

18
2er



Universidad Nacional Autónoma de México

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES

"ACATLAN"

INGENIERIA CIVIL

BOMBEO ELECTROSMOTICO EN EXCAVACIONES
PROFUNDAS A CIELO ABIERTO, PARA ABATIR
EL NIVEL FREATICO Y ESTABILIZAR TALUDES



T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO CIVIL
P R E S E N T A
MARCOS MEDINA NEGRETE

MEXICO, D. F.

1988

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

INDICE

OBJETIVO

INTRODUCCION

CAPITULO 1

ANTECEDENTES TEORICOS

1.1. Geohidrología	1
1.2. Ley de D'arcy y coeficiente de permeabilidad	3
1.3. Clasificación de suelos	4
1.3.1 Sistema de clasificación de aeropuertos	5
1.3.2 Sistema unificado de clasificación de suelos	6
1.4. Principio de la electroósmosis	9
1.5. Comparación del flujo electrosmótico y flujo hidráulico - normal	12
1.6. Comportamiento de las superficies libres de un suelo cerca - de los electrodos	15
1.7. Cambios en el contenido de agua del suelo durante el fenómeno- electrosmótico	17
1.8. Formación de grietas y fisuras	20
1.9. Dispositivo electrosmótico	21
1.10. Fenómenos electro-químicos	23
1.11. Estabilidad en taludes.....	24

CAPITULO 2

METODO ELECTROSMITICO PARA EL CONTROL DE FLUJO EN EXCAVACIONES BAJO EL NIVEL FREATICO.

2.1. Rangos de aplicación de diferentes sistemas de drenaje para - el nivel freático	29
---	----

2.2.- Instalación, funcionamiento y resultados obtenidos del - bombeo electrosmótico en la ciudad de México.....	29
---	----

CAPITULO 3

OTROS METODOS PARA EL CONTROL DE FLUJO DE AGUA EN EXCAVACIONES- BAJO EL NIVEL FREATICO.

3.1. Métodos de drenaje.....	42
3.1.1. Pozos punta.....	42
3.1.2. Pozos profundos.....	45
3.1.3. Sistema combinado de gravedad y vacío.....	48
3.2. Métodos de impermeabilización.....	50
3.2.1. Pilotes secantes de concreto.....	50
3.2.2. Tablaestacas de concreto.....	52
3.2.3. Trincheras flexibles.....	52
3.2.4. Pantallas de inyección.....	56

CAPITULO 4

EJEMPLOS DE APLICACION.

4.1. Antecedentes.....	58
4.2. Excavaciones para la construcción de la cimentación.....	59
4.2.1. Zanjas ademadas.....	59
4.2.2. Tablaestacas y troqueles.....	61
4.2.3. Tratamiento electrosmótico.....	63
4.3. Tratamiento electrosmótico para la excavación de la cimen- tación del edificio de la Tesorería del Departamento del- D.F.....	68
4.3.1. Descripción de la instalación.....	68
4.3.2. Analisis comparativo de la aplicación de la elec- trosmosis con otros métodos de excavación.....	71
4.4. Tratamiento electrosmótico para la excavación de la cimen- tación del edificio insignia del conjunto urbano Nonoalco Tlaltelolco.....	72

4.5. Abatimiento del nivel freático por medio de bombeo electros - mótico para la construcción de la Estación Chabacano de la -- Línea 9 del Metro.....	79
4.5.1. Localización de los pozos de bombeo.....	79
4.5.2. Perforación de los pozos de bombeo.....	79
4.5.3. Limpieza de las perforaciones.....	79
4.5.4. Ademe de la perforación.....	81
4.5.5. Ranurado de los ademes.....	81
4.5.6. malla alrededor del ademe.....	81
4.5.7. Filtro.....	82
4.5.8. Desarrollo del flujo hidráulico.....	82
4.5.9. Bombas.....	82
4.5.10. Operación del sistema.....	83

CONCLUSIONES.

BIBLIOGRAFIA.

OBJETIVO.

El objetivo principal de este trabajo es el de analizar -- las ventajas que tiene el bombeo electrosmótico, en el control de las presiones de filtración, en la reducción de expansiones, y en la estabilidad de taludes al efectuar excavaciones profundas a cielo abierto.

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

Los problemas de inestabilidad que presentan las excavaciones profundas que se realizan en suelos blandos constituidos por limos o arcillas, bajo el nivel freático, - son familiares para todo constructor que se ha visto en la necesidad de luchar contra esta clase de suelos. En excavaciones en zanjas profundas se puede presentar deslizamiento por el fondo, a pesar de que sus lados estén debidamente apuntalados. En excavaciones de gran área -- con talud perimetral, se pueden producir deslizamientos que afectan generalmente al talud y al fondo de la excavación.

Es bien sabido que, por la baja permeabilidad hidráulica de estos suelos, el caudal de agua que fluye hacia el interior de la excavación es pequeño y se controla fácilmente.

Sin embargo, al ejecutar excavaciones en arenas saturadas que presentan mayor permeabilidad hidráulica y sin que se realice algún control de flujo de agua, provocara una disminución en la estabilidad del talud. Lo cual puede solucionarse mediante un bombeo externo que acarrea - un notable incremento en la estabilidad de los taludes, - además de permitir realizar los trabajos de construcción subsecuentes sin los problemas derivados de la presencia de agua en la excavación.

Pero el control de las filtraciones mediante el bombeo - previo a las operaciones de excavación no solamente permite abatir el nivel freático en la zona por atacar, eliminando al mismo tiempo las fuerzas por filtración en -- los taludes y en el fondo, sino que, además favorece al desarrollo de fuerzas capilares en el agua que permanece adherida a las partículas de suelo que antes estaba 100%

saturado; tales esfuerzos capilares se traducen en un incremento temporal de la resistencia al corte y, por consiguiente, la estabilidad de la excavación se ve doblemente favorecida por el abatimiento del nivel freático.

En forma semejante, se logra en la actualidad controlar las fuerzas de filtración e incrementar temporalmente la resistencia al corte de los limos y arcillas blandas saturadas, mediante la aplicación de una corriente eléctrica al suelo, combinada mediante la acción de dispositivos de bombeo.

La presencia de la corriente eléctrica en el suelo origina una serie de fenómenos de naturaleza físico-química - cuya aplicación a la construcción resulta de gran interés cuando se trata con materiales de esta clase. Es el propósito del presente trabajo hacer una descripción general de alguno de estos fenómenos y sus consecuencias - en la resolución de problemas constructivos.

CAPITULO 1

ANTECEDENTES TEORICOS

1.1.- GEOHIDROLOGIA.

La Geohidrología es la disciplina geológica que se ocupa del estudio, explicación e interpretación de los diversos fenómenos físicos que concurren a la alimentación y recarga de los estratos o formaciones acuíferas.

De las aguas meteóricas un porcentaje de ellas se infiltran en el subsuelo para seguir a continuación trayectorias subterráneas gobernadas por las fuerzas capilares y de gravedad, así como la porosidad, fracturamiento etc.

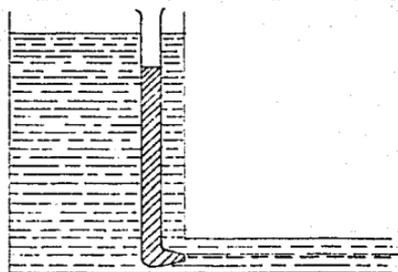
Los estudios de D'Arcy originaron los fundamentos de la Geohidrología científica en su aspecto del flujo de las aguas subterráneas.

Los problemas relativos al flujo de líquidos en general, pueden dividirse en dos grupos principales: los que se refieren a flujo laminar y aquellos que tratan con flujo turbulento.

Un flujo se define como laminar cuando las líneas de flujo permanecen sin juntarse entre sí en toda su longitud, como muestra la figura I-1.

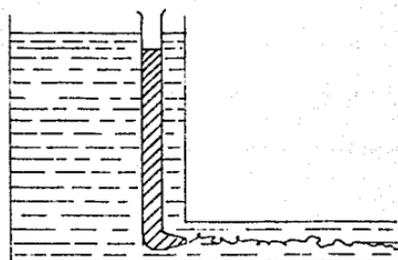
El flujo turbulento se define cuando las líneas de flujo se juntan entre sí en toda su longitud, como se muestra en la figura No. I-2.

Una línea de flujo se define como la línea ideal que en cada punto tiene la dirección del flujo, en el instante de que se trate; en todo punto el vector velocidad y la línea de flujo que pasa por él, serán tangentes. Se sabe que a velocidades bajas un flujo ocurre en forma laminar, mientras que al aumentar aquéllas se llega a un límite en que se transforma en turbulento.



a) FLUJO LAMINAR

FIG. I - 1



b) FLUJO TURBULENTO

FIG. I - 2

**DISTINCION EXPERIMENTAL OBJETIVA ENTRE EL FLUJO
LAMINAR Y EL TURBULENTO**

1.2.- LEY DE D'ARCY Y COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD.

El flujo de agua através de medios porosos, de gran interes - en la mecánica de suelos, esta gobernada por una ley descubierta experimentalmente por Henry D'arcy en 1856. D'arcy investigó las características del flujo de aguas através de filtros, formados precisamente por materiales térreos, lo cual es particularmente afortunado para la aplicación de los resultados de la investigación a la mecánica de suelos.

D'arcy encontró que para velocidades suficientemente pequeñas el gasto queda expresado por:

$$Q = \frac{dv}{dt} = K A i \quad (\text{cm}^3/\text{seg})$$

Donde:

Q = Gasto.

dv = Diferencial de la velocidad.

dt = Diferencial del tiempo.

A = Area.

i = Gradiente hidráulico, de donde $i = \frac{h}{l}$ número adimensional

K = Coeficiente de permeabilidad.

Con el valor numérico de K se reflejan propiedades físicas del suelo y en cierta medida ese valor indica la mayor o menor facilidad con que el agua fluye através del suelo.

Uno de los factores que influyen en la permeabilidad de un suelo es la relación de vacíos del suelo.

Puede hacerse un análisis teorico de la variación del coeficiente de permeabilidad de un suelo con respecto a su relación de vacíos, si se considera un suelo imaginario con capilares cilindricos de un mismo diámetro y con una relación en sus longitudes a la longitud de la muestra, igual a la que tengan los canálculos del suelo real. Se impondrá la condición adicional de que el suelo ficticio y el real tengan la misma relación de vacíos.

El diámetro de los capilares en el suelo imaginario se escogerá de manera que el coeficiente de permeabilidad también sea el mismo en los suelos imaginarios y real; siempre será posible escoger un diámetro que cumpla esta condición. El número de canales en el suelo real no influye en los resultados finales del análisis.

Otros factores que influyen en la permeabilidad de un suelo son:

- La temperatura del agua.
- La estructura y estratificación del suelo.
- La existencia de agujeros, fisuras, etc.

1.3.- CLASIFICACION DE SUELOS.

Dada la complejidad y prácticamente la infinita variedad con que los suelos se presentan en la naturaleza, que cualquier intento de sistematización científica, debe de ir precedido por otro de clasificación completa.

Es evidente que un sistema de clasificación que pretenda cubrir hoy las necesidades correspondientes, debe de estar basado en las propiedades mecánicas de los suelos, por ser éstas la fundamental para las aplicaciones en la ingeniería.

Una de las más importantes funciones de un sistema sería proporcionar la máxima información normativa.

Dentro de los sistemas de clasificación de suelos destacan los efectuados por el Doctor A. Casagrande, los cuales cristalizaron el sistema conocido como Clasificación de Aeropuertos.

1.3.1 Sistema de Clasificación de Aeropuertos.

Este sistema reconoce que las propiedades mecánicas e hidráulicas de los suelos constituidos por partículas menores que la malla 200, pueden deducirse cualitativamente a partir de sus características de plasticidad. En cuanto a los suelos formados por partículas mayores que la malla mencionada, el criterio básico de clasificación es aún el granulométrico que, aunque no es lo determinante para el comportamiento de un material, sí puede usarse como base de clasificación en los materiales granulares.

El Sistema de Clasificación de Aeropuertos modificado para constituir el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, -- las bases en que A. Casagrande fundamentó su criterio para proporcionar el sistema de Clasificación de Aeropuertos, punto de partida para los esfuerzos de valor que hasta hoy se han efectuado en este campo.

El sistema fue propuesto originalmente en 1942 y se adoptó en seguida por el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos de América, quien lo aplicó principalmente, a la construcción de aeropistas.

El sistema divide a los suelos en dos grandes fracciones: la gruesa, formada por partículas mayores que la malla No. 200 -- (0.074 mm) y menores que la malla de 3" (7.62 cm.) y la fina, formada por las partículas que pasan la malla No. 200.

La fracción gruesa se subdivide en gravas y arenas, teniendo como frontera la malla No. 4 (4.76 mm). Subdivisiones subsecuentes de esta fracción toman en cuenta el contenido y naturaleza de los finos, así como características de gradación.

La fracción fina se subdivide en grupos, tomando en cuenta sus características de plasticidad, las cuales están relacionadas con las propiedades hidráulicas y mecánicas, que interesan al

ingeniero civil.

El principal uso de la Carta de Plasticidad figura I-3, está en situar en ella un suelo desconocido, por medio del cálculo de los dos parámetros que definen su plasticidad; la colocación de suelo en uno de los grupos definidos indicará que participa del conjunto de propiedades mecánicas e hidráulicas características de ese grupo; así, y más si se cuenta con una cierta dosis de experiencia, se tiene un modo simple, rápido y económico de adquirir valiosa información básica sobre el suelo en cuestión.

1.3.2 Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.

Este sistema cubre los suelos gruesos y los finos, distinguiendo ambos el cribado através de la malla No. 200; las partículas gruesas son mayores que dicha malla y las finas, menores. Un suelo se considera grueso si más del 50% de sus partículas son gruesas, y fino, si más de la mitad de sus partículas, en peso, son finas.

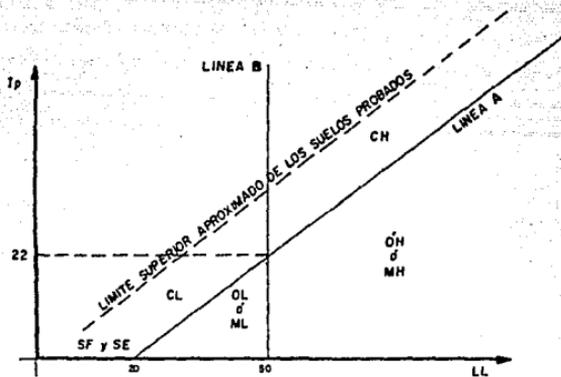
Suelos gruesos.

El símbolo de cada grupo está formado por dos letras mayúsculas que son las iniciales de los nombres ingleses de los suelos más típicos de ese grupo.

a) Gravas y suelos en que predominen éstas. Símbolo genérico G (gravel).

b) Arenas y suelos arenosos. Símbolo genérico S (sand).

Las gravas y las arenas se separan con la malla No. 4, de manera que un suelo pertenece al grupo genérico G, si más del 50% de su fracción gruesa (retenida en la malla 200) no pasa la malla No. 4, y es del grupo genérico S, en caso contrario.



