionados a consecuencia del caído, dándose instrucciones de efectuar nivelaciones cada tres horas y obteniéndose una diferencia

acumulada sobre el eje y el punto de control al frente de excavación de 63 mm. de asentamiento (fig. 4.38).

2. Ademe del frente de excavación y apuntalamiento de las compuertas de ademe.

Para comenzar a troquelar y ademar el frente se hizo que las compuertas de ademe se pegaran en la mayor medida posible al terreno. Inmediatamente después se inició la colocación de puntales con tubo de 6" entre la estructura del escudo y las compuertas de ademe, para garantizar que estas no cedieran ante la presión del material que se encontraban soportando. se dieron instrucciones de colocar placa de 1/2" de espesor a los claros entre compuertas, así como realizar el ademado y apuntalamiento en una forma total.

Posteriormente, en el frente de trabajo se dieron instrucciones para que el ademado y apuntalamiento se efectuara en toda el área del talud, así como la colocación de mamparas que protegieran de un posible movimiento del talud que formó el material producto del caído, El ademe se colocó con tablones de 2" x 8" x 8 1/4", durmientes de 6" x 6" x 4" y de 8" x 8" en la zona del frente que no estaba cubierta por las compuertas de ademe, así como en el área del talud ya mencionado. Este ademe se troqueló de la estructura del escudo hacia el frente con tubo de 6" y 2" de diámetro. Por último, se colocó una cama de tablones con durmientes en el área del material suelto que cubría el equipo Alpine, como protección en caso de algún movimiento de dicho material (ya que se encontraba algo de lodo suelto).

Esta cama fué troquelada con tubería de 6" de diámetro de la parte superior del escudo (clave) con el ademe, castigándolo contra el suelo y como medida preventiva se colocó una mampara de tablonés entre plataformas de control del lado derecho e izquierdo, colocando tubos de 6" de diámetro como travesaños, asegurando así cualquier falla del ademe colocado en el frente (fig. 4.39).

3. Inyección de contacto entre terreno-dovela e inyección de bentonita-aceite entre escudo y terreno.

Durante la ejecución de los trabajos descritos, la brigada de inyección efectuó los siguiente :

a) Se inyectó bentonita-aceite soluble entre el escudo y el terreno natural para asegurar que no se pegara el escudo, ya que se reinyectaría la zona próxima al faldón.

b) Se inyectaron los últimos anillos colocados con un volumen total de 80 bachas de 2a. fase. La profundidad de los barrenos fué de 1.5 m. y la presión de inyección varió de 1 a 1.5 kgs./cm<sup>2</sup>. Esta reinyección se realizó para asegurar que las posibles cavernas formadas por el caído se llenaran totalmente (en el momento del caído se escucharon desprendimientos de material que golpeaban el cuerpo del escudo, por lo que se pensó que existían huecos en dicha zona).

#### \* Recomendaciones

Paralelamente a la realización de todos los trabajos anteriormente descritos para controlar el caído, se recomendó

complementar las medidas de seguridad para poder reiniciar y continuar la excavación del túnel en forma segura.

1. A fin de que no progresara la falla presentada, fué necesario reforzar el apuntalamiento del frente, especialmente de las compuertas, además de un ademe para la zona que no contiene las compuertas, el cual se troqueló contra el escudo. Simultáneamente a la actividad anterior, en los últimos 30 anillos colocados se debió repetir la 2a. fase de inyección aumentando la presión a 3 kgs/cm<sup>2</sup>, pero sin mantener ésta, dejándola solo al "llegue". Esta inyección se hizo con una longitud de perforación de 2.50 m. (fig. 4.40).

3. Se efectuó una aureola de inyección por el interior del túnel (en el frente), tratando de inyectar cuando menos una longitud de 10.00 m. adelante del escudo. Esta inyección se efectuó con presiones bajas y sin un volumen definido (fig. 4.41).

4. Se concluyó que la realización de las inyecciones para consolidación del subsuelo desde la superficie, eran prioritarias y que debían ejecutarse de acuerdo al esquema recomendado antes de que sucediera el caído. Estas inyecciones quedaban sujetas a modificación de acuerdo a los resultados que se observaran en campo y de ninguna manera podría reiniciarse la excavación si la inyección no había sido realizada.

5. A partir de la última lectura de nivelación en superficie, cercana al frente, se efectuaron nivelaciones cada 4 horas hasta que se estabilizaron las deformaciones.

6. Fué conveniente que el ferrocarril que se encontraba en superficie se retirara fraccionariamente en su longitud, hasta que fué removido totalmente. Por otra parte, se solicitó la suspensión del paso de ferrocarriles, hasta que se terminara la inyección por el interior.

Las nivelaciones en superficie se hicieron en el sentido transversal al eje del túnel y a cada 15.00 m. También se hicieron nivelaciones en el sentido longitudinal sobre el eje, 50.00 m. a cada lado del frente.

8. Para conocer en forma detallada la estratigrafía del subsuelo en la zona del caído, se determinó efectuar 4 sondeos, separados a cada 15.00 m. a partir de 5.00 m. contados desde la cachucha del escudo. Estos sondeos se hicieron "ciegos" hasta 15.00 m. y de este nivel hasta 30.00 m. se muestrearon con Shelby Dentado o Denison y penetración estándar de manera alternada, a excepción del primero en el cual se muestreó desde la superficie.

Estos se localizaron transversalmente a una distancia máxima de 5.00 m., a partir del paño exterior del escudo (fig. 4.42).

Para consolidar mejor el frente de la excavación en la zona del caído, se determinó complementar la inyección perforando 4 barrenos desde la superficie hasta localizar el hueco originado por el caído. Al realizar estos barrenos se encontró que en uno de los puntos, el hueco formado iniciaba a los 2 m. de profundidad.

## 2. Segundo Caído

Después del primer caído, al reiniciar la excavación del túnel, se puso especial cuidado en observar el comportamiento del subsuelo en el frente de excavación, enfocándose a localizar los estratos inyectados y la forma en que la inyección había influido en el comportamiento de la masa del suelo; los resultados no fueron los desados porque aún persistían problemas de estabilidad y la inyección solo había penetrado rompiendo en pequeñas vetas por los estratos mas débiles sin lograr la trabazón de las vetas.

Nuevamente, en el cadenamamiento 6+661 se registró un segundo caído, que aunque de menores proporciones del anterior, fué suficiente para suspender la excavación y aumentar la incertidumbre de la mezcla usada para consolidar y mejorar la estabilidad. Las dimensiones del caído fueron aproximadamente de 6 m. x 5 m. x 5 m.

Tomando en cuenta las dificultades que se habin tenido para lograr un avance sostenido en condiciones de seguridad así como los retrasos en el programa de obra, se tomó la decisión de emplear un procedimiento de consolidación caro a base de productos quimicos, los cuales brindaron resultados altamente satisfactorios.

Este segundo caído también vino a modificar el criterio de exploración del subsuelo así como la definición de las zonas por consolidar mediante inyección; los sondeos de exploración se incrementaron en número para obtener la información mas detallada de los estratos y se estableció que la consolidación se haría en todo el tramo faltante de excavar.

#### 4.8 Tratamiento de consolidación por inyecciones.

Con el objeto de evitar problemas mayores, en el tramo 9-11 se determinó realizar una exploración detallada del subsuelo y consolidar los estratos arenosos desde la superficie, previamente al paso del escudo, empleando el método de progresiones controladas con tubo de manguito; para tal efecto se perforaron 129 aureolas de 3 barrenos cada una, separadas a cada 4.00 m. de distancia, a lo largo del eje de trazo.

La profundidad a la que se perforaron los barrenos varió de 23.5 m. a 22.0 m. siendo la profundidad menor la predominante, debido a ajustes que se consideraron convenientes practicamente al inicio del proceso de inyección. En todos los casos, se intentó consolidar los estratos del frente del túnel ubicados hasta 5.00 m. arriba de la clave y 3.00 m. abajo de la misma (fig. 4.43).

Originalmente la mezcla de inyección fué constituida a base de cemento, bentonita y agua, cambiándose posteriormente a una mezcla de silicato, acetato estabilizador y agua, con la que se obtuvieron resultados altamente satisfactorios.

##### 4.8.1 Proceso de inyección

Para ejecutar las inyecciones fué necesario realizar perforaciones verticales (barrenos) de 4" de diámetro.

En cada uno de los barrenos se efectuaron dos fases de inyección: 1) 1a. fase: correspondiente a la inyección de vaina, la cual se realizó en progresiones de 1.00 m. de longitud, iniciándose desde la profundidad máxima del barreno correspondiente. Esta primera

fase tuvo por objeto fijar el tubo de inyección (tubo de manguito) al terreno, empleándose una mezcla estable de cemento-agua cuya relación fué de 1 a 2 con el 20% de bentonita (en peso del cemento). Esta inyección se efectuó sin presión.

2) 2a. fase: Tratamiento de inyección de consolidación.

En esta fase, como ya se mencionó se inyectaron dos tipos de mezclas:

a) Lechada.

Esta mezcla consistió de cemento-agua-bentonita con proporcionamiento de una parte de cemento por tres de agua y el 5% de bentonita (en peso de cemento) para estabilizar la mezcla. A esta lechada se le agregó un acelerante de fraguado en proporción del 2% al 4% en relación al peso del cemento.

b) Productos químicos.

Esta mezcla quedó compuesta por los siguientes elementos y proporcionamientos:

SILICATO DE SODIO	50	LITROS
AGUA	50	LITROS
ACETATO DE ETILO	5	LITROS
ESTABILIZADOR (LYDET)	1.5	LITROS

En los primeros 60 barrenos el volúmen a inyectar (con lechada) por progresión se planteó en forma libre hasta alcanzar la presión de 7 Kg/cm<sup>2</sup> teniendo los barrenos una profundidad de 23.5 m, efectuándose la inyección entre esta profundidad y los 16.5 m.

A partir de este barreno se determinó inyectar en los barrenos

laterales un volumen de 3 m<sup>3</sup>. y en los centrales de 4 m<sup>3</sup>. como máximo o alcanzar la presión de 7 Kg/cm<sup>2</sup>., modificándose la profundidad de los barrenos a 22.00 m., efectuando el tratamiento de inyección entre esta profundidad y los 17.00 m. Estas inyecciones se ejecutaron hasta el barreno 162.

Debido a un segundo caído se planteó la necesidad de efectuar un tratamiento a base de productos químicos ya que con la lechada no se estaban obteniendo los resultados deseados, por lo que se realizaron pruebas entre los barrenos 163 al 178 durante lo cual se llegó a la conclusión del proporcionamiento antes mencionado.

Con esta mezcla de productos químicos se reforzaron los barrenos del 139 al 162, continuando así hasta el término de los 385 barrenos, inyectándose un volumen de 1.8 m<sup>3</sup>. por progresión en un espesor de tratamiento de 7.00 m. comprendido entre los 15.00 y los 22.00 m. de profundidad.

Esta mezcla penetró y relleno los vacíos formando estratos consistentes que mejoraron substancialmente las condiciones de estabilidad, por lo que durante el proceso de excavación el comportamiento de estos materiales fué completamente satisfactorio.

Fuó condición necesaria para continuar con la excavación del túnel, que previamente se hubieran efectuado los trabajos de inyección del suelo cuando menos 12 horas antes de que el frente de excavación pasara por la zona tratada, para el caso de los productos químicos. Para las inyecciones de lechada fué necesario esperar 48 horas para iniciar la excavación en la zona tratada.

## CAPITULO V

### MOVIMIENTOS ASOCIADOS CON LA CONSTRUCCION DEL TUNEL

Con el objeto de medir y conocer, tanto en la zona inmediata a la excavación como en las áreas adyacentes a la misma, la variación de los movimientos horizontales y la magnitud de los asentamientos superficiales, que pudieran ser provocados en el subsuelo antes, durante y después de la excavación del túnel con el escudo, fué preciso implementar una instrumentación compuesta de secciones de convergencia, inclinómetros, extensómetros y bancos de nivel superficiales.

Las secciones de convergencia permitieron medir las deformaciones sufridas por el revestimiento del túnel atrás del frente de excavación; Los inclinómetros y extensómetros registraron deformaciones horizontales y verticales de la masa de suelo, antes, durante y después de la excavación con el escudo por la zona instrumentada; las nivelaciones superficiales también registraron los hundimientos en la superficie del subsuelo antes, durante y después de la excavación del túnel.

Para cumplir satisfactoriamente el propósito de la instrumentación se determinó ubicar dichos instrumentos a todo lo largo del tramo.

Las nivelaciones topográficas sobre los extensómetros, inclinómetros y bancos de nivel, así como las lecturas de los mismos se realizaron cuando menos una vez al día, cuando el

escudo se encontraba cercano a las zonas instrumentadas. Al alejarse el escudo, la periodicidad de la toma de lecturas fué espaciándose hasta considerar que la sección ya estaba estable.

En las siguientes gráficas se puede observar la variación de los movimientos obtenidos a lo largo de la excavación del túnel:

En la figura 5.1, se presenta la curva que muestra los máximos asentamientos superficiales, en función de los cadenamientos del túnel. En esta curva se puede observar que los asentamientos promedio en el tramo L-5 a L-7, fueron de 50 mm., con un máximo de 120 mm.

En lo que respecta al tramo L-9 a L-11, el máximo asentamiento registrado fué de 220 mm. En esta misma gráfica se puede observar que a partir del cadenamiento 6+543, (punto donde se efectuó el mayor asentamiento) el monto del asentamiento se redujo a 50 mm. en promedio, esto se debió principalmente al mejoramiento del subsuelo mediante inyecciones en la vecindad de la clave del túnel, antes de realizar las actividades de excavación. Resultando dichas inyecciones como un excelente método para estabilizar el frente, reduciendo los movimientos de la masa de suelo al mismo tiempo que se mejoraron los rendimientos.

En la figura 5.2, se presentan las curvas de asentamiento-distancia del escudo a la sección de observación, para cuatro referencias sobre el eje situadas en superficie, correspondientes a los cadenamientos 4+820, 5+340, 5+860 y 6+640, los cuales pueden considerarse como representativos del comportamiento del

subsuelo durante la construcción del túnel.

En esta misma figura se observa que la sección de control en turno comienza a moverse desde que el escudo esta a 10 o 20 m. de distancia, antes de llegar a la misma.

La estabilización de los asentamientos ocurre cuando el escudo se encuentra a 40 o 60 m. adelante de la sección de control.

En la figura 5.3 se observan las curvas de asentamiento máximo en secciones transversales al eje del túnel, para los mismos cadenamientos antes mencionados. Interpretando las "curvas de probabilidad", con las ideas del Dr. R. B. Peck (1969) se observa que en dos de las estaciones dibujadas, las de los cadenamientos 4+820 y 5+340, caen en la frontera entre arcillas duras y arenas sobre el nivel freático con la región de arcilla blanda a media.

La sección en la estación localizada en el cadenamiento 5+868 se ubica definitivamente en la región de arcilla dura y arenas sobre el nivel freático y la sección en el cadenamiento 6+640 se encuentra en la zona de arcilla blanda a media, pero vecina a la frontera anteriormente mencionada.

Las mediciones de convergencia efectuadas en el endovelado o revestimiento del túnel, no muestran variaciones importantes a través del tiempo, lo que confirma que el revestimiento primario y único, utilizado en el túnel fué suficiente para conservar la estabilidad de la obra (fig. 5.4).

Cabe aclarar que debido al tren de equipo que era arrastrado por el escudo, las mediciones de convergencia no pudieron aportar

datos de las deformaciones ocurridas inmediatamente después de haber colocado las dovelas y ser sometido el anillo a las presiones de la inyección de contacto, que es la etapa en la cual ocurren las deformaciones mas importantes inherentes al propio procedimiento constructivo.

CAPITULO VI  
C O N C L U S I O N E S

Es evidente que con la ejecución del proyecto aquí descrito, se contribuye al desarrollo mundial de la tecnología en materia de construcción de túneles, cubriendo uno de sus objetivos que es la búsqueda de nuevos procedimientos constructivos.

El proceso constructivo logró las expectativas de avances rápidos en los suelos compactos para los que fué diseñado y ha permitido a la Ingeniería Mexicana dar un paso adelante en su integración a las modernas técnicas de construcción de túneles.

En la búsqueda de nuevas soluciones en la construcción de túneles para el "metro" influyeron decisivamente las experiencias mexicanas para definir la concepción de este nuevo "Escudo de Frente Abierto Totalmente Mecanizado de 9.513 m. de diámetro", el cual gracias a la integración de todos sus sistemas, se pudieron realizar actividades simultáneas acortando el tiempo de su ciclo de trabajo. Desde luego esto se logró en el momento en que se contó con todo el tren de equipo en el interior del túnel, ya que en la etapa de arranque se obtuvieron rendimientos menores, debido especialmente a las restricciones impuestas por la falta de espacio que no permitió la instalación de dicho tren.

