

35
2 Gen.

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**



FACULTAD DE INGENIERIA

**INYECCIONES PARA MEJORAMIENTO
DE SUELOS Y ROCAS**

T E S I S

Que para obtener el Título de
INGENIERO CIVIL
p r e s e n t a

CARLOS DELGADO DE ALVA



México, D. F.

1985



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 GENERAL

Introducción	3
1. Generalidades	5
2. Inyecciones	14
a. Características físicas de los suelos	15
b. Propiedades físicas de las rocas para efectos de inyección	16
c. Métodos de inyección	18
- Inyección simple	19
- Inyección por progresiones	19
- Inyección por progresiones ascendentes	21
- Inyección en combinación con la perforación	27
- Inyección con tubo de manguitos	28
- Inyección con ademe	31
d. Mezclas de inyección	34
- Mezclas inestables	35
- Mezclas estables	36
- Mezclas de productos químicos	39
- Características de las mezclas	40
e. Equipos de perforación	44
- Equipos para inyección	46
- Control de la inyección	47
3. Impermeabilizaciones	48
- Prueba Lugeón	48
- Prueba Lefranc	52
4. Consolidación en aluviones y macizos rocosos	61
- Características de los aluviones	62
- Mezclas	64
- Presión de inyección	65

5. Aplicaciones	
Colector Semiprofundo de Iztapalapa	66
a. Tratamiento de consolidación	70
b. Descripción del escudo	79
- Segmentos para edome del túnel	87
- Inyección de contacto	88
c. Revestimiento definitivo	92
- Cimbra telescópica	94
- Colado	97
d. Instrumentación	98
- Instalación y medición de bancos de nivel semiprofundo	99
- Instalación y medición de bancos de nivel superficial	100
- Inclínometros	103
- Instrumentación dentro del túnel	106
Conclusiones	109

INTRODUCCION.

Dentro de las ciencias de la Ingeniería, fundamentalmente la rama de la Mecánica de Suelos, ha tenido variaciones conforme surgen necesidades en el estudio de procedimientos de construcción y dentro de esta se encuentra la práctica del mejoramiento de suelos de acuerdo a la función que haya a desempeñar, ya que para la realización de obras civiles se complementan -- trabajos de tratamiento que permiten su ejecución.

La inyección de mezclas es muy utilizada en obras donde -- se tienen suelos de baja consistencia ya sea por el material -- existente o bien por el agua del lugar. El desarrollo alcan-- zado hasta la actualidad demanda varias teorías, haciendo que las constructoras tomen decisiones cada vez mas precisas y con mayor rapidez, y ademas siendo uno de los temas al que se le dedica poca atención.

Siendo éste uno de los factores que motivaron a realizar este trabajo, ya que el deseo es plantear los procedimientos -- para futuras investigaciones que a la vez deben abarcar mas y con mayor objetividad por compañeros que se interesen en esta -- area de la Ingeniería. Considerando que la intención no es -- llegar a conclusiones definidas, sino se quiere despertar inte -- res y discusión de este tema en sí.

En el desarrollo del trabajo se esbozan los procedimientos de inyección de mezclas con el fin de comprender la técnica -- partiendo de un conocimiento previo de la estructura interna -- del suelo, para posteriormente seleccionar el procedimiento -- mas adecuado, se presentan datos cuantitativos para obtener -- resultados adecuados de acuerdo a experiencias anteriores.

La tesis comprende cinco partes, en la primera se presentan generalidades y antecedentes aplicables en el tema. En la segunda parte se detallan los procedimientos de inyección, como las características que deben poseer las mezclas para tal objetivo, además se anotan definiciones sobre el equipo para la perforación. En la tercera y cuarta parte se presenta en --- cierto modo estudios del suelo y especificaciones en base a - estudios realizados sobre la impermeabilización y consolidación de suelos y macisos rocosos. En la última parte se presentan trabajos desarrollados para los tratamientos en la construcción del Colector Semiprofundo de Iztapalapa. Dichos trabajos representan una de las variadas aplicaciones ya que solamente ---- fueron efectuados en suelos arcillosos, pero esto es un buen - ejemplo ya que el procedimiento es similar para otro tipo de suelo. Debido a la relación con el tema y a lo interesante de la ejecución del túnel se describen los procedimientos que se ejecutan para su construcción y los fines de su diseño, pensando en lo valioso en obras de este tipo y que posteriormente -- serán superadas.

1. GENERALIDADES.

Dentro de algunas necesidades que el hombre ha tenido para poder resolver problemas que la naturaleza le ha presentado ha sido el mejoramiento de los suelos, que va desde situaciones -- sencillas hasta las difíciles y complejas.

Existen variadas técnicas para el mejoramiento de los suelos de acuerdo a obras cuya necesidad lo requieran, y en algunas se requiere que las condiciones del suelo mantenga ciertas características de resistencia, etc. como son las cimentaciones -- para edificios, en la cortina de una presa, en la construcción de túneles, etc.

En la actualidad ha sido muy necesario el mejoramiento de esta técnica para su mejor aplicación.

Basicamente el éxito de una obra de Ingeniería Civil depende de la forma de prever los problemas que presenta el suelo, entre otros y que se presentan en el lugar donde se llevará a cabo dicha obra, por lo que es necesario su estudio cuidadoso.

Es fundamental por lo tanto, para toda la Ingeniería conocer el tipo de materiales localizados en el área de estudio, - sus propiedades y características referente a la clasificación tanto de suelos como de rocas.

El levantamiento geológico para el caso de la clasificación de suelos se basa fundamentalmente en la tabla S.U.C.S. - (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos) la cual nos puede

servir para indicar:

- Curvas granulométricas.
- Límites de consistencia
- Relaciones volumétricas y gravimétricas del suelo.
- Identificación manual y visual del suelo.

La identificación manual y visual del suelo, se puede realizar por el tamaño de sus partículas.

Partículas gruesas.

Partículas finas.

Partículas gruesas.- En el estudio de estas partículas se recomienda calificar. Color, tono, textura, lustre, tamaño de grano, contenido de materia orgánica, humedad, cementación, desintegrabilidad en agua, compacidad, origen geológico, nombre típico.

Partículas finas.- En el estudio de estas partículas se recomienda calificar: Color, tono, textura, lustre, tamaño de grano, contenido de materia orgánica, humedad, cementación, - desintegrabilidad en agua, compacidad, origen geológico, nombre típico.

Clasificación de las rocas.

Las mas comunes, encontradas en la corteza terrestre y agrupadas según su origen se clasifican en tres.

Rocas ígneas: Son el resultado del enfriamiento de masas derretidas que emergieron del interior de la tierra a través -

de fisuras. Si la masa derretida se enfrió antes de llegar a la superficie de la tierra, la roca se define como:

Rocas intrusiva.- granito y grava.

Si se enfrió después de haber llegado a la superficie se define como:

Roca extrusiva.- Riolita y basalto.

Rocas sedimentarias.- Son depositadas por corrientes de agua, tales como: Areniscas, pizarras y arcillas. Y las que fueron depositadas por organismos marinos como: calizas y -- dolomitas.

Rocas metamórficas.- Cuando las rocas ígneas y sedimentarias se sujetan a altas temperaturas y presiones, sufren cambios en su estructura

Todas las rocas independientemente de su tipo tienen defectos físicos o estructurales que ejercen una considerable -- influencia en las operaciones de perforación.

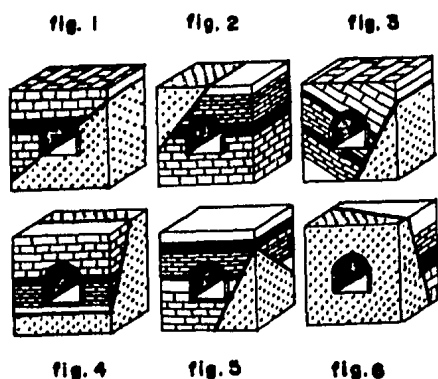
Estos defectos consisten en fracturas cuyas magnitudes y espaciamentos varían considerablemente. Las fracturas simples se definen como juntas, mientras que las fracturas mayores -- asociadas con desplazamientos relativamente grandes se definen como fallas.

Las fallas constituyen zonas particularmente críticas -- para la obra de importancia, por ejemplo en la construcción -- de túneles, pero dentro del peligro que las fallas nos produ-

con, el grado de dificultad que nos representa el atravesarla, depende de la posición falla-perforación.

Por ejemplo, si un túnel corta una falla activa, es poco lo que se puede hacer para proteger la construcción. En este caso, lo mejor es cambiar el trazo para evitarla o utilizar una trinchera para cruzarla siempre que sea posible.

Como ejemplos podemos observar las figuras siguientes que nos indican el porque es conveniente rellenar las figuras en rocas mas desfavorables a la seguridad de la obra.



En la figura 1 el túnel esta situado dentro de la zona de falla.

En la figura 2 y 3 corresponden al túnel en el muro y -- techo de la falla.

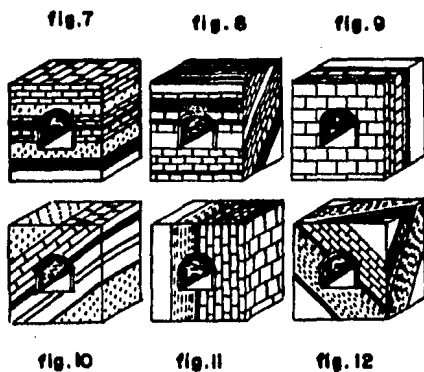
En la figura 4 y 5 el túnel cruza la falla y en la 6 -- queda fuera de la falla.

La estratificación de las rocas afecta directamente al revestimiento del túnel.

En la figura 7, 8 y 9 el revestimiento experimenta presiones verticales.

En las figuras 10 y 12 los estratos oblicuos producen --contracción de presiones a uno de los lados del túnel.

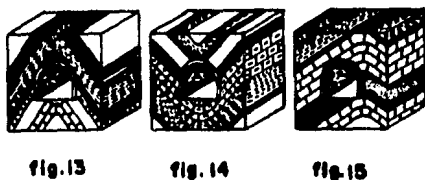
En la figura 11 los estratos se concentran en la clave.



En las figuras 13, 14 y 15 se puede suponer una distribu--ción bidimensional de los esfuerzos anticlinales y sinclinales.

Los anticlinales alivian la presión vertical sobre el --revestimiento del túnel.

Los sinclinales aumentan la presión vertical sobre el --revestimiento.



Gran parte de la exploración de los sitios elegidos para la construcción de obras civiles, requieren además de la clasificación superficial de las rocas, la clasificación de los núcleos obtenidos mediante barriles muestreadores usados en los sondeos exploratorios. En este caso la clasificación de las rocas deberá hacerse con base en sus características, -- usando para ello la clasificación de rocas y anexando algunos parámetros que definen la calidad de la roca (R.Q.D.).

El R.Q.D. (Rock Quality Designation) se basa en la recuperación modificada de testigos lo cual depende indirectamente del número de fracturas y el grado de debilitamiento o alteración del maciso rocoso.

El valor de R.Q.D. se define como la relación entre la suma de las longitudes de aquellos tramos de testigos de longitud mayor ó igual a 10 cm. en estado sano y compacto (despreciando las fracturas provocadas por el muestreo mismo) y la longitud total del testigo.

$$R.Q.D. = \frac{\text{Suma tramos mayores de 10 cm. de un testigo}}{\text{Longitud total del testigo en metros.}}$$

Existe una correlación entre los valores del R.Q.D. y la calidad general de la roca, pudiendo ser ésta la forma de zonificar el túnel de acuerdo a los índices de calidad de las formaciones que atraviezan. Se describen índices de calidad de la roca en la tabla 1.

Puede decirse que el R.Q.D. es en general un índice mas sensible para la clasificación de una roca.

Tabla 1

Relación entre el R.Q.D., índice de velocidad y calidad de las rocas.

R.Q.D.	Índice de calidad	Descripción de la calidad de la roca
0 - 25	0 - 0.20	muy mala
25 - 50	0.20 - 0.40	mala
50 - 75	0.40 - 0.60	regular
75 - 90	0.60 - 0.80	buena
90 - 100	0.80 - 1.00	excelente

$$\text{Índice de velocidad} = \left(\frac{V_f}{V_l} \right)^2$$

V_f = Velocidad sísmica in-situ

V_l = Velocidad sónica en el laboratorio

Con el fin de comprender el comportamiento de un material al ser inyectado ya sea para mejorar las condiciones físicas ó de impermeabilidad en los sitios de construcción es preciso recurrir a las ciencias naturales, entre ellas., la Geología, la Mecánica de rocas, la Mecánica de suelos, la Mecánica de Fluidos, la Geotécnia, la Química, la Ingeniería Mecánica y la Técnica de la construcción.

La geología nos proporciona la localización de tipos de terreno, arreglo estructural, principales accidentes y discontinuidades, condiciones hidráulicas y puntos de devilidad.

La Mecánica de rocas y de suelos cada cual en su rama, -- informan del grado de estabilidad, la granulometría en suelos y la fracturación en rocas, porosidad, grado de cementación, relleno de fracturas, lo que nos ayuda para la selección de mezclas que puedan penetrar en ellas, el rango de presiones -

que deberá utilizarse durante el tratamiento para no dañar el terreno.

Con la Mecánica de fluidos, se estudia el comportamiento de los líquidos mas o menos viscosos (mezcla de inyección) que serán transportados a presión a través de los conductos o fisuras del terreno y la respuesta de este cuando estos fragüen y adquieran resistencia.

Mediante la Geotéonia, se analiza toda la información anterior, se establece el problema y se apuntan sus posibles soluciones, si su solución es la inyección, nos proporciona el tipo de inyección, la resistencia y fluidez necesarias para la mezcla, la presión de sello, tipo de barrenación a ejecutar y ya en proceso la obra, lleva la coordinación y el control de los trabajos mediante la instrumentación adecuada para analizar las consecuencias en el terreno.

La Química aporta técnicas indispensables en la preparación de mezclas, las cuales deberán cumplir con las siguientes características:

- a) Inyectabilidad; de la que depende la penetración de la mezcla en el terreno y el equipo a emplear para bombearla.
- b) Estabilidad; de la que depende el buen comportamiento de la mezcla durante la inyección y el acomodo final del terreno.
- c) Inalterabilidad; de la que depende que la mezcla no se altere con las sustancias ó elementos del terreno en la zona por inyectar y ya fraguada mantenga una rigidez suficiente y permanente.

- d) Resistencia; de la que depende la efectividad de la mezcla en el lugar.
- e) Economía; de la que depende el costo de la obra.

La Ingeniería Mecánica nos proporciona:

- a) La selección de la maquinaria adecuada, tanto para la perforación, inyección y equipo auxiliar que cumpla con los renglones de eficiencia y economía.
- b) El diseño de dispositivos, adaptaciones auxiliares, para poder tener un mayor rendimiento de maquinaria de la obra en general.

La construcción, es la técnica que va a recopilar todos los datos anteriores para ejecutar la obra y tomando en cuenta las condiciones solicitadas por el cliente se elaboran programas, presupuestos, la obra en si, controles y estimaciones.

2. INYECCIONES.

La inyección es el conjunto de técnicas que pone en práctica el Ingeniero Civil, para hacer penetrar fluidos de composición y características controlables en el interior de fisuras, -- fallas, huecos, conductos y vacíos de un terreno, para lograr -- uno ó varios de los objetivos siguientes:

- a) Reducir la filtración de agua hacia excavaciones subterráneas, ó a cielo abierto, ó bajo el apoyo de presas situadas debajo del nivel freático.
- b) Lograr recintos estancos en grandes depósitos subterráneos de agua ó combustible.
- c) Controlar la subpresión y el exceso de presión de poro -- bajo la estructura, ó en apoyo de presas, combinado con -- un drenaje adecuado.
- d) Rellenar cavernas ó huecos en formaciones naturales de -- roca ó en derrumbes.
- e) Consolidar las cimentaciones ó apoyos de presas ó de estructuras pesadas.
- f) Sellar y consolidar terreno débil adelante de túneles ó -- en derrumbes de excavaciones.
- g) Reparar daños excesivos por voladuras en roca alrededor de -- túneles y excavaciones.

- h) Transmitir esfuerzos al terreno vecino, alrededor de ---
túneles ó tuberías de presión.
- i) Preesforzar el revestimiento de túneles y excavaciones --
para reducir su espesor.
- j) Romper ó boquear la estructura de masa de roca alterada ó
descompuesta y crear, con las venas de inyección, nuevas -
estructuras estables.
- k) Ligar revestimientos, anclas y demás elementos de refuerzo
de excavaciones ó túneles al terreno vecino, para que tra-
bajen en combinación con éste como un todo.

a. Característica física de los suelos.

Sería magnifico disponer de procedimientos que permitieran aumentar la cohesión o el ángulo de rozamiento interno, o bien - reducir la compresibilidad de un terreno, pero tales procedi-
mientos no existen, casi siempre actúan sobre varias caracterís-
ticas a la vez. El mejoramiento de un terreno se consigue:

- Aumentando su compacidad.
- Modificando sus características fisicoquímicas por cocción
por el paso de una corriente eléctrica.

El aumento de compacidad se hace de dos modos.

- Rellenando los huecos con un producto resistente, --
(inyección).
- Disminuyendo el volumen de los huecos, (compactación).

Así como la inyección no proporciona ninguna variación de volumen, la compactación conduce a un asentamiento del terreno que es preciso poder provocar o compensar cuando no es tolerable. Es por ello que no resulta posible hacer compacta una roca fisurada y que la confección de un pilote de tierra no hace asentar la superficie del terreno.

La inyección se utiliza para las rocas fisuradas, las gravas y las arenas finas. Las arcillas en cambio no son inyectables y en ocasiones se inyecta a grandes profundidades.

La compactación conviene a las arenas finas, a los aluviones, a las arcillas se efectúa mas superficialmente.

La modificación de las características fisicoquímicas sólo es eficaz en el caso de que estas sean determinates. Por lo -- tanto puede afectar a los aluviones y a las arcillas.

Debido a la presencia de agua en taludes se producen modificaciones de las condiciones del suelo por medio de un drenaje - ejecutado que permite dar a la presión de la corriente de agua una dirección favorable a la estabilidad.

b. Propiedades físicas de las rocas que deben considerarse para efectos de inyección.

Debido a las características Geológicas como Físicas, los materiales anisotrópicos se comportan de una manera diferente - en cualquier dirección y sentido, por lo que no puede generalizarse el comportamiento de las inyecciones dentro de todos los materiales.

Algunas propiedades físicas que deben considerarse en el

tratamiento de la inyección son:

1. Densidad.

La densidad en los dos grupos de materiales (cohesivos y friccionantes) es de importancia, ya que una roca densa - será menos porosa y por consiguiente opondrá mayor resistencia a la inyectabilidad de líquidos. Las rocas ígneas y metamórficas tienen mayor densidad que las sedimentarias. La densidad influye en la porosidad y por lo tanto en la cantidad de agua dentro de los poros que será necesario - desalojar para que los líquidos inyectados puedan penetrar dentro del material.

2. Porosidad y permeabilidad.

Los materiales granulares por estar constituidos por partículas, estos les imparten una variación en cuanto a porosidad y permeabilidad debido a: su composición mineralógica, tamaño, grado de arredondamiento y cementación de sus partículas y al acomodo de los mismos que hacen variar el contenido de agua y su resistencia. En este grupo de - materiales pueden incluirse las arcillas, limos, gravas, - arenas, limolitas, areniscas, brechas y conglomerados y cierto tipo de tobas y de calizas, en cambio dentro de - rocas masivas e ígneas y metamórficas se encuentran fracturas formando bloques unitarios.

Estos aspectos intervienen para hacer del macizo rocoso una roca menos densa, debido al aumento de vacíos originado por los planos de separación de sus fracturas; por lo tanto es importante conocer el grado de fracturación, frecuencia, longitud y separación y abertura de las grietas, así como el tipo de relleno que constituyen el macizo rocoso por tratar, con el fin de apreciar y de limitar la zona de influencia a la que deberá estar restrim

gida la zona por inyectar.