I_p = INDICE PLASTICO.
 LL = LIMITE LIQUIDO

**CARTA DE PLASTICIDAD, COMO SE USO EN EL
 SISTEMA DE AEROPUERTOS.**

FIG. I-3

Las gravas y las arenas se subdividen en cuatro grupos.

- a) Material prácticamente limpio de finos, bien graduado. Símbolo W (well graded). En combinación con los símbolos genéricos, se obtienen los grupos GW y SW.
- b) Material prácticamente limpio de finos, mal graduado. Símbolo P (poorly graded). En combinación con los símbolos genéricos, da lugar a los grupos GP y SP.
- c) Material con cantidad apreciable de finos no plásticos. -- Símbolo M (del sueco mo y mjala). En combinación con los símbolos genéricos da lugar a los grupos GM y SM.
- d) Material con cantidad apreciable de finos plásticos. Símbolo C (clay). En combinación con los símbolos genéricos, da lugar a los grupos GC y SC.

Suelos Finos.

Para suelos finos se podrá observar un criterio similar al usado para suelos gruesos, y dando lugar a las siguientes divisiones:

- a) Limos inorgánicos, de símbolos genéricos M (del suelo mo y mjala).
- b) Arcillas inorgánicas, de símbolo genérico C (clay).
- c) Limos y Arcillas orgánicas, de símbolo genérico O (organic).

Cada uno de estos tipos de suelos se subdividen, según su límite líquido, en dos grupos. Si éste es menor de 50%, es decir, si son suelos de compresibilidad baja o media, se añade al símbolo genérico la letra L (low compressibility), obteniéndose por esta combinación los grupos ML, CL y OL. Los suelos finos con límite líquido mayor del 50%, o sea de alta compresibili--

dad, llevan tras el símbolo genérico la letra H (high compressibility), teniendo así los grupos MH, CH y OH.

Por otra parte se hace notar que la compresibilidad de un suelo es una función directa del límite líquido, de modo que un suelo es más compresible a mayor límite líquido.

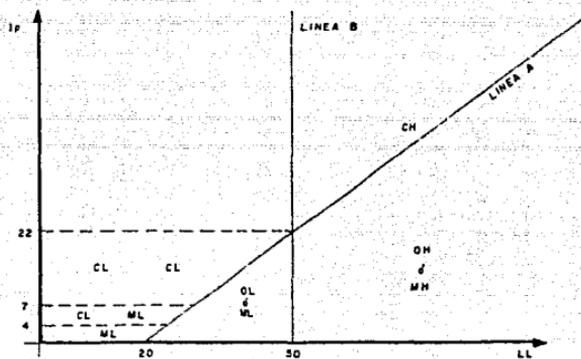
También es preciso tener en cuenta que el término compresibilidad tal como aquí se trata, se refiere a la pendiente del tramo virgen de la curva de compresibilidad y no a la condición actual del suelo inalterado, pues éste puede estar seco parcialmente o preconsolidado.

En la figura 1-4 se muestra la carta de plasticidad, tal como se usa actualmente.

Los suelos altamente orgánicos, usualmente fibroso, tales como turbas y suelos pantanosos, extremadamente compresibles, forman un grupo independiente de símbolo Pt (del inglés; turba).

1.4.- PRINCIPIO DE LA ELECTROSMOSIS.

El fenómeno de la electrosmosis fue descubierto por Reuss hace algo más de 150 años; Reuss observó que si se aplica una corriente eléctrica a una membrana rígida y porosa sumergida en agua, esta última emigra dentro de la membrana desde el ánodo (polo positivo), hacia el cátodo (polo negativo). Helmholtz puso por primera vez las bases matemáticas para una explicación racional de este efecto de migración del agua, que construye la esencia última de las aplicaciones ingenieriles del fenómeno electrosmotico, las explicaciones de Helmholtz fueron más tarde modificadas por Gouy y otros. Hoy se admite que cuando el agua ocupa un tubo capilar, sus iones positivos están distribuidos de un modo no uniforme, de manera que las mayores



I_p = INDICE PLASTICO

LL = LIMITE LIQUIDO

CARTA DE PLASTICIDAD, COMO SE USA ACTUALMENTE.

concentraciones de ellos se disponen a lo largo de las paredes del capilar, donde existe carga eléctrica negativa, la concentración de iones con carga positiva en el agua disminuye hacia las partes interiores del tubo, siendo mínima a la máxima distancia de las paredes. La zona de fuerte concentración de iones positivos es la que clásicamente recibe el nombre de doble capa. Naturalmente que, si por alguna razón, este recubrimiento circunferencial de agua, ligado por fuerzas eléctricas a las paredes del capilar y situado en torno al agua libre el interior del tubo se moviese, este movimiento arrastraría a toda el agua que ocupa la sección transversal del propio tubo.

Una diferencia de potencial aplicada externamente y suficientemente fuerte puede ser esa razón; si tal diferencia de potencial se aplica. Los iones positivos del agua se moverán hacia el cátodo que se haya colocado y con su movimiento arrastrarán a las moléculas de agua. Si no se estuviese de acuerdo con el sistema de la doble capa y se supiera una distribución uniforme de los iones positivos dentro de toda la masa del agua en el capilar, el flujo hacia el cátodo como consecuencia de la colocación de una diferencia de potencial suficiente y exterior sería también obvio, pues de cualquier forma el catión migraría, arrastrando con él a la molécula de agua con que se relaciona. El gasto que fluye a través de un tubo capilar en las condiciones arriba expuestas es directamente proporcional al gradiente del potencial eléctrico exterior que haya sido aplicado.

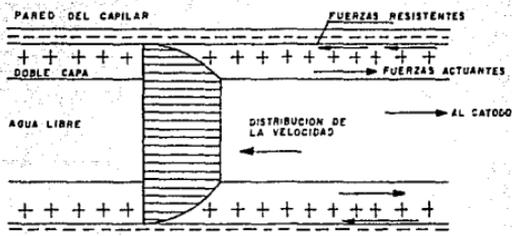
Si el capilar de referencia aún sujeto al campo eléctrico exterior se extrae del agua, pero conservándose lleno, el flujo de iones seguirá produciéndose. En el extremo catódico del capilar se forma un menisco suficientemente fuerte para resistir el flujo del agua en la forma antes expuesta, pero las moléculas de agua circularán dentro del capilar, hacia el cátodo en la zona circunferencial y retornarán al ánodo por la zona central de la sección capilar. Si ahora se supone que por algún

medio este menisco es eliminado, el flujo osmótico se interrumpirá de inmediato. Por esta razón, en los cuerpos rígidos porosos, la electrólisis sólo producirá una descarga de agua en el cátodo si están sumergidos y si, además, se permite una continua aportación de agua al ánodo. Por esto, los muros húmedos de edificaciones no pueden secarse por medio de electrólisis por más que diversas patentes así lo proclamen.

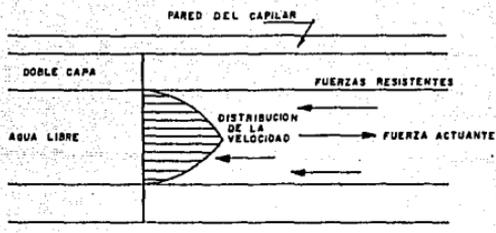
1.5.- COMPARACION DEL FLUJO ELECTROSMOTICO Y DEL FLUJO HIDRAULICO -- NORMAL.

Es muy interesante comparar el flujo electrosmótico y el flujo hidráulico común, en un capilar provocado por una carga de agua en el mismo conductor. Esa comparación se hace con base en la figura I-5. En el flujo electrosmótico la sección transversal del agua, (ver parte "a" de la figura), se mueve a velocidad prácticamente uniforme, pues la corona que la doble capa representa se está moviendo hacia el cátodo bajo el influjo de las fuerzas eléctricas y está arrastrando al agua libre. El efecto retentivo de las paredes del capilar se manifiesta en este caso sólo en la frontera exterior de la doble capa que está fuertemente ligada a las paredes por atracciones eléctricas intensas.

En el flujo, por lo contrario ver (parte "b" de la figura) - si se admite un régimen del tipo postulado por Hagen y Poiseuille, la distribución de la velocidad en la sección transversal del capilar es mucho menos eficiente; la doble capa no se mueve ahora en absoluto, pues ninguna fuerza eléctrica exterior - contrarresta las atracciones entre cargas opuestas de manera que el flujo abarca a masas de agua menores siendo esta diferencia apreciable en capilares muy delgados como suelen ser los de los suelos finos de esta manera, la doble capa funciona como pared para efectos de resistencia viscosa y éste es el hecho que rebaja sobre todo la eficiencia del conducto para efec



a.



b.

COMPARACION DEL FLUJO ELECTROSMOTICO
Y DEL FLUJO HIDRAULICO NORMAL .

FIG. I-5

tos de velocidad y gasto. En separación entre los electrodos, la velocidad del flujo electrosmótico puede oscilar entre 100 y 10,000 veces la del flujo hidráulico convencional.

El flujo electrosmótico puede describirse por medio de una ecuación del tipo:

$$Q = K_e i_e A$$

en donde: Q = Gasto

K_e . - Es el coeficiente de permeabilidad electrosmótico del suelo, definido como la velocidad con que ocurre el flujo electrosmótico bajo un gradiente de potencial unitario.

i_e . - Gradiente de potencial eléctrico aplicado al suelo.

A . - Tiene el sentido usual de la ley de Darcy convencional.

El valor de K_e definido como arriba se expresó resulta depender únicamente de la porosidad del material, pero no de las áreas de las secciones transversales de los capilares, a diferencia del coeficiente de permeabilidad convencional que sí depende de este último concepto. Debido a que la porosidad de la mayoría de los suelos varía entre límites estrechos, no es entonces sorprendente encontrar que el coeficiente de permeabilidad electrosmótico varía poco aún entre suelos muy diferentes.

1.6.- COMPORTAMIENTO DE LAS SUPERFICIES LIBRES DE UN SUELO CERCA DE LOS ELECTRODOS.

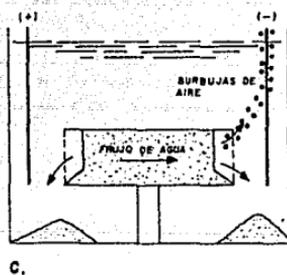
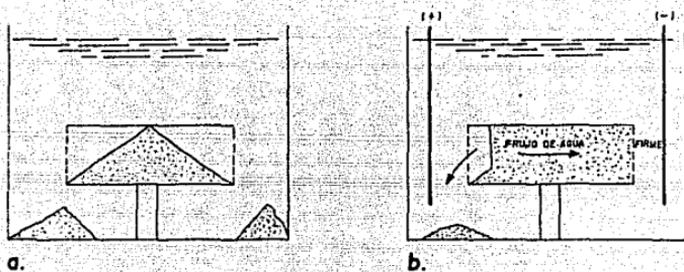
El efecto de un campo exterior sobre un suelo es descrito objetivamente por Leo Casagrande¹ en la figura I-6, a, b, c.

El suelo a que se refieren las figuras es un limo no cohesivo, análogo a un polvo de roca, sumergido y colocado en estado saturado en el cilindro abierto que se muestra. En la parte a) de la figura no actúa dentro del depósito ningún campo eléctrico exterior; el limo saturado que no se sostiene en taludes -- verticales, empieza a fluir fuera del cilindro, hasta que se llega a él a los taludes de reposo ya estables, en los que se estaciona el fenómeno. En la parte b) de la figura se supone que se ha colocado un campo eléctrico exterior. Su efecto es perceptible en el comportamiento de las dos superficies libres del suelo dentro del cilindro abierto, la cara que está próxima al ánodo se derrumba parcialmente por efecto del movimiento de las partículas con carga negativa del suelo, que tienden a moverse hacia aquel electrodo, dentro del suelo se ha establecido el flujo electromótrico del agua hacia el cátodo o polo negativo, por efecto del movimiento de los iones positivos contenidos en el agua, que arrastran y empujan las moléculas de esa substancia; las fuerzas de filtración que este flujo origina explica el que el talud de la cara que vé al ánodo se mantenga vertical o casi vertical; en la cara que mira hacia el cátodo, a pesar de que está saliendo el agua, el talud se mantiene vertical porque las partículas minerales del suelo, con carga negativa, tienden a moverse hacia el ánodo, contrarrestándose así el efecto de las fuerzas de filtración y de gravedad.

En la parte c) de la figura se ha colocado dentro del cilindro limo no cohesivo parcialmente saturado, en vez de totalmente.

Ahora, las cosas suceden como antes en la cara próxima al ----

(1) Juarez Badillo tomo III Flujo de Agua en Suelos. Cap VIII -



COMPORTAMIENTO DE LAS SUPERFICIES LIBRES DE UN SUELO CERCA DE LOS ELECTRODOS.

ánodo pero en la cercana al cátodo, las burbujas de aire son - arrastradas por el flujo electrosmótico hacia afuera del cilindro y en su recorrido arrastran algunas partículas de suelo, - produciendo un derrumbe parcial de la cara a pesar de la influencia estabilizadora de las cargas negativas de los granos minerales.

A fin de comparar los gastos correspondientes a un flujo electrosmótico y a uno hidráulico común. Leo Casagrande aplicó un gradiente eléctrico a una arcilla sujeta simultáneamente a un gradiente hidráulico que generase un flujo opuesto; para obtener gastos iguales, o sea una situación de equilibrio en el flujo, es preciso que el gradiente hidráulico sea de 1000, para un gradiente eléctrico unitario.

Se supone en la relación anterior que el coeficiente de permeabilidad electrosmótica del suelo es del orden de 0.5×10^{-4} cm/seg. y que el coeficiente de permeabilidad es del orden de 5×10^{-8} cm/seg.

Lo anterior permite concluir que se precisarán en un caso práctico real gradientes eléctricos bajos y, por lo tanto, fáciles de lograr para neutralizar flujos hidráulicos generados por gradientes hidráulicos importantes; en este hecho reside la posibilidad de las aplicaciones de la electrosmosis a la ingeniería civil.

1.7.- CAMBIOS EN EL CONTENIDO DE AGUA DEL SUELO DURANTE EL FENOMENO ELECTROSMOTICO.

Cuando el flujo electrosmótico se genera en un suelo, en tanto que en la zona del ánodo tenderán a formarse, correspondientemente meniscos generadores de un estado de tensiones, que produce una contracción de los materiales compresibles en dicha zona anódica; este efecto explica el agrietamiento que es común

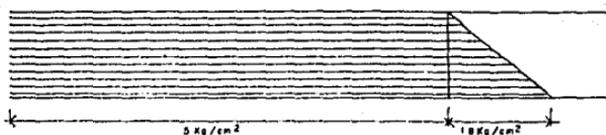
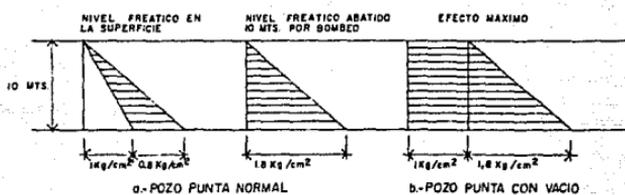
observar en torno al ánodo en un caso real. Naturalmente que los meniscos se desarrollarán mucho menos si en el ánodo hay - aporte constante de agua que alimenta el flujo y, por esta razón, en este caso el agrietamiento es mucho menos intenso (aun que experimentalmente se ha observado que existe en cualquier caso, en menor o en mayor grado); así, un flujo electrosmótico siempre produce consolidación de los suelos situados cerca del ánodo. Leo Casagrande ha comparado el proceso de consolidación común bajo cargas externas, con el proceso de consolidación -- por flujo electrosmótico, con o sin carga exterior, en el mismo suelo, para ello sujetó a un suelo a los dos efectos en el consolidómetro estándar.