Durante la excavación de este túnel con el escudo de 2.513" m. de diámetro, se vivieron situaciones muy especiales que no se contemplaron en el proyecto; dichas situaciones pusieron a prueba

la capacidad de los ingenieros, quienes solucionaron satisfactoriamente los problemas a los que se enfrentaron.

Se emplearon soluciones muy ingeniosas, tales como el paso del escudo por la estación Camarones, lo que representó un ahorro muy considerable en tiempo y costos.

La construcción de las lumbreras se adecuaron a las necesidades del escudo, dando libertades y comodidad para el armado de éste. El revestimiento primario y único a base de dovelas prefabricadas con mínima tolerancia de fabricación, demostró ser de colocación rápida y segura ya que los resultados fueron muy satisfactorios.

Las condiciones de estabilidad del frente, las cuales obligaron a modificar radicalmente el procedimiento constructivo, debido a la presencia de los "caídos", determinaron la aplicación de procedimientos de inyección hasta ahora poco comunes en México, sobre todo la usada con productos químicos, que permitió consolidar el subsuelo, disminuyendo notablemente los asentamientos y logrando un mejor rendimiento en la excavación. También, a causa de las condiciones de estabilidad, se realizaron nuevos estudios de mecánica de suelos que contribuyen a enriquecer la información ya existente del subsuelo.

El control topográfico se apoyó en el uso de procedimientos modernos como el rayo laser, permitiendo reducir tiempos y lograr mayor precisión en el control del movimiento del escudo en cada avance.

El uso de las técnicas adecuadas de planeación permitió tener una

visión muy completa para integrar un ciclo de trabajo que contemplara todas las instalaciones necesarias, tanto en el túnel como en la superficie, evitando demoras y optimizando los recursos.

En general, las experiencias obtenidas en la excavación de los dos tramos de túnel con el escudo de 9.513" de diámetro han resultado invaluable en todos aspectos.

A N E X O



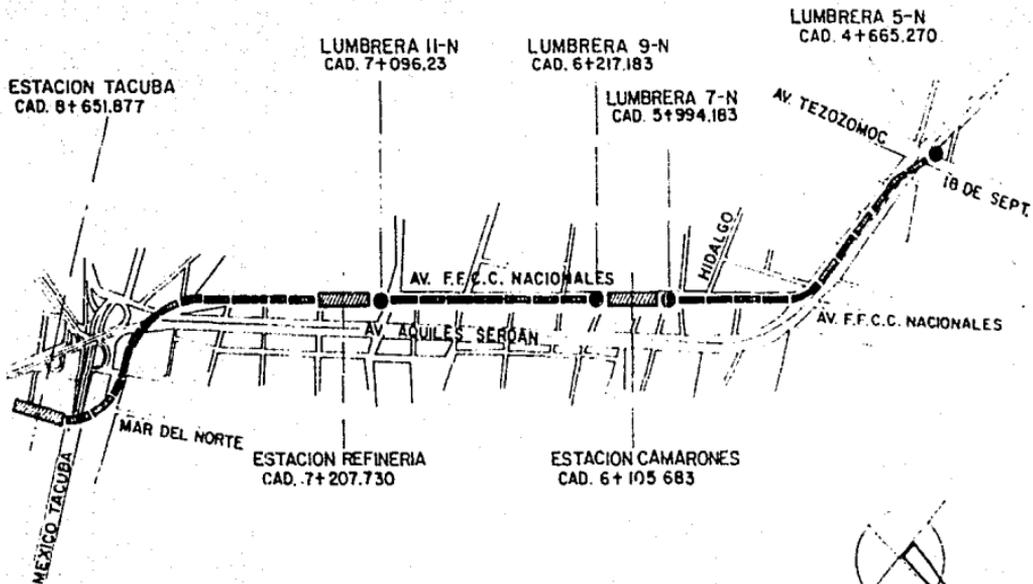


FIG. 2.1. PLANTA DE TRAZO DE LA LINEA 7N-N MOSTRANDO LOS TRAMOS DE TUNEL EXCAVADOS CON EL ESCUDO DE 9.513 M. Ø



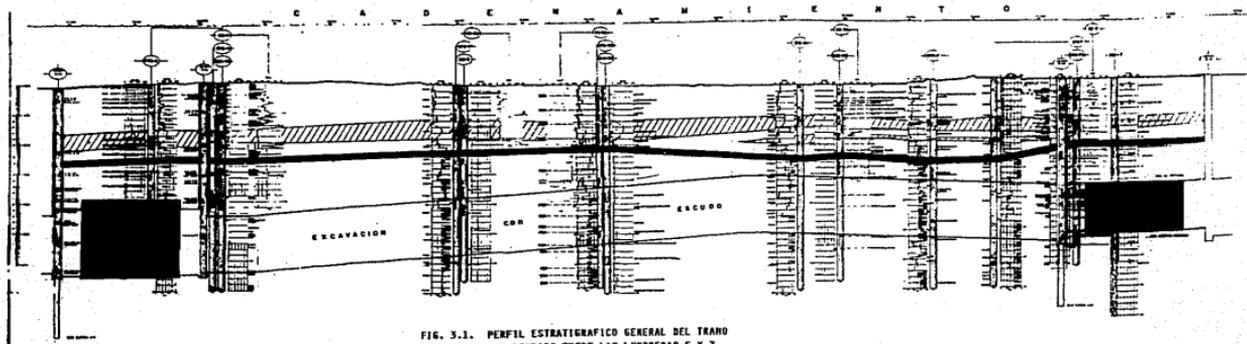


FIG. 3.1. PERFIL ESTRATIGRAFICO GENERAL DEL TRANCO  
 COMPRENDIDO ENTRE LAS LINDERAS 5 Y 7

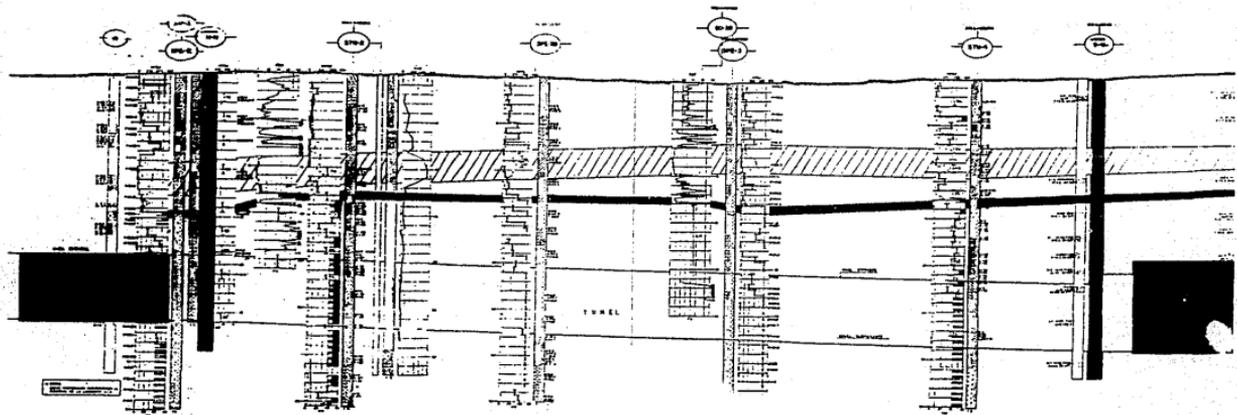


FIG. 3.2. PERFIL ESTRATIGRAFICO GENERAL  
 DEL TRAMO COMPRENDIDO ENTRE LAS  
 LUJBRERAS 9 Y 11

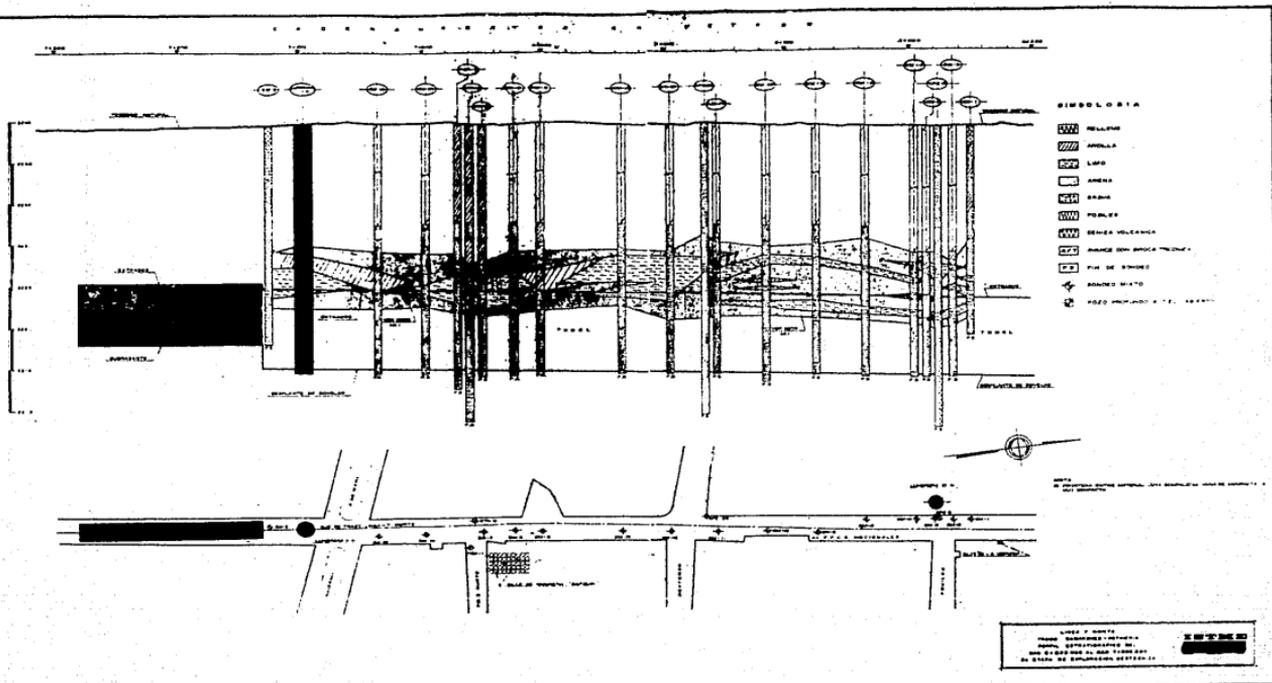
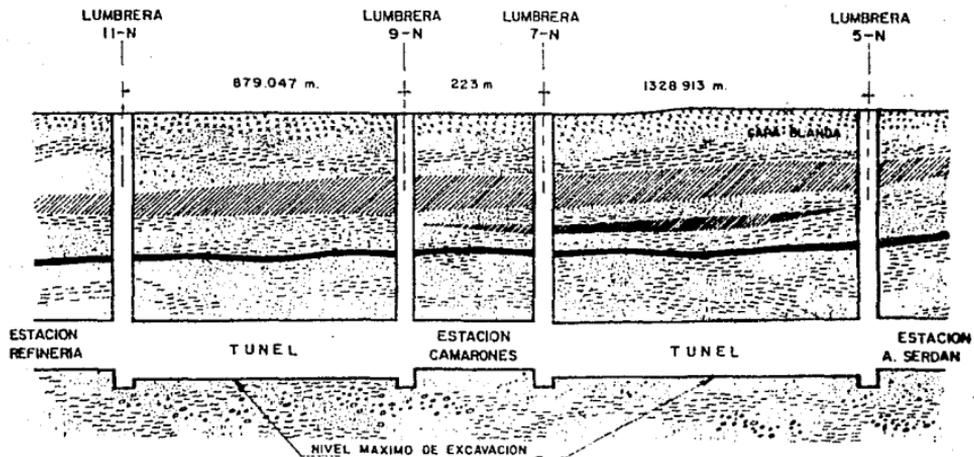


FIG. 3.3. PERFIL ESTRATIGRAFICO DEL TRAMO COMPRENDIDO ENTRE LAS LUMBRERAS 9 Y 11 DESPUES DE LOS CAIDOS.

No	PROFUNDIDAD EN METROS A		CLASIFICACION PREDOMINANTE			CONTENIDO NATURAL DE AGUA	COHESION C (TON M <sup>2</sup> )	FRICCION $\phi$ (GRADOS)
1	0.0	7.0	ARCILLA ARENOSA	CL	FIRME	40	3 A 8	5° A 11°
2	7.0	9.9	ARCILLA LIMOSA	CH	BLANDA	250 A 350	3 A 6	0° A 4°
3	9.9	11.0	ARENA LIMOSA	SM	MEDIANAMENTE COMPACTA	20 A 30		
4	11.0	12.0	LIMO ARCILLOSO	MH	BLANDO A MEDIO CONSISTENTE	200	5.5	6°
5	12.0	16.4	LIMO ARENOSO	ML	MUY COMPACTO	15 A 20	6 A 11	35° A 38°
6	16.4	22.6	LIMO ARENOSO ARCILLA ARENOSA ARENA LIMOSA	ML CL SM	COMPACTA	30 A 60	0 A 10	30°
7	22.6	35.0	ARENA CON GRAVAS LIMOSAS	SM	MUY COMPACTA	20	0 A 20	32° A 45°

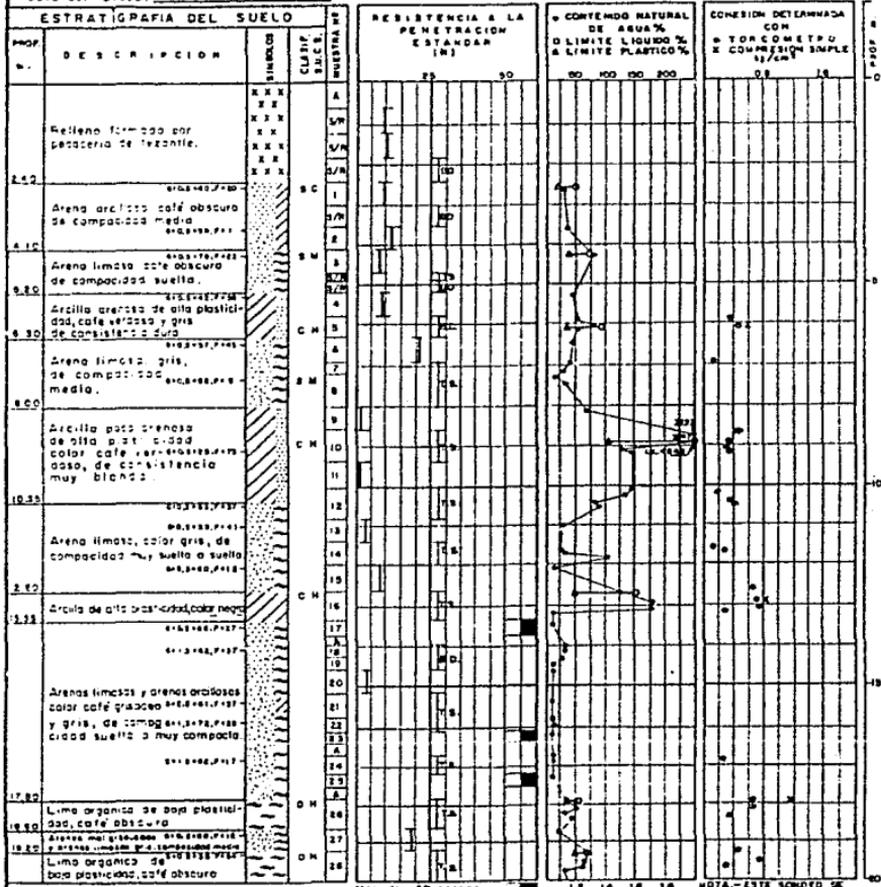
FIG. 3.4. CLASIFICACION DE LOS ESTRATOS EXISTENTES A LO LARGO DE LOS TRAMOS COMPRENDIDOS ENTRE LAS LUMBRERAS 5 y 11 .



**SIMBOLOGIA**

	RELLENO		ARCILLA
	ARENA		GRAVA
	LIMO		LIMITE ENTRE CAPAS

FIG. 3.5. PERFIL ESTRATIGRAFICO SIMPLIFICADO DE LOS TRAMOS COMPRENDIDOS ENTRE LAS LUMBRERAS 5 Y 11.