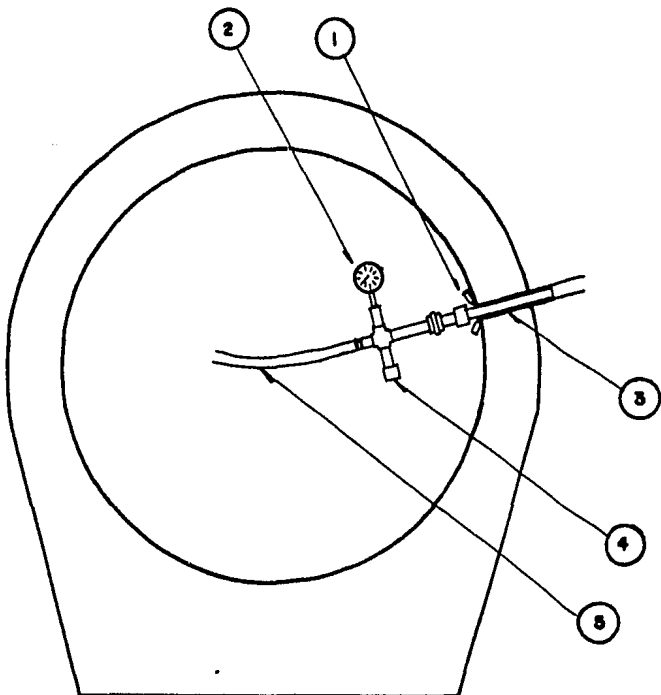
c) Métodos de inyección.

Los métodos de inyección difieren según que se trate de inyectar una roca fisurada o un macizo de aluvión, y ello por las siguientes causas.

1. En una roca fisurada, incluso se puede realizar una perforación al descubierto, aunque solo sea de uno o dos metros de longitud, lo cual es muy difícil en arenas y gravas.
2. Los huecos a rellenar no son los mismos. Así como para -- una fisura puede considerarse que la abertura es sensiblemente constante, los huecos de los terrenos pulverulentos son muy desiguales y sucesivamente grandes y pequeños, por lo que no puede utilizarse las mismas lechadas en uno y otro caso.

Esta diferencia es lo que hace que la inyección en aluviones sea distinta de la inyección en rocas fisuradas, inyectar -- de una vez la perforación en toda su longitud es una mala operación, porque no se puede adaptar la composición de la lechada a las dimensiones de las fisuras o huecos del terreno, por ello, -- considerando la estructura del terreno los métodos de inyección más usuales son los siguientes.

1. Inyección simple.
2. Inyección por progresiones.
3. Inyección por progresiones ascendentes.
4. Inyección en combinado con la perforación.



- 1 Acuñamiento
- 2 Manómetro
- 3 Bequillo
- 4 Desfogue
- 5 Líneas de inyección

5. Inyección con tubo de manguitos.
6. Inyección con ademe.

1. Inyección simple.

Este tipo de inyección deberá solo usarse en perforaciones de poca profundidad, y en terrenos que contengan pocas grietas y se deberá utilizar presiones altas para garantizar el relleno de dichos huecos. Si el terreno tiene grietas y fisuras en el plano de la boca del barreno, no es conveniente este método ya que se tendran fugas al exterior.

Este tipo de inyección tambien es recomendable para la inyección de contacto alrededor de túneles y en el relleno de cavernas o grandes huecos. (Fig. 16)

Este método de inyección consiste principalmente en llevar la perforación a la longitud deseada, lavar el barreno por circulación de agua y/o aire, amboquillar el orificio e inyectar todo en una sola operación.

2. Inyección por progresiones.

Este método se aplica tanto en rocas como en suelos, debiéndose realizar la perforación con sonda rotativa. Y consiste en dividir la longitud del terreno por inyectar en un número conveniente de progresiones.

Se comienza por sellar un tubo a la entrada de la perforación un prensaestopas situado entre éste y el tubo de inyección --

permite en el momento de inyectar, subir sin pérdidas de presión.

Si al estar ejecutando la perforación de cualquiera de las progresiones, se localiza un hueco ó una grieta grande, se suspenderá la barrenación y se procederá a inyectar.

Las etapas que comprende este método son las siguientes.

- a) Perforación de la primera progresión.
- b) Lavado del barreno con aire y/o agua, hasta que no salga material producto de la excavación.
Cuando se emplea agua como lubricante para la perforación y ésta se "pierda" se dará un tiempo fijo de lavado, pasando la herramienta de barrenación por toda la longitud perforada.
- c) Emboquillado del barreno.
- d) Prueba de presión con agua.
- e) Inyección de lechadas, hasta llegar a la presión de proyecto.
- f) Lavado del barreno al terminar el tiempo de fraguado inicial, de la mezcla inyectada.

Para iniciar la segunda progresión se calculará el tiempo de fraguado final de la mezcla inyectada, para después de transcurrido este tiempo se repitan las mismas operaciones anteriores comenzando con la perforación a la longitud determinada para la segunda progresión. Así se continúa el procedimiento hasta llegar a la longitud máxima especificada. (Fig. 17)

3. Inyección por progresiones ascendentes.

Este método de inyección se realiza en forma ascendente, -

INYECCION POR PROGRESIONES

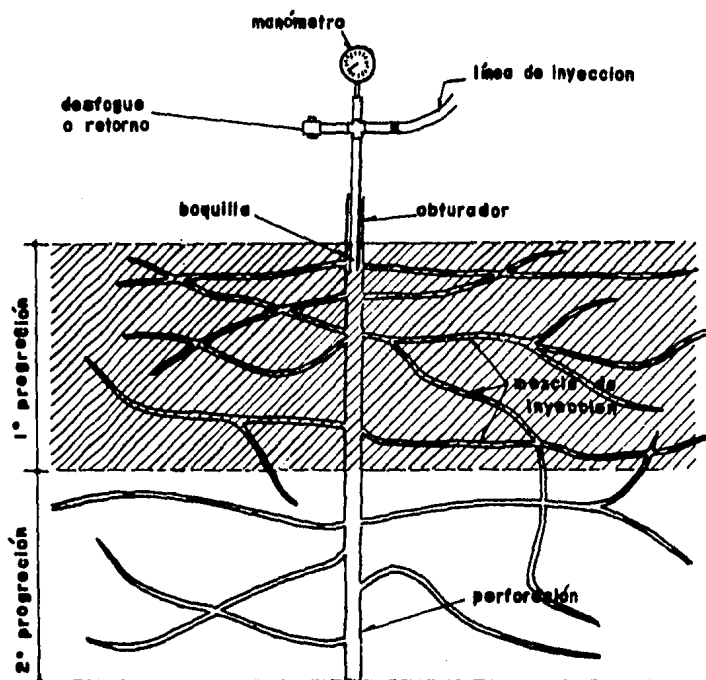
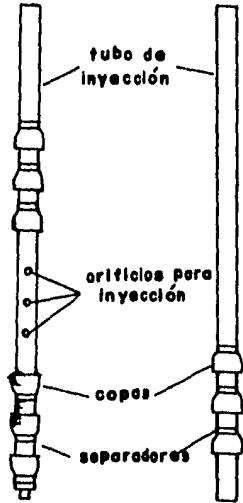


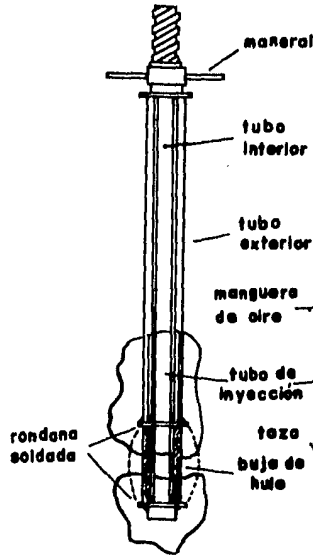
Figura 1

OBTURADORES UTILIZADOS PARA INYECCION

obturador doble
copa de hule

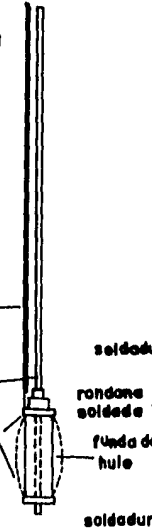


obturador copa
de cuero o neopreno



empaques mecánicos
con camisa

empaques
pneumáticos



empaques mecánicos
simple

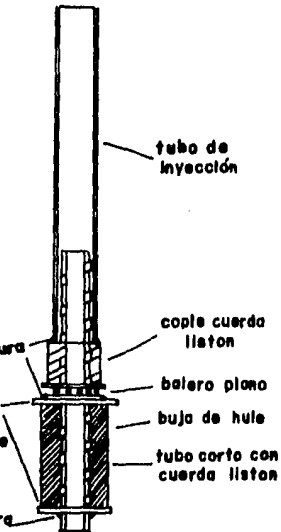


Fig. 18

permitiendo que la inyección se realice del fondo del barreno - hacia afuera, lo que nos permite llevar un control de las zonas por inyectar.

Este método se realiza con la ayuda de "obturadores" que - permiten aislar un tramo de barreno por inyectar, nos proporciona un cierre hermético entre la tubería de inyección y la pared - del barreno, se aplican cuando no hay problemas de control de - flujo de agua o de material y sobre las boquillas se tiene la ventaja que no requiere calafateo.

Los obturadores más usuales son: de copas de neopreno, me- cánico y neumático. (Fig. 18)

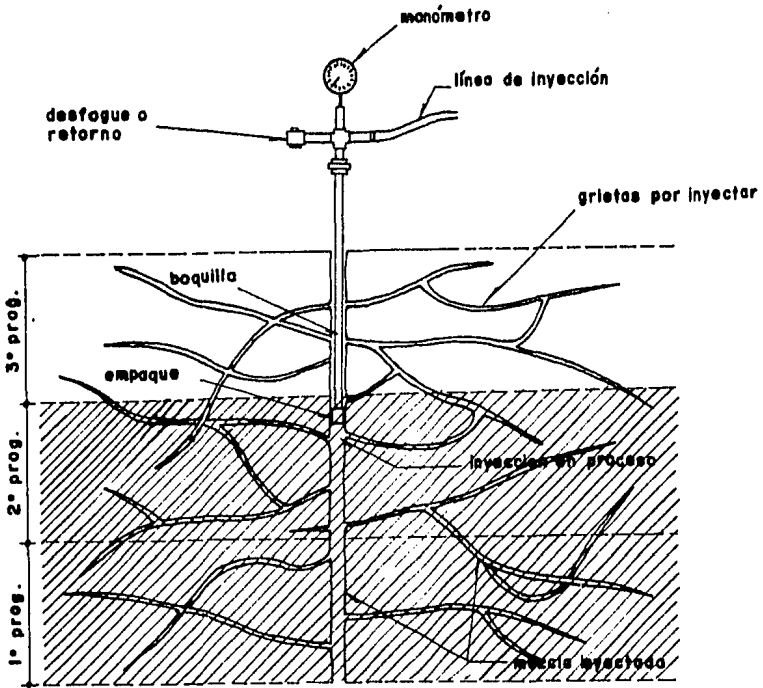
El tipo de copas de neopreno es el mas eficiente en terrenos bastante duros, donde el barreno no tenga sobre-excavación y las paredes son lisas y tambien alineadas, puede usarse con presiones muy elevadas.

El mecánico se adapta a terrenos de menos calidad, esta for- mado por una tubería exterior a la de inyección y que oprime en el extremo una serie de empaques de hule o neopreno, los cuales se apoyan en una rondana a la tubería de inyección, produciendo así una expansión en contra de las paredes del barreno.

El tipo neumático se emplea en terrenos de baja resistencia y en perforaciones sobre-excavadas, pero en las que las paredes se mantengan estables, está formado por una pared de hule engar- golado a sus extremos, donde tiene un pivote por donde se infla, adaptándose al contorno de las paredes del terreno, no es reco- mendable para presiones altas. (Fig. 19)

El procedimiento que se sigue para este método es el sigui- ente.

INYECCION POR PROGRESIONES ASCENDENTES



Figura

- a) Perforación del barreno a toda la longitud especificada.
En este proceso se deberán registrar los huecos o grietas para definir con mas seguridad la colocación del obturador.
- b) Lavado del barreno.
Consiste en remover y extraer todos los residuos dejados por la perforación.
- c) Instrumentación del barreno.
Consiste en colocar el obturador, por el cual pasa la mezcla de inyección a la profundidad especificada.
- d) Prueba de presión del agua.
Esta prueba se realiza para definir la permeabilidad del tramo por inyectar.
- e) Inyección de mezclas.
Cuando el terreno se encuentra muy agrietado se corre el riesgo de que la mezcla a través de dichas grietas fluya y salga entre el obturador y la boca del barreno, lo que podría ocasionar que la instrumentación quede atrapada, para evitar esto se debe introducir una manguera hasta el obturador, entre la tubería de inyección y la pared del barreno y circular agua, esto nos permite detectar el caso de comunicación de la mezcla y en caso de que lo haiga se procederá a cambiar de lugar el obturador hacia la boca del barreno, colocándolo después de las grietas.
- f) Cambio de posición del obturador.
Cuando se llegue a la presión de sello, se cambiará el obturador, colocándolo en la frontera de la segunda progresión.
- g) Limpieza del tubo de inyección.
Para la limpieza se hará mediante circulación de agua, esto para remover la lechada que se encuentra desde la salida de la bomba hasta la boca de la tubería.
- h) Prueba de presión de agua.

De igual manera se procederá con las siguientes progresio-

nes hasta inyectar en la boca del barreno.

4. Inyección en combinación con la perforación.

Este método se utiliza en terrenos muy fracturados, granulares o de baja compacidad, los cuales no permiten que la perforación quede abierta.

Los pasos que se siguen son los siguientes.

a) Colado del tapon de concreto.

Se deberá contruir un brocal en la zona donde se va a hacer la perforación para evitar fugas de la mezcla y apoyar la boquilla.

b) Colocación de la boquilla.

La boquilla en el terreno deberá tener un diámetro mayor que el de la perforación, para permitir el paso de la broca y las barras a trabes de ella. La longitud de la boquilla va de acuerdo al tipo de terreno que se tenga y de la presión de inyectado. En la parte superior de la boquilla está dotada de una contratuerca y en el centro, un orificio por donde pasa la tubería de perforación y lateralmente se dispone de una válvula de purga.

c) Perforación del primer tramo.

Para la primera progresión.

d) Inyección del primer tramo.

Por medio de la tubería de perforación se envían las mezclas de inyección, esta tubería se va recorriendo progresivamente hacia la boca del barreno, después de obtener una presión determinada, ó de inyectar una cantidad pre--determinada de mezcla, dejando la zona ya inyectada.

Esto se repite hasta llegar al inicio de la primera progresión.

Para evitar que la mezcla atrape la tubería se retorna la mezcla al agitador a través del tubo hincado y la valvula de purga.

e) Perforación del segundo tramo.

Terminando la inyección en la primera progresión se perfora y se continúa la perforación del segundo tramo y así sucesivamente.

5. Inyección con tubo de manguitos.

El tubo de inyección viene a hacer las veces de un ademe - del barreno protegiéndolo contra derrumbes y además permite la inyección en tantas fases como se requiera, pues en toda su longitud lleva perforaciones igualmente espaciadas y protegidas con una banda de hule o neopreno la cual actúa como valvula durante la inyección e impide el progreso de la lechada terminada cada - progresión. Este método es el más aconsejable para la inyección en terrenos malos, por estabilidad o por permeabilidad.

El método consiste en lo siguiente.

a) Perforación.

Se realiza hasta la profundidad de proyecto.

b) Colocación del tubo de manguitos.

El tubo de manguitos se habilita con tubería P.B.C. ó metalica, la cual se perfora en secciones de 33 ó 50 cm; cada sección tiene 3 ó 4 perforaciones según el diámetro de la tubería y cada perforación tiene un diámetro de 6 u 8 milí metros.

Sobre las perforaciones se coloca una banda de hule de 3 - milímetros de grueso y de 5 a 10 cm. de ancho las cuales

se fijan al tubo con alambre ó cinta de polievinilo, estas bandas reciben el nombre de manguitos.

Se llevará un estricto control de las secciones de manguitos ya que ahí se colocará el centro del obturador al inyectar.

c) Emboquillado.

Se coloca tela de ixtle entre el tubo de manguitos y la pared del barreno, en un tramo de un metro a partir de la perforación, de tal forma que esta sección entre forzada e inyectando esta parte se formará un tapon evitando que haya fugas hacia el exterior.

d) Colocación del obturador.

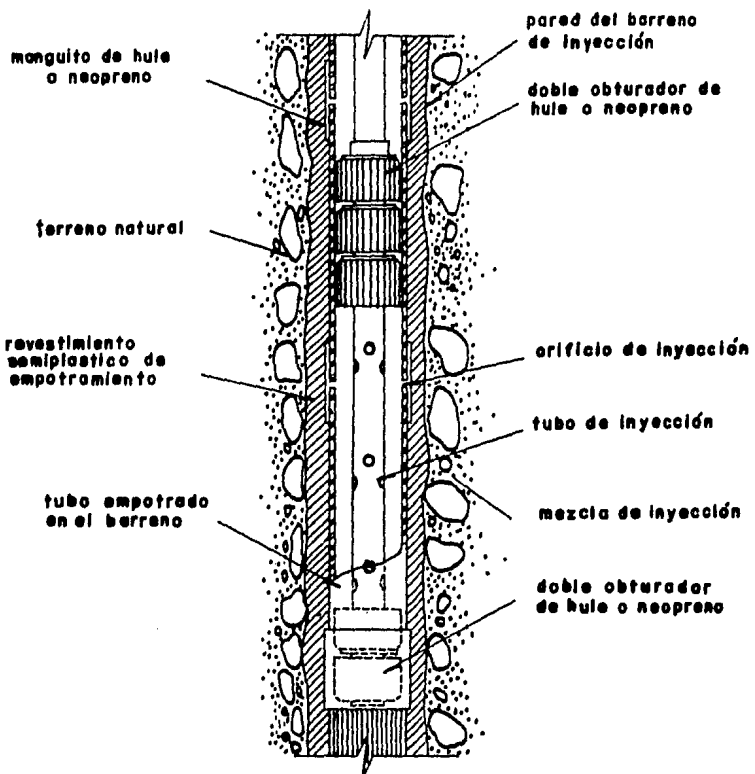
El tipo de empaques recomendable para este procedimiento es el obturador doble con copas de neopreno o cuero (Fig. 20). Este obturador es de acero y la distancia que hay entre las copas extremas es igual a la distancia entre las secciones de manguitos, en el eje del obturador entre las copas internas van de 2 a 4 perforaciones por donde saldrá la mezcla, la cual se bombea a través de la tubería de inyección. Esta tubería deberá estar graduada para poder garantizar una cierta posición del obturador dentro del tubo de manguitos.

Para introducir dicho obturador en el tubo y tener facilidad en los movimientos dentro de éste, todas las copas y los separadores serán totalmente untados de grasa.

e) Inyección de vaina.

Esta inyección consiste en rellenar el vacío entre la pared del tubo de manguito y la pared de la perforación, con el propósito de fijar dicho tubo.

La forma de inyectado es ir colocando el centro del obturador en las secciones de manguitos. La secuela de inyección



**TUBO DE MANGUITOS CON DOBLE
OBTURADOR**

depende de la dirección de la pendiente del barreno, si éste va hacia arriba con respecto a la horizontal la inyección va de la boca de la perforación al fondo y viceversa si el barreno va hacia abajo, se inyecta del fondo a la boca.

f) Reperforación.

Se elabora una reperforación en el interior del tubo de manguitos y a toda la longitud por inyectar, con la finalidad de limpiar todos los residuos de la mezcla utilizada en la vaina.

g) Inyección.

Se introduce el obturador con la línea de inyección hasta el nivel del tramo por tratar y se procede a inyectar, moviendo el obturador después de haber logrado un volumen predeterminado, así se continúa hasta cubrir la longitud del tubo por inyectar.