Leo Casagrande encontró que un gradiente eléctrico aplicado entre las caras de espécimen en el consolidómetro produce, con - el tiempo, la consolidación del suelo, de manera que, toscamente, el efecto de un gradiente exterior de 1.14 voltios/cm., -- equivale a la aplicación de una carga exterior de 5 kg/cm², en un suelo arcilloso. Entonces pueden fácilmente compararse los efectos de los diferentes métodos de consolidación en un caso práctico dado. Supóngase (figura I-7 a, b, c)

Un estrato de arcilla de 10 m, de espesor, con el nivel freático en su nivel superior.

En este caso, los efectos neutrales en la cara inferior del -- estrato serán de 1 kg/cm², y suponiendo a la arcilla ----- $\gamma_m = 1.8 \text{ ton/m}^3$, los efectivos en el mismo punto valdrán 0.8 -- Kg/cm², parte a) de la figura I-7.

Si se abate el nivel freático en el manto de arcilla en 10m precisamente, los esfuerzos efectivos en el fondo del estrato aumentarán a 1.8 Kg/cm², y la arcilla se consolidará bajo el - peso de las capas suprayacentes saturadas. En la parte b) de la figura I-7, se vé cómo podría aumentarse el esfuerzo efectivo en la arcilla si se utilizase para el bombeo pozos de ----



c- ESFUERZOS EFECTIVOS PRODUCIDOS POR ELECTROSMOSIS PARA UN GRADIENTE DE POTENCIAL DE 1.14 Volt./cm.

COMPARACION ENTRE LA CONSOLIDACION COMUN Y LA PRODUCIDA POR ELECTROSMOSIS.

FIG. I-7

captación (pozos punta) que aplicasen un vacío máximo de 1 kg/cm^2 , sin embargo, en la parte c) de la figura I-7, se ilustra el poderoso efecto de la electrósmosis como factor de consolidación, si se aplicase un gradiente eléctrico de 1.14 voltios/cm al suelo, el esfuerzo efectivo aumentaría en 5 kg/cm^2 , adicionalmente a lo que se hubiese logrado por los procedimientos más convencionales, arriba mencionados.

1.8.- FORMACION DE GRIETAS Y FISURAS.

Durante el tratamiento electrosmótico es frecuente la formación de grietas y fisuras en torno al ánodo, las cuales progresan gradualmente hacia el cátodo, a medida que el fenómeno continúa.

Al analizar el fenómeno es necesario considerar la diferencia fundamental entre el flujo debido a una consolidación por carga exterior y flujo electrosmótico; durante la consolidación el agua sale por las superficies de drenaje más libre con un gasto que depende del monto de la carga exterior y de la permeabilidad del suelo; en la electrósmosis, toda el agua se mueve instantáneamente al comenzar a actuar el gradiente eléctrico, produciendo un gasto constante. Leo Casagrande presenta el caso de un proceso electrosmótico inducido en el seno de un gelbentonítico diluido dentro del que se aplicó un gradiente eléctrico bastante menor que 1 volt/cm .

Al comenzar el flujo hacia el cátodo, el suelo se empieza a contraer cerca del ánodo; en zonas más alejadas de este polo, el suelo aún no se ve afectado por el fenómeno, así se exceptúa el flujo a gasto constante al que está sometido, durante el cual el agua perdida se repone con otra que aportan zonas más próximas al ánodo. Desde el principio, entonces, comienzan a formarse cerca del ánodo grietas perpendiculares al flujo; estas grietas tienden originalmente a una forma circular en torno al ánodo, pero con el tiempo se van desarrollando agrietamientos de otros tipos, que también progresan paulatinamente del ánodo hacia el cátodo. Todos estos sistemas de

agrietamiento producen diferentes grados de fisuramiento en las arcillas sujetas al fenómeno electrosmótico, estas fisuras servirán como canales para que fluya el agua.

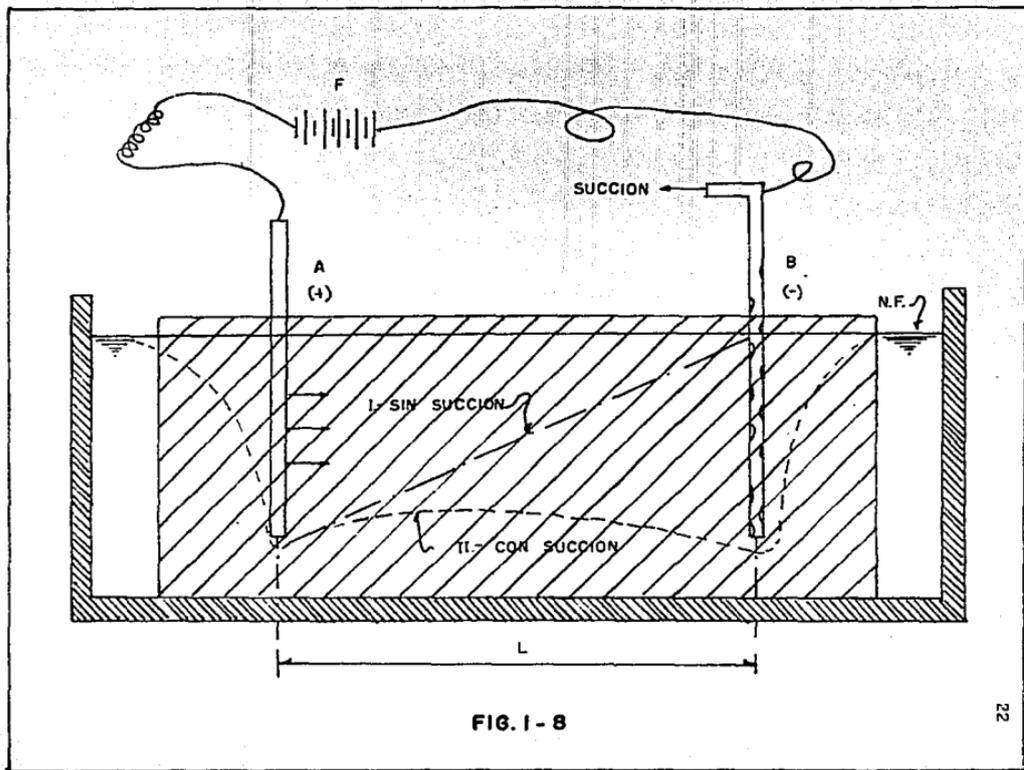
En las cercanías del cátodo se han observado dos fenómenos independientes que también producen grietas. En primer lugar, en las imbediciones del cátodo tiende a acumularse agua y ésta, si no se drena produce aumento de los esfuerzos neutrales que originan grietas normales a la dirección del flujo. Este agrietamiento tiende a evolucionar hacia el ánodo.

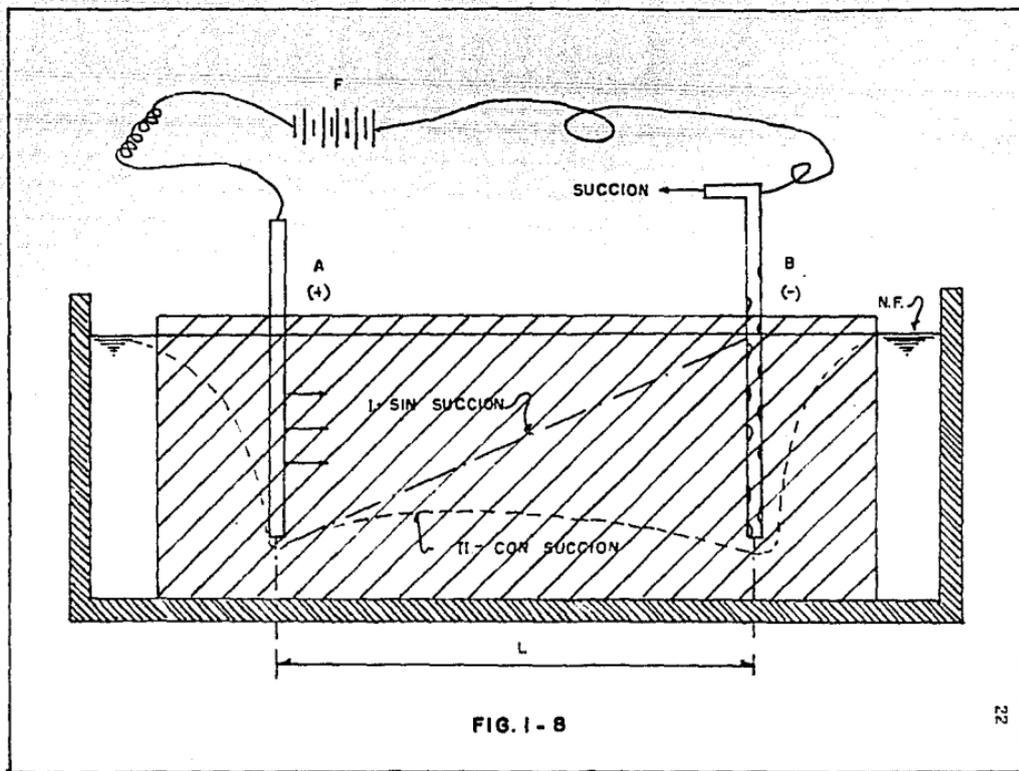
1.9.- DISPOSITIVO ELECTROSMOTICO.

A continuación se muestra un dispositivo que se ilustra en la figura 1-8, el cual representa a un prisma de arcilla blanda colocada dentro de un tanque de material aislante de la electricidad y rodeado por agua; dentro del suelo se coloca una barra metálica A y un tubo metálico B con perforaciones en la pared. El nivel piezométrico dentro del prisma de suelo será, para estas condiciones, horizontal. Si los dos elementos metálicos, A y B, se conectan ahora a una fuente de corriente continua o directa, F, se inicia el desarrollo de varios fenómenos:

El agua dentro del prisma de arcilla emigra dentro del electrodo positivo, A, hacia el negativo, B, con una velocidad que, dependiendo del voltaje aplicado y la separación entre electrodos, puede ser del orden de 100 a 10,000 veces mayor que aquella con la que fluiría a través del mismo suelo bajo un gradiente hidráulico unitario.

Este fenómeno del flujo del agua a través de los poros del suelo bajo la acción de un gradiente de potencial eléctrico se conoce con el nombre de "electrósmosis". Tras un lapso de algunos minutos de aplicado el potencial a los electrodos el agua se acumula y brota alrededor del negativo, y alrededor del positivo se observan pequeñas grietas en dirección radial. Indicando con ello el desarrollo





de un estado de tensiones en el agua del suelo vecino al electrodo, lo cual provoca contracción y agrietamiento. Es evidente que, tales condiciones la presión que existía en el agua de los poros -- del suelo antes de aplicar la corriente, no solamente desaparece si no que adquiere un valor negativo; la correspondiente curva del nivel piezométrico afecta entonces una forma semejante a la que ilustra la curva I. Si, al mismo tiempo se conecta la corriente eléctrica, se produce una succión en el tubo perforado del electrodo negativo, la superficie de abatimiento asume una forma semejante a la de la curva II. La rapidez con que se alcance el abatimiento y el desarrollo de tensiones en la masa del suelo afectada es una función del gradiente de potencial medio, $i_e = V/L$, expresado en volts por centímetro de separación entre electrodos; el consumo de energía necesario para lograr estos efectos depende de dicho gradiente eléctrico, por una parte, y por otra, de la conductividad eléctrica del suelo, la cual está íntimamente ligada a la concentración y clase de iones que existen en el agua del suelo y los que están químicamente adheridos a las partículas coloidales, denominados bases intercambiables. Así por ejemplo, la conductividad de un depósito de lúmo de origen fluvial es considerablemente menor que la de una arcilla marina. Es costumbre expresar la conductividad eléctrica de un suelo en miliamperes por centímetro cuadrado de sección transversal a la corriente, bajo un gradiente de potencial de un volt por centímetro. Tanto la rapidez con que se logra el abatimiento de la carga piezométrica como el desarrollo del estado de tensiones en el agua del suelo tienen gran importancia práctica en la estabilización de taludes y excavaciones en suelos finos, blandos y saturados.

1.10.- FENOMENOS ELECTRO - QUIMICOS.

Además del fenómeno electrosmótico en sí, la corriente eléctrica -- produce electrólisis, mediante la cual existe un intercambio iónico entre el ánodo y el cátodo a través del electrolito constituido por la solución salina en el agua del suelo. Es evidente que, el tipo de reacciones electroquímicas depende exclusivamente de la composición química del electrolito y del metal que constituye el ánodo, -- pero generalmente se observa un notable aumento en la alcalinidad --

del agua extraída en el cátodo y un incremento, también notable, de la acidez en la vecindad del ánodo, así como una fuerte corrosión de la barra metálica que forma a éste último. Pero ese constante ir y venir de iones en el agua del suelo trae como consecuencia importantes modificaciones en los iones adheridos a los coloides del suelo. Es un hecho experimental bien conocido que las propiedades mecánicas de una arcilla se modifican considerablemente cuando se substituyen las bases intercambiables por otras químicamente diferentes.

1.11.- ESTABILIDAD EN TALUDES.

La estabilidad de taludes temporales en arcilla, depende no sólo de la resistencia del material y del talud del corte, sino también de la profundidad de la excavación y de la profundidad a que aparezca un estrato firme, si existe no muy lejos, abajo del fondo de la excavación. La estabilidad de un talud durante el periodo de construcción puede estimarse con mucha confiabilidad por métodos teóricos y con los resultados de pruebas en el suelo, si la arcilla esta saturada, si es de consistencia media a blanda, y si esta protegida contra el secado y la formación de grietas de desecación en y más allá, de la cresta del talud. Si la excavación permanece abierta y sin protección por largo tiempo, la estabilidad puede reducirse por las grietas que se desarrollan por desecación y después se llenan de agua. El flujo de agua puede producir también deterioro progresivo mientras el corte está abierto, especialmente si la arcilla contiene capas o bolsas de limos sin cohesión y arenas finas bajo el nivel freático. Como estos factores no están bajo el completo control del constructor, se requiere gran discernimiento para elegir taludes a los que se obtenga el equilibrio adecuado entre la seguridad y la economía.

La experiencia ha mostrado que la falla de un talud en una arcilla-uniforme se produce por deslizamiento a lo largo de una superficie de sección transversal casi circular. Pueden hacerse estimaciones suficientemente precisas de la estabilidad de esos taludes, si la superficie de deslizamiento se supone circular.