**SIMBOLOGIA:**

	RELLENO		ARENA	$\frac{1}{100}$ % Porcentaje de limo
	ARCILLA		GRAVA	$\frac{1}{100}$ % Porcentaje de arena
	LIMO			$\frac{1}{100}$ % Porcentaje de grava

SM = Clasificación S.U.C.E.  
OH = Sin Recategorización

Más de 80 golpes  
TS - Tipo Shelby  
20 - Sencillo Dócil  
A - Avance

MECANICA DE SUELOS

LINEA 7 NORTE - NORTE  
CADENAMIENTO 6+550.000  
FIG. 3.6 SONDEO SM-1  
PERFIL ESTRATIGRAFICO

México, D.F. Febrero de 1988 78

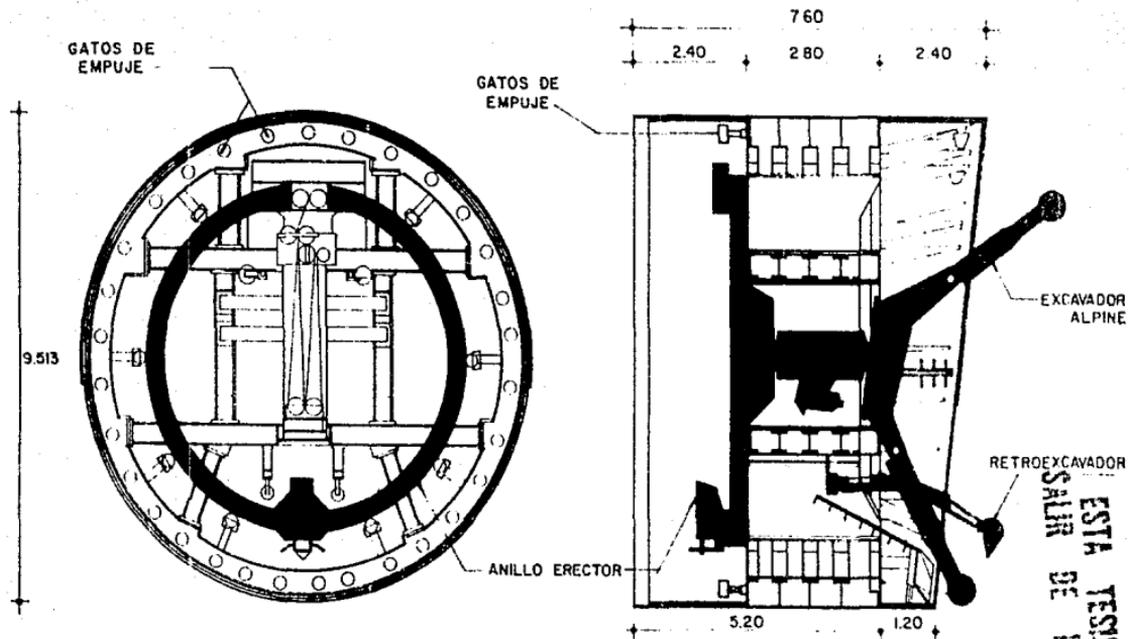


FIG. 4.1. DIMENSIONES GENERALES Y PARTES DEL ESCUDO DE 9.513 M. Ø

ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA

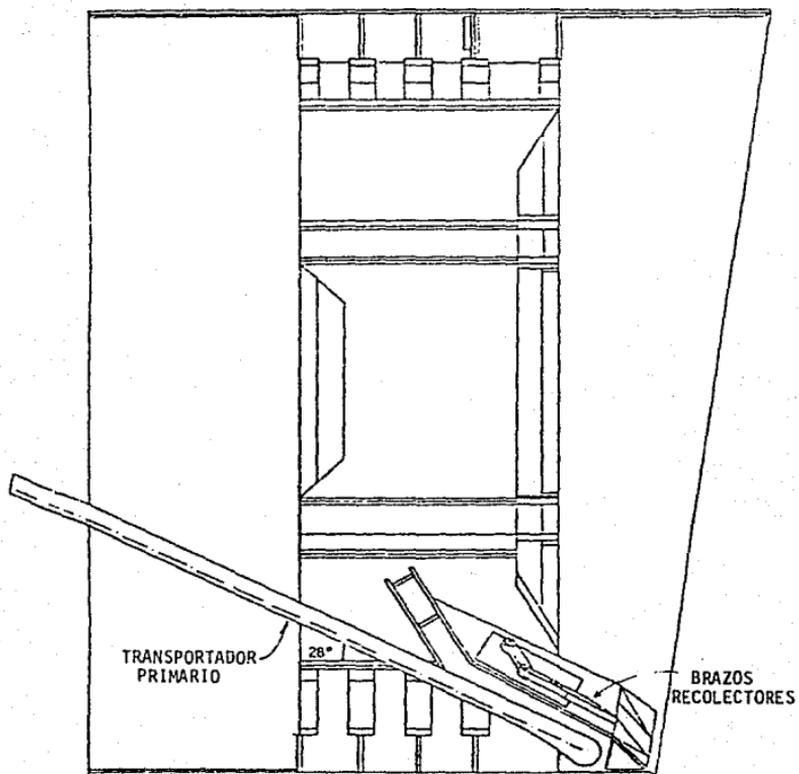


FIG. 4.2. CORTE DEL ESCUDO MOSTRANDO EL TRANSPORTADOR PRIMARIO Y LOS BRAZOS RECOLECTORES.

SISTEMA DE BRAZOS  
RECOLECTORES DE REZAGA

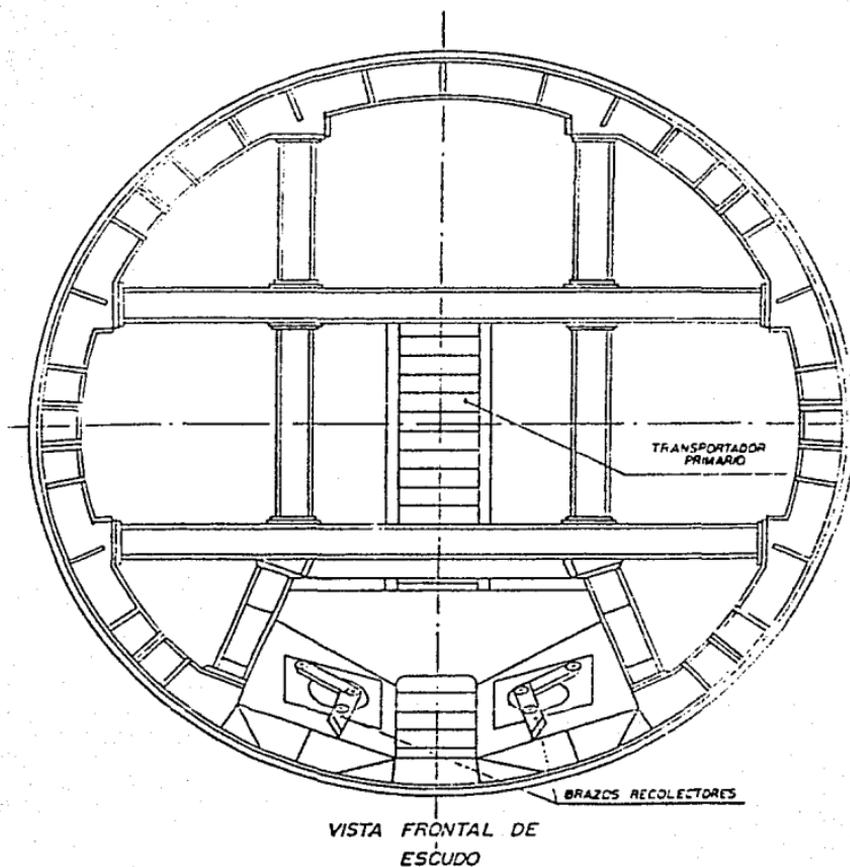
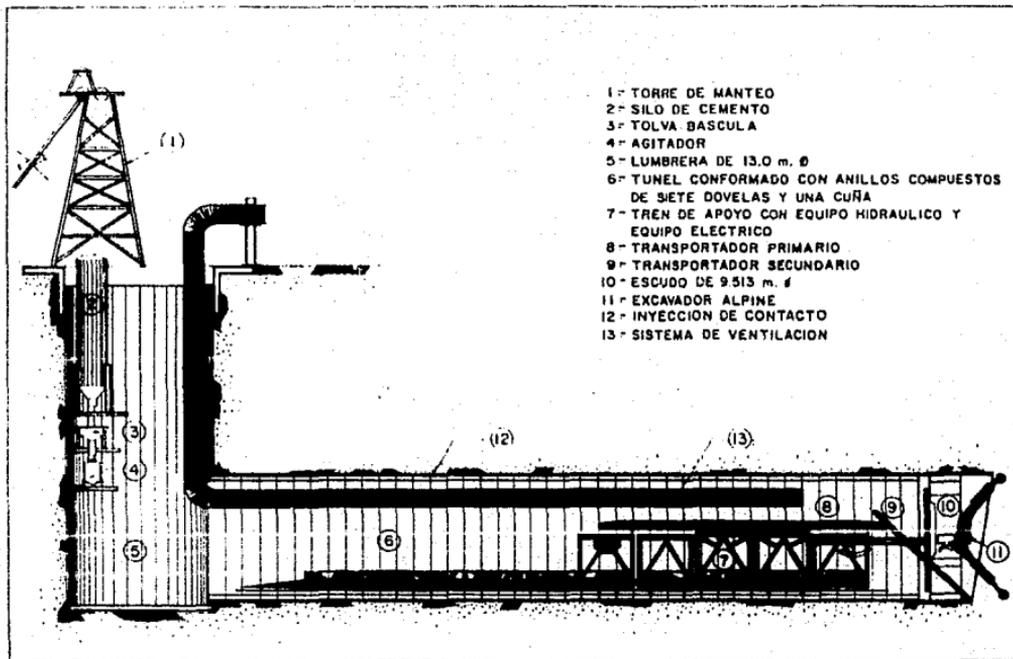


FIG. 4.3. VISTA FRONTAL DEL ESCUDO MOSTRANDO EL TRANSPORTADOR PRIMARIO Y LOS BRAZOS RECOLECTORES.



- 1- TORRE DE MANTEO
- 2- SILO DE CEMENTO
- 3- TOLVA BASCULA
- 4- AGITADOR
- 5- LUMBREHA DE 13.0 m. Ø
- 6- TUNEL CONFORMADO CON ANILLOS COMPUESTOS DE SIETE DOVELAS Y UNA CUÑA
- 7- TREN DE APOYO CON EQUIPO HIDRAULICO Y EQUIPO ELECTRICO
- 8- TRANSPORTADOR PRIMARIO
- 9- TRANSPORTADOR SECUNDARIO
- 10- ESCUDO DE 9.513 m. Ø
- 11- EXCAVADOR ALPINE
- 12- INYECCION DE CONTACTO
- 13- SISTEMA DE VENTILACION

FIG. 4.4. CORTE ESQUEMATICO MOSTRANDO EL ESCUDO CON SU TREN DE EQUIPO Y LAS DIVERSAS INSTALACIONES DE TUNEL Y LUMBREHA.

POSICIONADOR DE DOVELAS  
DETALLE "A"

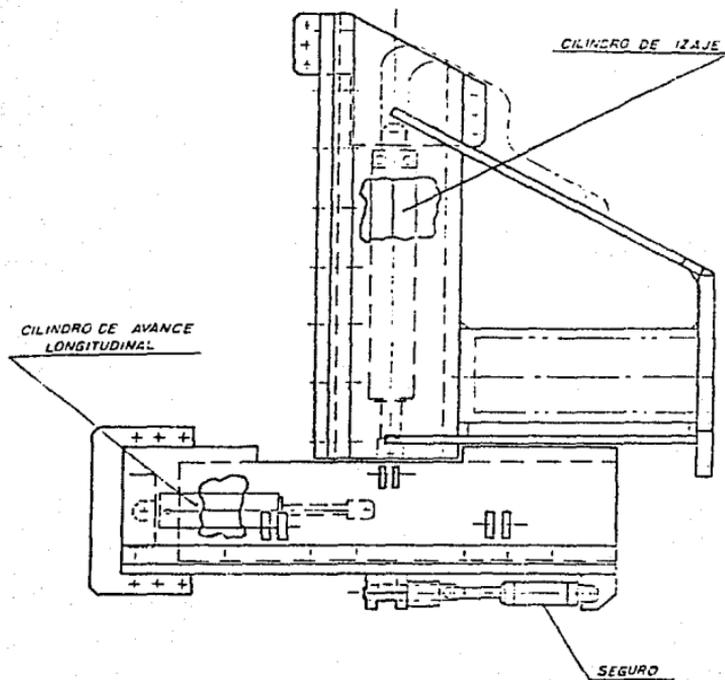


FIG. 4.5. VISTA LATERAL DEL POSICIONADOR DE DOVELAS  
MOSTRANDO LOS CILINDROS DE IZAJE, LEVANTE  
Y SEGURO.

POSICIONADOR DE DOVELAS  
DETALLE "A"

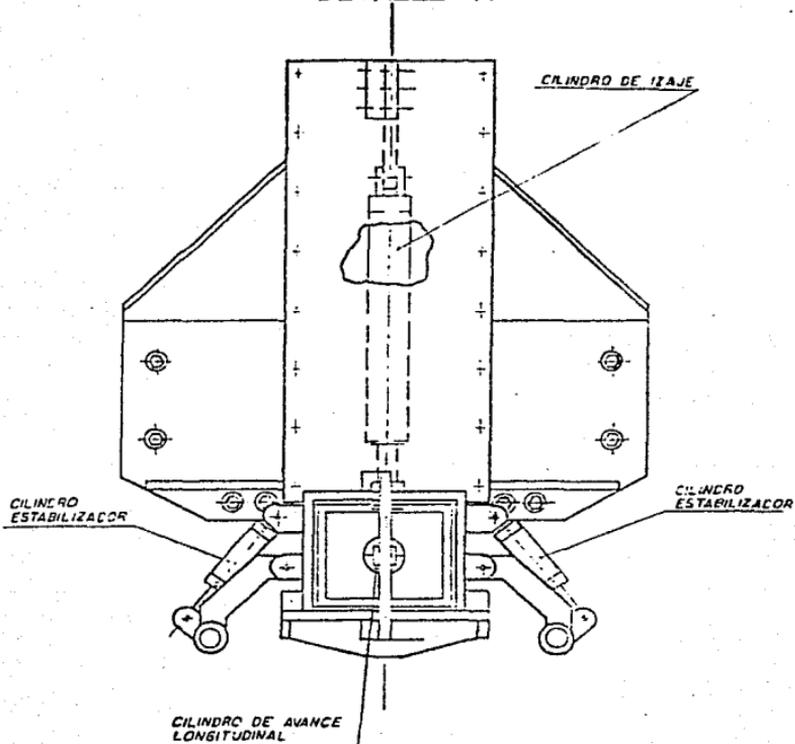


FIG. 4.6. VISTA FRONTAL DEL POSICIONADOR DE DOVELAS MOSTRANDO  
LOS CILINDROS ESTABILIZADORES, DE AVANCE LONGITUDINAL  
E IZAJE.