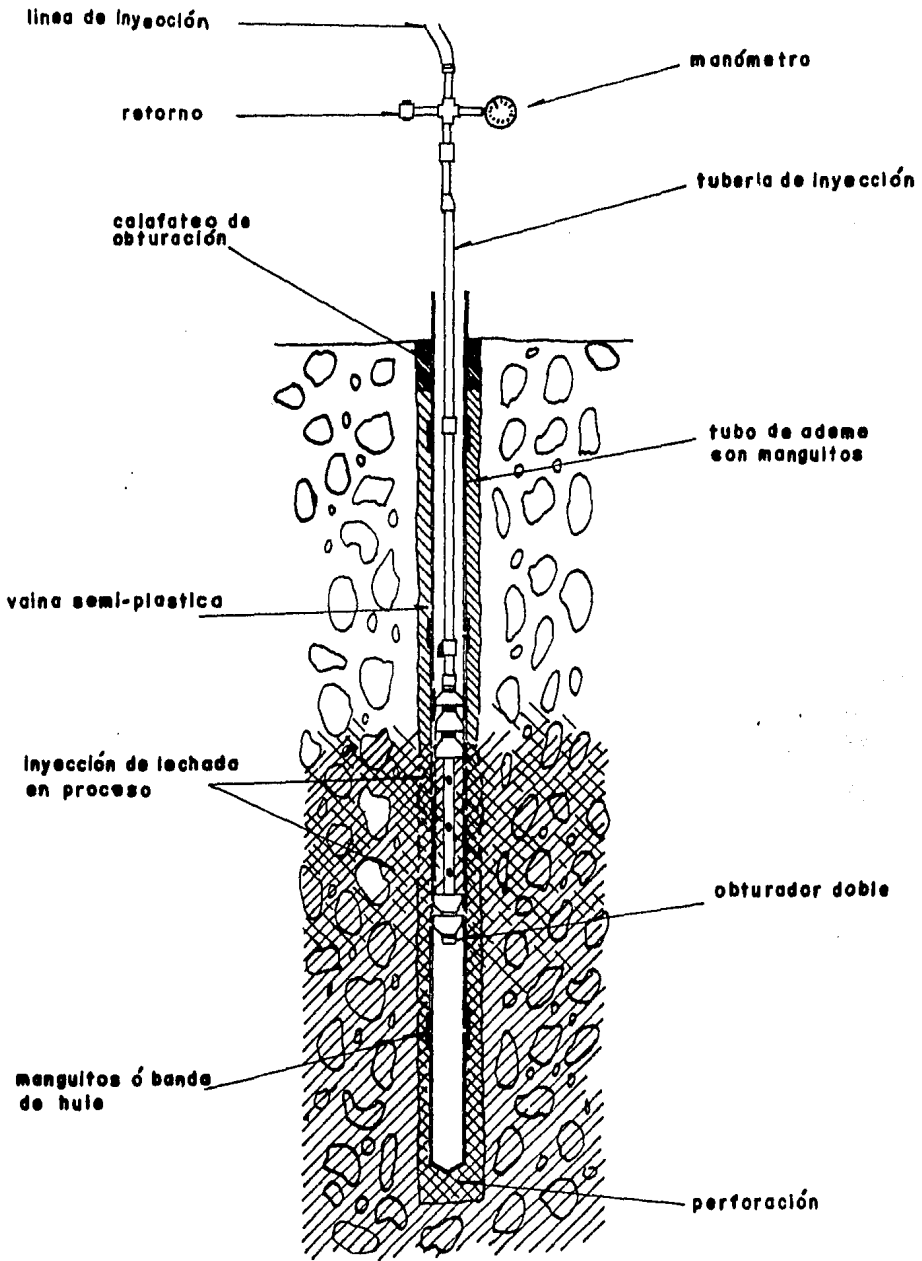
Es importante señalar que la gran ventaja de este método sobre cualquier otro, es que por el corto espacio entre progresiones se pueden ubicar las zonas débiles y por lo tanto, las que necesitarán varias etapas de inyectado, lo cual es posible también, sin necesidad de perforaciones ó reperforaciones. (Fig. 21)

6. Inyección con ademe.

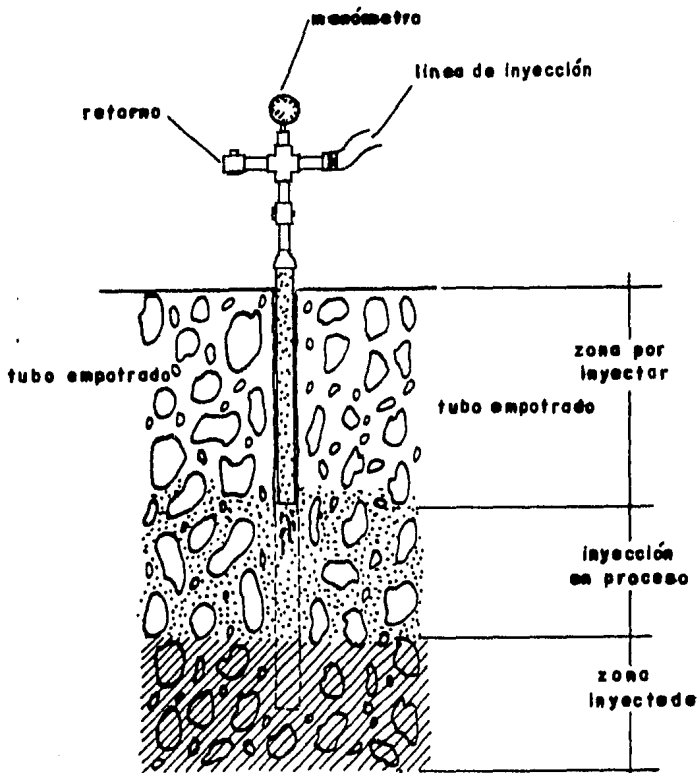
Este método consiste en hincar un ademe metálico hasta la profundidad final del proyecto, se procede a limpiar el interior del ademe, se emboquilla y se inicia la inyección.

Después de obtener la presión o el volumen previamente -

INYECCION TUBO DE MANGUITOS



INYECCION CON ADEME



calculado para esta progresión, se empieza a jalar el ademe sistemáticamente a una distancia no mayor de 30 cm. y se -- vuelve a inyectar, esto se realiza hasta llegar al exterior. (Fig. 22)

d) Mezclas de inyección.

Como se ha mencionado, cada terreno por inyectar será estudiado para determinar su procedimiento constructivo, de igual manera, para cada inyección se debe estudiar que mezcla se va a utilizar. La elección de dicha mezcla está, en general determinada por el estudio preliminar de los materiales del sitio a tratar, resultante del reconocimiento efectuado en el curso de los sondeos previamente efectuados.

A pesar de que las condiciones de campo no pueden ser reproducidas con fidelidad en los ensayos de laboratorio, estos son adecuados como procedimientos de bajo costo que permite -- determinar la lechada que es más conveniente inyectar en el subsuelo de acuerdo a la granulometría y a la permeabilidad -- del mismo.

Los materiales apropiados para la inyección deben ser lo suficientemente fluidos para permitir su bombeo; su grano si -- lo tienen, debe ser muy fino para que pueda pasar bajo presión por aberturas y grietas muy pequeñas. Debe ser una mezcla -- resistente a la compresión cuando endurece, en el caso de que se busque la consolidación y ese endurecimiento debe hacerse con un mínimo de retracción para que no se pierda la impermeabilidad conseguida.

Así mismo las mezclas pueden dividirse en: inestables, -- estables y a base de productos químicos.

Mezclas inestables.

Una mezcla es inestable si las partículas sólidas en suspensión tienden a sedimentarse cuando deja de estar agitada o en movimiento.

Una mezcla inestable típica es la de agua-cemento, con la condición de que el cemento esté suficientemente diluido. Este tipo de mezcla se emplea comúnmente en el tratamiento de macizos fisurados, obteniendo magníficos resultados tanto para -- impermeabilizar como para consolidar; también es común el uso de mortero de agua-cemento-arena en el tratamiento de fracturas muy abiertas, donde se presentan grandes consumos de lechada -- sin llegar a levantar presión.

Los proporcionamientos de agua-cemento (en peso) convenientes dependerán del tipo de cemento que se usa y de la -- abertura de las fisuras que se quiera inyectar. En general se ha observado que con proporcionamientos de 5 partes de agua -- por una parte de cemento se puede cubrir prácticamente cualquier clase de inyección en roca.

Así mismo, las mezclas inestables también se emplean en el anclaje de masas rocosas, rellenando el espacio anular entre el ancla y la roca.

La inyección de las mezclas inestables presentan varias -- dificultades, entre las cuales se pueden citar las siguientes:

- La necesidad de una línea de retorno para hacer circular la lechada para prevenir la sedimentación y el granulado, aunque esta circulación eleva la temperatura y disminuye su resistencia.

- Taponamiento de la perforación cuando no existe circulación de la lechada por un bajo consumo.
- Relleno incompleto de las cavidades grandes por el asentamiento de la mezcla antes del fraguado.
- Sensibilidad al labado y a la disolución al fluir el agua subterránea.

Mezclas estables.

Las mezclas estables son suspensiones en agua de gramos suficientemente pequeños para que no pueda manifestarse sedimentación alguna durante la inyección, pero siempre y cuando mantenga la fluidez necesaria para hacer posible la inyección y después proporcione la rigidez suficiente.

Se consideran estables aquellas mezclas que presentan menos del 5 % de decantación. Así mismo, existe una gran variedad de combinaciones de productos base y aditivos para reducir al mínimo la sedimentación durante la inyección.

A continuación tenemos una serie de mezclas estables típicas.

- a) Cemento - bentonita
- b) Cemento - Arcilla
- c) Arcilla - Cemento - Arena
- d) Arcilla tratada
- e) Cemento - Silicato de sodio

- a) Cemento - bentonita.

El uso de bentonita como aditivo, produce un aumento consi

derable del volumen final de sólidos y mejora la estabilidad de la lechada. La adición de bentonita puede ser pequeña, del 2 al 5 % en peso del cemento para disminuir la decantación -- sin reducir de manera importante la resistencia de la mezcla, además de proporcionar una mezcla homogénea y eventualmente - tixotrópica.

Dichas mezclas por contener gran cantidad de cemento, presentan sedimentación menor del 5 %.

Generalmente, se emplean en trabajos de inyección en aluviones con características granulométricas muy particulares y como consecuencia de la fuerte dosificación de cemento resultan muy caras, pero pueden ser útiles cuando se requiere de - altas resistencias mecánicas para consolidar, además de impermeabilizar. Cuando se requiere una consolidación, el rango del proporcionamiento varía de 0.8 a 2.0, relación agua-cemento - (en peso).

Cuando con la inyección únicamente sea necesario impermeabi- lizar se emplean mezclas con relaciones agua-cemento (en peso) que varían de 0.8 a 1.5.

La dosificación de la bentonita para obtener una mezcla estable varía del 2 al 5 % en peso de cemento.

b) Cemento - Arcilla.

La suspensión arcilla-agua, aunque es estable, puede -- requerir de cemento para aumentar su resistencia al deslavado o destaponamiento. Para tener una fluidez conveniente, las - mezclas arcilla- cemento, dependen de la propia calidad de la arcilla, principalmente sus problemas absorbentes.

La cantidad de arcilla seca varía desde 5 a 15 % en peso de cemento, en una relación agua-cemento (en peso) menor que 3.

c) Arcilla - Cemento - Arena.

Cuando los huecos a rellenar son suficientemente grandes que requieran enormes consumos de lechada, puede adicionarse arena mas o menos fina a las mezclas de cemento-arcilla; permitiendo la impermeabilización de rocas fisuradas, con vacios de grandes dimensiones y con rápidos pasos de agua.

d) Arcilla tratada.

Son suspensiones de arcilla en agua, adicionales de pro-- ductos químicos adecuados, para permitir una inyección satisfac toria. Estos productos por carecer prácticamente de resistencia mecánica, se emplean para realizar pantallas impermeables susce ptibles de resistir cargas apreciables de agua.

Para evitar problemas en la viscosidad, es recomendable no mezclar arcillas de diferente naturaleza o agregar productos - químicos eventualmente y el orden de mezclado de los materiales es importante ya que los resultados son diferentes en cuanto a viscosidad, condición de fluidez y tixotropía. En la práctica - se ha obtenido que una arcilla de límite líquido superior de 60 se encuentra en buenas condiciones para mantenerse en suspensión, de otra manera habrá que adicionar coloides.

e) Cemento - Silicato de sodio.

La rigidez de una mezcla de cemento-arena queda mejorada

por la adición de Silicato de sodio, siendo más apreciable -- cuando más fuerte es la dosificación de cemento. Este tipo de mezclas se emplean generalmente para llenar los huecos de los depósitos de aluvión grueso.

Algunas de las ventajas que se obtienen al inyectar mezclas estables son:

- No existe sedimentación en las tuberías, ni en la perforación, aunque la mezcla permanezca mucho tiempo en reposo.
- La fluidez de la lechada se mantiene y puede penetrar -- mas lejos en las fisuras finas.
- Las cavidades grandes se rellenan mejor debido a la --- ausencia de la sedimentación.
- Resistencia a la erosión del agua del subsuelo durante la inyección.

Mezclas de productos químicos.

Debido a la dimensión de los granos que componen las suspensiones de las mezclas clásicas, la penetrabilidad de éstas es limitada, por lo que se ha recurrido a la Química para -- encontrar mezclas líquidas que alcancen todos los huecos del suelo por donde el agua pueda tener acceso. Los productos -- químicos empleados generalmente para inyectar rocas con fisuras muy pequeñas o suelos aluviales con espacios granulares, intergranulares muy reducidos, son los geles de Silicato de - Sodio y reactivo y las resinas orgánicas.

La adición de reactivo en una proporción conveniente a un

silicato provoca la transformación de la mezcla en un gel, que puede ser duro o plástico. Estos productos se emplean para consolidar o impermeabilizar los terrenos. Esto se aprovecha para aplicar estas mezclas en dos métodos de inyección.

1. Cuando se efectúa instantáneamente la transformación del silicato en un gel líquido y resistente se utiliza para tratamiento de consolidación.
2. Cuando el endurecimiento es controlado y lento se puede formar una mezcla gelatinosa que es útil únicamente para la impermeabilización.

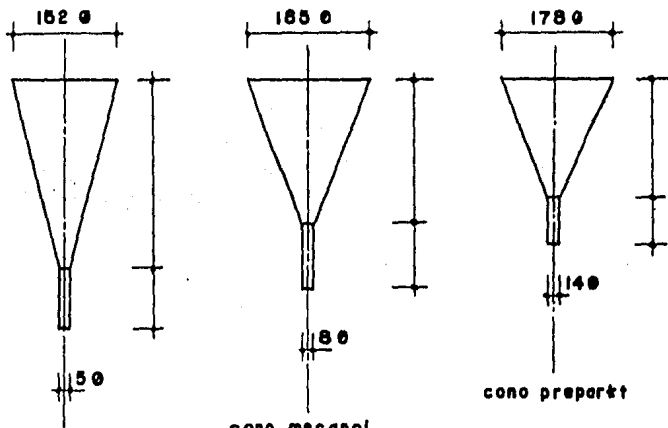
Características de las mezclas.

Al programar un tratamiento de impermeabilización o consolidación en aluviones, es necesario hacer ensayos de laboratorio de las mezclas para conocer sus características y determinar con exactitud la proporción exacta de los materiales que se van a emplear, obteniendo una mezcla fácil de inyectar para llegar a los resultados deseados.

Este estudio consiste en la medida de la fluidez, la sedimentación, la densidad y la rigidez de las mezclas. Para estas observaciones, no siempre es necesario que se hagan con aparatos costosos o difíciles de obtener, sino que para los fines que se desean, es suficiente obtener las medidas, utilizando los procedimientos siguientes.

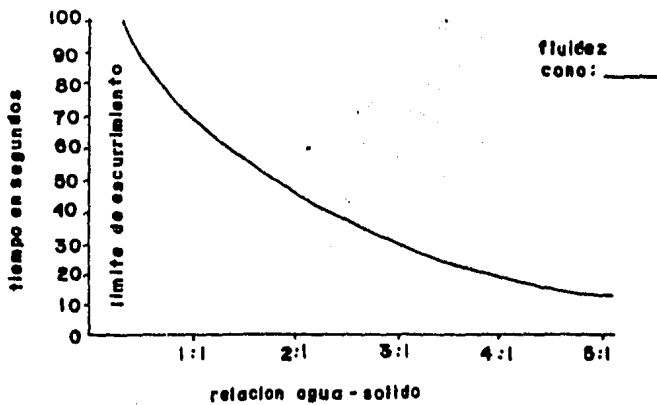
Fluides.

Para determinar la viscosidad o fluidez, se utiliza, una batidora, una tasa graduada de 1500 cc., un cronómetro y unos



cono marsh

acot: en mm.



Conos calibrados de circulación simple. La medida se hace ----
tomando el tiempo de circulación de un volumen de mezcla previg
mente batida durante un tiempo de 5 min. (Fig. 23)

El modo de efectuar las operaciones consiste en verter la
mezcla en el cono escogido a través de una malla, llenándolo --
hasta el límite superior.

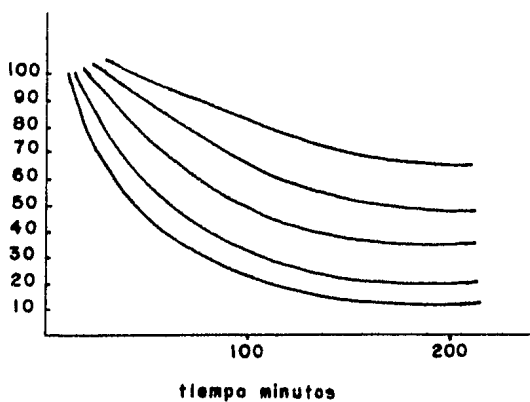
Esta operación se hace tapando con un dedo el orificio de
salida, y una vez que se ha llenado, sequita el dedo en el ---
instante en que se pone en marcha el cronómetro, se toma el --
tiempo en que se vacía hasta el volumen de 1500 cc. que se está
recibiendo en la tasa graduada, anotando en la gráfica la velo-
cidad en segundos. El resultado depende de la fluidez, rigidez-
y densidad de la mezcla.

Sedimentación.

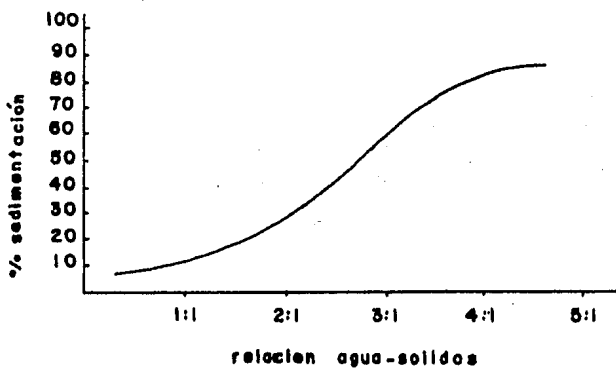
La sedimentación es el ascenso del agua que se produce en
la superficie de una mezcla después de la decantación de sus --
partículas. Para su determinación se utiliza una batidora, pro-
beta graduada de 1000 cc., y una escala milimétrica. La medida-
se hace una vez vertido un litro de la mezcla en la probeta, --
tomando el tiempo al momento de llenar hasta el límite de 1000
cc. Y se continúan tomando lecturas de la sedimentación cada --
5 min., hasta que la decantación esté completamente terminada.
La superficie de separación entre el agua y la mezcla es bien -
definida sin embargo, cuando no es inmediata esta separación, -
es debido a que la mezcla tiene características de rigidez y -
tixotropía. (Fig. 24)



probeta graduada
1000 c.c.



grafica de sedimentación
(relacion agua-solidos)



Es indispensable utilizar siempre el equipo antes descrito, ya que el diámetro de la probeta, la inclinación de la misma o las inclinaciones de las paredes del recipiente, influyen en la sedimentación de una mezcla.

Las observaciones hechas en el laboratorio, rara vez tiene semejanza con lo que sucede en el inyectado de los aluviones. Sin embargo se utilizan mucho para programar las mezclas y hacer comparaciones.

Rigidez.

La determinación de la rigidez, después del fraguado de la mezcla, se hace por medio de la resistencia a la compresión -- simple de cubos con aristas de 5 cm. almacenados en el cuarto -- de curados, curándose a los 7, 14 y 28 días, anotando su resistencia en promedio.

Densidad.

Para la determinación de la densidad de una mezcla de inyectado, se utiliza como equipo una balanza analítica y un -- recipiente de volumen y peso conocidos. La operación consiste -- en llenar el recipiente con la mezcla que se va a ensayar, previamente batida, pesándose lleno. A este peso se le descuenta -- el peso del recipiente vacío y se divide entre el volumen ocupado obteniéndose la densidad en gr/cc.

e) Equipos de perforación.