CAPITULO 2

METODO ELECTROSMOTICO PARA EL CONTROL DE FLUJO EN EXCAVACIONES ---
BAJO EL NIVEL FREATICO.

Cuando se trata de suelos de baja permeabilidad como las arenas arcillosas, los limos arcillosos, y las arcillas de mediana o alta plasticidad, cuyo coeficiente de permeabilidad es del orden de --- 10^{-6} cms/seg, o menor, la aplicación del sistema de vacío es insuficiente para lograr el abatimiento rápido del nivel freático; en estos casos el bombeo puede auxiliarse con la aplicación de un gradiente de potencial eléctrico que acelera el flujo de agua através de los poros del suelo y desarrolla, de manera semejante al sistema de vacío, un estado de tensión en el agua de los poros del suelo que incrementa temporalmente la resistencia al corte, efecto -- que unido a la eliminación de las fuerzas de filtración estabiliza los taludes.

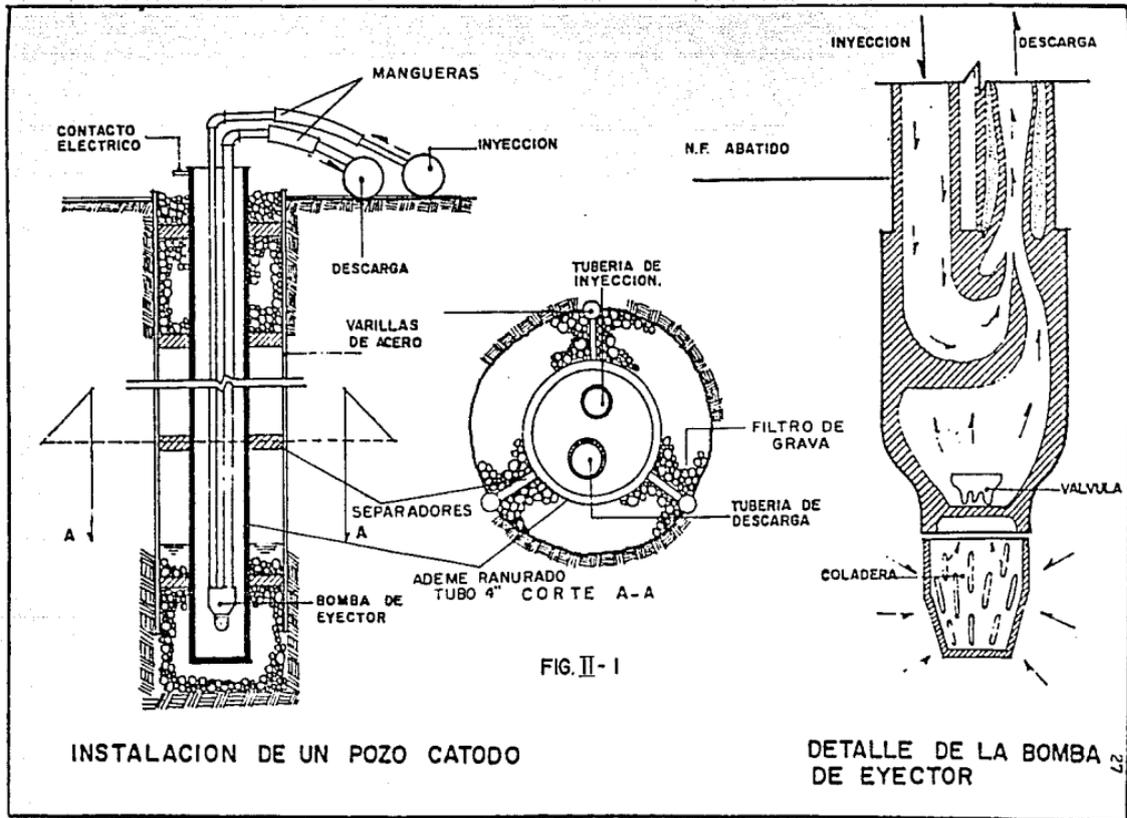
Ya se ha dicho que en este tipo de suelos, dada su baja permeabilidad, se producen gastos de filtración muy pequeños que son fáciles de manejar desde el interior de la excavación; además, por ser suelos cohesivos no son fácilmente erosionables y se puede excavar en ellos hasta profundidades razonables sin necesidad de abatimiento previo del nivel freático. Sin embargo, cuando la profundidad de la excavación va más allá de los límites de la estabilidad de los taludes, el empleo de la electrósmosis y el bombeo combinados es conveniente para mejorar las condiciones de estabilidad de los taludes y alcanzar con toda seguridad la profundidad de excavación final.

En el caso de excavaciones en arcillas blandas y expansivas, como las del valle de México, se producen expansiones del fondo de la excavación, como consecuencia de la descarga que sufren los suelos que quedan bajo el nivel del fondo, al retirar la tierra que se encuentra arriba de ese nivel. En excavaciones realizadas en estos suelos, de gran área y a profundidades de 6 a 8 m, se han registrado expansiones mayores de 60 cms, las cuales se recuperan en forma de asentamientos al volver a cargar las arcillas con el peso de la estructura. En esta forma, una cimentación totalmente compensada -- que teóricamente-----

no debería sufrir asentamientos se hunde una cantidad igual a la -- expansión provocada durante el proceso de excavación. En estos casos el abatimiento local del nivel freático previo a la excavación, produce una sobrecarga local de igual magnitud que la descarga que provocará posteriormene la excavación. Es bien conocido que el abatimiento local del nivel freático produce hundimientos por consolidación de la arcilla, cuya magnitud es función del tiempo que actúa la sobrecarga producida por el abatimiento. Si el abatimiento se logra en un tiempo corto, alrededor de una semana, los hundimientos locales no exceden de unos 10 cm. Este abatimiento rápido se consigue con el auxilio de la electrólisis. Al ejecutar la excavación después de haber abatido el nivel freático, pueden excavar grandes áreas, produciéndose expansiones de magnitud muy semejante a -- los asentamientos provocados previamente durante la etapa de abatimiento del nivel freático. Los esquemas² II-1 y II-2, ilustran la -- instalación de este sistema en el que se emplean pozos de bombeo -- cuyo ademe metálico está diseñado para servir también como electrodo negativo hacia el cual fluye el agua del suelo por el potencial eléctrico creado en el terreno mediante la instalación de varillas de acero colocadas entre los pozos, las cuales sirven de electro-- dos positivos.

Los pozos-catodo (-) y las varillas ánodo (+), se conectan a los -- bornes correspondientes de un generador de corriente continua, --- creándose así el gradiente de potencial eléctrico, cuyo valor se -- mantiene entre 0.1 y 0.3 volts/cm de separación entre electrodos. - El agua es extraída del interior del ademe mediante una pequeña bomba de pozo profundo, del tipo eyector (trompa de vacío) operada por un chiflón de agua producida por una bomba centrífuga de alta presión; el agua inyectada en el eyector, junto con la extraída del -- suelo, fluyen por una tubería de retorno que regresa hasta el cárcamo de la bomba centrífuga que se encuentra en la superficie, desde donde se recirculada y reinyectada para la operación continua de -- los eyectores.

(2) Trabajos de investigación de la empresa SOLUM del grupo ICA.



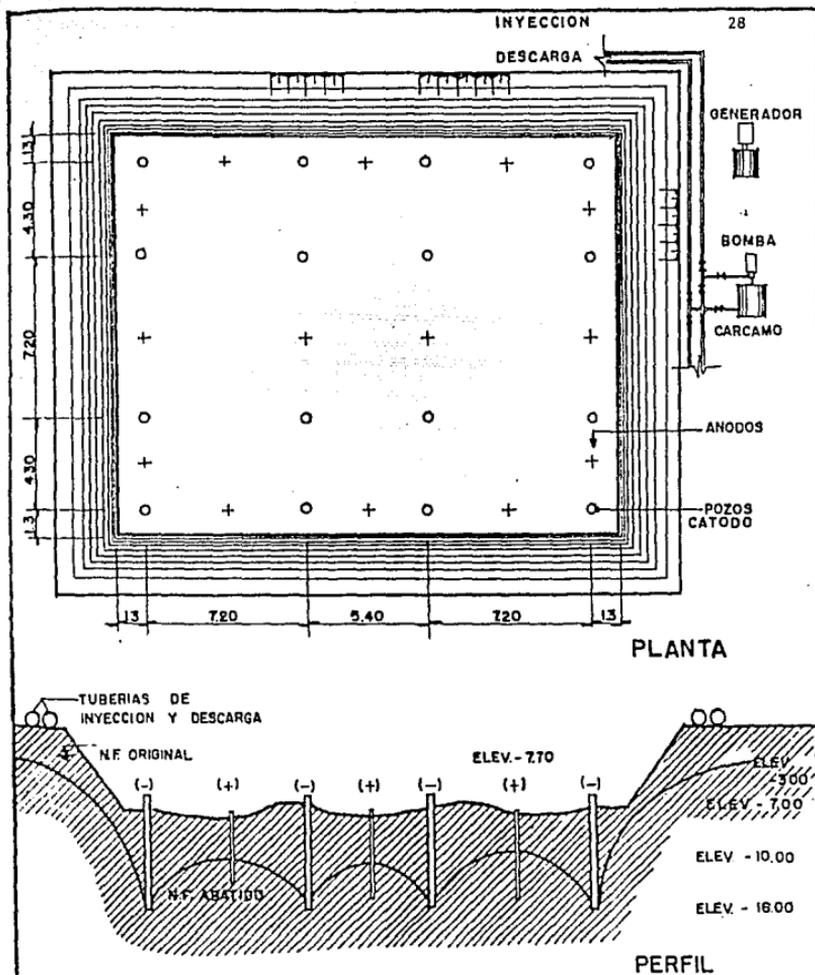


FIG. II-2

INSTALACION PARA ABATIMIENTO
ELECTROSMOTICO EN ARCILLAS

En arcillas de alta compresibilidad la distribución de los electrodos en el área de la excavación y el gradiente de potencial aplicado se diseñan de manera tal que reduzcan al mínimo los asentamientos de la corona de los taludes y de la zona vecina a la excavación, con el fin de evitar daños a estructuras vecinas y prevenir el agrietamiento de los taludes, lo cual empeoraría su estabilidad.

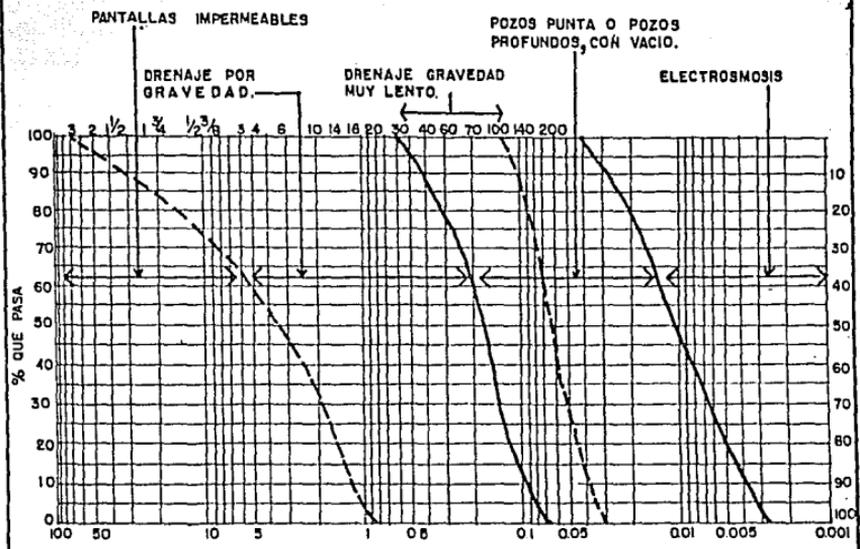
2.1.- RANGOS DE APLICACION DE DIFERENTES SISTEMAS DE DRENAJE PARA ABATIR EL NIVEL FREATICO.

La figura II-3 muestra los rangos de granulometría de suelos dentro de los cuales son aplicables los distintos métodos de abatimiento. En ella puede observarse que para aquellos depósitos de grava y arena cuyas partículas son de tamaños mayores que los correspondientes a las arenas gruesas, los métodos de drenaje por gravedad no son recomendables, pues aunque es posible lograr buenos resultados, los grandes gastos de bombeo y el alto costo de las instalaciones de los pozos hacen el procedimiento antieconómico. En estos casos es preferible recurrir a los métodos de impermeabilización.

2.2.- INSTALACION, FUNCIONAMIENTO Y RESULTADOS OBTENIDOS DEL BOMBEO ELECTROSMOTICO EN LA CIUDAD DE MEXICO.

En la Ciudad de México, se ha empleado con éxito, en varios casos, el bombeo electrosmótico para controlar las expansiones que sufre el fondo de las excavaciones y para evitar la falla por deslizamiento de los taludes perimetrales. A continuación se describe uno de estos casos, con el fin de mostrar la forma de realizar las instalaciones, su funcionamiento y los resultados obtenidos.

Para llevar a cabo la excavación de un área con dimensiones aproximadas de 30 m de ancho por 130 m de largo y profundidad variable de 6.5 a 8.0 m; en ambos lados de la excavación y a unos 6 m de distancia se encuentran edificios que transmiten al terreno una carga ---



GRAVA		tamano en mm.			ARENA		LIMO Y ARCILLA
GRUESA	FINA	GRUESA	MEDIA	FINA			

FIG. II-3

RANGOS DE APLICACION DE DIFERENTES SISTEMAS DE DRENAJE PARA ABATIR EL NIVEL FREATICO

estimada en 6 ton/m², uno de los cuales había sufrido ya fuertes asentamientos diferenciales inducidos por su propio peso, figura II-4. El suelo de la zona está constituido por los depósitos de arcillas lacustres de origen volcánico, que forman el subsuelo de la parte central de la Ciudad y de una gran extensión del Valle de México, alcanzando en este punto espesores de 45 m. Con excepción de un relleno superficial de 1.00 m de espesor medio de un estrato de materiales areno-limosos fuertemente consolidados, cuyo espesor medio es de 3.00 m y se encuentra a 36 m bajo la superficie, en el resto del perfil existen limos y arcillas blandas, expansivas, cuyo contenido natural de agua varía entre 200% y 400%. El nivel freático en esa zona se encuentra a 1.80 m de profundidad.

La ejecución de tal excavación involucraba dos grandes riesgos: el primero, consiste en el desarrollo de importantes expansiones de los estratos localizados bajo el fondo de la excavación, a consecuencia de la eliminación de carga, por la extracción del material excavado; se estimaba que dicha expansión alcanzaría una magnitud del orden de 80 cm, en un lapso de 4 meses, de la cual se recuperaría, aproximadamente, el 75% al cargar el suelo nuevamente con la estructura. El segundo riesgo, pero menos importante, era la amenaza de un deslizamiento de talud, que dañaría muy seriamente a los edificios cercanos; deslizamientos de este tipo están asociados a una disminución considerable de la resistencia al corte de las arcillas, por la absorción de agua que acompaña a la expansión.