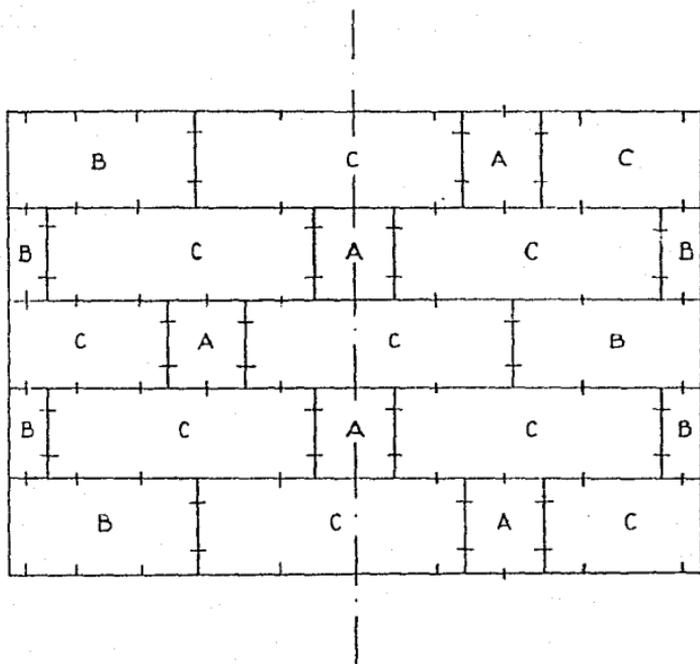


FIG. 4.7. PLANTA ESQUEMATICA DE LA COLOCACION Y DETALLES DE UNION DE LOS ANILLOS DE DOVELAS

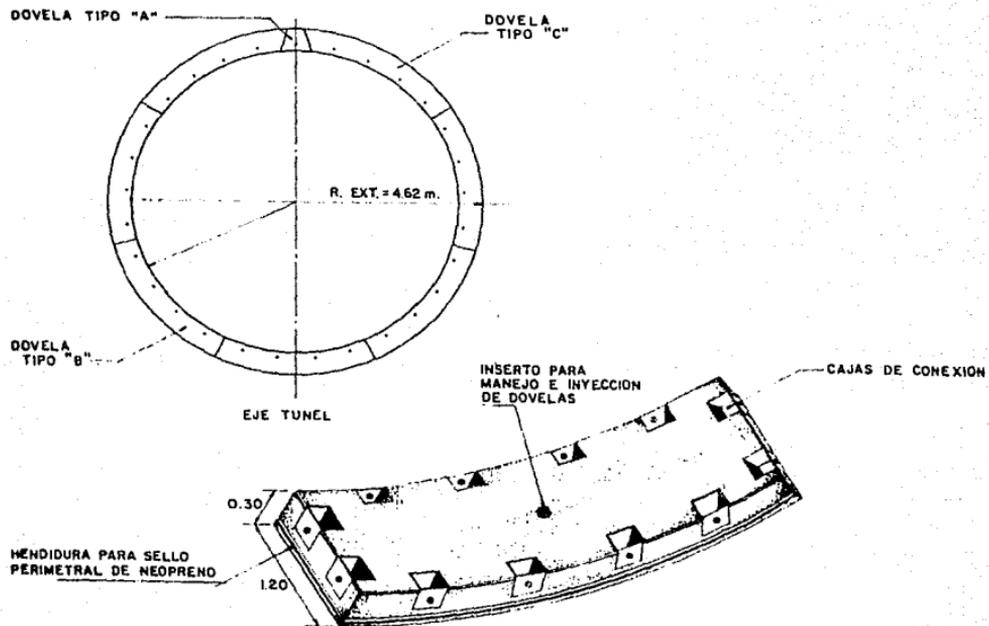
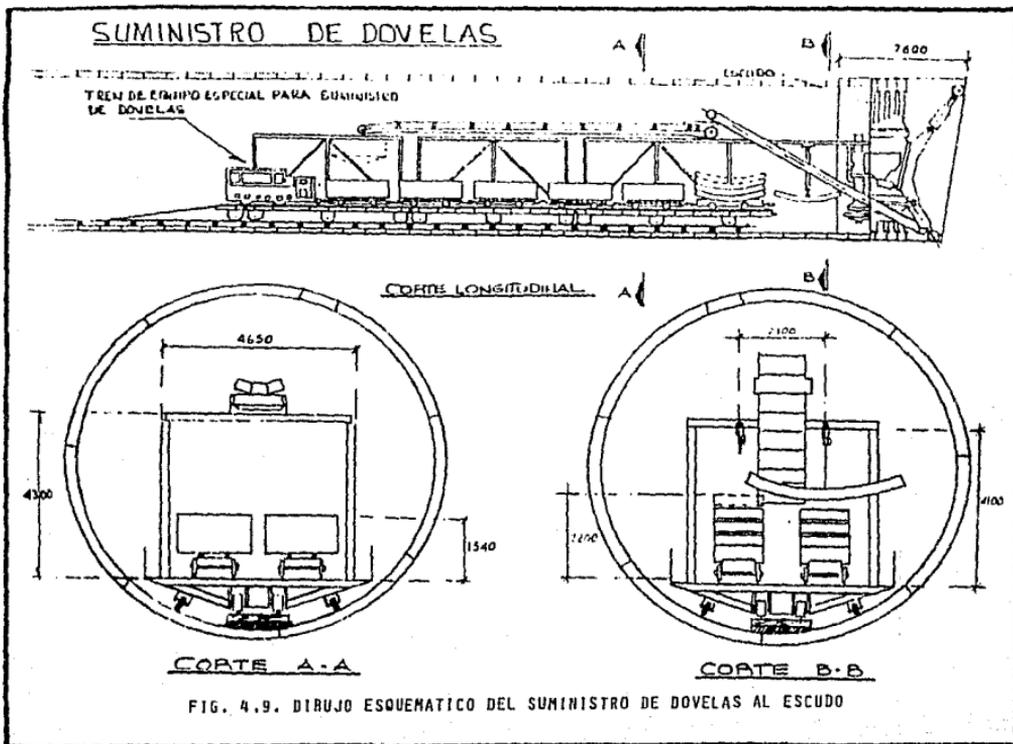


FIG. 4.8. CORTE TRANSVERSAL DE UN ANILLO CON LA DISTRIBUCION DE LAS DOVELAS E ISOMETRICO DE UNA DE ELLAS.



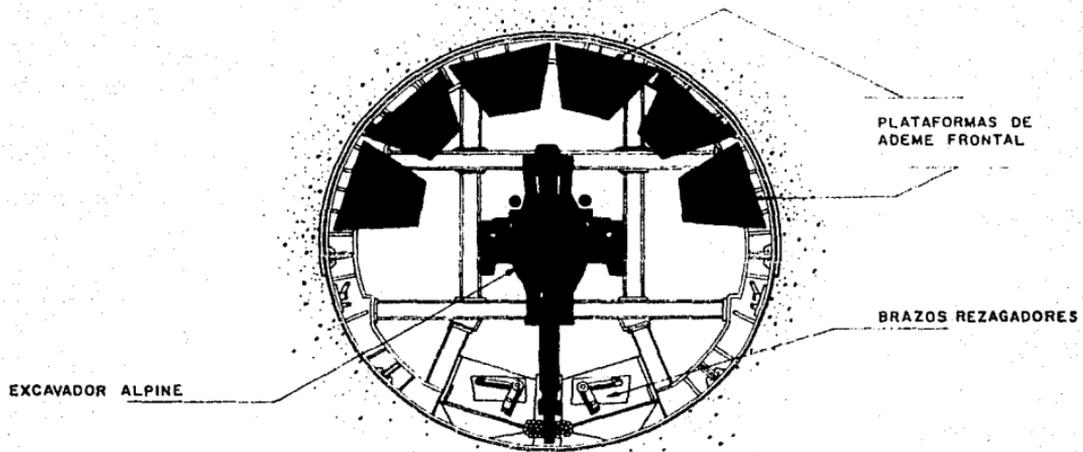


FIG. 4.10 VISTA FRONTAL DEL ESCUDO CON SUS PLATAFORMAS DE ADEME

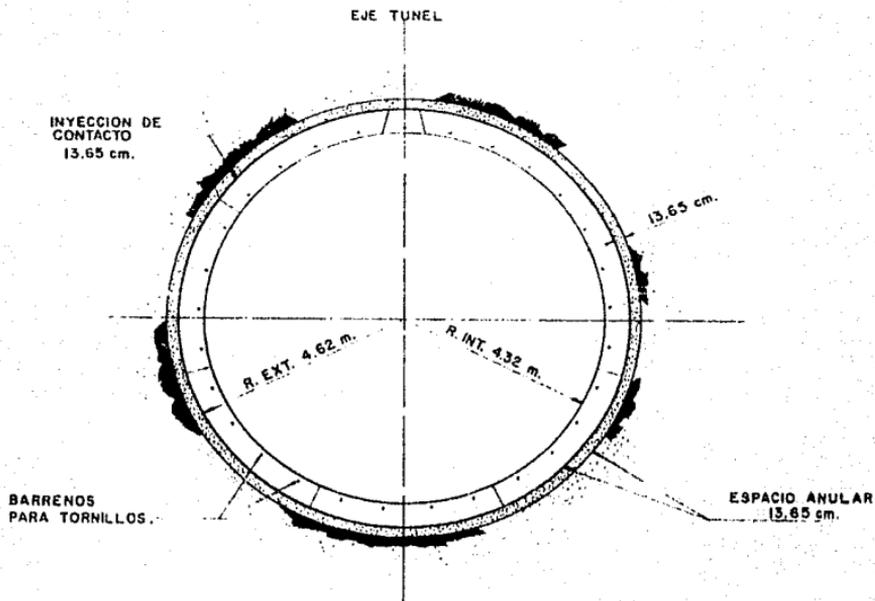


FIG. 4.11. CORTIC DEL TUNEL MOSTRANDO EL ANILLO Y EL ESPACIO ANULAR PARA LA INYECCION DE CONTACTO

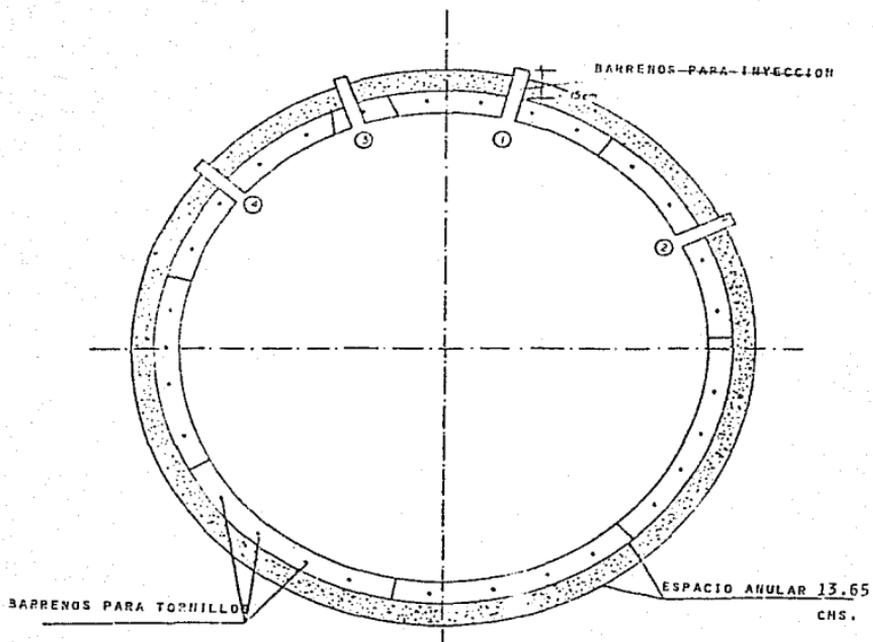
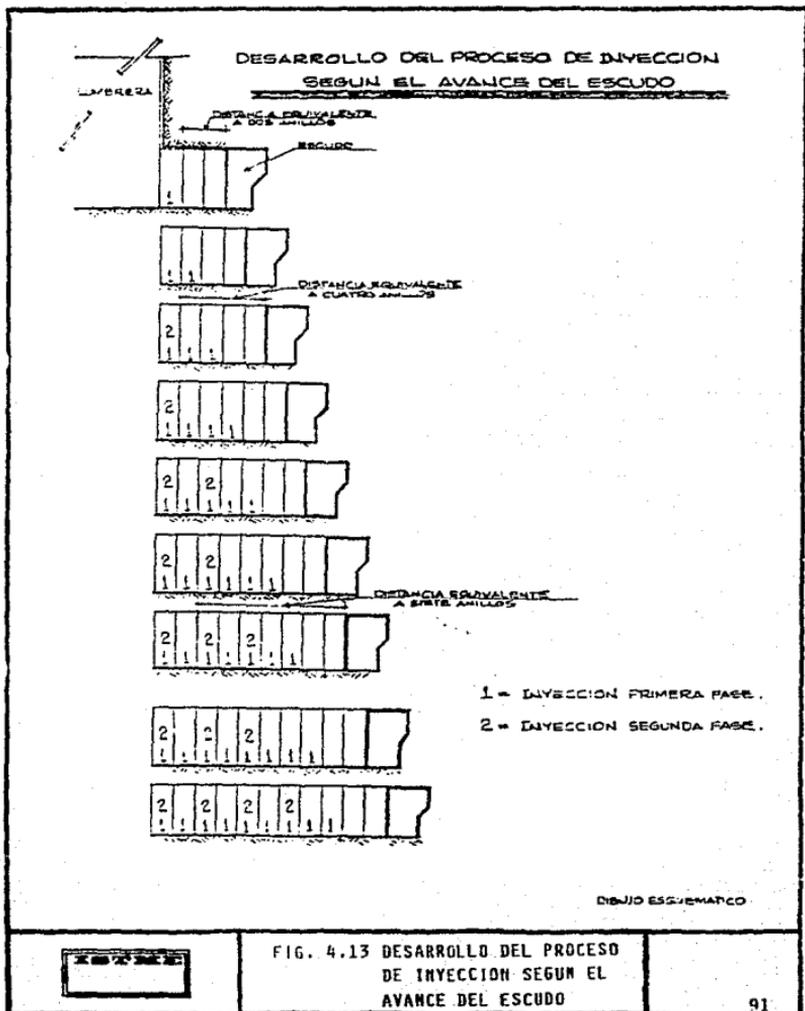
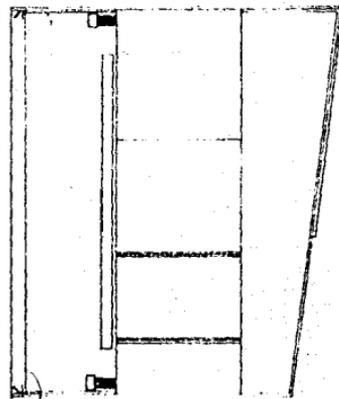
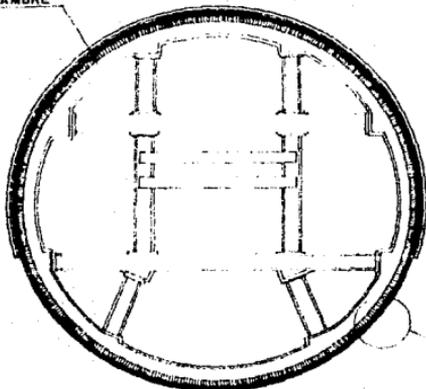


FIG. 4.J2. CORTE ESQUEMATICO DEL ANILLO CON LOS BARRENOS PARA INYECCION DE 1A. Y 2A. FASE



SELLO CON CEPILLO  
DE ALAMBRE



SELLO TIPO  
CEPILLO

CUBIERTA DEL  
HULE ESPONJA

SELLO DE HULE

PROTECCION P/SELLO

PLACA P/SOPORTE  
DE SELLO



HULE ESPONJA  
P/SOPORTE DEL SELLO

FIG. 4.14 DETALLI DE LOS SELLOS PERIFERIALES EN EL FALDON DEL ESCUDO .

ARREGLO PARA PRIMEROS 180 Mts.

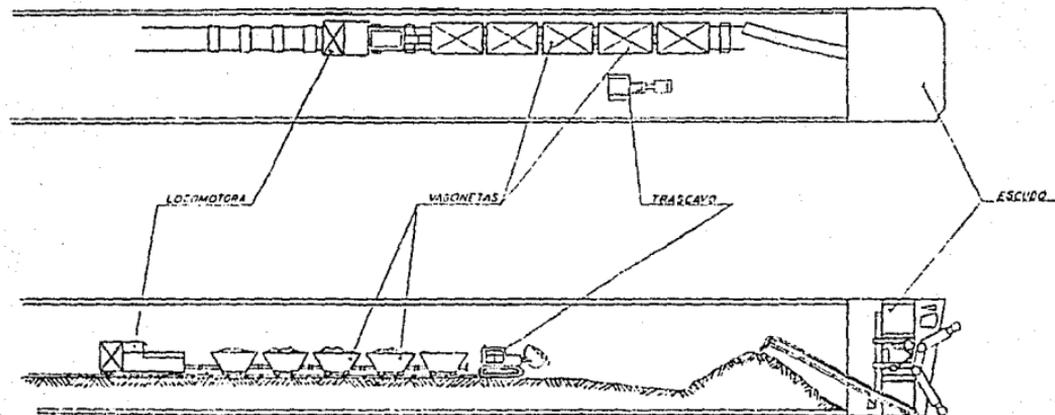


FIG. 4.15 DIBUJO ESQUEMATICO DEL ARREGLO PARA LA EXCAVACION DE LOS PRIMEROS 180 Mts.