Para llevar a cabo los trabajos de inyección se requiere -- de la realización de perforaciones que permitan la penetración

de las mezclas al terreno por tratar, hasta la profundidad --- deseada.

Las perforaciones pueden ser verticales, inclinadas u hori-
zontales. Estas perforaciones se hacen con máquinas perforadoras
cuya selección y método de perforación se efectúa de acuerdo a
la naturaleza del terreno, a las características del material, -
la profundidad y el diámetro de los barrenos, al espacio dispo-
nible, la ubicación de la obra y en general a las necesidades-
del programa.

El método seleccionado puede ser a percusión, rotación ó -
una combinación de los dos.

Para perforación en rocas sanas con o sin fracturas, se --
emplean generalmente perforadoras de percusión ó rotación-percu-
sión. Las máquinas de percusión perforan con martillo neumático,
existen máquinas en las que la acción del martillo se comunica
a la broca por medio de la tubería de perforación; otras máqui-
nas cuentan con martillo de fondo y la acción se aplica directa-
mente a la broca.

Para suelos o rocas blandas se emplean ventajosamente las
perforadoras de rotación con cabezal hidráulico. Para realizar
la perforación con este tipo de máquinas se aplica carga axial
y rotación simultanea, inyectando agua o lodo para enfriar la-
broca, arrastrar el material cortado a la superficie y para ---
estabilizar las paredes y el fondo de la perforación.

Se emplea lodo como fluido de perforación en perforaciones
sobre el nivel freático; abajo de este nivel se pueden usar ---

lodo o agua, según sea la condición de estabilidad de las paredes. El método de rotación con agua o lodo es aplicable a todo tipo de suelos, en los granulares se emplean lodos duros para eliminar la posibilidad del uso de ademes metálicos.

Los equipos de perforación pueden ser montados sobre orugas, sobre camión para hacerlos móviles; o simplemente sin sistema de transporte.

Equipos para inyección.

Para su uso se pueden definir dos grupos de equipos: para preparación de mezclas y para el bombeo de la lechada.

El equipo que se emplea para la preparación de las mezclas, consta de dosificadores, así como de mezcladoras o agitadores — que pueden ser de distintos tipos, dependiendo de las mezclas y de los volúmenes calculados.

Las dosificadoras son propiamente balanzas que pesan los materiales en seco antes de la mezcla, aunque también existen dosificadoras para agregados líquidos, los cuales se aforan.

Las bombas de baja, mediana y alta presión, se distinguen entre sí fijando como límite de cada una de ellas las presiones de 10, 15 y arriba de 25 Kg/cm².

Para la inyección de lechadas a baja presión, las bombas de gusano con motor eléctrico y neumático o de combustión interna, son las más adecuadas; teniendo como ventaja el inyectar grandes volúmenes de lechada sin existir variaciones de

presión. Para presiones medianas y altas, las bombas neumáticas de ámbolos son las que generalmente se emplean.

Control de la inyección.

Antes de iniciar un tratamiento se hace una estimación aproximada del volumen de inyección requerido, basándose en el índice de vacío del material a tratar, para tener un panorama de hasta donde es necesario inyectar.

La presión de inyección se fija en función de la carga hidrostática que se debe vencer, las pérdidas de carga que se tienen en los conductos de inyección y el grado de impermeabilización ó consolidación que se desee, tomando en cuenta las condiciones naturales que indican los estudios preliminares.

Una vez determinado el volumen por inyectar y la presión, es necesario interpretar diariamente la evolución de la inyección, lo cual se puede visualizar mediante la elaboración de graficas de profundidad contra volumen y presión.

Se debe vigilar en forma estricta la manera de elaborar las secciones, verificar que el equipo trabaje adecuadamente, que las dosificaciones sean las correctas de acuerdo a lo especificado y que en forma general, los trabajos sean ejecutados lo mas correcto posible. Los resultados de las observaciones se registran en graficas, indicandose los consumos de lechada, presiones de inyectado con su respectiva fecha, lo cual permite visualizar de manera objetiva todas las eventualidades del tratamiento y delimitar zonas que requieran de tratamiento adicional.

3. IMPERMEABILIZACIONES.

Los estudios de investigación que se hacen para determinar la permeabilidad en el suelo es un complemento de información necesaria, ya que la perforación de un pozo de muestreo no es suficiente para conocer el estado real del terreno.

La permeabilidad a través del agrietamiento o fisuras en la roca o suelo se mide por medio de las pruebas Lugeón y Lefranc efectuadas en el sitio de la perforación.

Prueba Lugeón.

La prueba consiste en inyectar agua a presión en tramos de perforación lo cual tiene por objeto tener una idea aproximada de la permeabilidad de la roca o material granular cementado. Se varía la longitud de los tramos probados, así como la presión a la que se inyecta el agua. La llamada unidad Lugeón corresponde a una absorción de 1 litro de agua por minuto por metro de sondes, con una presión de inyección de 10 Kg/cm².

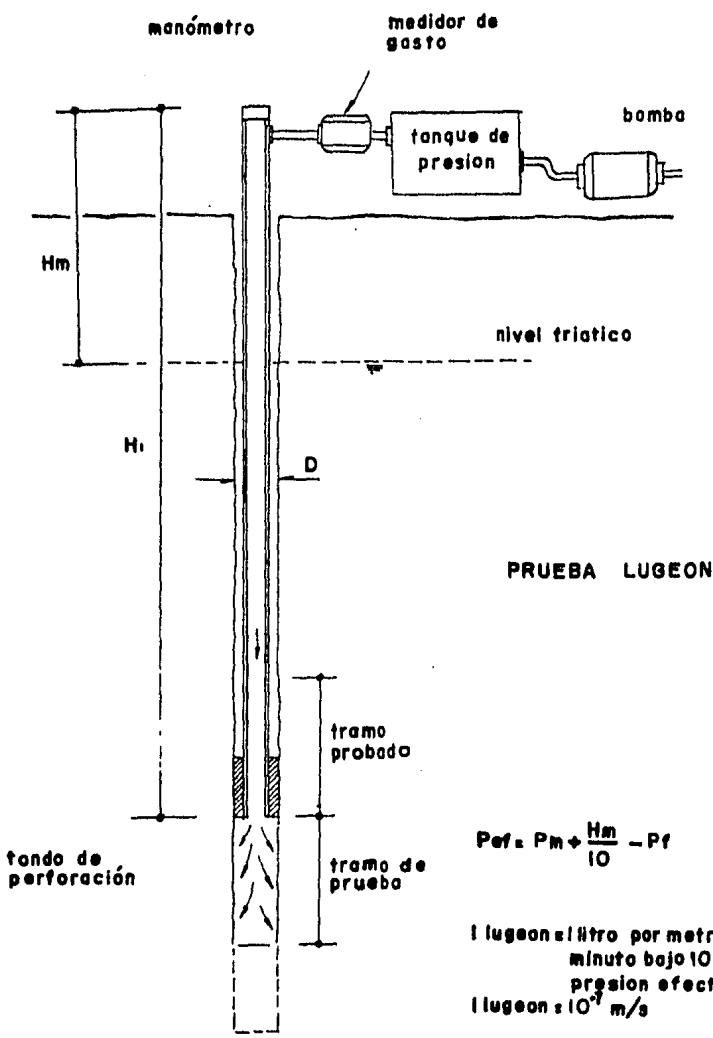
La longitud de los tramos de perforación en los que se realiza la prueba debe adaptarse a la naturaleza del terreno. En algunos casos resulta adecuado el empleo de tramos de prueba — de longitud reducida (1 m o menos) con objeto de analizar detalladamente zonas de características excepcionales. El esquema general de montaje del equipo necesario aparece en la Fig. 25.

La realización de la prueba consiste en lo siguiente.

1. Se anotan los datos correspondientes al tramo probado; - profundidad del nivel fríatico (obtenida al estabilizarse el nivel de agua en la perforación), profundidad y longitud del tramo probado y diámetro y longitud de la tubería de inyección.
2. Se aplica el primer incremento de presión de inyección se observa el gasto correspondiente y se espera de 5 a 10 -- min. a que se estabilice. Se anotan los valores del gasto y de la presión correspondiente en el registro de prueba, (Fig. 26).
3. Se repite el paso anterior hasta llegar a una presión -- máxima de 10 Kg/cm² y se procede a aplicar decrementos de presión, registrando los valores de presiones y gastos -- correspondientes. La presión considerada debe ser la presión efectiva P, en la zona de prueba, que se obtiene a partir de la presión leída en el manómetro P_m, pérdidas -- por fricción en el tubo alimentador desde el manómetro -- hasta el obturador P_e, así como la profundidad del nivel-fríatico con respecto al plano de la lectura del manómetro.

$$P = P_m + \frac{H_m}{10} - P_e$$

4. Se calcula el valor de la absorción en unidades Lugeón, -- dividiendo el gasto correspondiente a la prueba de 10 Kg/cm², expresado en Lt/min, entre la longitud de la zona -- probada, expresada en metros. Para dar una idea de una --



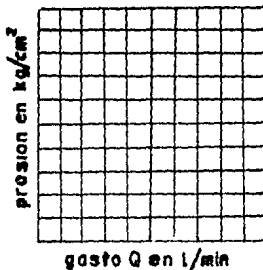
NOTA: Cuando no exista manto freático se tomará H₁ como carga en Kg/cm² en vez de Hm.

DIRECCION DE PROYECTOS
 departamento de ingeniería experimental
 mecánica de suelos

PERMEABILIDAD DE CAMPO
 prueba lugon

obra _____
 localización _____

fecha _____
pozo _____
prueba num. _____
inclinación _____
prof. del nivel freatico _____
altura del manómetro con respecto al nivel del terreno _____
tubería de inyección _____
diámetro interior _____
num. de coples _____
obturador _____
tipo _____
longitud _____



presión leído kg/cm ²	gasto (venturi) l/min	dur. min.	observaciones	presión correg. kg/cm ²	gasto l/min.

observaciones _____
 operador _____ cálculo _____ fecha _____

unidad Lugeón se puede establecer que si se tubiera un medio poroso y homogéneo, sometido a una prueba de inyección, que diera una absorción igual a una unidad Lugeón, su permeabilidad sería: $K = 1.3 \times 10^5$ cm/seg.

Interpretación de la prueba.

El valor de la absorción en unidades Lugeón no es la única información que se puede obtener. La forma de las curvas gasto-presión es muy variable (Fig. 27) y depende de la fisuración del suelo, distribución y espesor de las fisuras, tipo de relleno, etc. Si se aumenta la presión de inyección se puede observar que la variación del gasto no es lineal, salvo en algunos casos.

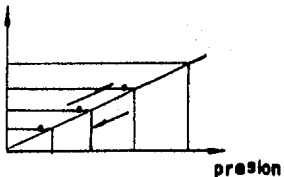
El tapamiento y destapamiento de grietas con materiales de relleno a diversas presiones, provocan el aumento o disminución de la permeabilidad, esta variación debe considerarse para valorar la permeabilidad de diseño.

Algunas discontinuidades en las curvas gasto-presión pueden atribuirse a la abertura y cierre reversible de las fisuras que provocan una variación no lineal del gasto con la presión de inyección.

Prueba Lefranc.

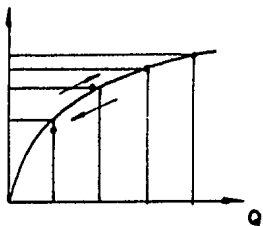
Esta prueba tiene por objeto medir con cierta precisión el coeficiente de permeabilidad en algún punto de un terreno --

gasto



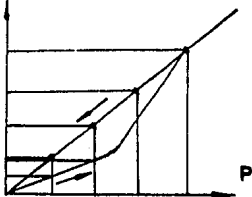
escurrimiento laminar

P



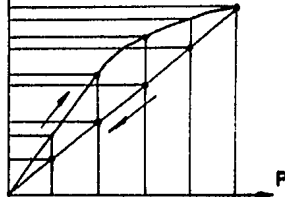
escurrimiento turbulento fisura grande o falla de sello del obturador.

Q



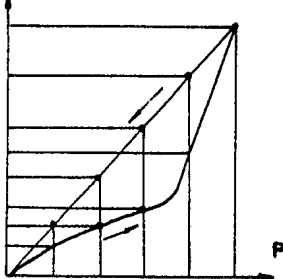
destapamiento a presion

Q



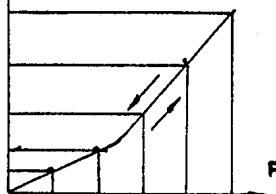
taconamiento a alta presion

Q



destapamiento a alta presion

Q



apertura y cierre reversible de las fisuras

cuando existe un manto freático que satura el material. La prueba consiste en inyectar agua en una cavidad del terreno, de forma geométrica definida, situada debajo del nivel freático, con una carga pequeña constante de agua. La medida del gasto y de la carga que lo origina permite calcular el coeficiente de permeabilidad K , en la vecindad de la cavidad.

Si Q es el gasto de inyección y H la carga aplicada, se tiene:

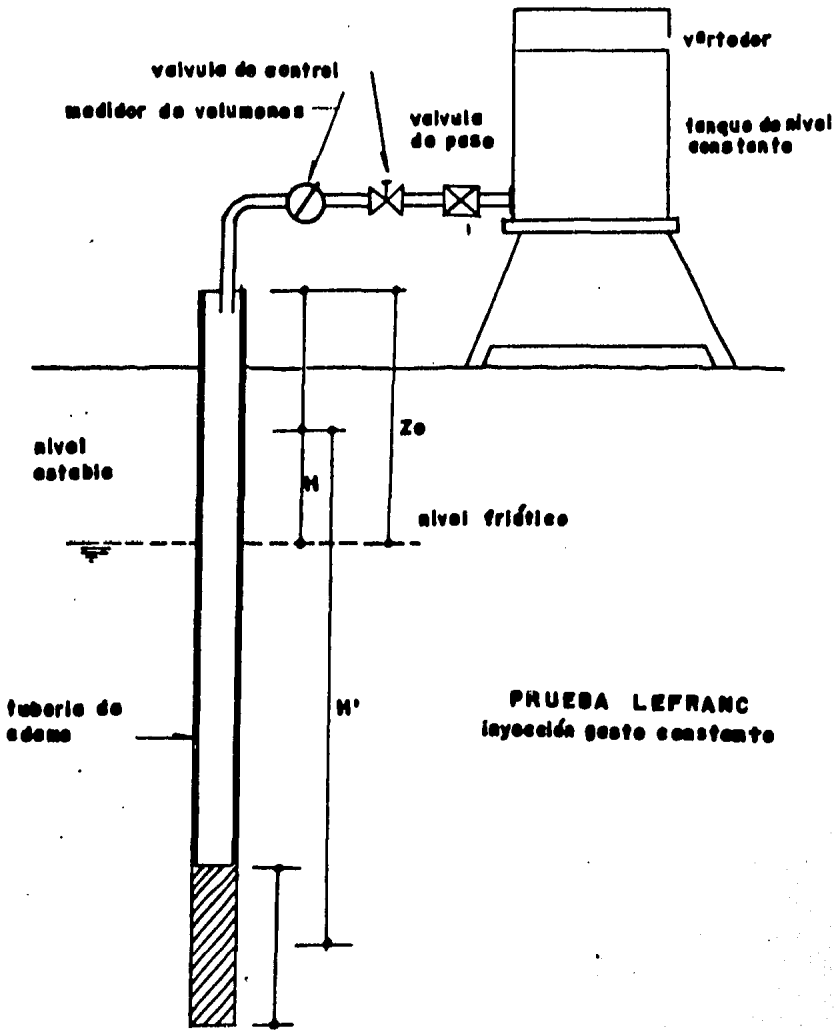
$$Q = C K \Delta H$$

donde C es un coeficiente que tiene dimensión de longitud y que caracteriza geoméricamente la prueba (forma de la cavidad) cuyos valores son los siguientes:

Cavidad en forma de disco de radio r	$C = 4r$
Cavidad semiesférica de radio r	$C = 2\pi r$
Cavidad esférica de radio r	$C = 4\pi r$
Tubo perforado de longitud l y radio r	$C = \frac{4}{l \log \frac{l}{r} - \frac{1}{2H}}$

Para la realización de la prueba se dispone de un tanque de carga constante, una válvula de compuerta o globo para controlar un medidor de volúmenes y un cronómetro, y la forma más usual para efectuarla es la siguiente: (Fig. 28)

1. Se realice una perforación hasta la profundidad deseada, estabilizando las paredes mediante un edema, el cual se rellene con grava limpia de muy alta permeabilidad, sobre una longitud igual a la deseada para la prueba. A conti---



- h** profundidad del nivel estable de agua
M Carga cuando el nivel frídico está arriba del centro de la cámara filtrante.
M' Carga cuando el nivel frídico está por abajo del centro de la cámara filtrante.

Fig. 28

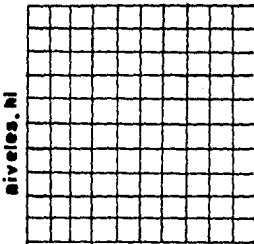
DIRECCION DE PROYECTOS
 departamento de ingeniería experimental
 mecanica de suelos

PERMEABILIDAD DE CAMPO
 prueba lefranc

obra _____
 localizacion _____ fecha _____

pozo num. _____ prueba num. _____
 longitud ensayada, L, de _____ a _____ operader _____
 nivel fríctico, H, _____
 diametro del difusor, D, _____
 volumen del recipiente de gastos _____

lectura del nivel del agua en la part, H,	tiempo min.	tiempo necesario para llenar el recipiente de volumen conocido.	gasto inyectado
h ₁ _____	t ₁ _____	T ₁	Q ₁
h _n _____	t ₂ _____		
h _n =H ₁ _____	t _n _____		
h ₁ _____	t ₁ _____	T ₂	Q ₂
h ₂ _____	t ₂ _____		
h _n =H ₂ _____	t _n _____		



$Q_2 = CK \Delta H$ $\Delta H = H_0 - H_i$

$$C = \frac{4}{L \cdot \log \frac{2L}{D} - \frac{1}{2H}}$$

H = profundidad del tramo probado con respecto al nivel fríctico

observaciones _____
 operador _____ calculó _____ fecha _____

muación se levante el ademe un metro quedando la perforación lista para realizar la prueba.

2. Se mide la profundidad del nivel freático Z_0 , respecto a la parte superior del ademe.
3. La prueba se iniciará vertiendo agua dentro de la perforación calibrando con la válvula de control hasta que el nivel se estabilice. En ese instante se iniciará a contar el tiempo de la prueba que por lo general es de 10 min. Terminado este tiempo se tomará en el medidor el volumen inyectado.
4. Se repite la prueba, disminuyendo los gastos inyectados con lo que los niveles estables irán bajando y en cada operación se tomará el tiempo y el volumen inyectado.
5. Se calcula el coeficiente de permeabilidad del material mediante las formulas correspondientes al caso de un tubo perforado de longitud L (generalmente 1 m) y radio r :

$$Q = C K (H - H_0)$$

$$K = \frac{Q}{C (H - H_0)}$$

donde

$$C = \frac{4}{L \log \frac{2L}{D} - \frac{1}{2H}}$$

La interpretación de los resultados de estas pruebas, es de suma importancia, ya que de ello dependen los trabajos para el tratamiento del terreno.

Una permeabilidad de 1.0×10^{-6} o mayor se puede considerar como un material impermeable, con 1.0×10^{-5} como poco permeable, de 1.0×10^{-4} como permeable y entre 1.0×10^{-3} y 1.0×10^{-2} cm/seg. como altamente permeable.

Dentro de otras pruebas para determinar la permeabilidad -- del suelo en campo, aunque no son tan usuales como la Lugeón y Lefranc en el caso de inyecciones, se encuentran:

- a) Pruebas de bombeo
- b) Pozos de filtración y de absorción
- c) Micromolinetes
- d) Trazadores radiactivos

Una vez terminado el estudio geológico y de permeabilidad del sitio, el tratamiento estará de acuerdo con el tipo de obra que se va a ejecutar. Si se trata de la cortina de una presa se considerará el tipo de formación en que se desplantará para adoptar la forma de la pantalla de impermeabilización y ver la necesidad de hacer consolidación del suelo, en el caso de túneles la impermeabilización se realiza cuando las aportaciones del agua al túnel son de tal magnitud que las operaciones del ciclo de excavación (barrenación, explotación y rezago) no pueden realizarse o se ejecutan con rendimiento incooperable, o cuando las instalaciones de bombeo para evacuar el agua, son insuficientes, requiriéndose un procedimiento que si bien no elimine la aportación de agua, mantenga esta dentro de límites aceptables compatibles con la capacidad de bombeo para evitar inundación del túnel.