El problema de la expansión por descarga de las arcillas se contrarrestó produciendo, en el área por excavar, una sobrecarga, previamente a las operaciones de extracción de la tierra. Tal sobrecarga se logró abatiendo el nivel freático hasta una profundidad de 7.5 m, bajo el nivel que ocupaba originalmente, lo cual significaba una sobrecarga de 7.5 ton/m², igual al peso de la estructura por construir. La eliminación de la tierra al excavar releva una presión de 10.5 ton/m², de tal manera que, siendo mayor esta última que el peso de la estructura, se tendrá una sobrecompensación de 3 ton/m², con la cual deberá esperarse una expansión

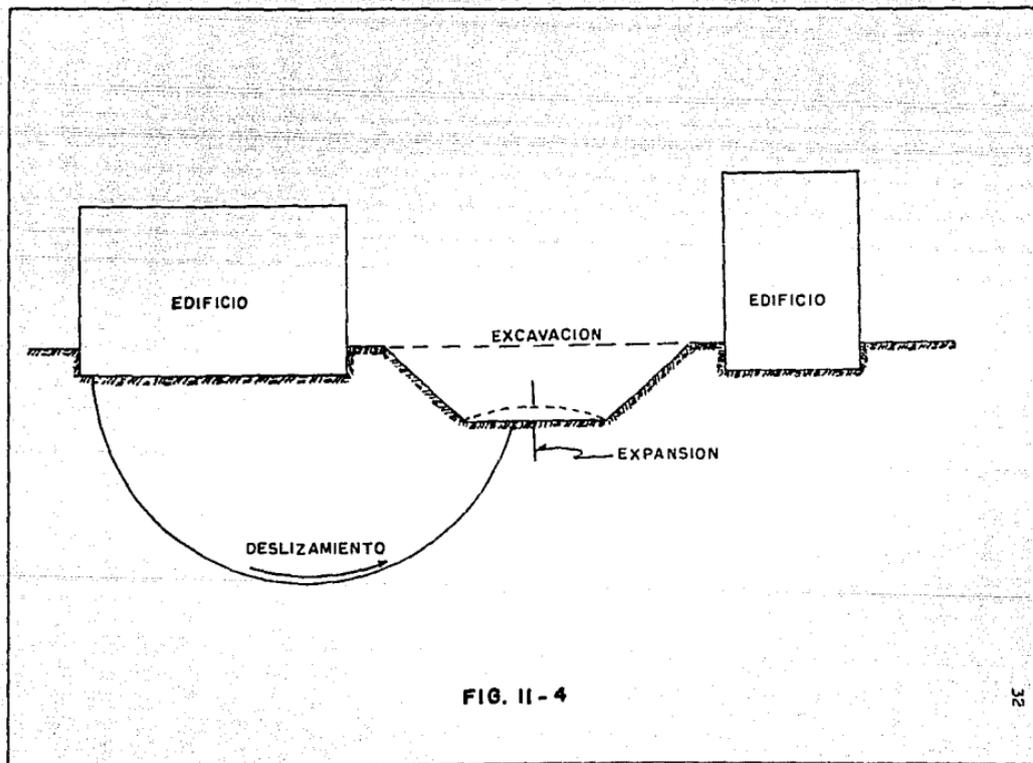


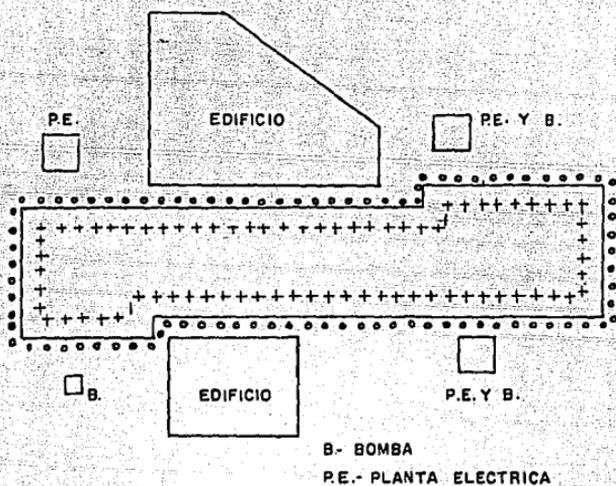
FIG. II - 4

final del orden de 20 cms.

En esas condiciones, se decidió permitir una expansión durante la construcción, que no excediera de esta cantidad, ya que, de no permitirse en esta etapa, se produciría de todas maneras después de terminada la obra; condición no deseable.

Las instalaciones necesarias para lograr el abatimiento en el tiempo y la profundidad requeridos consistieron en una serie de 85 pozos de bombeo, perimetralmente distribuidos en el borde superior del futuro talud, figura II-5, con una separación de 4 m, diámetro de 20 cms, y llevados hasta 14 m, de profundidad. Dentro de cada uno de estos pozos se instaló un tubo de fierro, ranurado, de 4" de diámetro nominal, relleno el espacio anular entre dicho tubo y la perforación con arena gruesa fina de buena graduación, para formar un filtro. El extremo inferior del tubo está provisto de una barra de fierro con longitud de 2 m, y de diámetro de 2.5 cms que penetra en el suelo, sirviendo así como electrodo negativo. Los electrodos positivos están formados por barras de 2.5 cms, de diámetro y 12 de longitud y se distribuyeron en dos hileras paralelas a los negativos separadas 6 m, de éstos hacia el interior del área. La extracción del agua de los pozos cátodo se realizó por medio de pequeñas bombas de pozo profundo del tipo eyector instaladas dentro del tubo ranurado; el agua a presión para accionar a los eyectores se hacía llegar a éstos por tubería desde una estación central de bombeo, tomada del tanque de recirculación a donde descargaba la tubería de retorno que conducía el agua extraída de los pozos más el gasto inyectado en las bombas; la diferencia entre éstos gastos salía por un vertedor en el tanque de recirculación figura II-6.

Tres plantas generadoras convenientemente distribuidas alrededor del área se utilizaron para excitar los electrodos aplicando un potencial que se fué haciendo variar entre 60 y 120 volts, poniendo a funcionar simultáneamente el bombeo. Estaciones piezométricas instaladas dentro del área indicaron que el abatimiento deseado se había logrado nueve días después de iniciado el tratamiento, dando comienzo después de este lapso a las operaciones de extracción de



PLANTA

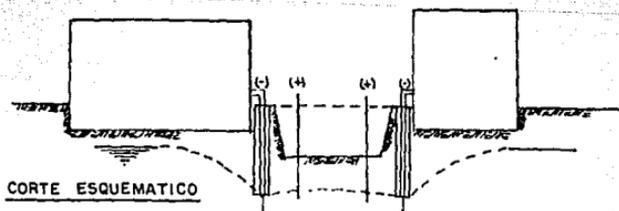


FIG. II-5

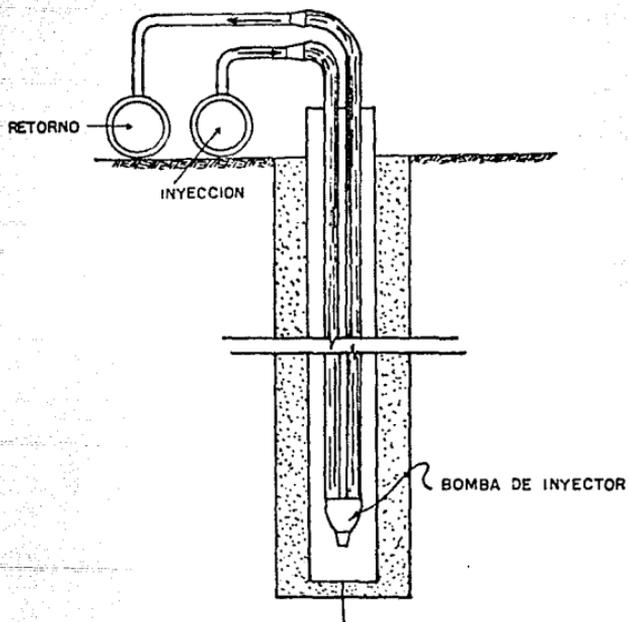


FIG. II-6 ESQUEMA DE LA INSTALACION DE BOMBAS DE POZO PROFUNDO.

la tierra, las cuales continuaron al máximo ritmo que permitía la capacidad del equipo de excavación y transporte. El bombeo electrosmótico se mantuvo funcionando hasta cuando se completó el colado de la bóveda de la estructura.

La expansión máxima medida en bancos profundos fue de 23 cms, de los que se recuperaron 7 cms, en el curso de la construcción. El asentamiento observado en el más pesado de los edificios vecinos fue de 4 cms, los cuales fueron sólo una insignificante adición a los ya existentes, de más de un metro, antes de la excavación.

En cuanto a las posibilidades de un deslizamiento que arrastrara a las estructuras vecinas, ésta quedó eliminada evitando la presencia de presiones de filtración en el talud y en el fondo, al mismo tiempo que se evita la pérdida de resistencia de las arcillas controlando su expansión.

.CAPITULO 3

OTROS METODOS PARA EL CONTROL DE FLUJO DE AGUA EN EXCAVACIONES
BAJO EL NIVEL FREÁTICO.

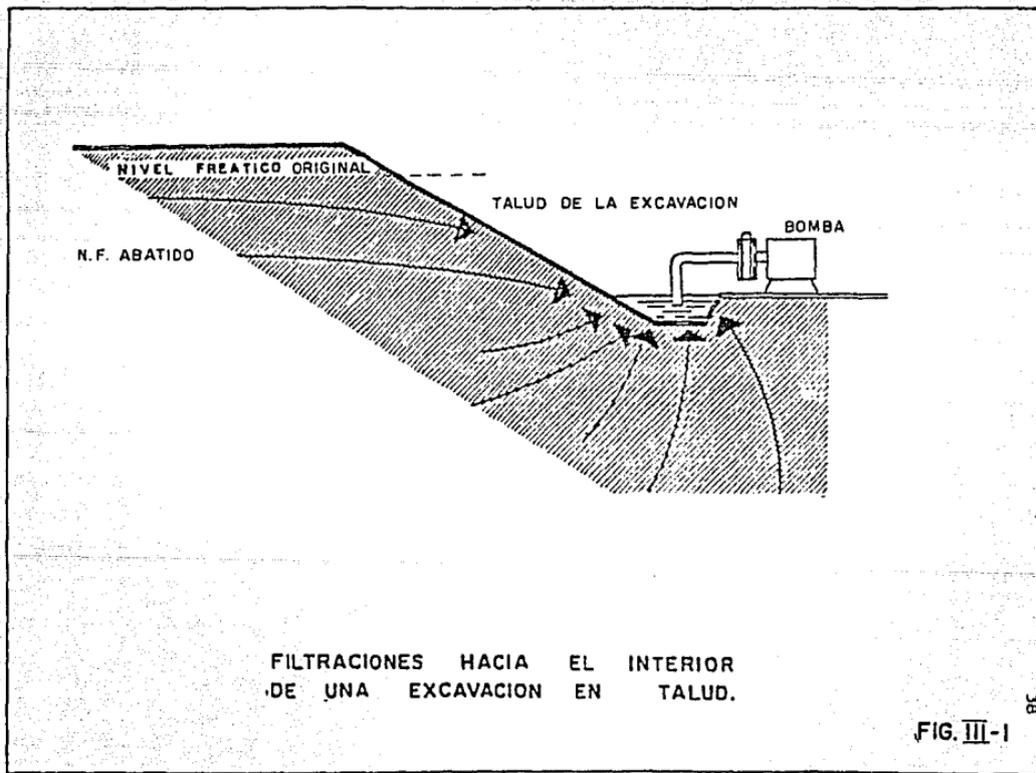
Con frecuencia es necesario excavar bajo el nivel freático para construir una cimentación, cuando esto sucede el agua freática tiende a recuperar su nivel y para ello es indispensable conducirla por zanjas colectoras hasta cárcamos de bombeo, con la finalidad de realizar la construcción de la cimentación en seco, este método se ilustra en la figura III-1.

Esta forma de abatimiento del nivel freático puede ser tolerable en algunos casos, cuando la recuperación del nivel freático es relativamente pequeño y no se produce el arrastre de partículas del suelo por el agua. Tales condiciones se presentan cuando se excava en suelos cohesivos como arcillas, limos arcillosos, arenas arcillosas, gravas arcillosas, es decir todos aquellos suelos con algún contenido de arcilla que produce cierta cohesión entre las partículas ofreciendo cierta resistencia a la erosión y tienen un bajo coeficiente de permeabilidad.

Por el contrario, cuando se excava con este procedimiento en suelos no cohesivos, tales como los limos plásticos, las arenas limosas y las arenas finas, se produce el deslizamiento y la erosión de los taludes y del fondo de la excavación, aun cuando la profundidad sea apenas de uno ó dos metros bajo el nivel freático. Además, las filtraciones ascendentes en el fondo de la excavación, al tratar de levantar las partículas de suelo aflojan su estructura y lo convierten en un material suelto, con lo cual se reduce importantemente la capacidad de carga y se aumenta la compresibilidad del suelo que queda bajo el fondo de la excavación.

Presiones de filtración y gradiente hidráulico crítico.

Si el nivel libre del agua se conserva en el borde del recipiente y se baja el depósito, se produce pronto un flujo establecido; de acuerdo con las condiciones ilustradas en la figura



III-2a. Como el depósito y el tubo flexible se comunican con el fondo del recipiente, la presión intersticial, presión de poro o esfuerzo neutro (U_w), en el fondo del recipiente puede expresarse como:

$$U_w = (H_1 + H - h) Y_w$$

Donde:

H_1, H .-se representan en la figura.

Y_w .- es el peso volumétrico del agua.

Esta fórmula representa una disminución de hY_w en la presión del agua de los poros. Se advierte que esta disminución no puede atribuirse a la velocidad de circulación del agua, debido a que la carga de velocidad $v^2/2g$ es despreciable para velocidades comparables a las más elevadas que se encuentran en los depósitos de suelos naturales. Por lo tanto, la presión total en el fondo del recipiente se determina únicamente por el peso del suelo y del agua que están arriba del mismo. Como resultado la presión efectiva debe aumentarse en hY_w , por lo tanto en el plano ab, el aumento proporcional en la presión efectiva es igual a $hY_w (z/H)$. El aumento en presión efectiva debido al flujo de agua se conoce con el nombre de presión de filtración es el resultado del empuje por fricción del agua corriente sobre los granos del suelo.

Se advierte que la pérdida de carga entre la parte superior del material granular y la profundidad z es hz/H . El gradiente hidráulico correspondiente i es h/H . Por lo tanto, la presión de filtración puede expresarse como izY_w , y la presión efectiva a la profundidad z es:

$$\bar{p} = zY' + izY_w$$

Donde:

z .- se representa en la figura.

i .- gradiente hidráulico.

Y' .- peso volumétrico del suelo sumergido $Y_{sat} - Y_w$.