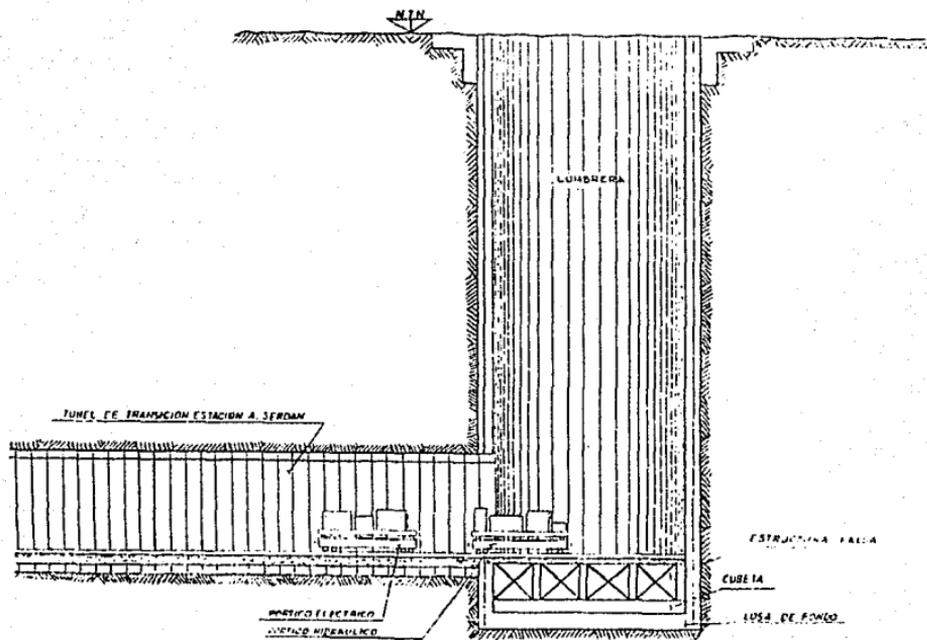


FIG. 4.16 INSTALACIONES EN EL FONDO DE LA LUJBRERA PARA ALOJAR LOS PORTICOS EN EL TUNEL DE TRANSICION

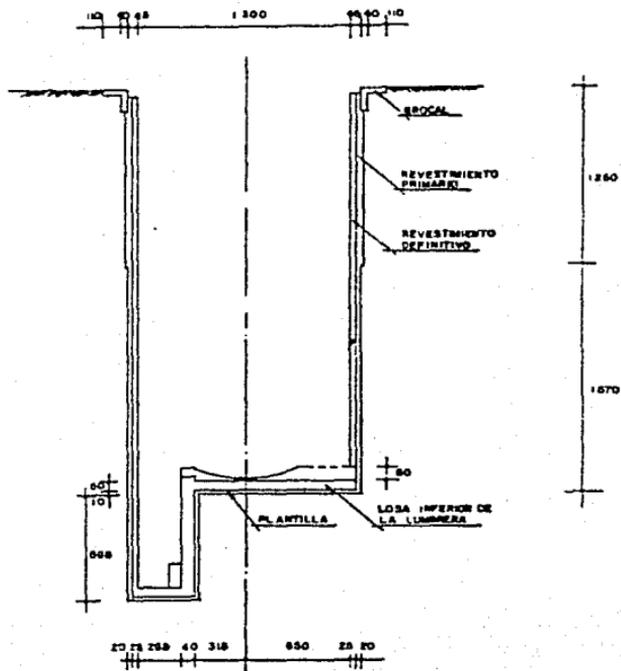


FIG. 4.17 CORTE DE LA LUMBRERA CON LA UBICACION DE LA ALCANCIA PARA EL MONTEO Y CUBETA PARA EL ARMADO DEL ESCUDO .

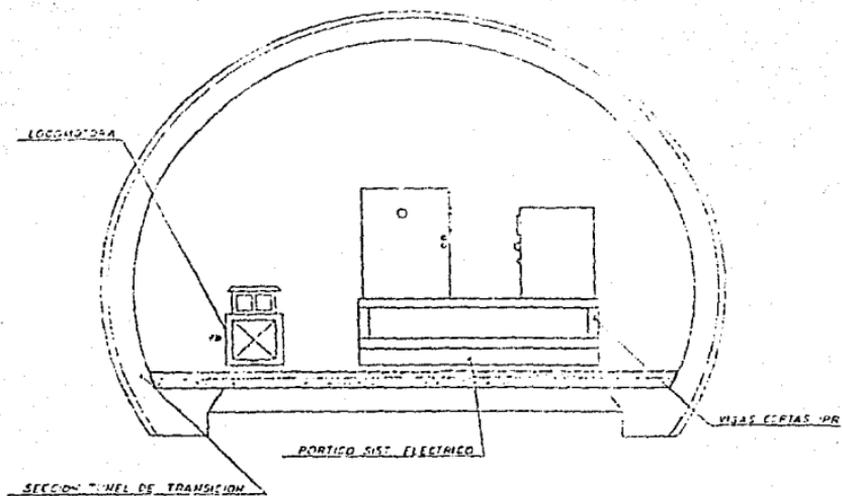


FIG. 4.18 INSTALACION DE LOS PORTICOS HIDRAULICO Y ELECTRICO EN EL TUNEL DE TRANSICION

SECCIONES DEL CUERPO DEL ESCUDO

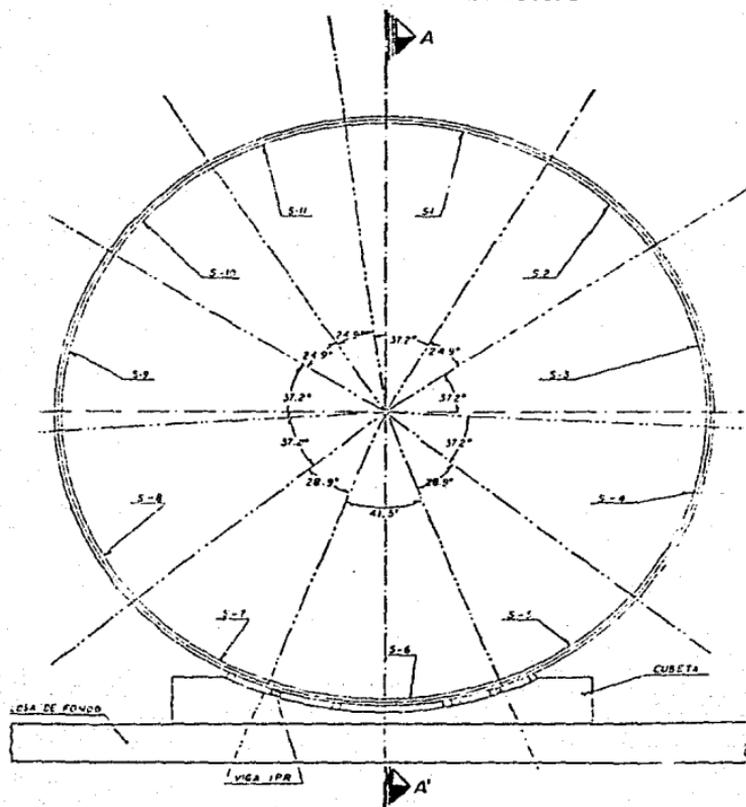


FIG. 4.19 SECCIONES DEL CUERPO DEL ESCUDO PARA SU ENSAMBLE EN EL FONDO DE LA LUNBRERA

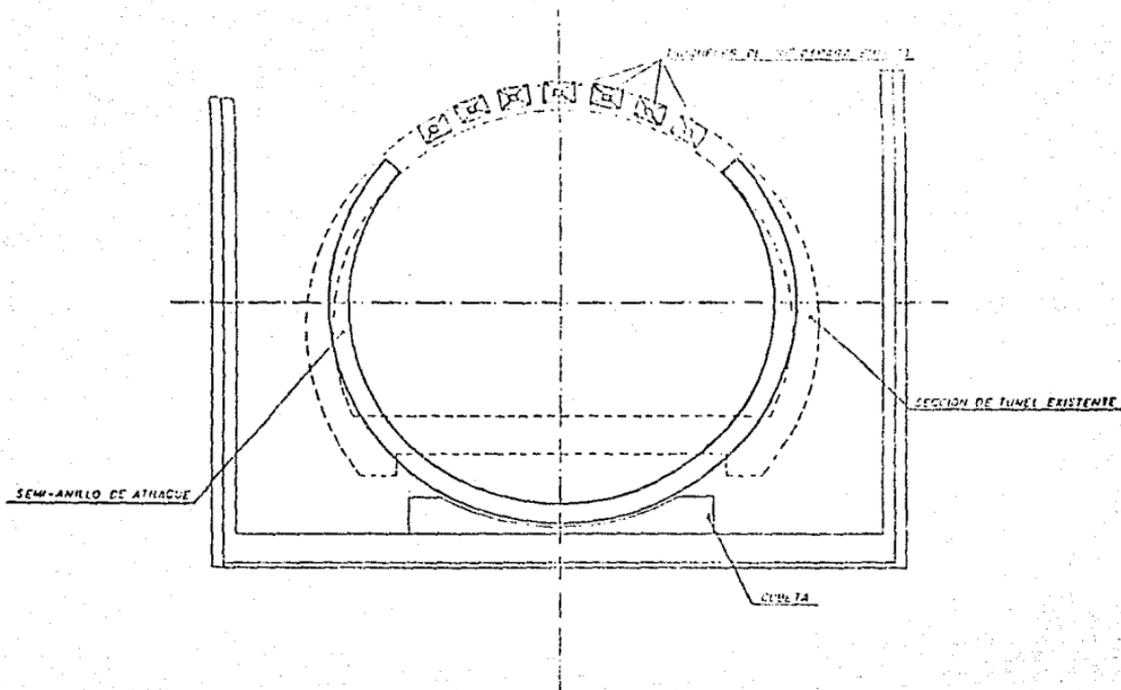
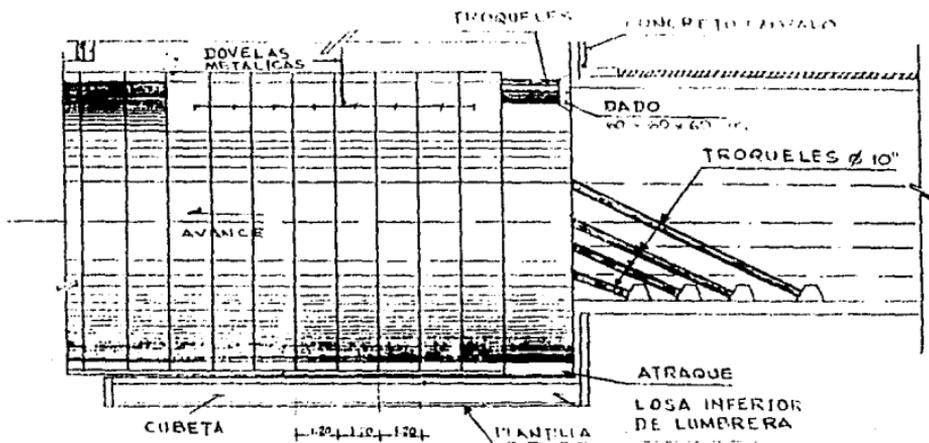


FIG. 4.20 ESTRUCTURA DE ATRAQUE .



FIG. 4.21 DISPOSICION DE ATRAQUE  
Y DOVELAS EN ZONA DE  
LUMBRERA



CORTE C-C

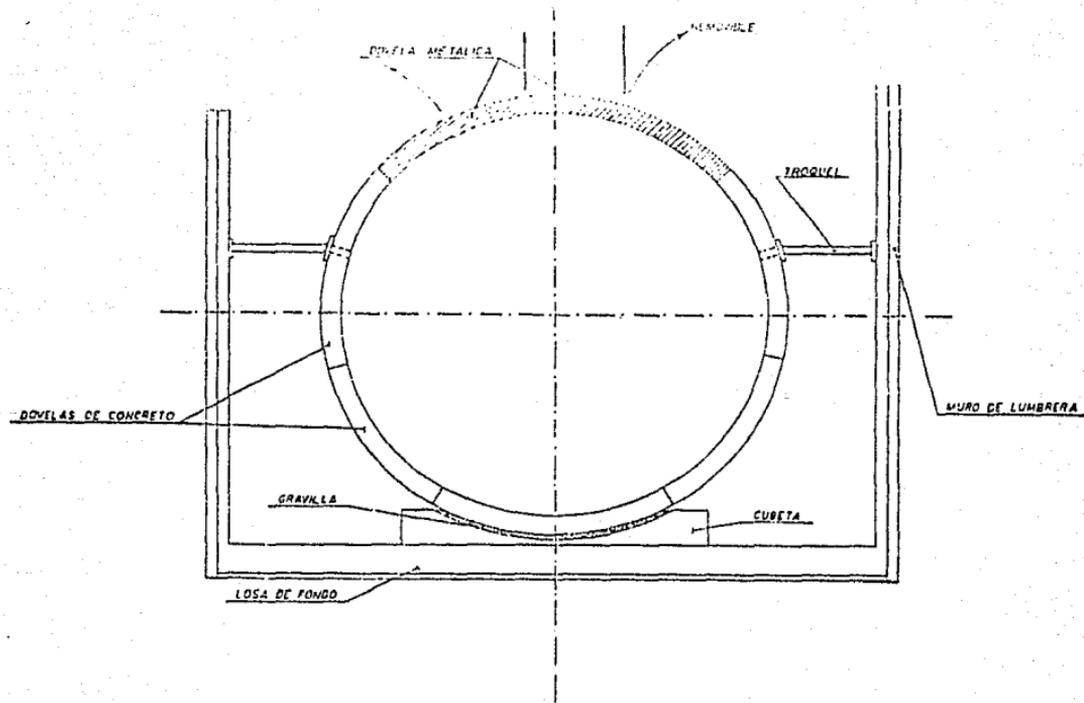


FIG. 4.22 ESTRUCTURA DE ATRAQUE CON DOVELAS REMOVIBLES EN LA PARTE SUPERIOR.

CONCEPTO		MINUTOS													
		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140
1	EXCAVACION	0	25	53.50	82.50	111.40									
2	REZAGA	0	28.50	57.50	86.4	115.20									
3	EMPUJE			5		5		5		5		5			
4	COLOCACION DE DOVELAS	0	25								111.40				
5	INYECCION DE GRAVILLA	0	25		25		25		25				25		

FIG. 4.23 CICLO DE EXCAVACION PARA AVANCE DE PROYECTO DE 20 M/DIA.