El tratamiento de consolidación se realiza cuando la resistencia al corte de los materiales por excavar es tan baja que es necesario incrementarla por aglutinación de la masa con algún producto de inyección o bien cuando habiendo fallado un material es preciso recomprimirlo para impartirle la resistencia necesaria para que pueda ser excavado.

La impermeabilización depende de varios factores de los que los principales son:

- a) Espesor de la zona por inyectar.
- b) Permeabilidad de la roca.
- c) Tolerancia del gasto filtrado a través del terreno.
- d) La naturaleza del agrietamiento en la roca.

Las pantallas de inyección suelen quedar en un plano vertical o inclinado en una o dos hileras y generalmente se programa en etapas y progresiones; entendiéndose por etapas el localizar perforaciones adicionales, a la mitad entre perforaciones ya inyectadas, en la etapa anterior la progresión consiste en perforar, lavar e inyectar un tramo de pozo. En la primer etapa se inyectan los pozos a una equidistancia, tratando de que cada perforación rellene el máximo de grietas, juntas y huecos, aplicando la mayor presión permisible sin que se comunique la mezcla de la perforación adjunta de la misma etapa. Terminada la primer etapa se efectuará la segunda con pozos intermedios a los de la primera para cubrir algunas imperfecciones dejadas por la primera, en algunas ocasiones será necesario programar una tercer etapa.

Para determinar si la inyección se debe considerar terminada se deberá verificar que:

- a) Se haya inyectado el volumen máximo especificado.
- b) Se haya alcanzado la presión máxima especificada sin que el barreno haya tomado el volumen máximo especificado
- c) Cuando se hayan sellado las filtraciones aunque no se hubiese alcanzado el volumen o presión máximos.

El método de inyección muy utilizado es por medio de tubos de manguitos y obturador doble ya que facilita su aplicación con progresiones ascendentes y generalmente son a cada metro dependiendo de las filtraciones que se tengan, procediendo en fases sucesivas en la vaina y el barreno de inyección.

4. CONSOLIDACION EN ALUVIONES. Y MACIZOS ROCOSOS.

La consolidación permite lograr una reducción de vacíos, - ya sea por medio de la aplicación de una carga estática, o bien por medio de la adición de materiales dentro del terreno, esta acción va acompañada de la expulsión de agua del suelo.

Como hemos dicho anteriormente la consolidación de terrenos se realiza con el fin de mejorar las características físicas -- del suelo, ya sea para mejorar la resistencia al corte de los materiales que van a estar expuestos a cargas adicionales.

Por lo tanto la consolidación mejora las características - de un suelo en lo que se refiere a:

- a) Resistencia mecánica.
- b) Resistencia a cargas adicionales.
- c) Impermeabilidad.

Los factores que primordialmente influyen en la obtención de una consolidación económica son:

- a) Contenido de humedad.
- b) Granulometría del material.
- c) Geología del sitio.
- d) Tipo de método de consolidación.

Estos tratamientos se llevan a cabo principalmente en --

terrenos muy malos, como son aquellos que presentan una cohesión muy reducida y admiten cargas muy limitadas. Entre estos suelos se encuentran las arcillas blandas, limos y lodos que plantean problemas considerables para la ejecución de las obras.

Para el diseño de la obra se intentará trabajar exclusivamente con esfuerzos verticales o al menos con componentes horizontales pequeños para evitar deslizamientos, se fijará un centro de empuje tan próximo como sea posible al eje de la obra -- para obtener una repartición lo mas uniforme posible de los --- esfuerzos verticales.

Características de los aluviones.

El termino aluvión se aplica a depósitos fluviales. Sin -- embargo para fines de inyección se utiliza para designar todo - material terreo, elástico, no cementado excluyendo las arcillas y aún los limos.

Los sedimentos pueden ser homogéneos en cuanto a dimensión de partículas y permeabilidad como lo son los depósitos de arena ó bien ser muy heterogéneos, como los depósitos originados por derrumbes.

Los sedimentos depositados por los rios, son heterogéneos- y estratificados, por lo cual resulta factible distinguir estratos arenosos y de gravas bien definidos, que corresponden a - variaciones de la velocidad de la corriente durante el depósito.

Las propiedades de estos depósitos deben investigarse por-

medio de pruebas que proporcionen datos locales, como son ---- pruebas de granulometría y permeabilidad con objeto de definir la dimensión de los poros del suelo, dentro de estas pruebas-- se encuentran las ya mencionadas Lugeón y Lefranc.

Cuando se inyectan lechadas de cemento inestables, para - que los granos puedan penetrar en los poros del suelo, es necesario que sus dimensiones sean mucho menores que los de los -- vacíos del suelo, en caso contrario se formarán bovedas de --- granos de cemento entre los granos del suelo que impiden el -- paso de la lechada. Esto ha llevado a establecer varios criterios de inyectabilidad, uno de ellos es el siguiente.

$$\frac{D_{15} \text{ aluvión}}{D_{85} \text{ lechada}} > 15$$

donde:

- D_{15} aluvión. Diámetro en milímetros, tal que el 15 % de -- las partículas del aluvión sean menores de - dicho diámetro.
- D_{85} lechada. Diámetro en milímetros, tal que el 85 % de las partículas de la suspensión sean menores que ese diámetro.

Por otro lado, por ser inestables van a sedimentarse las - partículas sólidas al disminuir la velocidad de filtración. Si se supone que el diámetro del canal de filtración aumenta repentinamente de d , a D , en este caso la velocidad de la corriente de filtración disminuye, y el cemento se sedimenta. Posteriormente la presión de la corriente arrastra este depósito y

tapa el canal en la parte del diámetro $d_1 < D$, y la inyección ya no progresa. Por lo tanto para sedimentos cuyo tamaño de granos es menor de 5 ó 10 mm., es preciso emplear lechadas estables.

Para verificar la estabilidad de las lechadas se realizan pruebas de sedimentación en tubos, procediendo en cuanto a forma, volumen e inclinación del tubo. Se mide en función del tiempo la variación de la altura del agua libre, o bien se procede por el procedimiento ya descrito anteriormente.

Mezclas.

Para la consolidación conviene utilizar lechadas que tengan alguna afinidad química con los granos del medio. Por ejemplo, una lechada de cemento y arcilla mejorará su cohesión por aumentar el ángulo de rozamiento interno del macizo inyectado. Con Silicato de Sosa se logra algo mucho mejor, una probeta inyectada es unas tres veces mas resistente que la lechada pura, pero los mejores resultados se obtienen con las resinas organicas.

Una resina pura da 50 Kg/cm². Mezclada con arena sílica se obtienen 60 Kg/cm², pero con arena calcárea la resistencia desciende a 7 Kg/cm².

La misma resina diluida en un volumen de agua resiste 7 Kg/cm² con arena sílica de 30 Kg/cm² y con arena calcárea 7 Kg/cm².

Además interviene la granulometría del medio. De este modo se han podido medir 2 a 3 Kg/cm² con los intervalos de

granulometría siguientes:

0.001-0.2 ; 0.10-0.14 ; 0.2-10 ; 2-5 mm

y 7 a 8 Kg/cm² con:

0.1-1 y 0.2-1 mm

Por lo tanto conviene siempre realizar ensayos de laboratorio para escoger la lechada en función de las condiciones -- técnicas y económicas, ya que las resinas que suelen dar casi siempre los mejores resultados son enormemente caras.

Presión de inyección.

El papel desempeñado por las presiones de inyección está-- bastante claro, y constituye una característica física del procedimiento. Estas presiones aumentan la adherencia del depósito a los terrenos y contribuyen a evitar un fraguado en un suelo -- mas o menos fangoso; ensanchan las fisuras demasiado estrechas-- y hacen penetrar en ellas la lechada de cemento a mayor profundidad y llegan a crear en el terreno nuevas fracturas formando una red a través de la cual la circulación de agua queda limi-- tado por fuertes pérdidas de carga.

Las presiones de impermeabilización a diferencia de las de consolidación deben ser menores ya que unicamente se requiere -- bloquear el paso del agua lo cual ésta misma ayuda a dirigir -- la trayectoria de la mezcla, en el caso de consolidar el suelo las presiones serán mayores, debido a que se deberá conseguir -- lo descrito anteriormente.

5. APLICACIONES.

COLECTOR SEMIPROFUNDO DE IZTAPALAPA.

Para dar salida a las aguas negras y pluviales del noroeste del valle de México, así como evitar el peligro de inundaciones en esta zona de la ciudad, el Departamento del Distrito Federal ordenó la construcción del Colector Semiprofundo de Iztapalapa.

Esta obra de desague está diseñada para trabajar por gravedad aliviando la laguna de regulación de Iztapalapa y captando volúmenes de agua residual que circula por los colectores, Canal de San Juan, Ejercito de Oriente y Central de Abasto.

El Colector Semiprofundo de Iztapalapa inicia en la laguna de regulación, donde se encuentra la lumbrera 6 en la colonia - Zona Urbana INDECO, siguiendo sobre la avenida Marcelino Buendía y termina en la lumbrera, Carcamo de bombeo, localizada en río Churubusco y el eje 5 Sur, frente a la Central de Abastos.

Esta obra consta de 7 lumbreras que unen el túnel a una profundidad promedio de 15 metros. (Fig. 30)

Actualmente se encuentra construida la lumbrera 1 (lumbrera de rejillas), la lumbrera 2 y 3 y una excavación del túnel - hasta casi llegar a la lumbrera 3. La excavación se inició en el tramo lumbrera 1 - lumbrera 2, ejecutándose por medio del método convencional de escudo de frente presurizado a base de lodos, que permite mantener estabilizados los suelos mientras

se avanza, ya que estos están integrados principalmente por mantos de arcilla de baja compresibilidad intercalados con mantos de limo, arena y combinaciones de estos (zona del lago). (Fig. 31)

Posteriormente de la ejecución del revestimiento primario (ademe con dovelas) se reforzará con un revestimiento definitivo de concreto de alta resistencia para mejorar su resistencia a empujes externos del terreno y proporcionar la rugosidad adecuada para el buen escurrimiento de las aguas.

La capacidad de diseño del colector es de 20 M³/seg. regido por un diámetro exterior de 4.00 m., con un revestimiento primario de 3.50 metros y el revestimiento definitivo de 3.20 metros de diámetro interior.

Datos del Colector Semiprofundo de Iztapalapa.

Longitud total	5 837 m.
Número de lumbreras	7
Diámetro exterior	4.00 m.
Diámetro interior	3.20 m.
Pendiente geométrica	0.0005
Gasto de diseño	20 M ³ /seg.
Velocidad máxima	1.6 m/seg.
Prof. media de plantilla	15.00 m.
Profundidad máxima	16.82 m.
Área transversal	12.56 M ² .

La lumbrera 1 contará con rejillas para limpieza de las

LOCALIZACION COLECTOR SEMIPROFUNDO DE IZTAPALAPA

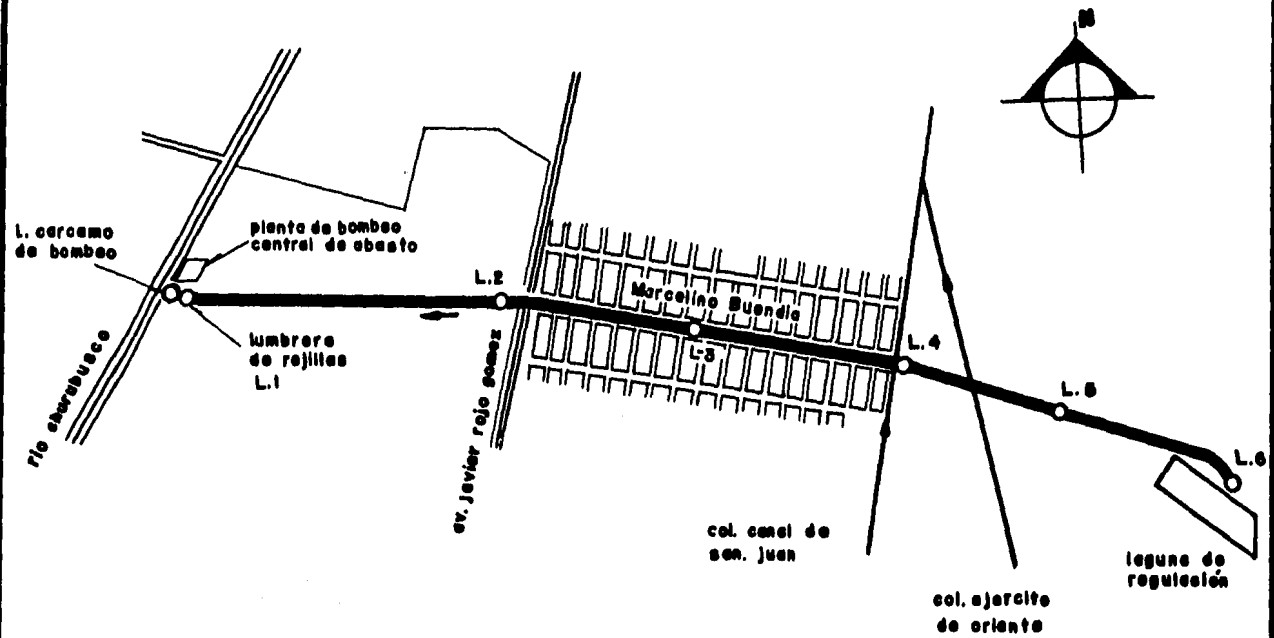


Fig. 30

PERFIL COLECTOR SEMIPROFUNDO DE IZTAPALAPA

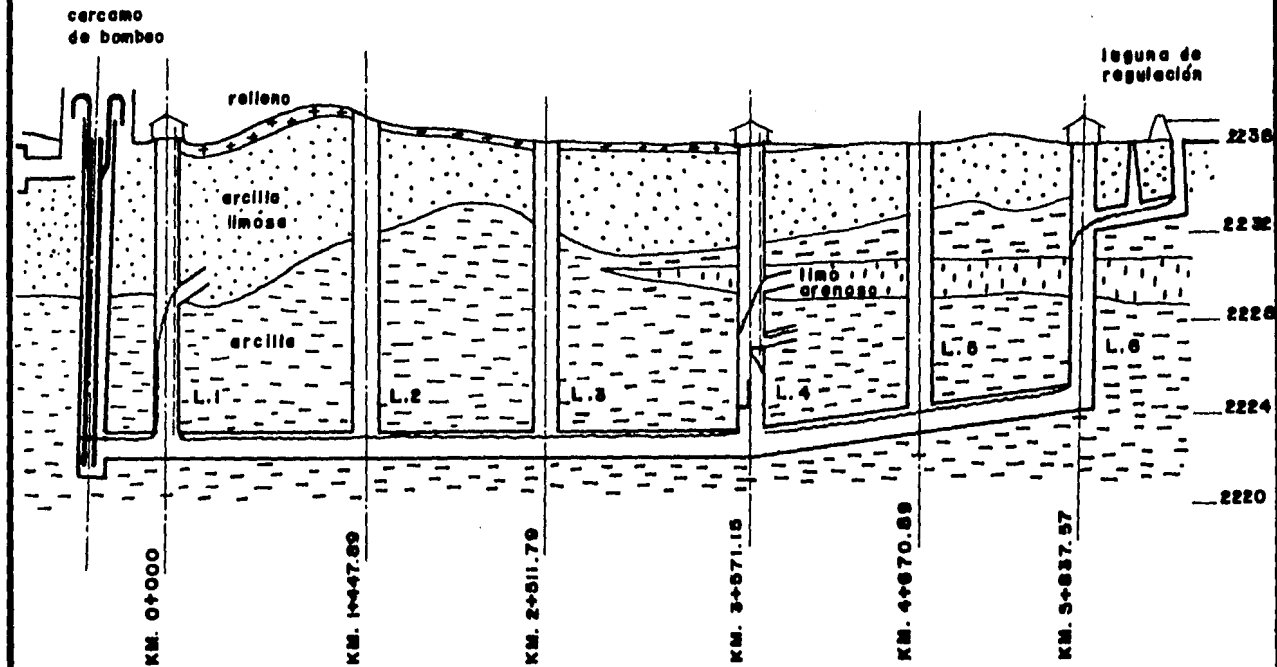


Fig. 81

aguas y poder pasar al Carcamo de bombeo de donde se bombeará para el cajón del río Churubusco. En la lumbrera 4 se dejará una preparación para conectar a futuro con el Interceptor de Oriente Sur.

Tratamiento de consolidación.

A continuación se detallan los trabajos efectuados para el reforzamiento del material en la zona de la llegada del túnel a la lumbrera núm. 2, así como la salida del mismo hacia la continuación de este colector.

Es conveniente aclarar que los trabajos efectuados, fueron similares a los realizados en la salida de la lumbrera 1, que fue donde se inicio la excavación. Estos trabajos se realizaron a una profundidad inicial de 15.90 m. con 60 barrenos de inyección y con una mezcla de las mismas propiedades que para el caso que se enuncia a continuación.

Debido a que la zona por excavar está formada totalmente por material enteramente arcilloso de baja compresibilidad, -- los empujes y alivios de terreno producidos por el paso del escudo pueden originar desplazamientos que pueden perjudicar las condiciones de estabilidad del terreno, por lo que ha sido necesaria la aplicación de un tratamiento de consolidación -- para el mejor desarrollo de los trabajos.

Este tratamiento de inyección tiene por objeto.

- a) En la llegada del escudo, formar un collar impermeable - y resistente del suelo tratado, con el fin de evitar -- filtraciones de agua ó inestabilidad del suelo hacia el frente del escudo.

- b) Para la salida del escudo hacia la lumbrera 3, estabi-- lizar la zona del suelo, proxima a la pared de la - lumbrera para facilitar la introducción de éste en el - terreno.

De esta manera los trabajos se dividieron en dos partes, primeramente se inyectó la sección de llegada con 44 barrenos y posteriormente la sección de salida con 66 barrenos.

Para la ejecución de este tratamiento se siguió el sistema puntual de barrenos, cuya mezcla se inyectó a alta presión, lo que facilitó un rompimiento de la estructura arcillosa del - suelo, penetrando donde se requiera y depositando de esta -- manera la mezcla en las fracturas que la presión provoca.

Barrenos.

Primeramente los trabajos se iniciaron con la perforación de los barrenos, para tal caso se perforó el brocal exterior de la lumbrera que se encuentra en esta zona, utilizando perforadoras neumáticas y una vez alcanzado el terreno firme, para dar la profundidad del barreno se utilizarón dos perforadoras Longyear.

Los barrenos fuerón totalmente verticales de 10 cm de -

diámetro (4 pulg.) colocados a cada metro de separación. Esta configuración de barrenos formará un delantal de 3 m. de espesor con respecto al paño de la lumbrera, abarcando casi 11 m. de extensión en sentido horizontal y 12 m. en sentido vertical mas de 6 m adicionales para alcanzar la profundidad donde se inicia el tratamiento. (Fig. 32 y 33)

De la misma manera para la salida en la lumbrera, se ejecutarán una serie de barrenos, como se indica en la figura, en esta figura se indica graficamente la geometría del area que cubrirán los barrenos así como la profundidad que deben alcanzar. En terminos generales se busca formar un delantal de suelo tratado que tenga 8 metros de ancho, 6 metros de espesor y 10 metros de altura. Además para evitar filtraciones hacia el túnel se extenderá un tapete de inyecciones alrededor del boquete de salida del escudo abarcando 2 metros adicionales.

Tubos de manguitos.

Una vez perforados los barrenos se procede a colocar tubos de fierro con perforaciones de 3.8 cm (1 1/2 pulg) de diámetro, las perforaciones en el tubo tendrán una separación de 50 cm. dentro de la zona de tratamiento, estas perforaciones serán tapadas con un hule llamado manguito de 10 cm. de longitud. (Fig. 34)

Inyección de vaina.

Una vez colocados los tubos de manguitos en su perforación se procede a la inyección de vaina y consiste en rellenar el

vacio entre la pared del tubo de manguitos y la pared de la perforación con el proposito de fijar dicho tubo. La forma de inyectar es ir colocando el centro del obturador en las secciones de manguitos o sea cambiandolo a cada 50 cm. e ir inyectando el volumen predeterminado para cada progresión.