Si se eleva el depósito arriba del recipiente, de manera que se tenga un flujo ascendente a través del material granular --

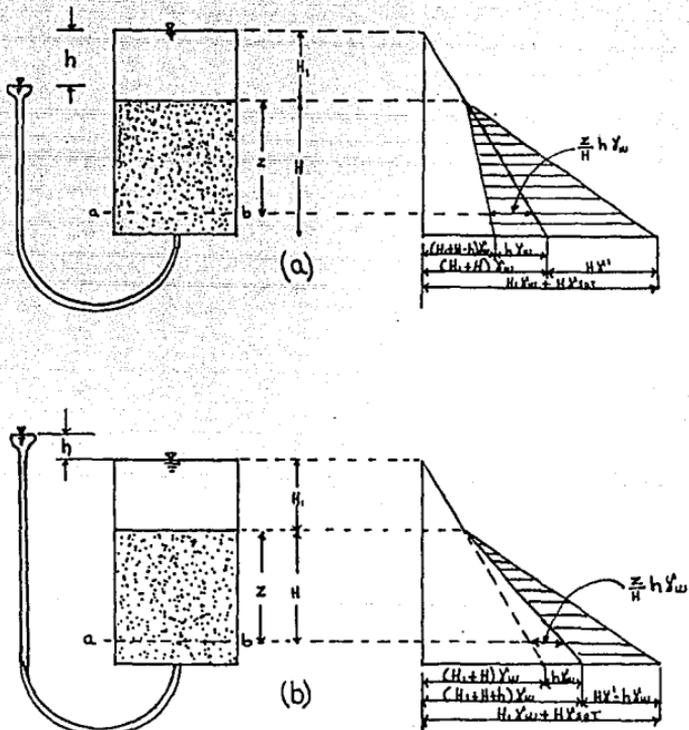


FIG.- III - 2

DIAGRAMA QUE ILUSTRAS EL SIGNIFICADO DE LA PRESION EFECTIVA Y LA PRESION DE PORO.

figura III-2b, la presión intersticial en el fondo del recipiente se aumenta en la cantidad hYw . Por lo tanto, la presión efectiva en el plano ab se reduce a:

$$\bar{p} = zY' - izYw$$

Aumentando el gradiente hidráulico ascendente puede incrementarse la presión de filtración a zY' , con lo que la presión efectiva \bar{p} se hace cero. Esto ocurre cuando:

El gradiente hidráulico para el cual la presión efectiva se hace cero se denomina gradiente hidráulico crítico i_c . Bajo estas condiciones, un suelo sin cohesión no puede soportar ningún peso sobre su superficie.

Además al aproximarse el gradiente hidráulico al valor crítico el suelo se hace mucho más suelto, y aumenta el coeficiente de permeabilidad K . Por lo tanto, si se hace una excavación en un suelo sin cohesión, bajo el nivel freático, a una profundidad tal que la presión efectiva se reduzca a cero, se observa una agitación visible de los granos del suelo. Este fenómeno se conoce como condición de arena movediza.

Los métodos modernos comunes para el abatimiento del nivel freático y/o el control del flujo de agua en excavaciones trabajan en dos formas diferentes.

- 1.- En unos casos se conducen los flujos de agua mediante instalaciones convenientes de bombeo, extrayendolas del suelo antes de que lleguen al sitio de la excavación; estos son los llamados "MÉTODOS DE DRENAJE", y permiten abatir el nivel freático, en forma local, en el sitio en que se excava, previamente a la ejecución de la excavación.
- 2.- Otros procedimientos evitan la llegada del agua al sitio de la excavación interceptándola mediante pantallas impermeables que rodean al sitio de la construcción y en ocasiones, forman también un fondo impermeable, cuando no existen en forma natural estratos impermeables que impidan la filtración por el fondo; a estos se les llama "MÉTODOS DE IMPERMEABILIZACION".

3.1.- MÉTODOS DE DRENAJE.

A continuación se ennumeran los diversos tipos de instalaciones para el abatimiento del nivel freático por gravedad antes de la excavación.

3.1.1.- POZOS PUNTA.

El esquema de la figura III-3 muestra este sistema que consiste en una serie de tubos verticales no perforados de unos 6 m de longitud y diámetro de 1 1/2 a 2", acoplando en su extremo inferior un tubo perforado de acero inoxidable o de latón de 30 a 60 cms de longitud.

La parte inferior del tubo perforado tiene una cabeza especial para hincarla con chiflones, como se muestra en la figura III-4, dichos "tubos punta" se colocan en líneas alrededor de la excavación, con separaciones entre una y otra punta, que varían de 0.5 a 2 m, excepcionalmente esa separación llega a 3 m.

El extremo superior de cada uno de los tubos se conecta a una tubería de descarga con diámetro de 8 a 10", la cual a su vez se conecta al extremo de succión de una bomba que envía a otro tubo conectado a ella el agua extraída.

Cada una de estas puntas es capaz de succionar un gasto de 0.5 a 1.0 lts/seg, dependiendo de su diámetro; así pues, la separación de las puntas dependerá del gasto que haya de bombear por metro lineal de perímetro de sistema, el cual está relacionado con la permeabilidad del suelo, de manera que si-----

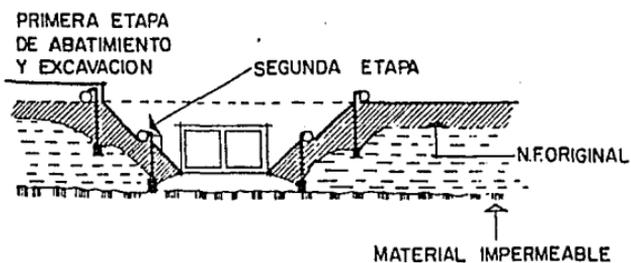
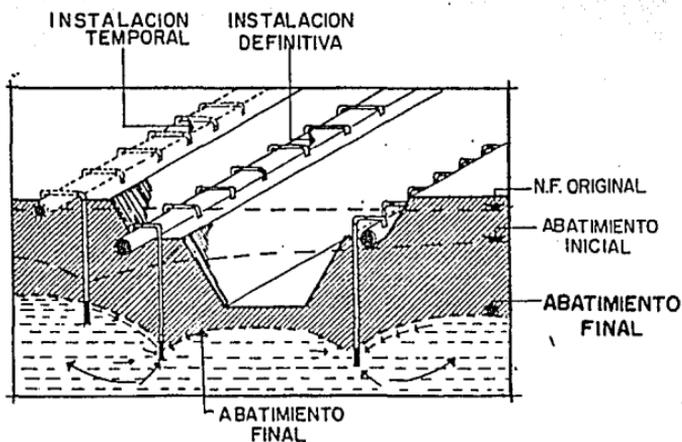


FIG. III-3

ABATIMIENTO DEL NIVEL FREATICO
MEDIANTE POZOS - PUNTA

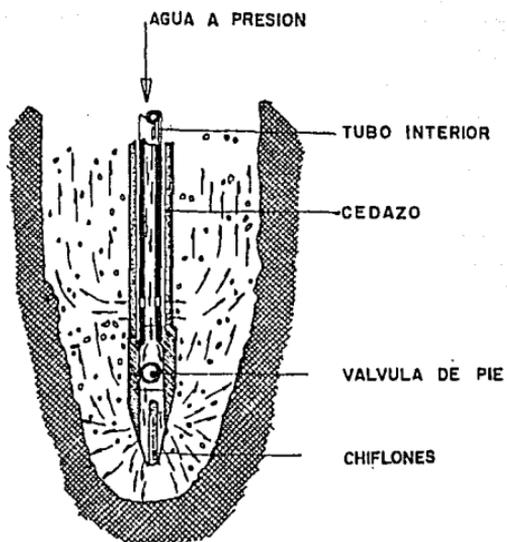


FIG. III-4
HINCADO DE LA PUNTA POR MEDIO
DE CHIFLON DE AGUA

se conoce está, se puede estimar el gasto por unidad de longitud, así como el diámetro de las puntas y su separación.

Para fines de orientación a este respecto, puede decirse que en arenas de tamaño medio a fino, cuya permeabilidad es del orden de 10^{-2} cms/seg, pueden requerirse puntas de 2" con una separación de 0.5 m, mientras que, en arenas finas limosas -- con permeabilidad del orden de 10^{-3} cms/seg, bastarán puntas de 1 1/2", con separaciones de unos 2 m.

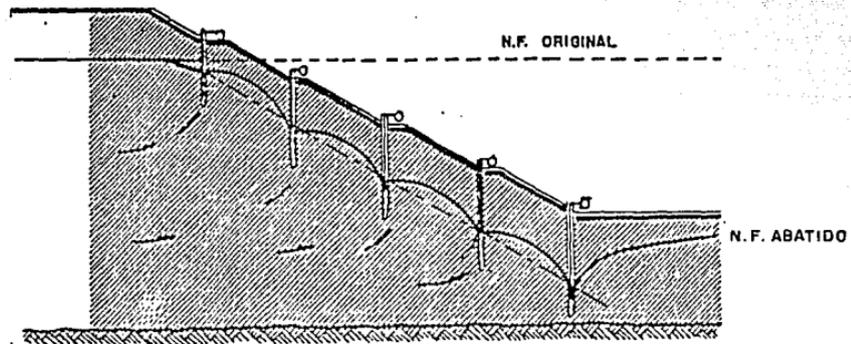
El sistema de pozos punta solo permite abatir el nivel freático hasta unos 6 m, de profundidad, por lo que, si se requiere mayor profundidad de abatimiento, es necesario instalar varios circuitos de puntas escalonadas como indica el croquis de la figura III-5.

3.1.2.- POZOS PROFUNDOS.

Como una alternativa a la instalación de puntas escalonadas -- se recurre al uso de pozos profundos que se instalan en un solo circuito perimetral a la excavación, mostrado en la figura III-6.

Las bombas de pozo profundo se fabrican en una amplia gama de capacidades que va desde unos 5 a 10 lts/seg, hasta gastos -- mayores de 100 lts/seg, lo cual permitiría diseñar una instalación que lograra controlar cualquier gasto de filtración y a cualquier profundidad que pudiera requerirse en la práctica aun tratándose de excavaciones de gran profundidad y de depósitos de grava y arena gruesa y limpia, cuya permeabilidad -- sea mayor de 10^{-1} cms/seg, bastaría para ello conocer la permeabilidad media y la estratigrafía del depósito para determinar, mediante el trazo de una red de flujo, el gasto por metro lineal que se obtendrá a lo largo de la línea de bombeo.

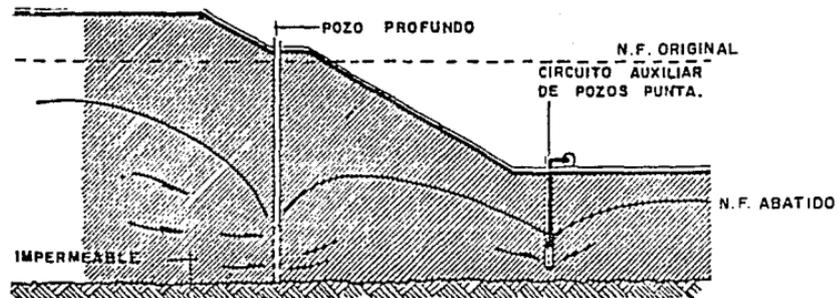
Puesto que es indispensable que los conos de abatimiento de --



ABATIMIENTO MEDIANTE VARIAS
ETAPAS ESCALONADAS

94

FIG. III-5



ABATIMIENTO DE N.F. MEDIANTE
POZOS PROFUNDOS

cada uno de los pozos a lo largo de la línea de bombeo se traslapen completamente es necesario que la separación entre pozos no sea mayor que la mitad de la profundidad del abatimiento requerida y que el espejo de agua abatida en cada pozo de bombeo se encuentre de 2 a 3 m, abajo de la profundidad de abatimiento deseada en la excavación.

Sobre estas bases se puede elegir la capacidad y número de las bombas que se requiera. Sin embargo, cuando se trata de permeabilidades de 10^{-1} cms/seg, o mayores (gravas y arenas limpias), los gastos que se bombean llegan a ser tan grandes que requieren de fuertes inversiones en equipo y costo de operación; en tales circunstancias puede justificarse mejor desde un punto de vista económico, evitar las filtraciones mediante métodos de impermeabilización que se discutirán más adelante.

3.1.3.- SISTEMA COMBINADO DE GRAVEDAD Y VACIO.

Quando se tienen depósitos de limos o limos arenosos cuya permeabilidad varía entre 10^{-3} y 10^{-5} cms/seg, los sistemas de bombeo de gravedad por si solos pueden requerir de un tiempo de bombeo demasiado prolongado o bien ser totalmente ineficientes para los limos menos permeables; en tales condiciones se recurre al auxilio de un sistema de vacío que, combinado con el equipo de bombeo produce un vacío que actúa en las paredes del pozo, a través del filtro, según se muestra en la figura III-7, este sistema aumenta el gradiente de las filtraciones hacia el pozo y desarrolla un estado de tensión en el agua de los poros del suelo que, a su vez se traduce en un aumento de la presión intergranular y, por lo tanto, de la resistencia al corte del suelo. De esta manera, no solamente se logra la eliminación de las fuerzas de filtración, sino que además, el estado de tensión creado en el agua mejora notablemente las condiciones de estabilidad de los taludes en una excavación, lo que permite aumentar el ángulo del talud

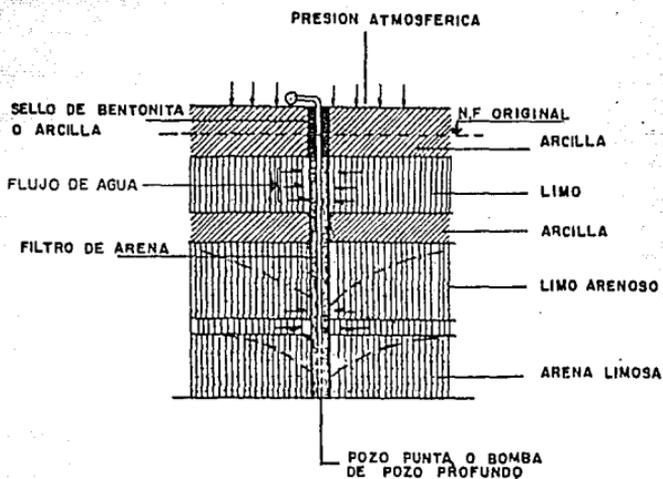


FIG. III-7

BOMBEO Y VACIO COMBINADOS

y reducir el volumen de tierra excavada.

En el caso de suelos estratificados que contienen capas alternadas de muy diferente permeabilidad, arenas, limos, y arcillas se requiere del empleo de pozos con filtro en toda la profundidad, independientemente del sistema de bombeo que se utilice.

3.2.- METODOS DE IMPERMEABILIZACION.

Para construir barrera o pantallas impermeables capaces de interceptar las filtraciones hacia el interior de la excavación se dispone de los siguientes procedimientos:

3.2.1.- PILOTES SECANTES DE CONCRETO.

Las pantallas de pilotes secantes se forman mediante pilotes de concreto colocados insitu, dentro de una perforación con el auxilio de una trompa de colado o tubo tremie que deposita el concreto de alto revenimiento, mayor de 15 cms, en el fondo de la perforación, de manera que el concreto vaya desplazando a la bentonita hasta sustituirla completamente. El trabajo se hace en dos etapas, figura III-8, en la primera se cuelean pilotes alternados a lo largo de la hilera que formará posteriormente la pantalla, y en la siguiente se cuelean los pilotes intermedios. Los pilotes tienen un diámetro de 50 a 60 cms, y la longitud suficiente para que su extremo inferior empotre en un estrato impermeable. Si no existe un estrato de estas características dentro de una profundidad razonable, se puede formar artificialmente mediante la inyección de lechadas de bentonita y cemento, o productos químicos, a fin de impedir la entrada de las filtraciones por el fondo de la excavación.