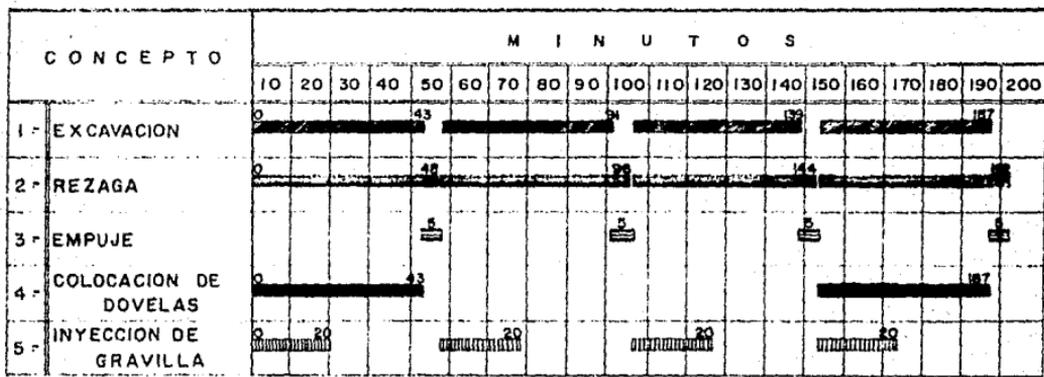
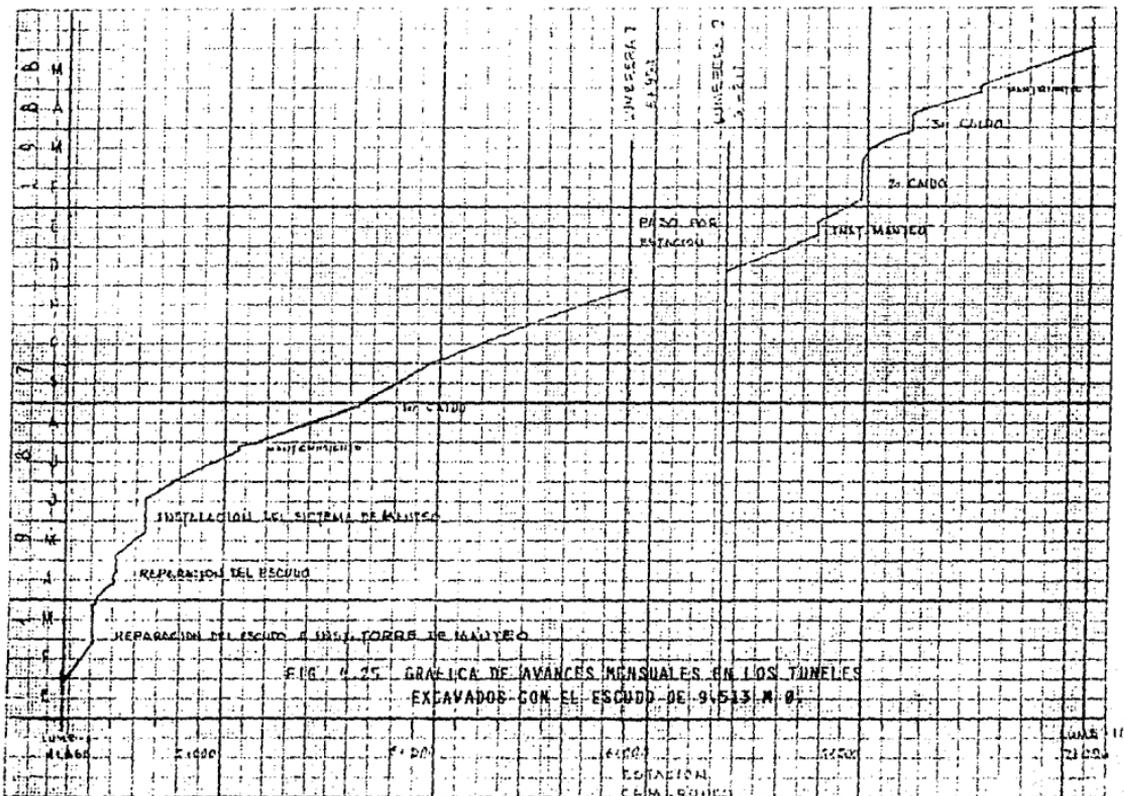


FIG. 4.24 CICLO DE EXCAVACION PARA AVANCE REAL DE 12 M/DIA



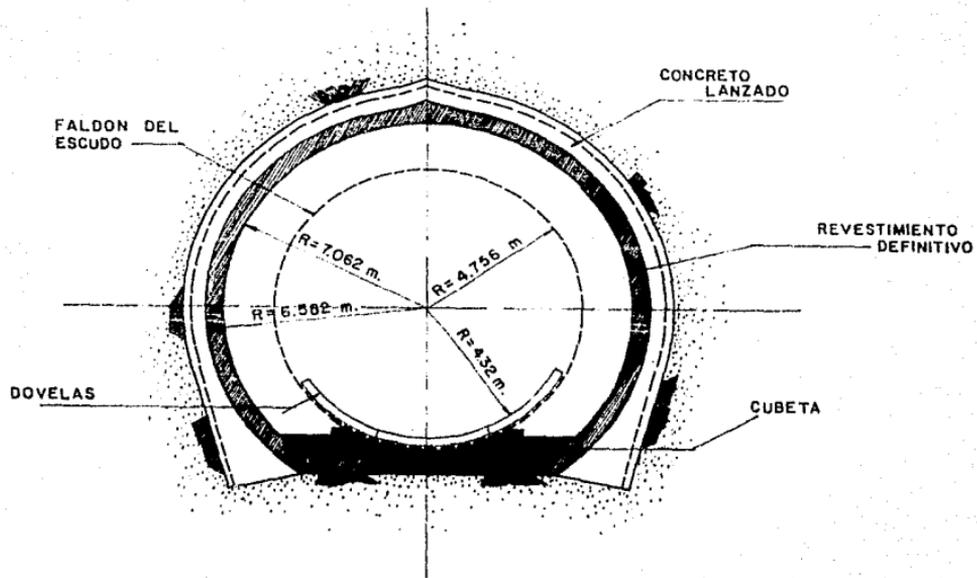


FIG. 4.26 VISTA ESQUEMATICA DE LA UBICACION DEL ESCUDO A SU PASO POR LA ESTACION CAMARONES.



# INFORMACION DE ALINEAMIENTO, ELEVACION, GIRO Y PENDIENTE DEL ESCUDO

FIG. 4.27

FRETE 27-211  
 NO. ANILLO 500  
 CADENAMIENTO 678931692  
 LUMBRERA 19  
 REPORTE 27-2-115  
 HORA 11:00  
 TIPO HOSPITAL  
 FECHA 15-1-88

## DATOS DE LA PLOMADA EN EL ESCUDO

GIRO 1° 18' 30" (30' 25")  
 PENDIENTE REAL 10.23%  
 PENDIENTE PROYECTO 11.24%  
 DIFERENCIA 1.01%

## DATOS DE ELEVACION Y ALINEAMIENTO SISTEMA DIRECTO (TRANSITO Y NIVEL)

### ALINEAMIENTO ESCUDO

IZQUIERDA	DERECHA
ATRAS = 40	ATRAS = -
ADELANTE = 40	ADELANTE = -
TENDENCIA =	%

### ELEVACION ESCUDO

ELEV. REAL =	18.504
ELEV. PROJ. =	18.520
DIFERENCIA	
ARRIBA =	ABAJA = 2

## SISTEMA LASER

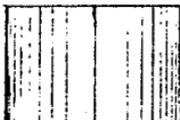
### ALINEAMIENTO ESCUDO

TARJETA TRASERA	
IZO. =	DER. =
TARJETA DELANTERA	
IZO. =	DER. =
TENDENCIA =	%

### ELEVACION ESCUDO

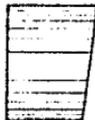
TARJETA TRASERA	
ARRIBA	ABAJO =
TARJETA DELANTERA	
ARRIBA =	ABAJO =
PENDIENTE =	%

### AVANCE



ALINEAMIENTO PROMEDIO

### AVANCE



ELEV. Y PEND. PROM.

NOTAS: \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_



CONETRO

FIG. 4.27 A

## INFORMACION DE ADELANTO LADEO Y ENDOVELADO

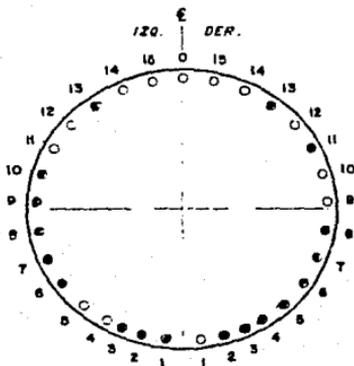
REPORTO 247000  
ANILLO 560

HORA 1:40 FECHA 10-1-88  
ESTACION 61873 642

DISTANCIAS DEL ANILLO N. AL PLANO IX

	ARRIBA	ABAJO
15 IZO. — 1 IZO.	70	—
15 DER. — 1 DER.	70	—
	IZQUIERDO	DERECHO
9 IZO — 9 DER.	10	—

GATO No.	IZQUIERDA	DERECHA	ADELANTO IZQUIERDO	ADELANTO DERECHO
0	1330	1330	—	—
18	1340	1330	—	—
13	1340	1320	10	—
11	1340	1340	—	—
9	1350	1340	10	—
7	1350	1330	20	—
6	1340	1330	10	—
5	1330	1320	10	—
4	1320	1320	—	—
2	1310	1310	—	—
1	1310	1310	—	—



### DATOS COMPLEMENTARIOS DEL EMPUJE

#### PRESIONES EMPLEADAS

MINIMA \_\_\_\_\_

MAXIMA 2400

#### PENDIENTES:

MINIMA \_\_\_\_\_

MAXIMA + 0.12 %

#### LONGITUD DE VASTAGOS

0E 1330 1 1310 DIR. 20

9 IZO. 1350 9 DER. 1340 DIR. 10

- GATOS USADOS EN EL EMPUJE
- ⊗ GATOS USADOS OCASIONALMENTE
- GATOS NO USADOS

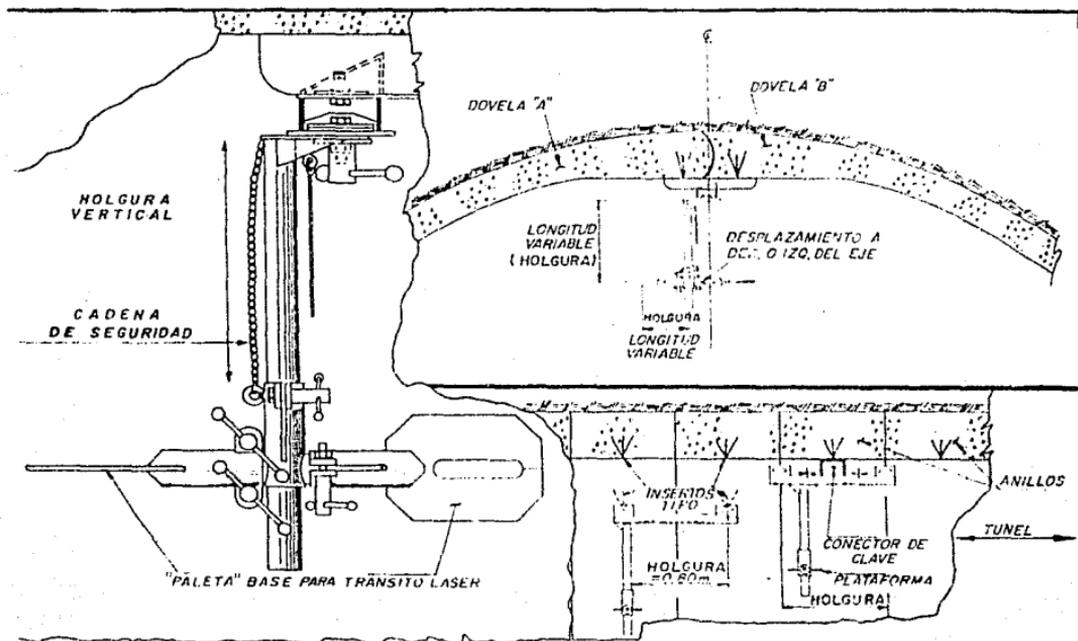


FIG. 4.28 **FIJACION Y DETALLE DE LA ESTRUCTURA DE SUSPENSION PARA TEODOLITO LASER.**

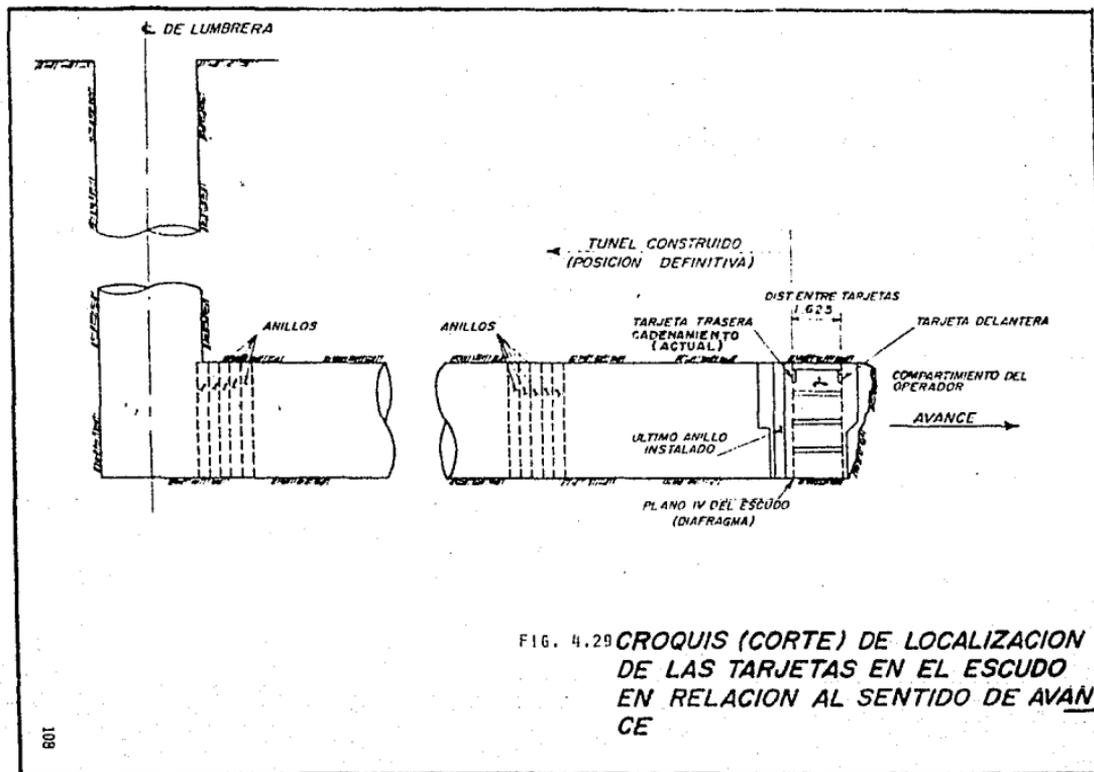
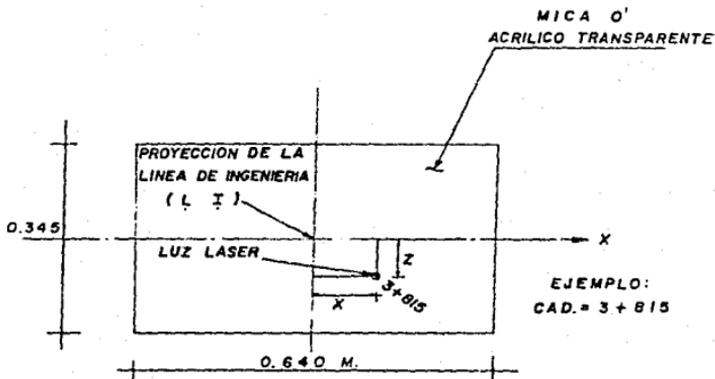


FIG. 4.29 **CROQUIS (CORTE) DE LOCALIZACION DE LAS TARJETAS EN EL ESCUDO EN RELACION AL SENTIDO DE AVANCE**



**FIG. 4.30 LOCALIZACION DE PUNTO SOBRE LAS TARJETAS DE CONTROL EN BASE A DIFERENCIA DE.**

**COORDENADAS: LUZ LASER — CAD. ACTUAL ESCUDO**

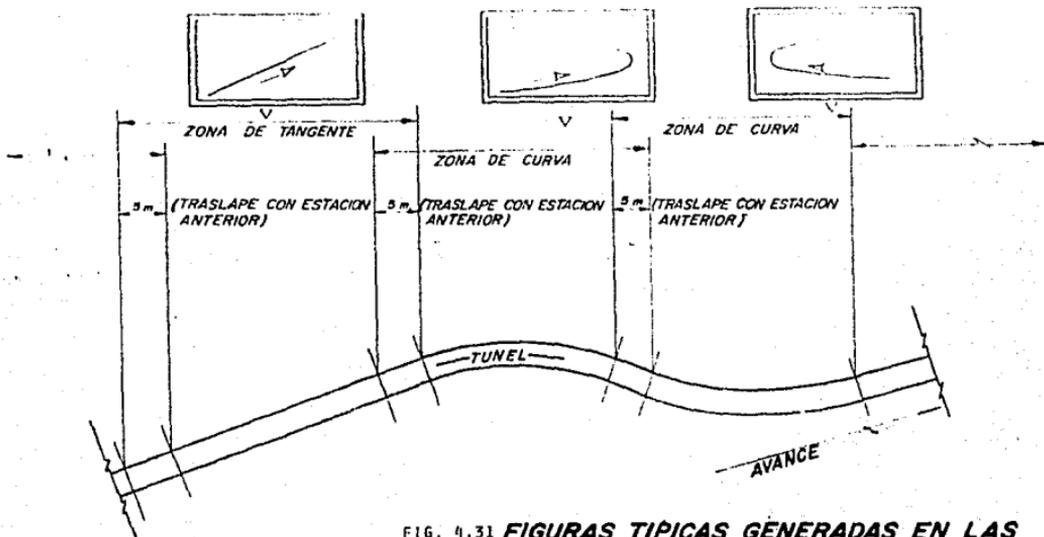


FIG. 4.31 **FIGURAS TÍPICAS GENERADAS EN LAS TARJETAS LASER A CONSECUENCIA DE LA SINUSOIDALIDAD DEL TRAZO DEL EJE DE PROYECTO DEL TUNEL RESPECTO DEL RAYO LASER**