Esta inyección se hará desde el fondo del barreno hasta la boca de la perforación.

Esta inyección se hará con una mezcla de bentonita-cemento, cuyo proporcionamiento sea adecuado para darle una resistencia a la compresión simple a los 28 dias de 6 Kg/cm² lo cual se logra agregando 350 Kg de cemento a un M³ de lodo bentonítico previamente hidratado no menos de 8 horas al 8 %. La presión ejercida en este caso realmente es muy pequeña ya que unicamente se requiere cubrir el volumen en el espacio para fijar el tubo perforado.

La proporción de la mezcla es.

Agua	69.4 %
Bentonita	5.6 %
Cemento	25.0 %

Una vez inyectado en cada progresión se realiza una limpieza en el interior del tubo de manguitos y a toda su longitud por inyectar, con la finalidad de eliminar todos los residuos de la mezcla utilizada en la vaina.

Inyección.

Para llevar a cabo la inyección se procede a introducir

la tubería de inyección dentro del tubo de manguitos, procurando colocar el doble obturador de inyección en cada una de las perforaciones del tubo perforado, es decir se tendrán progresiones de 50 cm. empezando de la mas profunda a la mas superficial.

La mezcla es preparada en un agitador vertical de donde se manda por medio de una bomba Moyno a una máquina agitadora Ac - 2, donde se continúa en agitación para impedir la sedimentación. De estas máquinas agitadoras se bombea a las perforaciones con bombas neumáticas a la presión requerida.

El equipo utilizado es el siguiente.

- 2 Perforadoras Longyear
- 2 Bombas Moyno
- 3 Bombas perone neumáticas
- 2 Máquinas agitadoras AC-2

La inyección se realiza en dos etapas en cada perforación separadas entre sí un lapso no menor de 48 horas.

Se inyectó a presión una mezcla de bentonita-cemento -- que tendrá como propiedad alcanzar una resistencia a la -- compresión simple a los 28 días de 4 Kg/cm². Esta mezcla se logra agregando 350 Kg de cemento en un M³ de lodo bentonítico al 8 % previamente hidratado no menos de 48 horas.

Agua	60.4 %
Bentonita	5.0 %
Cemento	25.0 %

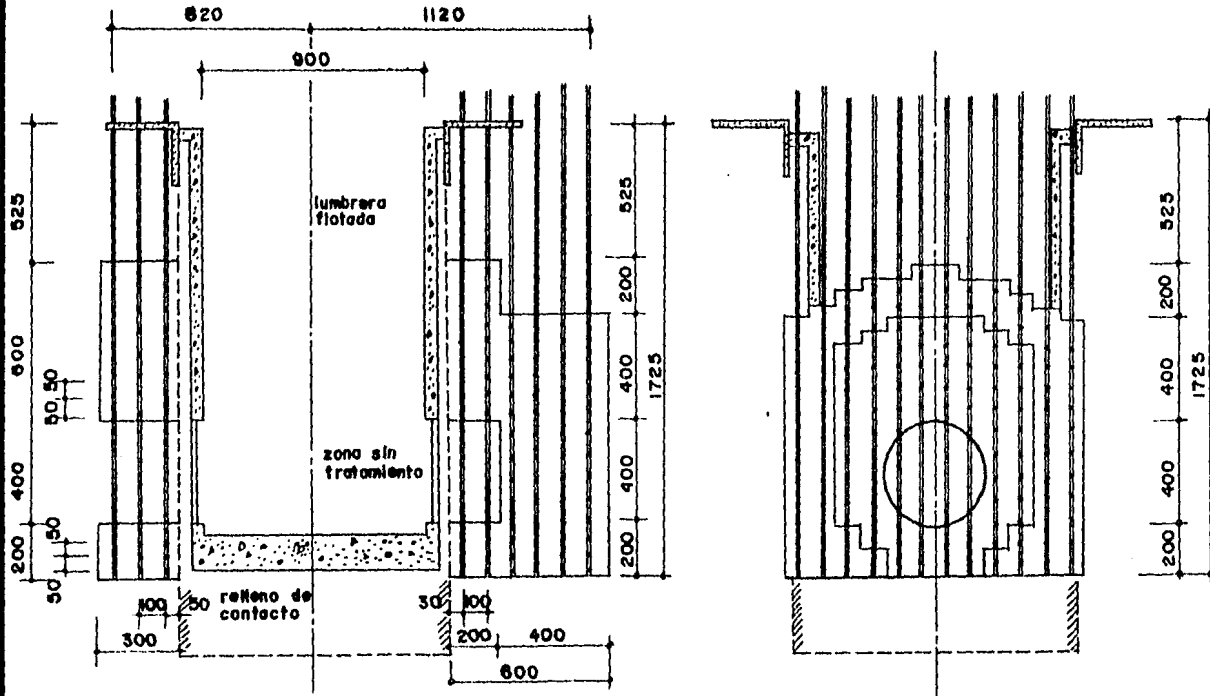
Al formar la mezcla se le añade un aditivo acelerante SIKKA al 25 % del peso del cemento, para que la mezcla frague rapidamente y no se disperse por el material y ademas para que esté fraguado antes de inyectar el barreno vecino, e impedir que la mezcla circule mas adelante. El tiempo de fraguado de la lechada por lo regular es de 5 min., el radio de acción de la lechada se encuentra entre los 50 cm del barreno.

En la primera etapa las presiones de inyección no deben ser mayores de 5 Kg/cm² y se considera terminada cuando se alcanza la presión máxima establecida, o bien cuando el volumen del material inyectado llegue a 0.25 M³.

En la segunda etapa de inyección las presiones máximas que se aplican son de 10 Kg/cm², esta presión está considerada para que rompa el material tratado por la primera etapa y se introduzca en él mejorando sus cualidades de resistencia, es decir, se pretende que la mezcla, busque o forme fisuras por donde pueda circular hasta alcanzar su radio de acción, se considerará que el terreno correspondiente a la perforación ha quedado tratado cuando se alcanza la presión establecida o el volumen inyectado llegue a 0.25 M³. En ciertos casos especiales se aplicará una tercera etapa de inyección en los puntos donde los volúmenes inyectados resulten escasos.

En el espacio donde llegará el escudo no se inyectará para evitar que el escudo encuentre mayor obstaculo a su paso, donde se debe tener mucho cuidado en la colocación del obturador.

TRATAMIENTO A LA ENTRADA Y SALIDA DE LA LUMBRERA 2



acot. en cm.

Fig. 32

LOCALIZACION DE BARRENOS DE TRATAMIENTO DE LA LUMBRERA 2

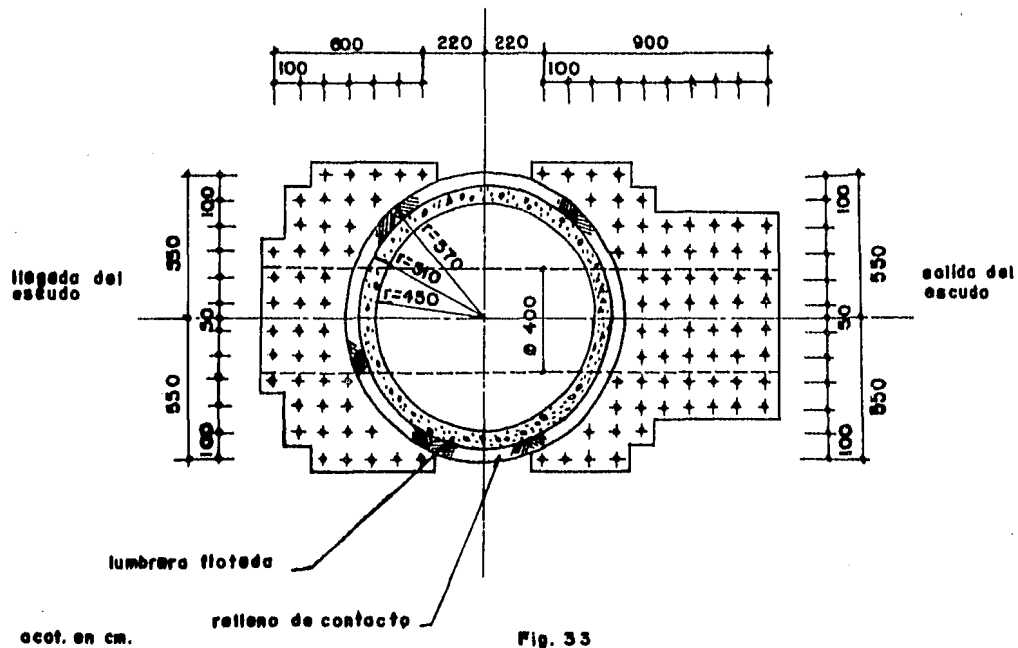
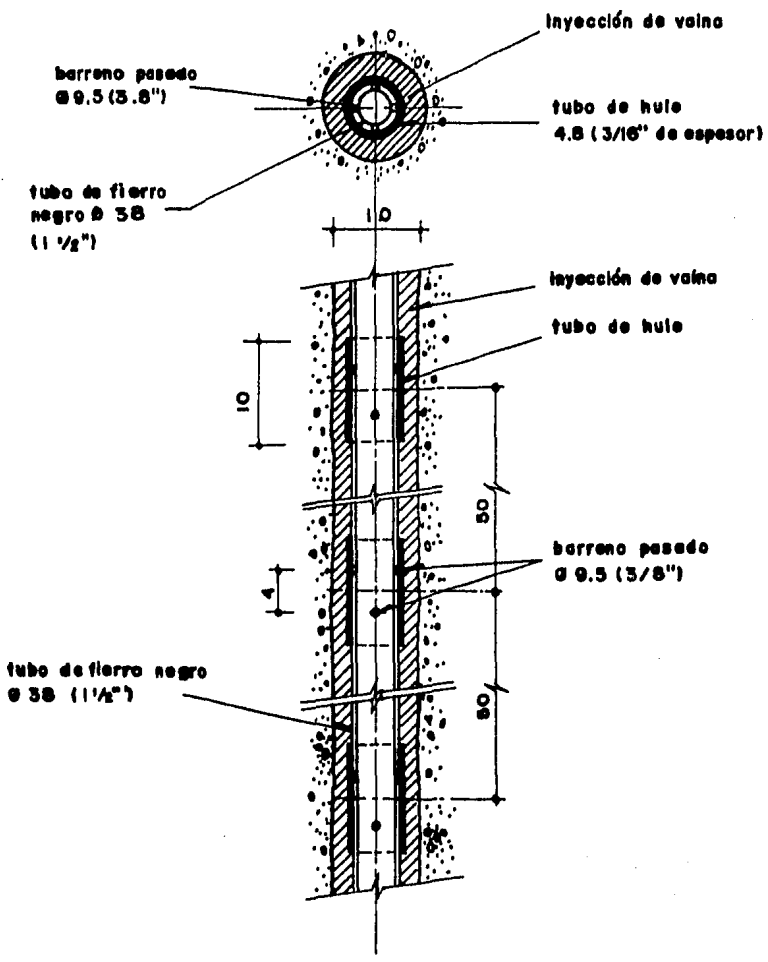


Fig. 35

CROQUIS TUBO DE MANGUITOS UTILIZADO EN EL TRATAMIENTO DE LA LUMBRERA 2



b) Descripción del escudo.

Cuando los suelos por donde va a pasar la excavación de un túnel son muy blandos y se pretende hacer uso del aire comprimido el cual esta restringido por el aspecto humano, ya que en la práctica se ha registrado que para presiones mayores de 1.2 Kg/cm^2 , las enfermedades por descompresión aumentan su índice hasta un 20 %, el cual ya no es aceptable por las normas que rigen el uso del aire comprimido en túneles, para lo cual se llego a la conclusión de utilizar una herramienta en la excavación que es mas elaborada y que costa de una cabeza cortadora y una zona en el frente del escudo que se presuriza mediante lodo para estabilizar el suelo a excavar.

El escudo consiste de un cilindro de metal rígido que cubre la sección frontal del túnel, puede dividirse en tres secciones; la parte delantera formada por dientes que van cortando el material, una estructura intermedia que sirve para rigidizar la coraza y alojar los sistemas hidraulicos que empujan el escudo y en la parte trasera una coraza cilíndrica en donde se coloca el ademe provicional, o sea las dovelas.

El escudo en sus tres partes debe ser capaz de resistir primero, la fuerza o el peso del terreno que actuan sobre él en forma perimetral; segundo, el empuje contra las dovelas para poder encajar en el terreno. (Fig. 35)

A estos sistemas de excavación se le denomina genericamente como escudos de lodos. Estos sistemas se han desarro--

llado en Inglaterra, Alemania y Japón, correspondiendo a éste último, el mayor kilometraje de túneles construidos con este sistema. Actualmente se cuenta en México con un escudo cortador y es el primero que se usa de este tipo.

Dentro de las propiedades que juegan un papel importante en la calidad de los lodos y por lo tanto su utilización mas económica son sus características tanto físicas como mecánicas, por lo que deben controlarse los valores correspondientes a su viscosidad (va en relación su tixotropía), su contenido de -- arena que es importante por la estabilidad de la mezcla, su - volumen de agua en prueba de infiltrado para que el terreno -- no absorba la humedad, etc.

Para poder efectuar recirculación de lodo a presión, es - necesario contar con desarenado y regeneración, lo que se logra pasando por el sistema de tratamiento, fabricación y almacenamiento de lodos que consiste en una serie de carcamos de decan tación.

La herramienta de corte es un disco plano con cuatro --- ranuras dentadas, capaz de girar en cualquiera de los dos senti dos a razon de 1.1 a 1.6 r.p.m. Para efectuar el empuje del - escudo, se logra mediante 16 gatos hidráulicos de 1.15 m. de - carrera, y tienen un diámetro de 15 cm y 100 ton. de capacidad, que se apoyan sobre las dovelas de concreto previamente coloca das en el faldón, la distribución de los gatos se encuentra en el contorno de la sección del escudo y generalmente es mayor en la mitad inferior ya que este tiende a clavarse. Estos se acci onan al mismo tiempo si el escudo va en línea correcte y en - porciones en caso contrario se accionan parcialmente, en la -- sección donde el escudo necesita girar. Cabe mencionar que el

avance del escudo es independiente del corte de la cabeza en el frente, es decir, conforme avanza la cabeza cortadora se accionan los gatos de reacción produciendo el avance de todo el sistema.

Para que el escudo pueda moverse se deben considerar los siguientes factores.

- a) La fricción del terreno sobre la superficie exterior de la camisa del escudo.
- b) La reacción del anillo de dovelas sobre los gatos de apoyo.
- c) La resistencia del terreno que no ha sido excavado en frente del escudo.

Entre el disco cortador y la máquina se encuentra una mampara estanca, que permite confinar el lodo presurizado garantizando así la estabilidad del frente y además se tiene otras dos opciones para dar mayor seguridad de trabajo; el ademe mecánico que establece la cara del escudo, ya que, éste puede cerrar sus ranuras y presionar contra el terreno, en caso de emergencia y teniendo extendida toda la cabeza cortadora, el escudo está adaptado para realizar inyecciones con barrenos radiales y retrocediendo el cortador se forma una cámara donde se puede tener acceso para extraer el obstáculo de material que accidentalmente se encuentra a su paso.

Todas las virutas del material cortado se mezclan mecánicamente con el lodo por medio de cuatro licuadoras de aspas, posteriormente se expulsa el lodo del frente mediante bombeo a lo largo del túnel y la lumbrera, así llega a la superficie

un lodo de alta densidad, normalmente de 1.08, el cual por medio de decantación se detienen partículas gruesas de material producto de la excavación, logrando aligerar el lodo a una densidad de 1.02, para poder recircular nuevamente al frente. (Fig. 36)

Por lo tanto tenemos.

Presión frontal	0.65 Kg/cm ²
Gasto suministrado	3.0 M ³ /min
Gasto extraído	3.5 M ³ /min
Densidad de suministro	1.025
Densidad de extracción	1.08
Vel. de suministro B 1	1100 r.p.m.
Vel. de extracción B 2	800 r.p.m.
Volumen excavado	5 M ³ /min
Volumen extraído en un metro de avance	15.5 M ³

El escudo cuenta con un borde cortador que se proyecta un mínimo de 10 cm. adelante de las ranuras dentadas alrededor de su periferia, con objeto de hacer mínimo el remoldeo del suelo y alrededor del escudo. Este borde contribuirá a formar un tapón, el cual actuará como sello para restringir la pérdida del fluido a presión, este mismo cortará y confinará las grietas transversales angostas, que se encuentren en la trayectoria del escudo antes que las ranuras dentadas lleguen. Esto reducirá las pérdidas de presión y los ajustes subsecuentes en el fluido, por efecto del llenado de grietas.

Ya que la penetración del escudo con su cara cortante -

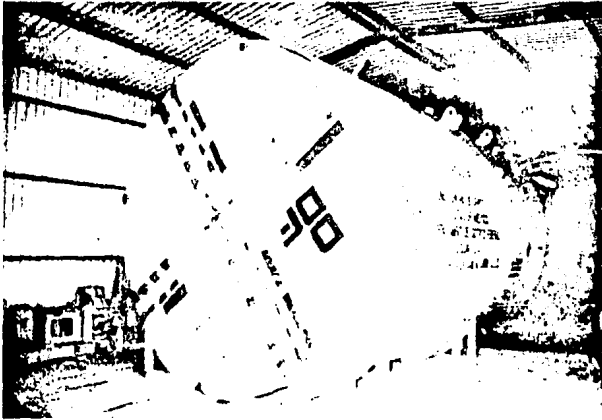
está protegido por la mampara delantera es imposible ver si la excavación es convenientemente transportada hacia la línea ó no. Todos los datos concernientes con la seguridad de la -- operación son detectados por instrumentos de medición y números indicadores en todo momento. Estos datos alimentan continuamente las computadoras donde el control semiautomático y computarizado conducen fuera del túnel la excavación.

Cuando el escudo ha avanzado un cierto tramo este tiende a girar sobre su eje longitudinal, en un sentido y en la -- siguiente excavación gira en sentido inverso. Las tuberías de suministro y de descarga son telescópicas y se les puede hacer un aumento cuando está parado.

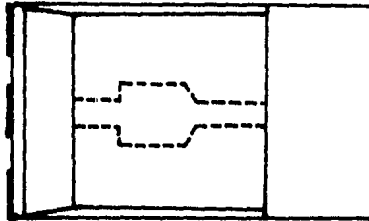
Datos del escudo.

Velocidad máxima de empuje (p/gato)	20 cm/min
Velocidad real de empuje (p/gato)	3 - 6 cm/min
Presión de gatos (trabajable)	90 Kg/cm ²
Núm. ideal de gatos requeridos	15
Empuje total	450 Ton
Presión máx. del gato cortador	100 Kg/cm ²
Presión real del gato cortador	50 Kg/cm ²
Velocidad del cortador	1.1 - 1.6 r.p.m.
Amperaje motores (trabajable)	60 Amp.
Tiempo de ejecución (promedio)	35 min.

El dispositivo de medición del sistema puede juzgar la -- calidad propia de la rezaga detectando la cantidad de fluido de lodo por medio de sensores eléctricos, así como también, -- su densidad la cual nos la da una señal ultrasónica, el cuarto de control inmediatamente computa el volumen de la rezaga --



cabecera
cortadora parte
 central falda



Escudo cortador cuyo avance es controlado según sus 16 getos hidráulicos distribuidos en su contorno.

Fig. 10

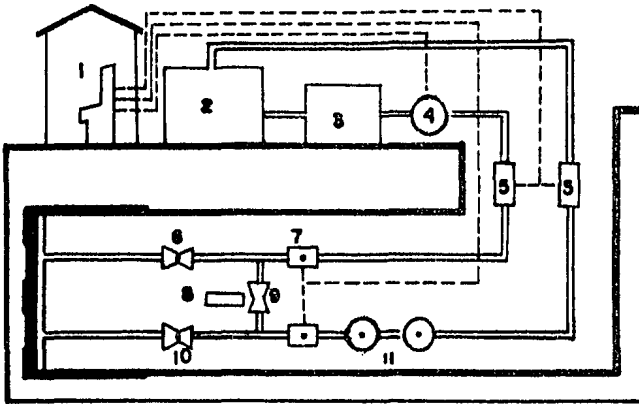
determinandolo mediante un volumen teórico según la sección transversal del túnel y su avance.