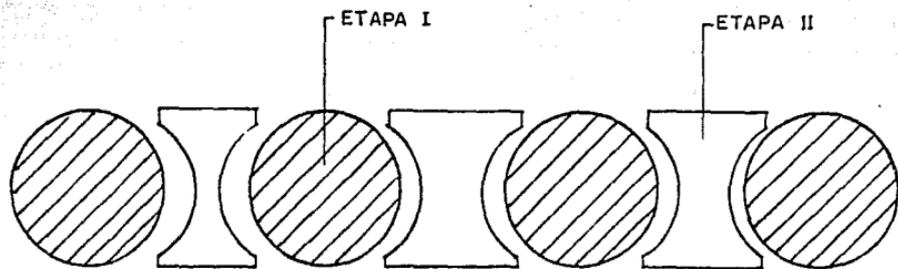


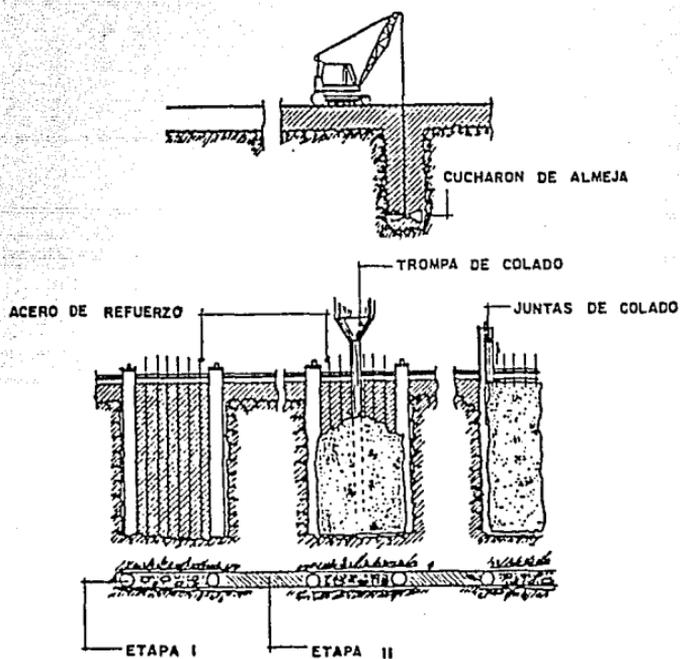
FIG- III -8 PILOTES SECANTES .

3.2.2.- TABLEROS DE CONCRETO.

La ejecución de perforaciones de depósitos fluviales con alto contenido de cantos rodados, presenta serias dificultades por la necesidad de triturar dichos cantos rodados para que sean extraídos por el lodo bentonítico en circulación en el pozo; esta operación hace muy lento el proceso constructivo de la pantalla de pilotes. En estos materiales resulta ventajoso -- hacer la excavación en tableros de planta rectangular de 3 a 6 m, de longitud y 50 a 80 cms, de ancho, figura III-9, utilizando para ello un cucharón de almeja especialmente diseñado para este objeto. A medida que la excavación se va profundizando, se mantiene llena de lodo bentonítico, el cual ejerce una presión contra las paredes de la zanja y la estabiliza evitando el derrumbe de los materiales del depósito hacia el interior de la excavación. Una vez alcanzada la profundidad deseada, la zanja se rellena de concreto de alto revenimiento (mayor de 18 cms), depositándolo con trompa de colado otubo tremie, hasta desplazar toda la bentonita y formar un tablero de concreto. De manera semejante al caso de la pantalla de -- pilotes los tableros se cuelan alternadamente en dos etapas -- en la construcción de cimentaciones, estos muros de concreto se construyen frecuentemente con refuerzos de acero, de tal manera que, además de funcionar como pantallas impermeables -- sirven como estructuras de contención durante la excavación -- y se integran después a la propia estructura de cimentación.

3.2.3.- TRINCHERAS FLEXIBLES.

Cuando el objeto de la pantalla es exclusivamente el de impedir las filtraciones, las zanjas estabilizadas con lodo bentonítico pueden rellenarse con una mezcla de grava y arena -- bien graduada a la que se agrega un 20 o 25%, de arcilla de -- mediana o alta plasticidad, a esta mezcla se adiciona agua -- hasta darle un revenimiento mayor de 18 cms, y se coloca en -- la zanja de igual manera que el concreto del caso anterior, --



**TABLEROS DE CONCRETO
COLADO IN SITU.**

obviamente esta solución representa alguna economía en relación a los tableros de concreto del caso anterior. La excavación de la zanja puede hacerse con el mismo cucharón de almeja que se emplea en el caso anterior o bien puede utilizarse una draga con bote de arrastre una retroexcavadora o una zanjadora, dependiendo de la profundidad de la pantalla y del -- equipo disponible, como ilustra la figura III-10,

El relleno de la zanja puede también hacerse desde el extremo opuesto a aquel en que avanza la excavación, utilizando para ello un bulldozer que va empujando la mezcla y haciéndola --- deslizarse dentro de la excavación, con lo cual se va desalojando el lodo bentonítico que estabiliza las paredes de la -- zanja. Se han construido pantallas flexibles de este tipo, -- hasta profundidades de 30 m, para interceptar depósitos fluviales de arena, grava y cantos rodados, utilizando draga y - bulldozer.

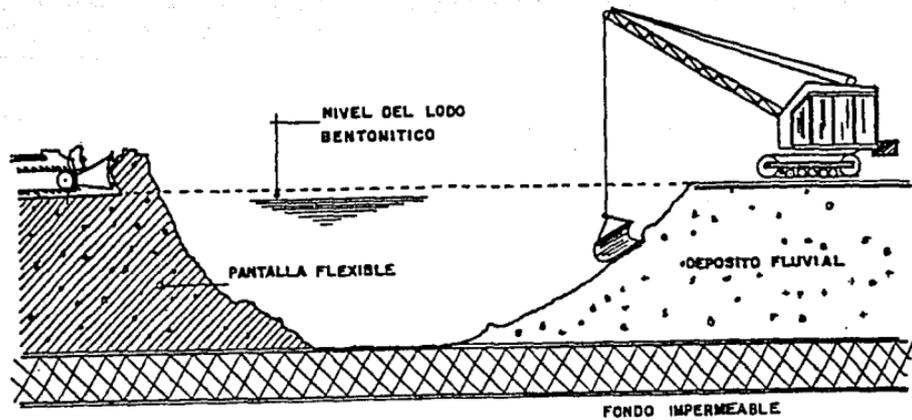


FIG. III-10

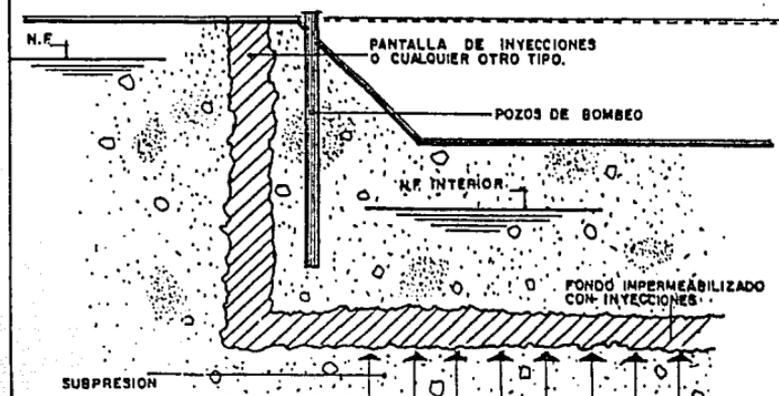
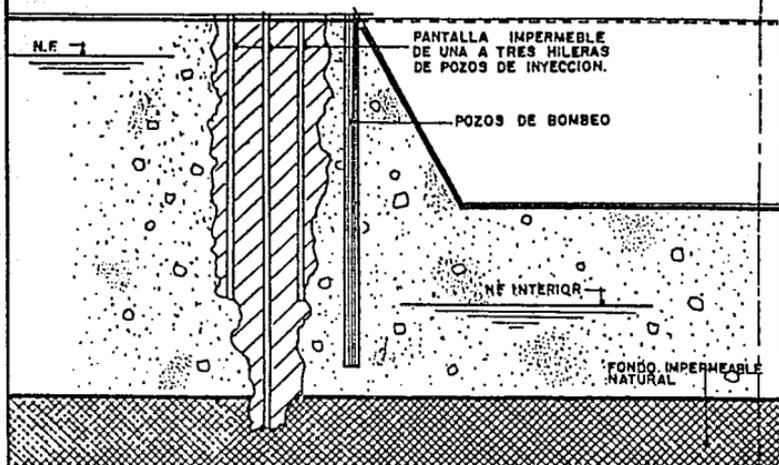
PANTALLA FLEXIBLE

3.2.4.- PANTALLAS DE INYECCION.

Figura III- 11 se han utilizado con éxito pantallas impermeables formadas mediante la inyección de lechadas de bentonita con cemento, o bien de productos químicos como el silicato de sodio con alcohol isopropílico, o con cloruro de calcio, resinas de lignosulfonato de cromo u otras resinas comerciales. Las lechadas a base de bentonita penetran en depósitos que tienen poros grandes como las arenas y las gravas, cuya permeabilidad es mayor de 10^{-1} cms/seg, en las arenas medianas - de menor permeabilidad las partículas de bentonita y cemento no son capaces de penetrar a través de los poros y se hace necesario entonces recurrir al empleo de productos químicos.

Las lechadas o los productos químicos se inyectan en el terreno a través de una o varias hileras paralelas de perforaciones separadas entre sí una distancia variable de 1.5 a 2.00 m, de manera que la zona de influencia de cada uno de los pozos de inyección se traslape con la de los pozos vecinos y forme así una pantalla impermeable.

PANTALLA DE INYECCION



CAPITULO 4

EJEMPLOS DE APLICACION.TRATAMIENTO ELECTROSMOTICO PARA LA REALIZACION DE EXCAVACIONES DE GRAN AREA Y PROFUNDIDAD.4.1.- ANTECEDENTES.

El diseño estructural y arquitectónico de los edificios de la Tesorería del Departamento del Distrito Federal contemplaban la realización de excavaciones de gran área y profundidad las cuales deberían de efectuarse en un plazo de tiempo mínimo por consideraciones de programa.

Son ya bien conocidos en el medio de la construcción, los problemas que se presentan en las excavaciones profundas realizadas en las arcillas del Valle de México, problemas derivados principalmente de:

a).- La alta plasticidad del material y por lo tanto de su notable compresibilidad y expansibilidad, así como de su baja resistencia al corte.

b).- La existencia de aguas freáticas casi superficiales. Las anteriores consideraciones nos permiten predecir que en cualquier excavación abierta que se realice en estas arcillas lacustres de origen volcánico, se presentarán en mayor o en menor escala según el valor del área de excavación, de su profundidad y del tiempo que permanezca descubierta, los siguientes fenómenos:

- 1).- Expansiones en el fondo.
 - 2).- Flujo del agua freática a través de taludes y fondo.
 - 3).- Disminución de la resistencia al corte de las arcillas.
 - 4).- Falla de taludes.
 - 5).- Falla por el fondo.
 - 6).- Asentamientos diferenciales importantes durante la construcción de la estructura o una vez terminada.
- Ante este panorama, se comprende porqué es difícil excavar ---

en áreas más o menos grandes y a profundidades mayores de 4- o 5 m, sin riesgo a que se presenten varios de los problemas anteriores. Se han desarrollado diferentes métodos de ataque para solucionar los problemas señalados, los cuales analizaremos brevemente para el caso que nos ocupa.

4.2.- EXCAVACIONES PARA LA CONSTRUCCION DE LA CIMENTACION.

Siendo las dimensiones de la cimentación por construir las siguientes:

edificio	largo	ancho	profundidad
A	97.50 m	60.00 m	5.60 m
B	70.00 m	22.50 m	7.20 m

Se pueden considerar tres formas de ataque principales para realizar la excavación.

4.2.1.- ZANJAS ADEMADAS.

El objetivo primordial de este método es controlar las expansiones del fondo ya que la descarga del suelo no se realiza en toda el área de la cimentación sino que, se excavan zanjas, las cuales se troquelan para garantizar la estabilidad de las paredes. Puesto que el colado y la excavación se realizan por etapas el suelo no se altera por una descarga brusca y total y las expansiones son reducidas a valores mínimos: sin embargo, se tienen con bastante frecuencia fallas por el fondo debidas a flujo de agua, figura VI-1.

Una falla por el fondo, que se presenta en una excavación de dimensiones reducidas acarrea serios problemas, que se traducen finalmente en atrasos en el programa y aumento notable del costo.

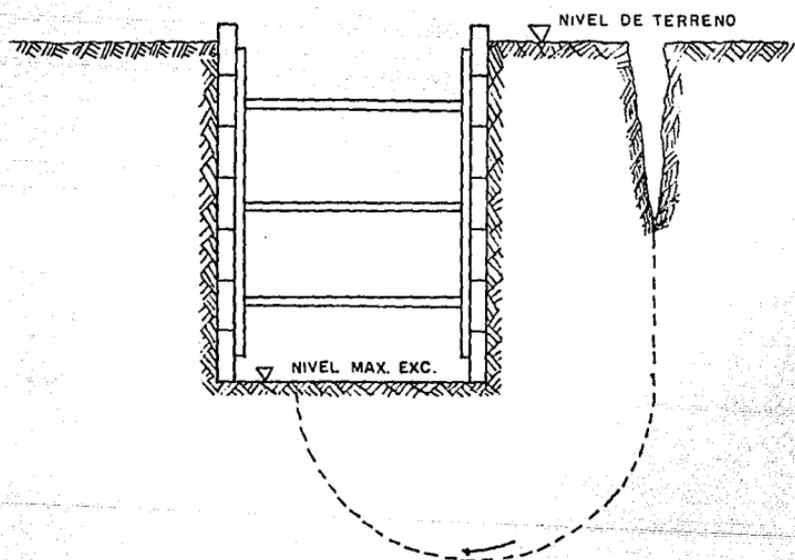


FIG- IV-1

FALLA POR EL FONDO DE UNA ZANJA ADEMADA.

Además de la consideración anterior, es conveniente hacer -- hincapié en que, una excavación realizada por el método de -- zanjás presenta dificultades de carácter práctico, en el -- trazo de ejes, en el movimiento de tierras y en general, en todas las operaciones de construcción, ya que se trabajan en zonas estrechas, en la que los rendimientos y la calidad de trabajo son reducidos. Más grave aún es la presencia de desniveles en colado de las losas contiguas. El alto costo de este procedimiento y el tiempo necesario para la ejecución -- de la excavación son fácilmente explicables con las anteriores consideraciones.

4.2.2.- TABLAESTACAS Y TROQUELES.