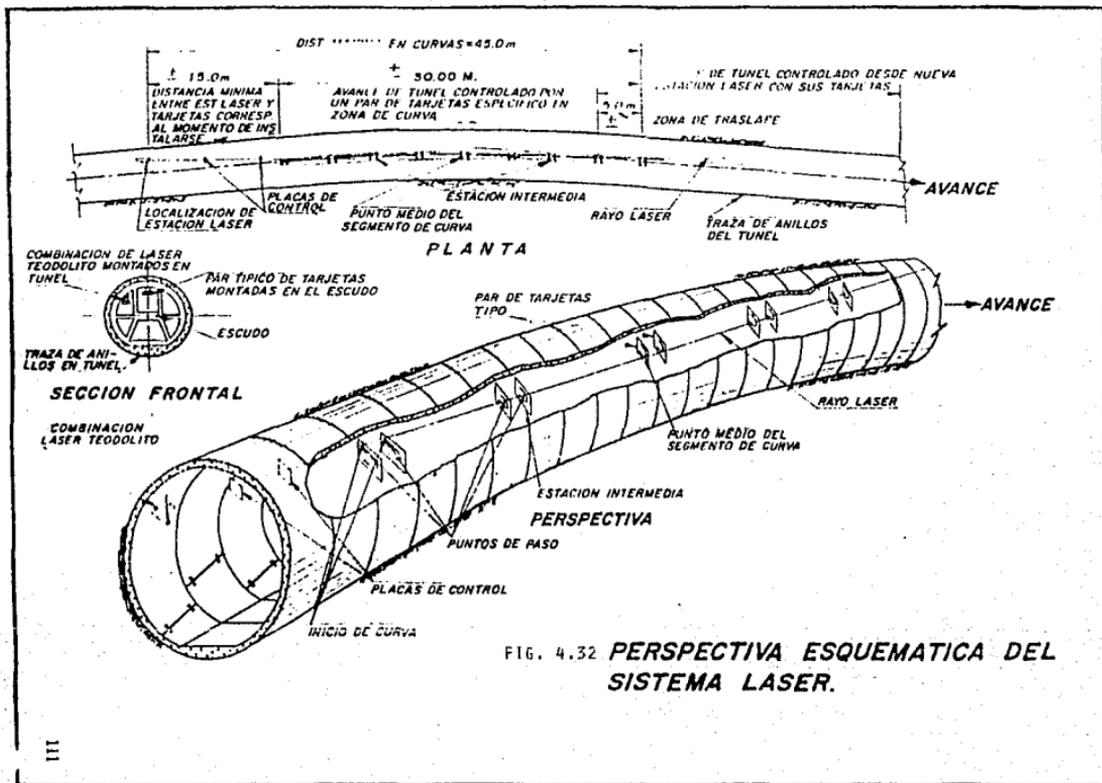
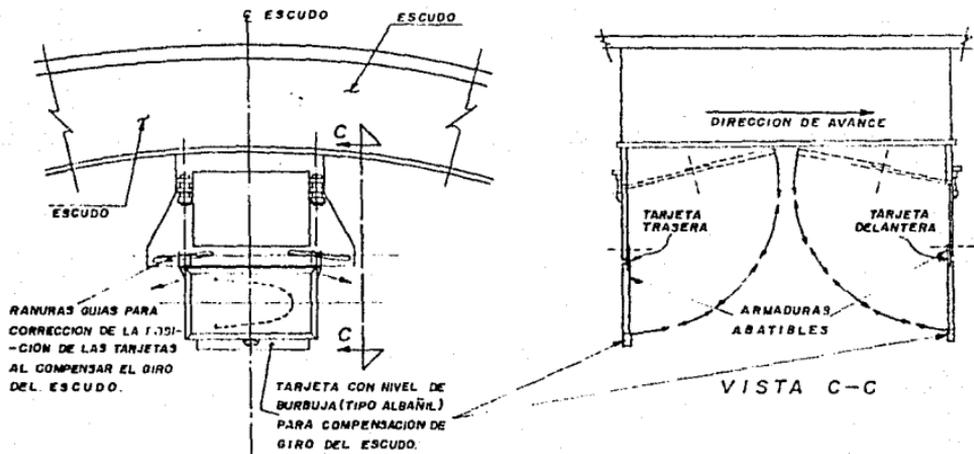


FIG. 4.32 PERSPECTIVA ESQUEMATICA DEL SISTEMA LASER.



ELEVACION DE LAS TARJETAS

FIG. 4.33 METODO DE COMPENSACION DEL GIRO DEL ESCUDO.

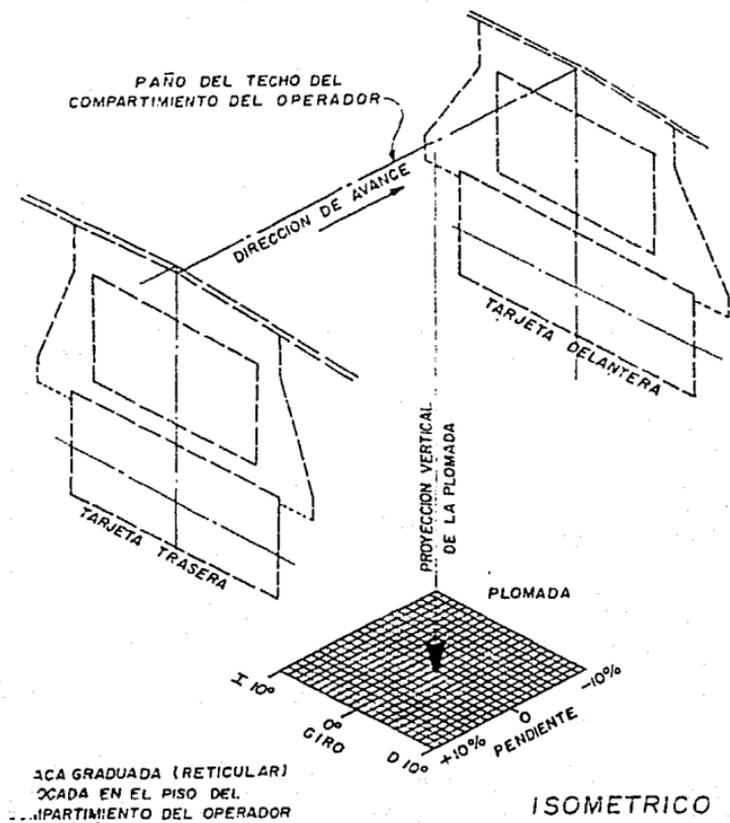


FIG. 4.34 PLACA Y PLOMADA PARA EL CONTROL DE GIRO Y PENDIENTE DEL ESCUDO.

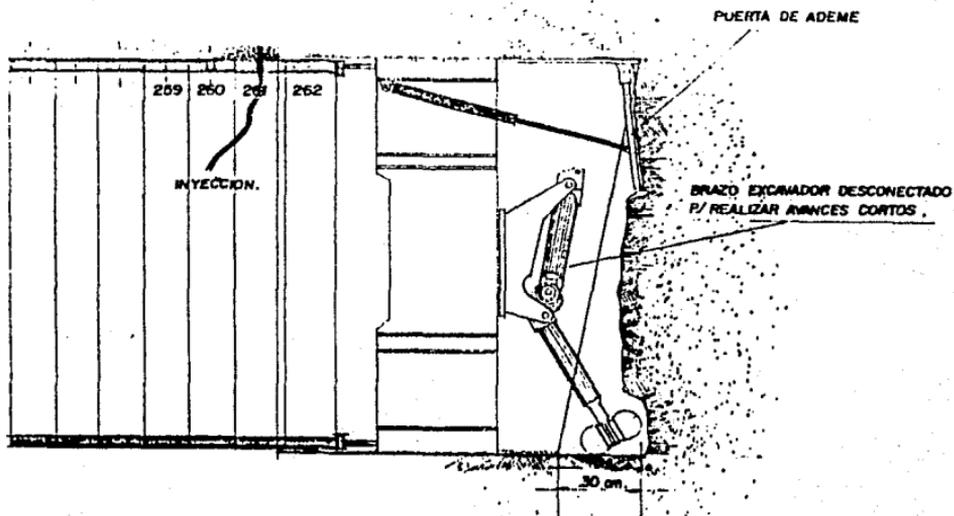


FIG. 4.35 PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO RESTRINGIDO USANDO UN SOLO BRAZO DE CORTE Y LAS PLATAFORMAS DE ADEME .

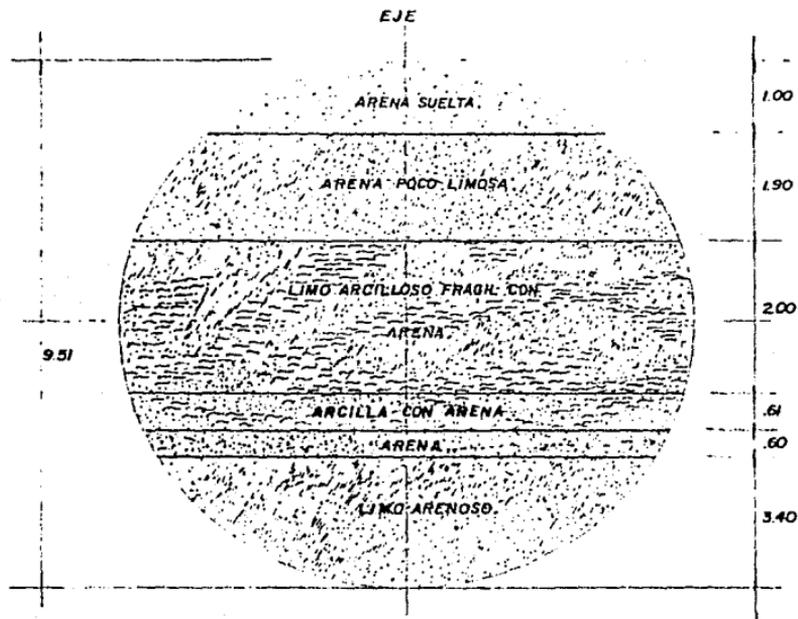


FIG. 4.36. PERFIL ESTRATIGRAFICO DE LA SECCION  
DEL DIA 6 DE FEBRERO 88'

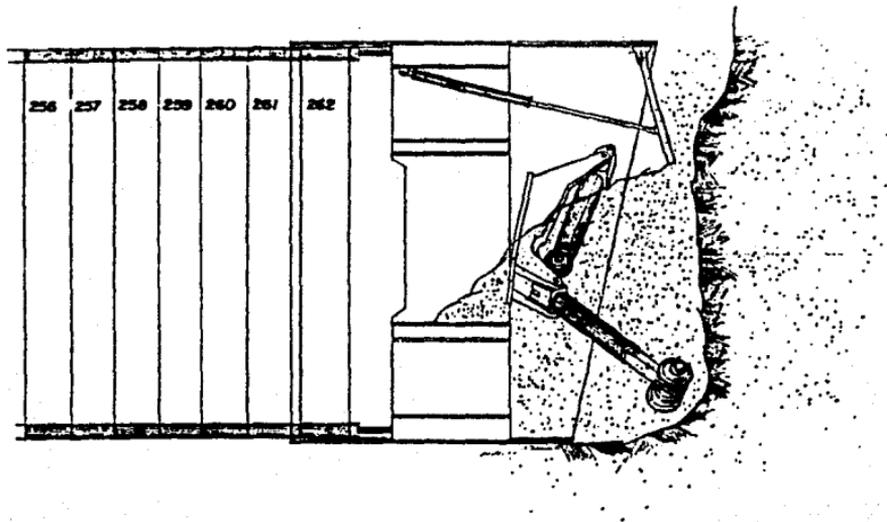


FIG. 4.37 FORMA EN LA QUE QUEDO EL TALUD DESPUES  
DEL CAIDO

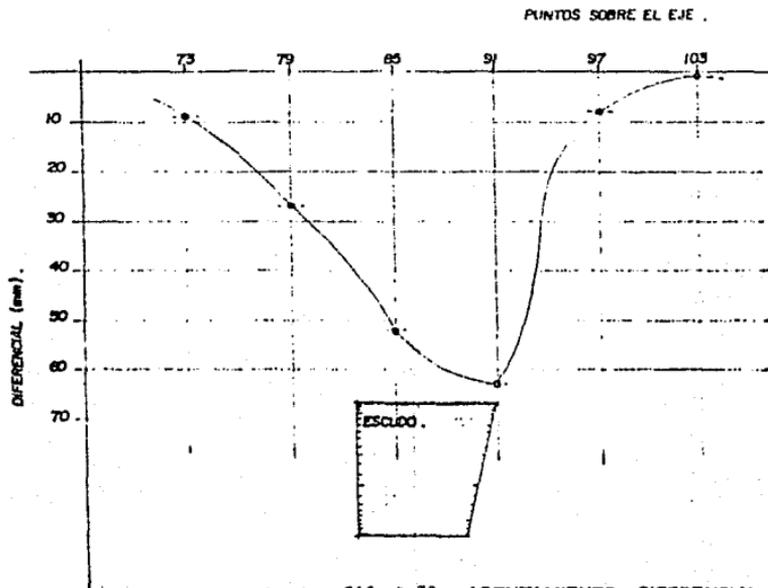


FIG. 4.38 ASENTAMIENTO DIFERENCIAL.  
 ANTES DEL CAIDO a 12 Hrs. DESPUES.