El arreglo de la distribución del sistema requiere de un gran espacio para el procesamiento del lodo mismo que posee - serios problemas en la conservación del ambiente por el estado de la arcilla. La distribución de la planta de lodos se estandarizo en base a la sección transversal del túnel manejando - ciclos de trabajo. Los lodos sedimentados son extraídos de los depositos por medio de una motogrua mecánica y vaciados - en camiones volteo para su tiro, otra parte de lodo con cierta viscosidad son enviados al cajon del rio Churubusco.

A medida que se va excavando se lleva a cabo la inyección de contacto entre la dovela y el terreno natural. Esta inyección se realiza 3 anillos atras del que se esta excavando, cuando el anillo se encuentra fuera del faldón, ademas para evitar que la lechada se filtre hacia el túnel en construcción existen -- sellos deslizantes entre el faldón del escudo y la superficie externa de las dovelas, así como también, entre anillos de --- dóvelas se cuenta con un sello con el mismo fin.

Posteriormente a estas dos actividades simultaneas se -- procede a la colocación del anillo de dovelas ya excavado. --- Para el ensamble del anillo, algunos gatos de empuje se retiran dejando libres los lugares donde se colocarán las primeras -- dovelas, una vez fijas se apoya sobre estas los gatos que se encuentran en su dirección y se procede a colocar las demas y se apoyan los gatos hasta terminar el anillo. Para la colocación de las dovelas se dispone de un anillo erector el cual - evita el entorpecimiento que se podría generar por esta acción.

Así sucesivamente, se va repitiendo el procedimiento una



- 1 tablero de control central
- 2 tanque de descarga de lodos -
- 3 tanque de mezclado de lodos
- 4 bomba de suministro de lodo
- 5 medidores de flujo
- 6 valvula de admision
- 7 medidores de densidad
- 8 estuador
- 9 valvula by-pass
- 10 valvula de descarga
- 11 bombas

Diagrama del sistema de bombas mediante el cual se espulizan las virutas del material cortado.

Fig. 36

y otra vez, cuando las operaciones del túnel paran en días - festivos o fines de semana el frente es protegido contra un posible colapso, así mismo, cuando las dovelas son colocadas. El sistema tiene valvulas y bombas controladas automaticamente para asegurar la protección estabilizadora del frente en todo momento.

Una de las actividades importantes, es el alineamiento - de la línea de centro del escudo con la del trazo, ya que de acuerdo a el funcionamiento de sus 16 gatos es posible facilmente que se desvie de su línea, considerando este efecto, es revizada su posición una vez que se termina cada empuje por - medio del transito y nivel y en tramos rectos se utiliza el rayo laser. Las variaciones registradas varian de 0 a 5 cm. - en forma horizontal y vertical lo que se considera aceptable por ser valores pequeños.

Dovelas. (segmentos para ademe del túnel)

Deben tener las siguientes características.

- a) Suficiente capacidad de carga para soportar la presión total (suelo mas agua) sin que exista deformación ó -- filtración.
- b) Resistencia a los esfuerzos de impacto debido a un manejo brusco, transporte y colocación.
- c) Resistencia a altos esfuerzos axiales, producidos por los gatos de empuje durante el avance del escudo.
- d) Resistencia a la humedad y a los efectos del agua del terreno sobre el segmento mismo, así como resistencia a la corrosión.

e) Economía en construcción y mantenimiento.

Las dovelas utilizadas en este túnel son de concreto y tienen una resistencia de $f'c = 350 \text{ Kg/cm}^2$, y el anillo está formado por 6 dovelas, 5 iguales y una de cerramiento, unidas por medio de 10 tornillos distribuidos en su perímetro.

El sello que se debe lograr para impedir que la lechada se salga por las uniones entre dovelas, se realiza colocando entre ellas sellos de hule duro espumoso, que satisface adecuadamente el problema. El diámetro interno es de 3.5 m. con 17.5 cm de espesor, las que posteriormente se recubrirán con el revestimiento definitivo que será de 15 cm. de espesor.

Inyección de contacto.

La inyección de contacto es una operación importante, - por lo que los objetivos de esta son:

- a) Establecer un relleno compacto en el espacio anular.
- b) Estabilizar el terreno circundante lo cual reduce la presión del suelo contra las dovelas del túnel.
- c) Actúa como sello para el agua.

Ya colocado el anillo el espacio entre dovelas y terreno generalmente es de 5 cm, que es la sección dejada por el faldón del escudo y que será rellena por la lechada 3 anillos a atrás del excavado.

Generalmente esta inyección se lleva a cabo en una sola etapa dando el volumen y presión adecuados.

Los elementos que constituyen la mezcla son cuidadosamente bien revisados, por lo que se envían al laboratorio para realizarles ensayos.

Agua. Deberá ser agua tratada, libre de sedimentos, materia orgánica ó impurezas.

Bentonita. La bentonita es un factor importante ya que es el agente que mantiene en suspensión las partículas.

Arena. Esta deberá estar constituida por partículas muy finas.

Cemento. El cemento será del tipo 11.

La proporción de la mezcla utilizada para este caso es:

Cemento	200 Kg.
Arena sílica	180 Kg.
Bentonita	50 Kg.
Agua	400 lts.

Siendo un volumen por bacha de 0.539 M³.

El volumen inyectado es de 1.078 M³ y 1.3475 M³ ó sea - 2 y 2.5 bachas intercaladas una y otra.

En cada proceso de inyección la mezcla es preparada en la salida del túnel y transportada hasta el frente de excavación.

Inicialmente se emboquilla la manguera a la perforación con una cruz de tubería mostrada en la figura y se procede a la circulación de la mezcla. Para llevar a cabo la inyección se utiliza una bomba Moyno con cono sobre una estructura móvil para el traslado hasta el lugar de los trabajos. (Fig. 37)

La inyección se da por terminada cuando se logra inyectar el volumen establecido manteniendo una presión de 1.5 -- Kg/cm² como mínima y de 2.0 Kg/cm² como máxima. Con este -- volumen y presión se logra cubrir el espacio libre entre anillos y el terreno y además se logra que la mezcla se introduzca en el terreno por lo menos 10 cm.

La impermeabilización plena de la sección del túnel se logra cuando la mezcla alcanza su estado de fraguado, que por lo general se encuentra entre una duración de 5 horas, evitando así filtraciones hacia el interior del túnel.

Datos técnicos.

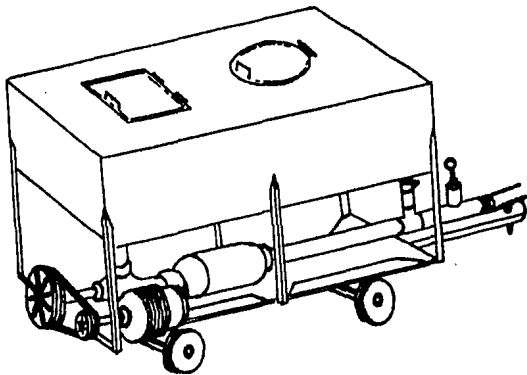
Consumo de cemento	0.2 tton/M ³ de mezcla
Consumo de bentonita	0.05 ton/M ³ de mezcla
Consumo de arena	0.18 ton/M ³ de mezcla
Rendimiento efectivo	3.4035 M ³ /hr de inyección

Observaciones.

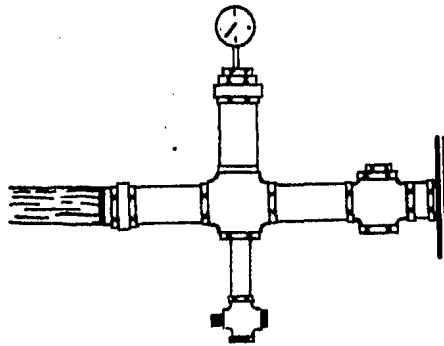
El equipo auxiliar para efectuar la inyección consiste -- fundamentalmente de válvulas a la salida de la bomba, para permitir el paso de la mezcla y controlar la presión hacia la -- perforación, de un manómetro a la salida de la bomba y otro -- en la cruz a la entrada de la perforación, y una válvula de purga para aliviar la presión a la hora de retirar la tubería.

Instalaciones.

Para la preparación de la mezcla se utiliza; un agitador



tanque móvil de inyección



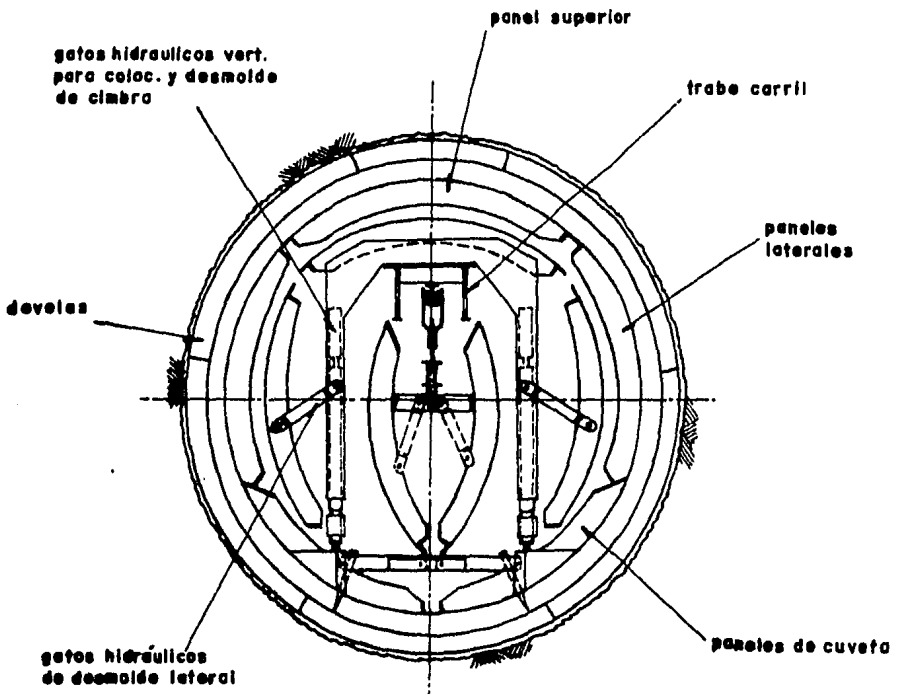
entrada de lechada al terreno

vertical con capacidad de 1 M³, el cual proporciona las bachas hasta lograr el volumen deseado. Los elementos de la mezcla se surten por tanques verticales donde se encuentran; la arena, el cemento y el agua, de donde por medio de básculas se descarga solamente la cantidad requerida para la mezcla, la bentonita se abastece por medio de bultos de 50 Kg directamente al agitador. Estos materiales son agitados durante 3 minutos y se descargan al tanque móvil.

c) Revestimiento definitivo.

Es conocido en la Ingeniería, que la ejecución de una cavidad subterránea, altera el estado de esfuerzos alrededor de la misma, cuyo radio de influencia varía, dependiendo de las propiedades mecánicas del subsuelo, por lo que en la mayoría de los casos es necesario instalar un ademe primario, que comúnmente se le conoce como revestimiento primario, el cual impide que la cavidad se cierre o se produzca un posible colapso -- durante la construcción de la cavidad subterránea, el revestimiento primario estará actuando en forma temporal, para dar paso a la construcción de un segundo revestimiento adicional, el cual se colocará sobre el primero reforzándolo, siendo conocido como revestimiento definitivo. Ambos revestimientos se consideran que estarán sujetos a cargas que a largo plazo se presentarán sobre la cavidad.

La carga con la que se diseña la estructura primaria y la estructura definitiva del túnel, depende principalmente de las propiedades mecánicas del subsuelo, de su relación esfuerzo---deformación-tiempo y de la geometría del túnel.



SECCION TRANVERSAL CIMBRA TELESCOPICA

El revestimiento definitivo formará junto con el revestimiento primario y el suelo perimetral una estructura que deberá ser capaz de soportar las cargas que con el tiempo actúen sobre dicho conjunto. El recubrimiento definitivo tomará además las formas y características definidas por el proyecto geométrico de la sección interior de la bóveda.

En el interés de la economía es deseable que la pared de concreto de un túnel sea lo más delgada posible. Los factores que determinan el espesor son: El estado del terreno que rodea el túnel, el tamaño y la forma de la sección transversal, los requisitos de las condiciones de construcción, la presión interna si es un acueducto, la geometría del sitio es esencial para determinar si el terreno es de roca sólida o fragmentada o si es un suelo no consolidado, sujeto a presiones verticales y horizontales. Como la roca sólida no le impone ninguna carga al revestimiento definitivo, el espesor de éste puede ser el mínimo.

Cimbra telescópica.

La cimbra telescópica es de tipo móvil, se construye con miembros de acero para dar una superficie que se conforme a la superficie interior del túnel. Esta cimbra permite el colado en forma continua y esta compuesta por tramos de placas metálicas articuladas, correspondientes a la curva inferior (cubeta), a las paredes y al domo ó clave formando así las secciones, fijándose entre sí por medio de pernos ó tornillos y varias secciones forman un módulo de la cimbra.

La cimbra que está articulada en los cuartos superior e

inferior, se encuentra adaptada a un sistema móvil sobre rieles. A través de una serie de gatos ajustables, es posible expansionar la forma a su tamaño natural y colocar la cimbrera en su posición para colar el concreto y de igual manera se retraen las paredes y se baja el techo para permitir el movimiento de una nueva posición. (Fig. 38) La cimbrera posee puertas articuladas a lo largo de las paredes laterales, clave y cubeta para permitir la inspección detrás de la cimbrera y permitir el vibrado del concreto con vibradores manuales además de vibradores de pared utilizados.

Datos de la cimbrera.

Diámetro interior 3.50 m.

Diámetro exterior 3.20 m.

$$\text{Area} = 0.785(3.50^2 - 3.20^2) = 0.785 \times 2.01 = 1.58 \text{ M}^2/\text{M.L.}$$

La cimbrera está compuesta por 7 módulos de 6.10 M.L. que da una longitud de 42.70 M.L.

Volumen total en la cimbrera.

$$1.58 \text{ M}^3/\text{M.L.} \times 42.70 \text{ M.L.} = 67.47 \text{ M}^3$$

Para el revestimiento en el tramo, lumbrera 2- lumbrera 1 se utilizó en toda su longitud concreto armado con un espesor de 15 cm y acero de refuerzo indicado en la figura 39. Para el colado se utilizaron 2 carros moran ó vagones agitadores de 4 M³ de capacidad, el concreto fue colocado por bombeo a baja presión, fabricado en superficie, teniendo un avance de 30.50

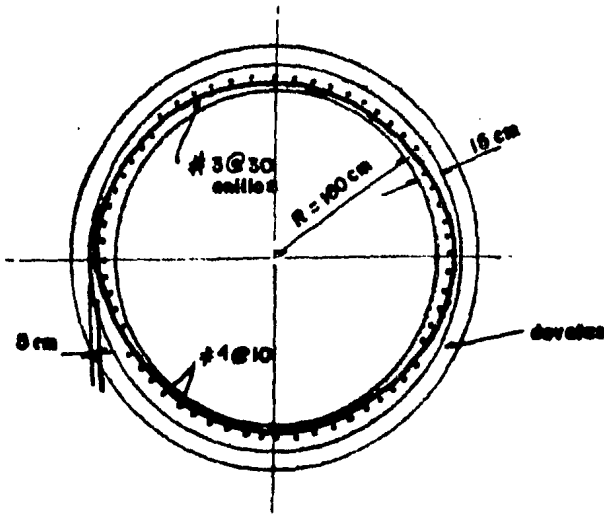


Fig. 39

m.l. de túnel y 48.19 M³ por día.

El procedimiento constructivo, en terminos generales, con siste en lo siguiente.

1. Colocación y nivelación de la cimbra.
2. Preparación del tramo por colar.
3. Transporte del concreto desde la superficie hasta la - cimbra.
4. Colocación y acavado del concreto.

El concreto, ademas de cumplir con los requisitos de resis tencia estructural, durabilidad y estabilidad volumetrica y - baja permeabilidad, necesita tener una trabajabilidad adecuada a las condiciones de manejo y colocación en su posición final y desde el punto de vista hidráulico es fundamental obtener - una superficie lisa terminada.

La prporción de materiales en la mezcla es la siguiente:

Cemento tipo V	420 Kg
Arena	707 Kg
Grava	750 Kg
Agua	210 Lts

La resistencia de proyecto fijada por el diseño estructural se encuentra en 300 Kg/cm². El tamaño máximo del agregado está condicionado por los espesores reducidos, así como por el transporte del concreto en su etapa final, el uso de bomba neumática y tubería rígida de 4" de diámetro, dicho tamaño se limita a 3/4".

Para establecer el revenimiento mas adecuado, se consideró, la perdida de fluidez, motivada por el transporte del concreto, altura de caída a través de la lumbrera, distancia de acarreo - en el túnel y longitud de la línea de bombeo, para compensar - dicha perdida el revenimiento medido en la planta de concreto se especificó de 15 cm, para transportarlo al frente donde se agrega 10 lts. de aditivo fluidizante PUZZOLIT, incrementandose a 18 ± 1 cm.

La base para la verificación de calidad del concreto es - la resistencia a compresión simple de cilindros estandar, fabricados de acuerdo a las normas establecidas y ensayados a la - edad de 3, 7 y 28 dias, el resultado de la compresión de una muestra, consiste del promedio de resistencia de dos cilindros compañeros, probados a la edad mencionada.

d) Instrumentación.

Los objetivos de la instrumentación son los siguientes - y se obtienen por mediciones realizadas durante la construcción del túnel.

- a) Proporcionar elementos que permitan garantizar la seguridad de la excavación.
- b) Obtener, valores que permitan ajustar o modificar los diseños y procedimientos de construcción y revestimiento de acuerdo al comportamiento del subsuelo.
- c) Verificar el modelo analítico para calcular asentamientos en superficie y movimientos horizontales.
- d) Comprovar su comportamiento durante la vida útil de la obra, ante movimientos horizontales y verticales.
- e) Relación de experiencias derivadas de este estudio con los túneles que se requiera construir.

Existen tres estaciones de medición en el tramo comprendido de la lumbrera 1 a la lumbrera 2, para detectar los movimientos del suelo y subsuelo producidos por la excavación del túnel. Estas estaciones están compuestas por dos líneas A y B que incluyen los siguientes aparatos.

- Cinco bancos superficiales.
- Cinco bancos semiprofundos colocados abajo de la costra superficial, a 5.0 m. de profundidad.
- Cuatro bancos semiprofundos colocados arriba de la claw del túnel, a 10.6 m. de profundidad.
- Un inclinómetro a 17.00 m. y cuatro a 20.00 m. de profundidad.

1. Instalación y medición de bancos de nivel semiprofundo.

Los bancos de nivel semiprofundos, son referencias que se instalan entre la superficie y la clave del túnel, consisten de un tapón de concreto al final de la perforación, a la que se acopla una tubería galvanizada continua de 3/4" hasta tener la longitud especificada. (Fig. 40)

La instalación de estos bancos, se hace dentro de la perforación la cual se ha ejecutado previamente con máquina rotatoria y broca triconica de 6" \varnothing . Cuando la perforación llega a la profundidad establecida por medio de la tubería se cuela el tapon de concreto quedando dentro de ella la tubería de registro.

Una vez instalada la referencia de nivel en la perforación se coloca un ademe de 2" \varnothing a partir de 1.00 m, por arriba del registro. Lo anterior es con el objeto de evitar la influencia al rozamiento del material de relleno colocado entre la perforación y la tubería de 3/4" \varnothing .

El banco de nivel semiprofundo se encuentra a diferentes profundidades, a 5.00 y 10.00 metros.

El periodo de lecturas se realiza cada 7 dias, cuando el escudo se encuentra a mas de 50 m. de la sección ya sea antes o despues de la misma y será diaria cuando la distancia de la sección al escudo sea menor de 50 m.

Los asentamientos máximos en superficie se oresentan al centro del eje del túnel y van disminuyendo a medida que se

alejan del eje, el asentamiento que se registra depende en gran medida del tipo de material en la clave y terreno natural. Según observaciones, se empiezan a notar asentamientos cuando el frente de excavación se encuentra aproximadamente a 20 m. - de la sección y se estabilizan cuando el frente de excavación se encuentra a mas de 50 m. de la sección de instrumentación.