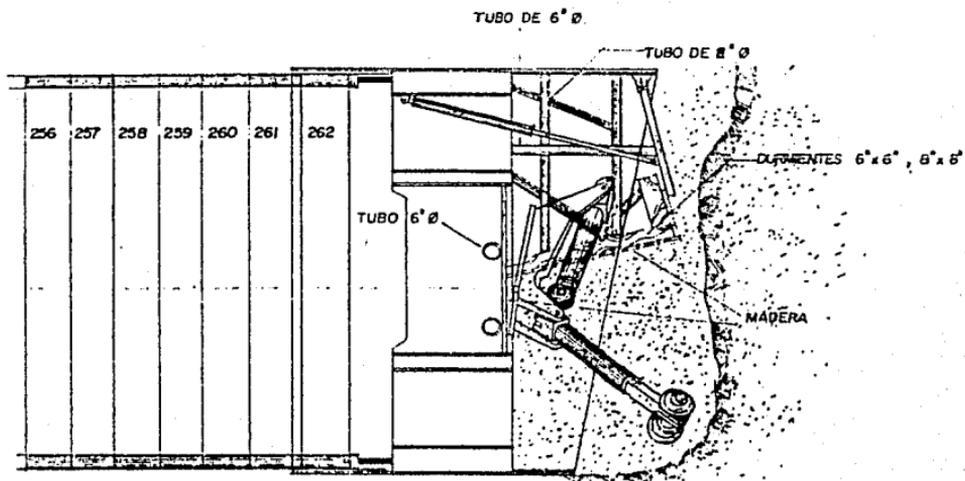
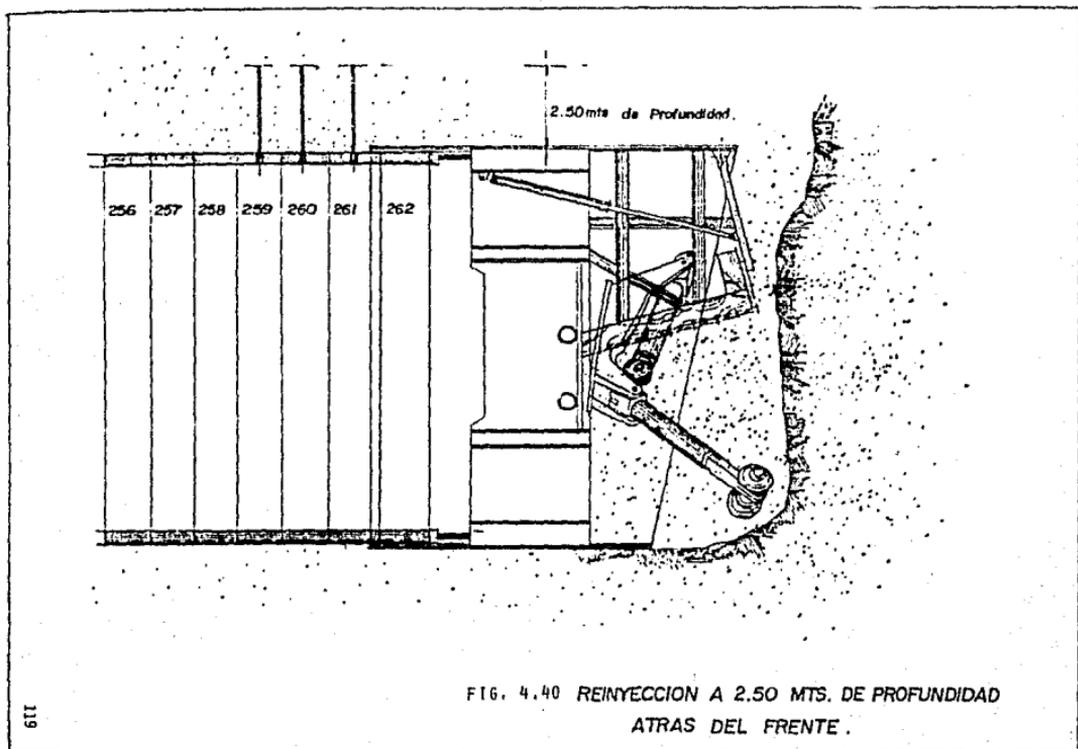
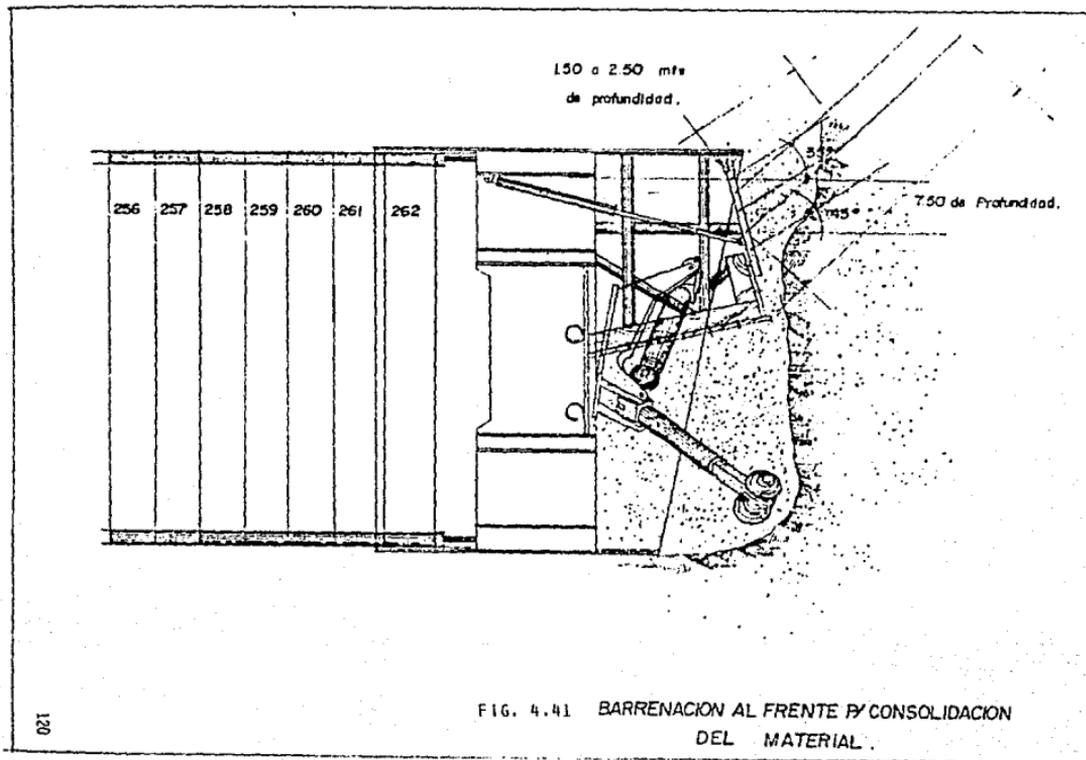
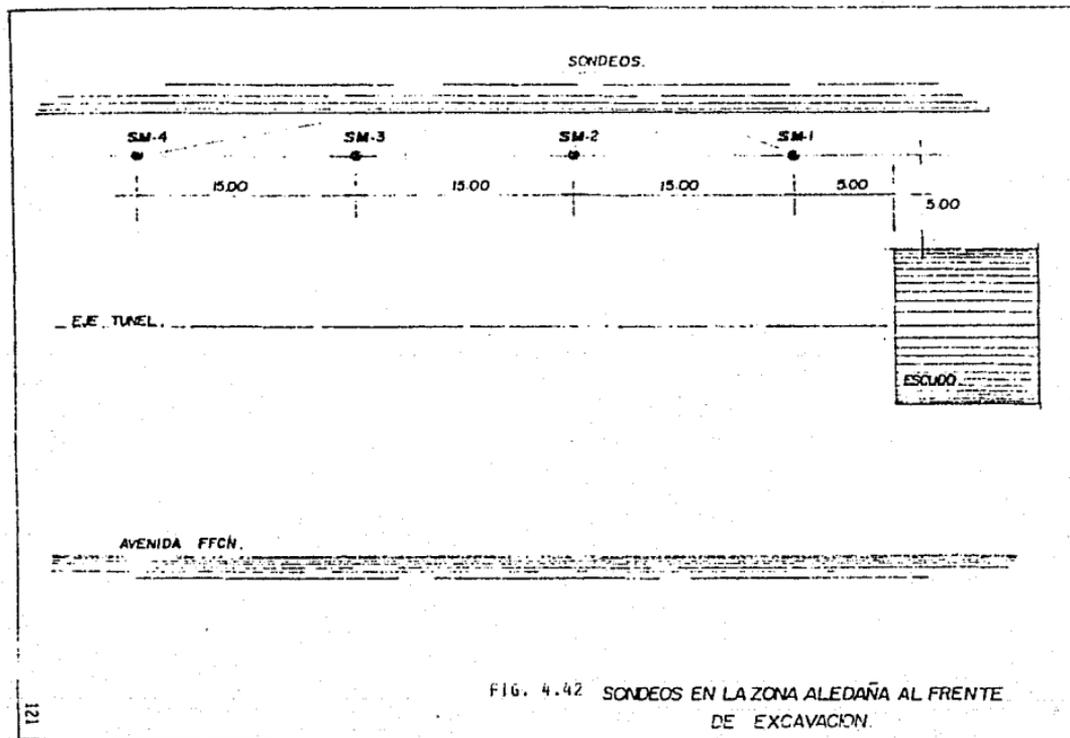


FIG. 4.39 ADEME DEL FRENTE Y ATROQUELAMIENTO DE COMPUERTAS.







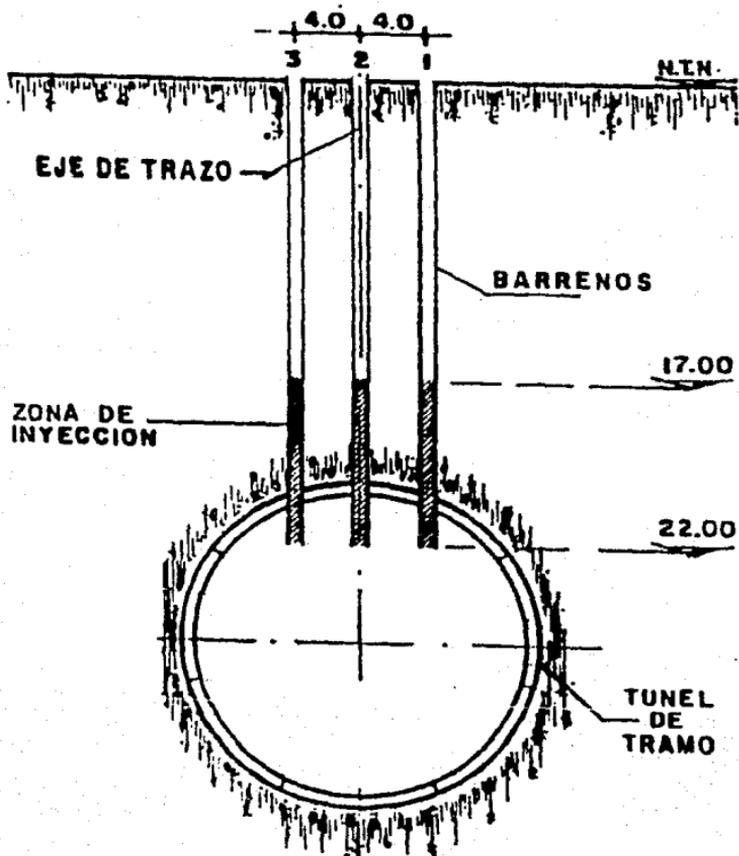


FIG. 4.43 DISPOSICION DE LAS AUREOLAS PARA INYECCION DE CONSOLIDACION DESDE LA SUPERFICIE TRAMO 9-11

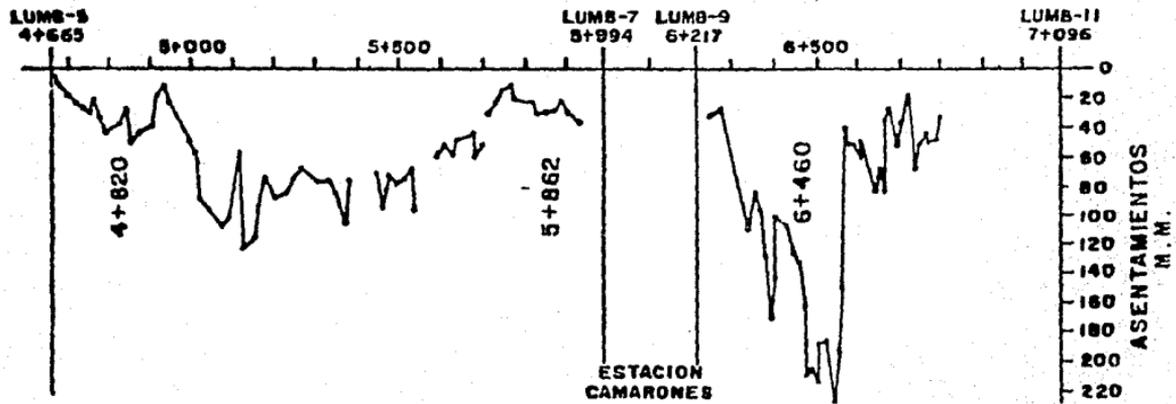


FIG. 5.1 VARIACION DE LOS ASENTAMIENTOS SUPERFICIALES MAXIMOS MEDIDOS SOBRE EL EJE DEL TUNEL A LO LARGO DEL TRAMO

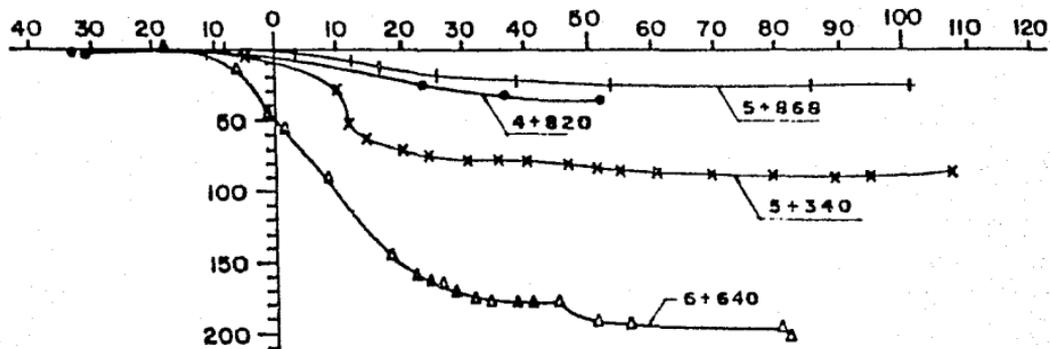


FIG. 5.2 VARIACION DE LOS ASENTAMIENTOS SUPERFICIALES MAXIMOS MEDIDOS SOBRE EL EJE DE ACUERDO AL PASO DEL ESCUDO POR LA SECCION .

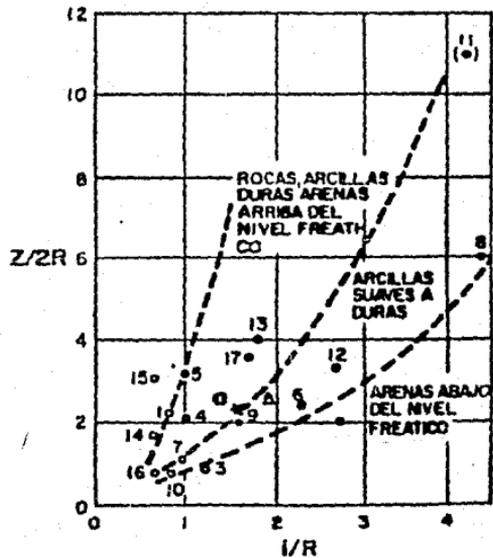
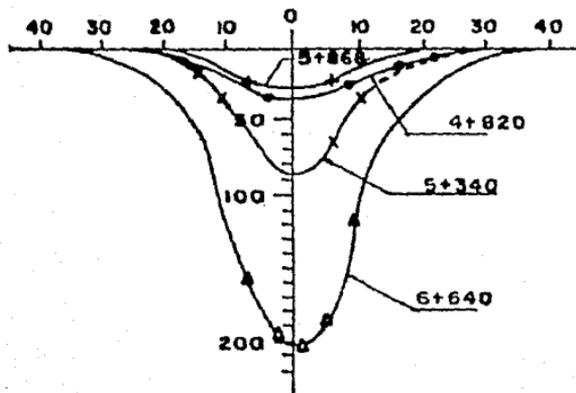


FIG. 5.3 CURVAS DE ASENTAMIENTOS SUPERFICIALES EN SECCIONES TRANSVERSALES.

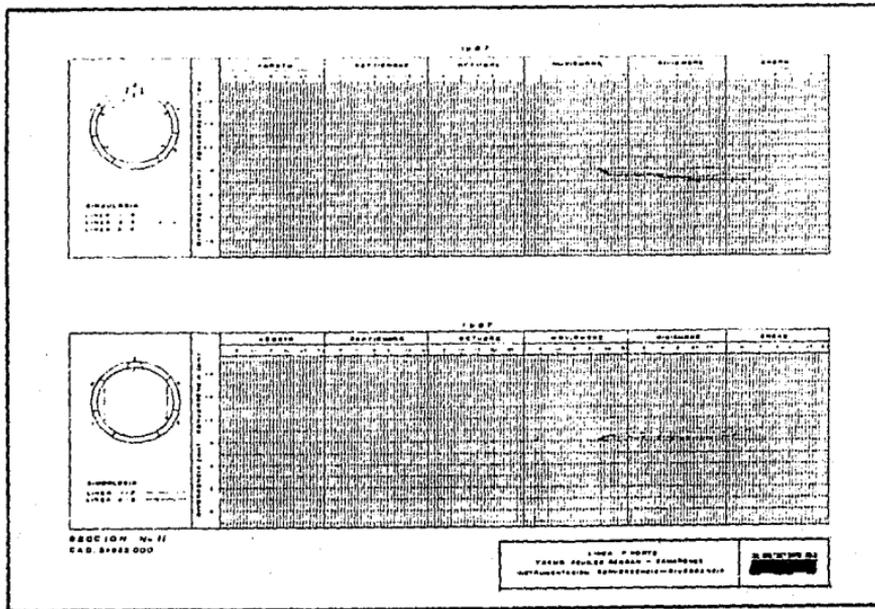


FIG. 5.4 MEDICIONES DE ONVERGENCIA EN LA SECCION No. 11  
DEL TRAMO AQUILES SERDAN - CAMARONES

## B I B L I O G R A F I A

- ASOCIACION MEXICANA DE INGENIERIA DE TUNELES Y OBRAS SUBTERRANEAS  
A. C., Trascendencia Futura, Estado del Arte y Desarrollo Histórico de las Obras Subterráneas en México. México, Septiembre 1983.
- CANSECO ARAGON, HECTOR, Escudo Excavador para Suelos Compactos en la Línea 7 Norte Norte del Metro. Artículo presentado en la Reunión de Túneles en Suelos Blandos organizado por AMITOS. México, D. F., Mayo 1987.
- CANSECO ARAGON, HECTOR Y SCHMITTER, J.J., Artículo presentado en la Reunión de ITA. Madrid, España, Junio 1988.
- COMETRO, SOLUM Y MOFAL, Diseño de un Escudo Rápido para la Línea 7 Norte del Metro. Informe. México, D. F., 1985.
- D.D.F., COVITUR, Estudio Sobre el Uso de Máquinas Perforadoras para Túneles en la Ciudad de México. México, D.F., 1987.
- FARJEAT PARAMO, DANIEL, Diseño y Construcción de Túneles, Excavación con Escudos. DECFI. México, 1984.
- ISTME, Informe Técnico de la Excavación y Comportamiento del Túnel Aquiles Serdán-Camarones-Refinería. México, D. F., Agosto 1988.
- SOCIEDAD MEXICANA DE MECANICA DE SUELOS, A. C., Túneles en Suelos Blandos y Firmes. México.

SZECHY, KAROLY, The Art of Tunneling. Akadémiai Kiadó. Budapest,  
1973.