Los bancos superficiales instalados en la línea A de la estación 1, presentan un movimiento vertical máximo de aproximadamente 6.5 cm, desde Agosto 1984 hasta el 20 de Febrero 1985. Los asentamientos máximos registrados en los bancos instalados a 5.0 m. de profundidad en la línea A presentan un valor acumulado del orden de 8.7 cm. que representa un incremento de 0.5 cm. en un mes. A 10.60 m. de profundidad en la línea A se presenta un movimiento máximo acumulado de 6.2 cm. que representa un incremento máximo mensual de 0.8 cm. En la línea B se presentan asentamientos menores, siendo los máximos de 3.6 y 4.3 cm. para profundidades de 5 y 10.60 m. de profundidad respectivamente. Comparando estos asentamientos, se tiene que el incremento en los asentamientos causados por túneleo es despreciable.

2. Instalación y medición de bancos de nivel superficial.

Los bancos de nivel superficial, son mojoneras de concreto instaladas en superficie a poca profundidad con barreta y pala ó pala posteadora.

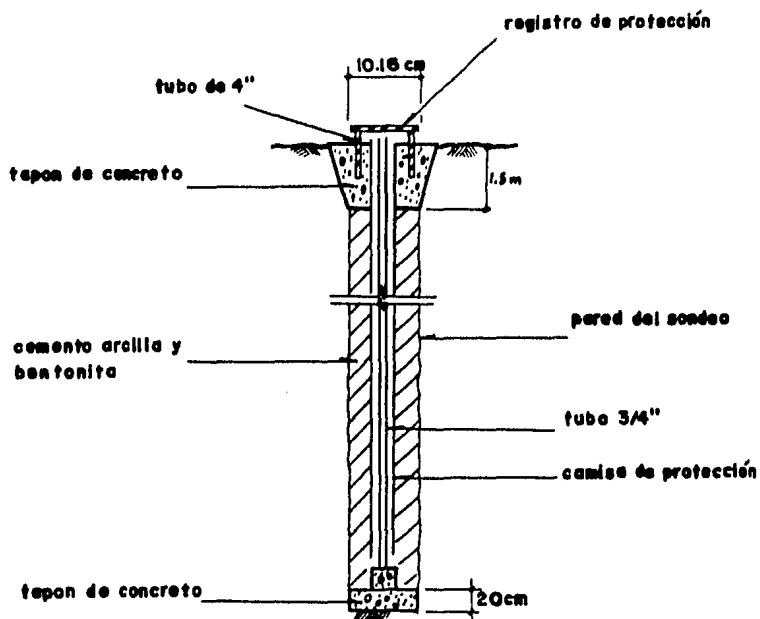
Una vez hecha la perforación, esta se rellena de concreto simple de baja resistencia y se coloca al centro de la perforación.

ración una varilla corrugada de $1/2" \text{ } \phi \text{ } 5/8" \text{ } \phi$ a 25 cm. de profundidad dentro del concreto la cual se hinca cuando se encuentra fresco, dejando 1 cm. libre de concreto para la toma de lecturas de nivelaciones, como se aprecia en la figura 41.

Las estaciones de nivel superficial se encuentran sobre el eje del trazo a cada 50 m. de separación, estas estaciones estan compuestas por cinco bancos de nivel superficial, colocados perpendicularmente al eje del trazo.

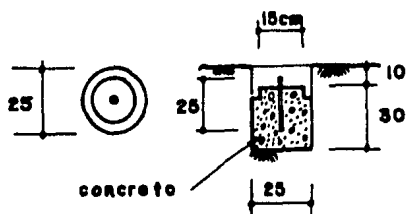
El periodo de lecturas se realiza cada 7 dias cuando el escudo se encuentra a una distancia mayor de 50 m. de la sección en observación y diaria cuando el escudo se encuentra a 50 m. o menor de dicha sección.

En este caso también como el anterior los movimientos máximos siempre se presentan sobre el eje superficial del túnel con una tendencia a disminuir hacia ambos lados a medida que la referencia se aleja de dicho eje. De acuerdo a los datos recabados durante la construcción del túnel se ha podido determinar que la influencia de los asentamientos transversales al eje de excavación son pequeños, al centro de la línea de trazo. Los movimientos máximos registrados en el periodo de lectura del 1 al 8 de Marzo 1985, de la estación N. 3 a la estación de banco de nivel superficial 1 + 382, se ha presentado una deformación acumulada de 6.8 cm en esta última estación y a una distancia transversal de 18.50 m. al eje de excavación, dichos movimientos son insignificantes.



BANCO DE NIVEL SEMIPROFUNDO

Fig. 40



BANCO DE NIVEL SUPERFICIAL

Fig. 41

3. Inclínometros.

El inclínometro es un instrumento de precisión, para -- medir movimientos de deslizamiento, desplazamiento y otros -- tipos de movimientos laterales de tierra.

La tubería para inclínometro consta de tubos circulares - de aluminio de 3" \varnothing y 1.50 m. de longitud, los cuales poseen 4 ranuras longitudinales localizadas en la periferia y distribuidas a 90°.

La preparación de la tubería se realiza uniendo tramos de tubería de 1.50 m. mediante coples de 30 cm. Estos coples van remachados o flejados y sellados con cinta plástica. En el extremo final de la tubería se coloca un tapón de aluminio que evita la introducción dentro de la tubería de lodo, lechada ó terreno. (Fig. 42).

La instalación de la tubería se hace dentro de una perforación de 6" \varnothing , realizada con máquina rotatoria, broca tricónica y lodo bentonítico. La secuencia es como sigue:

Se baja la tubería dentro de la perforación en secciones de 3 ó 4 tramos, procurando que dos de las ranuras de la misma queden en dirección perpendicular al eje del túnel.

Conforme va bajando la tubería se van acoplando las diferentes secciones hasta completar toda la longitud. Una vez que la tubería llega al fondo de la perforación se procede a rellenar la oquedad entre ésta y la tubería con un material de -- igual rigidez que los suelos del sitio que tomará en cuenta - las variaciones estratigráficas.

La tubería del inclinómetro debe satisfacer dos condiciones poco compatibles; transversalmente debe ser rígida y lateralmente muy deformable. Esto se logra con tubos rígidos unidos con coples deformables. Por lo tanto el inclinómetro registrará inclinaciones con respecto a la vertical y puede ser utilizado para determinar desplazamientos horizontales.

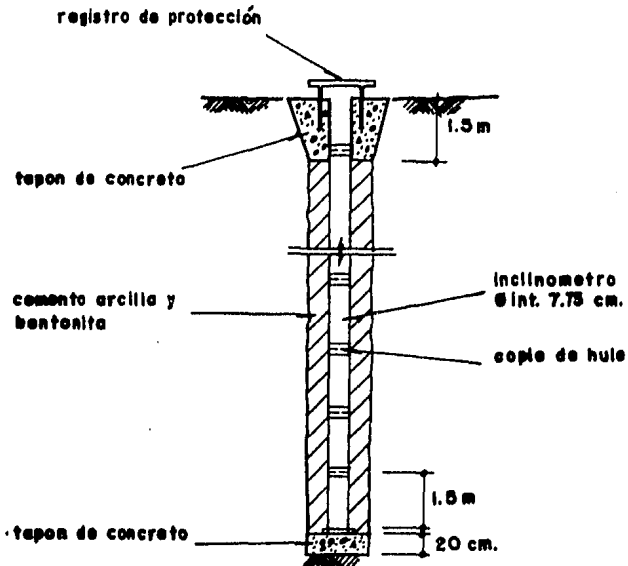
Los resultados horizontales detectados por los inclinómetros en la estación N. 1, para los primeros días de Diciembre 1984, indican deformaciones de hasta 4.15 cm, para el inclinómetro I 2 (N.S.) (Fig. 44)

Al acercarse el frente del escudo a la línea de medición se observa que el suelo se desplaza hacia afuera y hacia adelante, a profundidades de 10.75 m. se observa que los asentamientos empiezan a ser perceptibles cuando el frente de la excavación llega a una distancia aproximada de medio diámetro de la sección de medición.

Los asentamientos máximos por alivio de esfuerzos en el frente son del orden de 0.5 cm, y los movimientos verticales causados por la instalación de las dovelas y el proceso de inyección son del orden de 3.5 cm.

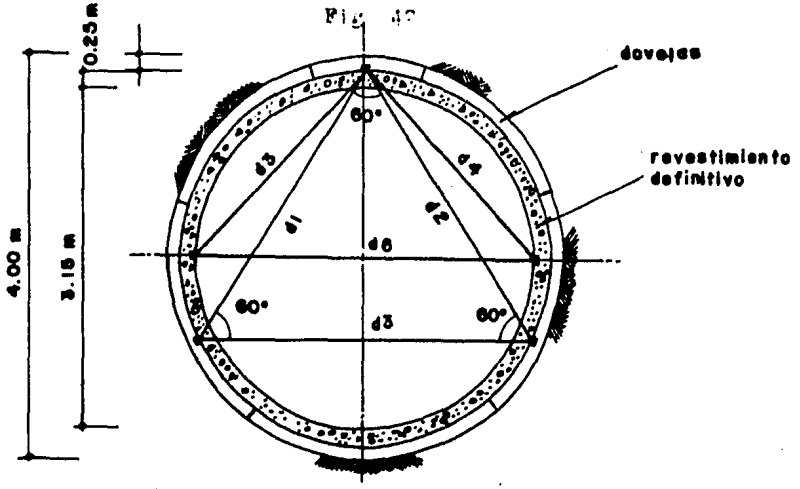
4. Instrumentación dentro del túnel.

A medida que se colocan las dovelas del túnel, se efectúa la colocación de la instrumentación dentro del túnel, la cual será medida diariamente durante la etapa de la excavación.



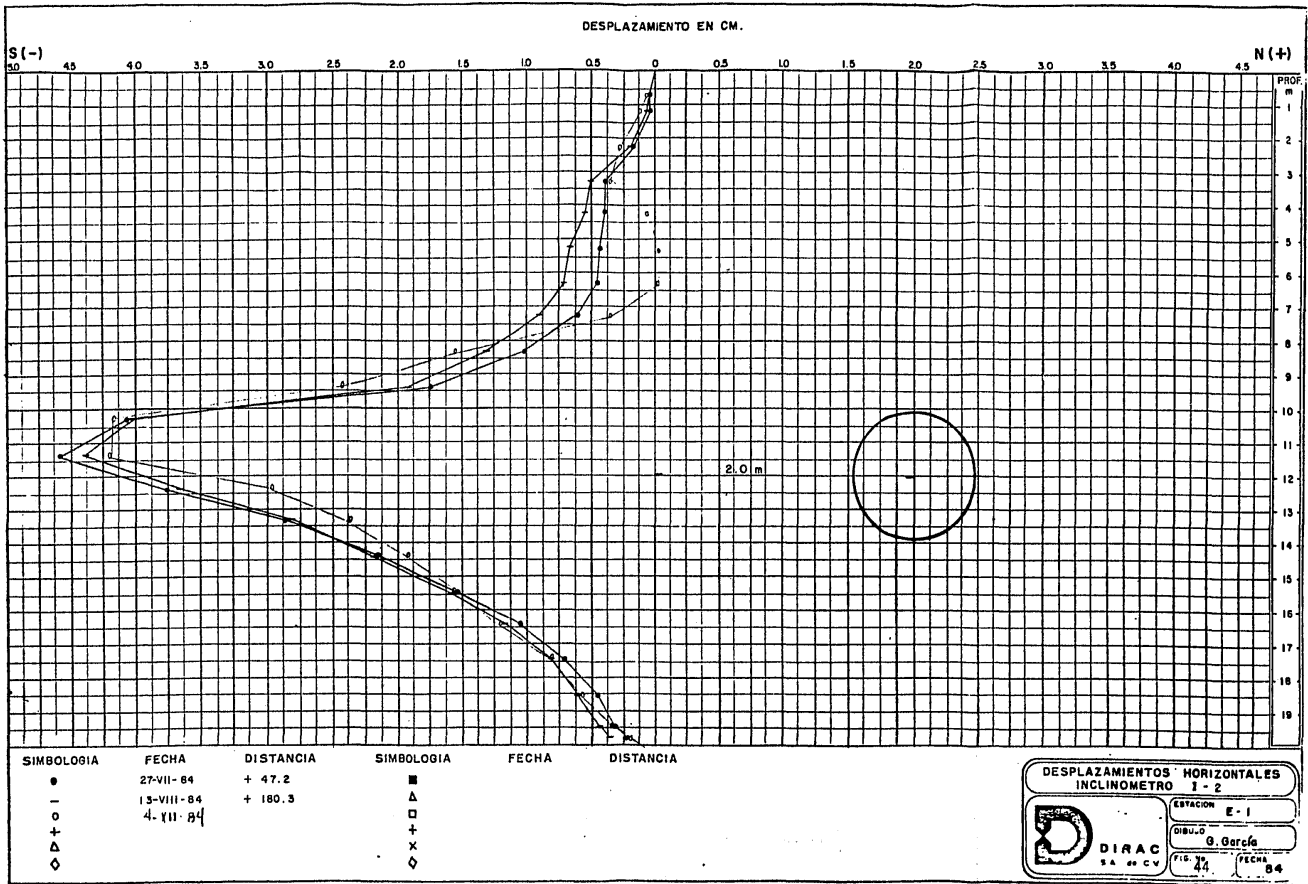
INCLINOMETRO

Fig. 40



LINEAS DE CONVERGENCIA

Fig. 41



Esta instrumentación consta de estaciones de convergencia a cada 25 m. de longitud, midiendo en cada sección seis dimensiones, tal como se muestra en la figura 43. Es conveniente que la colocación se realice cuando las dovelas se encuentran dentro del escudo.

Terminado de construir un tramo del túnel se continúan las mediciones con el fin de conocer el comportamiento de los túneles a largo plazo, estas mediciones se efectúan cada 15 días.

Los resultados indican que cuando las dovelas se encuentran dentro del faldón, se genera un desplazamiento brusco al empujar el recubrimiento fuera del escudo y se estabiliza a los pocos días de instalado el recubrimiento teniendo poca deformación. El alargamiento máximo observado hasta el 16 de Febrero en el anillo 89 cadenamamiento 0 + 093, para la distancia d_6 es de 1.53 cm. estos valores son acumulados desde la fecha de instalación que fue en Agosto 1984.

Los resultados del programa de mediciones realizadas desde el inicio del proyecto hasta Febrero 1985, indican que el túnel es estable y que los asentamientos son tolerables desde el punto de vista de daños a estructuras vecinas al trazo del túnel.

Los máximos asentamientos acumulados que se han presentado son del orden de 6.5 y 6.2 cm. para 5.0 y 10.60 m. de profundidad respectivamente, los cuales ocurrieron en la estación N. 1. Respecto a los movimientos de convergencia se observa que estos son del orden de 12 a 15 mm. de los cuales 7 a 9 mm. ocurren

cuando el anillo de dovelas se expulsa del faldon del escudo. La velocidad de deformación disminuye practicamente a cero en 3 ó 4 semanas. Este comportamiento se ha observado sistemáticamente en todas las estaciones de convergencia.

CONCLUSIONES.

En la inyección de suelos, la base principal para su ejecución es la Mecánica de Suelos; pero no se descarta que la experiencia del Ingeniero, el cual juega un papel importante, debido a que se conjugan los dos aspectos para un mejor y más amplio criterio sobre su ejecución, uno de los conceptos más típicos a que esta sometida la inyección de mezclas son las presiones ejercidas en el suelo alrededor de la zona establecida, los estudios que pueden hacerse sobre el comportamiento del suelo, no son ni pueden ser totalmente representativos, ya que un suelo no se comporta como un material elástico ó plástico perfecto. Además una masa de suelo no puede ser homogénea, isotropo, etc. Sin embargo, el estudio efectuado permite establecer por lo menos normas cuantitativas de interés para explicar ciertas observaciones de campo ó prácticas empíricas utilizadas.

Se ha tenido interés sobre la necesidad y la conveniencia de realizar mediciones en el medio, algunas con mayor importancia, que pueden ser:

Registrar el comportamiento en el espacio afectado, donde induce variaciones en el estado físico del medio que lo rodea, es decir variaciones en esfuerzos y en presiones de las mezclas y estructura del terreno e inducción de deformaciones y desplazamientos de la masa del subsuelo en donde se inyecta.

Los trabajos tienen como origen la responsabilidad que se adquiere para lograr que las obras se realicen cumpliendo tres preceptos básicos que son: seguridad, economía y confiabilidad.

Seguridad en el sentido de que no se ponga en peligro las inversiones aplicadas a la obra, la integridad de los equipos utilizados para su ejecución y mucho menos la seguridad del personal que labora. Economía en el sentido de costos y beneficios correspondientes, establecer los conceptos a que deben aplicarse las erogaciones para ejecutar la obra con el monto requerido para realizarla pero no mucho mas. Confiabilidad en el sentido de que la obra ejecutada cumpla satisfactoriamente con la función que le dio origen, es decir que su utilización sea efectiva.

La calidad de los resultados depende en gran medida de los trabajadores, por lo que éstos deben poseer conocimiento sobre la operación de máquinas, así como habilidad en trabajos de este tipo.

La inyección de mezclas en túneles es muy utilizada debido a que es necesario mejorar las condiciones que presenta el suelo. debido a la alteración de la estructura del subsuelo.

En la construcción del Colector Semiprofundo de Iztapalapa se ha permitido acumular experiencias muy interesantes que servirán para un mejor manejo de escudos cortadores y proporcionar mejores avances en la excavación. Los rendimientos han permitido el cumplimiento de los programas de obra, pues se ha vigilado constantemente cada una de las actividades del ciclo.

Ademas de permitir mejores avances, proporciona una mayor seguridad para el personal que labora en su ejecución, a diferencia de otros procedimientos de excavación que son de mas complejidad en su ejecución, se permite observar el mejoramiento de la técnica en el equipo que es en su mayor parte electrico y mecánico.

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

1. **Tratamientos de consolidación e impermeabilización de suelos y rocas.**
Técnicas de diseño construcción y control
Ing. Juan Manuel Escamilla
Solum S.A. México, D.F. 1975

2. **Reconocimiento de los suelos y cimentaciones especiales**
Henry Cambefort
Ed. Omega. 1967

3. **Tratado de procedimientos generales de construcción Cimentaciones y túneles**
P. Galabru
Ed. Reberte México. D.F. 1977

4. **Tesis profesional**
Procedimientos de inyección en la construcción del drenaje profundo, Cd. de México
Pedro Barrero Cobo
U.N.A.M. México. D.F. 1969

5. **Memorias de la construcción del drenaje profundo Cd. de México**
D.D.F.
Tomos 1, 3 1973

6. **Inyecciones y muros colados insitu**
Centro de educación continua, U.N.A.M.
U.N.A.M. 1970

7. Especificaciones y referencias del Colector Semi-profundo de Iztapalapa

Solum, S.A. México, D.F. 1984

8. Seminario diseño y construcción de túneles

E.S.I.A. I.P.N. México, D.f. 1984

INDICE DE FIGURAS

1. Inyección simple.
2. Inyección por progresiones.
3. Obturadores utilizados para inyección.
4. Inyección por progresiones ascendentes.
5. Inyección en combinación con la perforación.
6. Tubo de manguito con doble obturador.
7. Inyección con tubo de manguito.
8. Inyección con ademe.
9. Conos calibrados de circulación simple.
10. Probeta para medición de la sedimentación.
11. Prueba Lugeón.
12. Tabla de datos (P. Lugeón)
13. Interpretación de la prueba.
14. Prueba Lefranc.
15. Tabla de datos (P. Lefranc)
16. Localización Colector Semiprofundo Iztapalapa.
17. Perfil Colector Semiprofundo Iztapalapa.
18. Tratamiento a la entrada y salida de la lumbrera 2.
19. Localización de barrenos de tratamiento lumbrera 2.
20. Croquis tubo de manguitos utilizado en el tratamiento de la lumbrera 2.
21. Partes del escudo.
22. Diagrama de circulación de lodos.
23. Tanque movil de inyección, cruz de entrada de lechada en el terreno.
24. Sección transversal cimbra telescópica.
25. Banco de nivel semiprofundo.
26. Banco de nivel superficial.
27. Inclímetro.
28. Líneas de convergencia.
29. Registro de deformaciones en Inclímetro N I - 1.