Este procedimiento está indicado para aquellas excavaciones circundadas por construcciones, donde no es posible tender -- taludes al exterior de la excavación y donde la falla por el fondo causada por la sobrecarga de las estructuras vecinas -- sería inevitable en caso de proceder por el método de zanjás ademadas. Para tener un correcto funcionamiento del sistema se requiere el hincado de tablaestacas a profundidades mayores que las del fondo de la excavación, pues de lo contrario (lo cual sucede frecuentemente), se provoca la falla por -- el fondo debido a flujo plástico del material, fenómeno que es acelerado por las fuerzas de filtración creadas al fluir el agua por gradientes hidráulicos, a través del suelo como puede apreciarse en la figura IV-2.

La necesidad de hincar la tablaestaca a profundidades de 8 -- ó 10 m, y las dificultades inherentes al sistema, obligan a programas de excavaciones demasiado largos y el costo de la misma crece en forma notable.

Este costo es mayor aún si se toma en cuenta la recuperabilidad problemática de la tablaestaca.

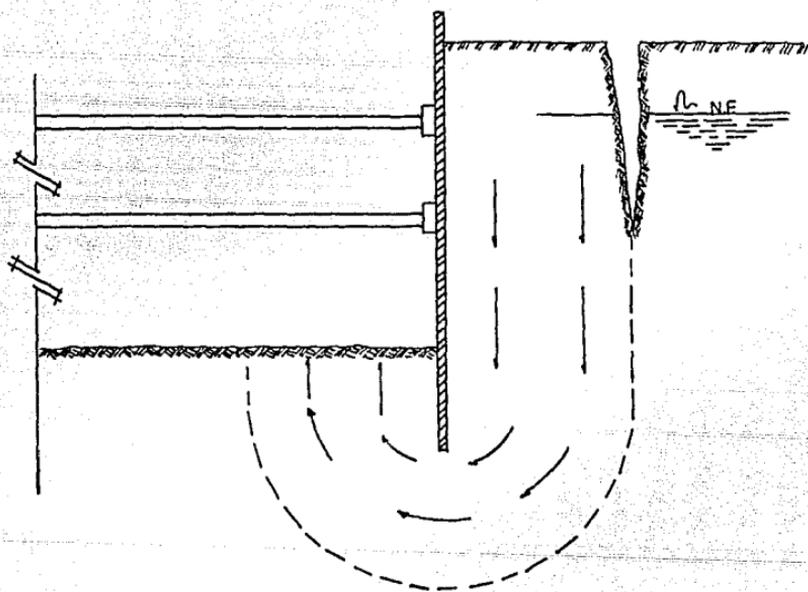


FIG.- IV - 2

FALLA POR EL FONDO DE UNA EXCAVACION CON
TABLESTACA EFECTO DE LAS FUERZAS DE
FILTRACION .

Pero aún en el caso favorable de tener garantizada la estabilidad de los taludes y del fondo de la excavación mediante tablaestacado profundo y resistente, no puede de ninguna manera evitarse que se presenten expansiones en el fondo de la excavación cuyo valor será mayor al aumentar el área excavada y la profundidad de la misma y cuando más tiempo permanezca la excavación descubierta.

4.2.3.- TRATAMIENTO ELECTROSMÓTICO.

Este procedimiento está basado en el fenómeno electrosmótico - en el cual, por la aplicación de un potencial eléctrico en un medio poroso se produce un movimiento del agua del polo positivo hacia el negativo permitiendo acelerar el abatimiento del nivel de agua freática. La utilización de este principio físico en el suelo arcilloso, además de aumentar la permeabilidad del mismo, produce en éste una serie de fenómenos físico-químicos, tales como intercambio de cationes y desecamiento total del suelo (que significan incremento de la resistencia al corte), así como el origen de tensiones en el agua de los poros, y por lo tanto, compresiones en los granos del suelo. Mediante un tratamiento electrosmótico convenientemente diseñado como se indica en la figura IV-3, puede lograrse además la inversión de las fuerzas de filtración, ya que el agua fluye de la excavación hacia los pozos cátodo y ésto da un mayor factor de seguridad en la estabilidad de los taludes y del fondo.

La apropiada utilización de éstos fenómenos para el caso práctico de la excavación, permite que esta sea realizada en un corto plazo, con toda el área descubierta y con inclinación en los taludes del orden de 0.3:1 a 1:1, dependiendo de que la profundidad varíe de 5 a 10 m, ó más aún.

Sin embargo, la ventaja más importante que puede obtenerse sobre los otros métodos de ataque, mediante el tratamiento del -

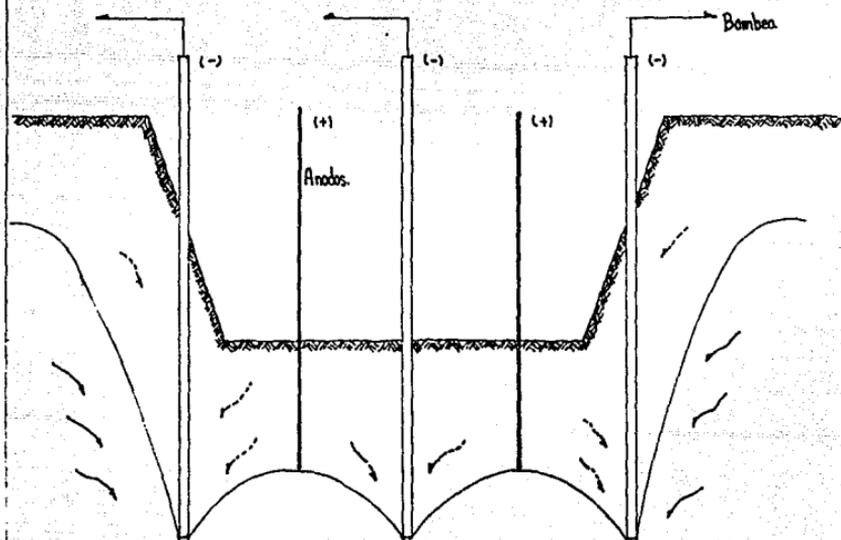


FIG. IV-3 .- Tratamiento electrosmótico para una excavación.
inversión de las fuerzas de filtración.

bombeo electrosmótico, es el control de expansiones del fondo de la excavación, ya que la adecuada instalación eléctrica y de bombeo y el notable aumento de permeabilidad del suelo, --- permite lograr rápidamente el abatimiento del nivel freático a una profundidad tal que la descarga causada por la excavación es compensada por la sobrecarga causada por el abatimiento.

Para ilustrar este concepto, podemos analizar el caso del edificio B, de la Tesorería, cuya excavación requería llegar a -- 7.20 m, de profundidad, si consideramos el estado de esfuerzos intergranulares verticales de una partícula de suelo M, a la - profundidad Z, figura IV-4, después de realizada la excavación está ha sufrido una descarga cuyo valor es:

$$D = h_1 \times y_h + h_2 \times y'$$

donde:

h_1 y h_2 = acotaciones indicadas en la figura.

y' = peso volumétrico del suelo sumergido, o sea, afectado por el empuje de Arquímedes.

y_h = peso volumétrico del suelo húmedo.

$$(y' = y_{sat} - 1 = 0.3 \text{ ton/m}^3.)$$

y_h = peso volumétrico del suelo húmedo.

$$y_h = 1.3 \text{ ton/m}^3.$$

La descarga D, para el caso del edificio B, de la Tesorería, -- vale entonces; considerando al suelo sumergido.

$$D = 2m \times 1.3 \text{ ton/m}^3 + 5.2m \times 0.3 \text{ ton/m}^3 = 4.2 \text{ ton/m}^2$$

Para que las partículas del suelo M, a la profundidad Z, que -- han sido afectadas por una descarga de 4.2 ton/m², no sufran - expansiones, es necesario afectarlas simultáneamente con cargas C, del mismo valor lo cual se logra abatiendo el nivel --- freático 4.2 m, por debajo del fondo de la excavación, por la siguiente consideración:

La partícula M, quedo afectada después de la excavación con --

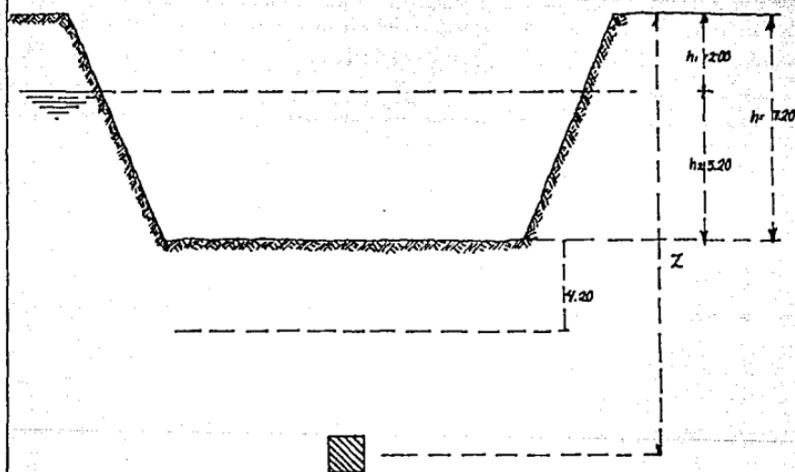


FIG. IV-4 Esquema para el cálculo de presiones intergranulares verticales. Edificio B de Tesorería.

con esta carga E :

$$E = (Z - h) \gamma' = (Z - h) m \times 0.3 \text{ ton/m}^3.$$

Por lo tanto, si abatimos el nivel freático 4.2 m, por debajo del fondo de la excavación y del nivel freático ya abatido deja de sufrir el empuje de Arquímedes y pesa por lo tanto volumétricamente 1 ton/m³ más que en su condición anterior.

Ahora la condición de cargas verticales intergranulares de la partícula M vale:

$$E = (Z - h) m \times 0.3 \text{ ton/m}^3 + 4.2 \text{ ton/m}^2.$$

Resumiendo la anterior, la partícula M, que había sufrido una descarga de 4.2 ton/m², al momento de la excavación, es equilibrada por una sobrecarga de 4.2 ton/m² debida al abatimiento del manto freático por debajo del fondo de la excavación.

Combinado convenientemente el abatimiento del manto freático con la excavación y posteriormente la construcción y lastrado de la estructura con la recuperación del nivel freático original, es posible reducir las expansiones del fondo de la excavación al mínimo, lográndose así evitar los asentamientos diferenciales de la estructura, que pueden ser graves para su estabilidad y funcionamiento.

Es de considerarse también que la disminución al mínimo de las expansiones hace que la resistencia al corte sólo se vea reducida en un pequeño porcentaje, con lo que se garantiza aún más la estabilidad de los taludes y del fondo.

4.3.- TRATAMIENTO ELECTROSMOTICO PARA LA EXCAVACION DE LA CIMENTACION DEL EDIFICIO DE LA TESORERIA DEL DEPARTAMENTO DEL D.F.

Del estudio de las tres posibilidades antes mencionadas se decidió utilizar un tratamiento eléctrico como el método más adecuado para la ejecución de la excavación.

Damos a continuación una breve descripción de la instalación, de su funcionamiento y terminaremos con algunos datos estadísticos que permitirán comprender mejor los resultados obtenidos en relación con aquellos que por experiencias anteriores se podrían haber esperado de los métodos convencionales (zanjas ademasadas, tablaestacas y troqueles). El criterio que determino el uso del tratamiento electrosmótico, se basó principalmente en los siguientes puntos:

- 1.- Necesidad de disminuir las expansiones del fondo de la excavación a valores mínimos.
- 2.- Urgencia de iniciar y terminar los trabajos de excavación y construcción de la cimentación para lo cual era necesario contar con:
 - a) Grandes áreas de excavación.
 - b) Libertad de maniobra.
 - c) Mínima perdida de tiempo de los trabajos previos a la excavación.
 - d) Abatimiento del nivel freático.
- 3.- Bajo costo del procedimiento.

4.3.1.- DESCRIPCION DE LA INSTALACION.

De acuerdo con la figura IV-5, en la que se ilustra la planta de instalación electrosmótica, dicha instalación consistió en un sistema de bombeo y un sistema eléctrico, convenientemente

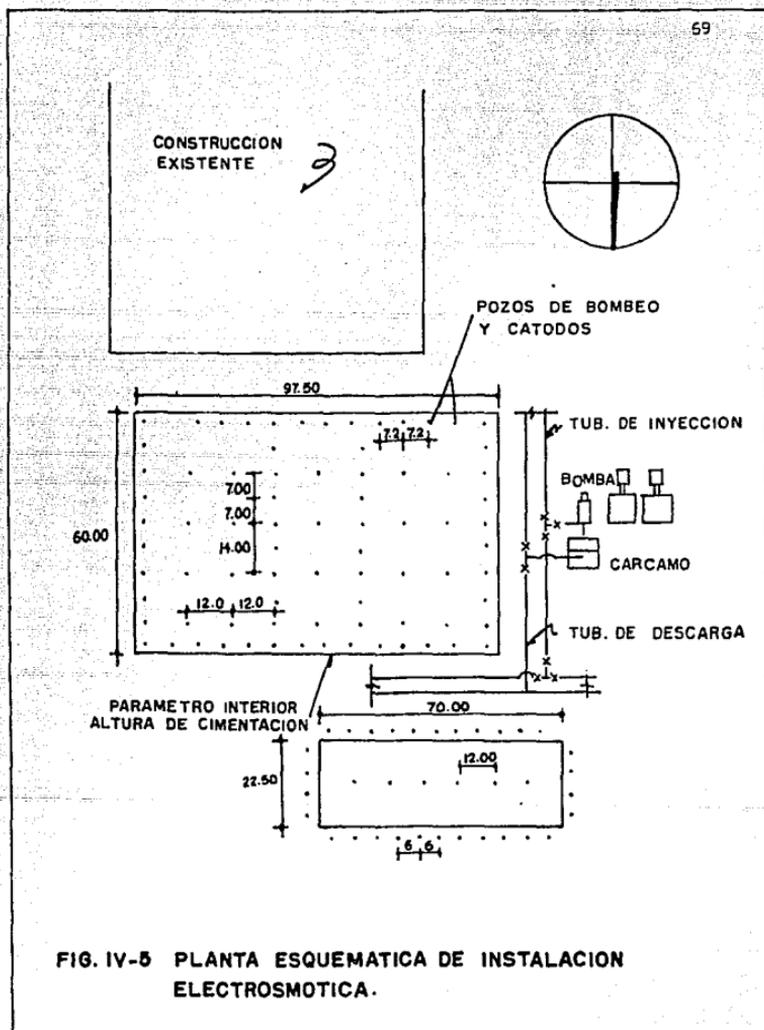


FIG. IV-5 PLANTA ESQUEMATICA DE INSTALACION ELECTROSMOTICA.

combinados para lograr el abatimiento del nivel freático y -- la estabilización del suelo en el mínimo plazo posible.

CONCEPTO	EXCAVACION DEL EDIFICIO "A".	EXCAVACION DEL EDIFICIO "B"
Número de pozos	71	33
Profundidad de los pozos.	13 m.	15 m.
Piezómetros a 12 m de profundidad.	3	3
Profundidad de excavación.	5.60 m.	7.20 m.
Taludes perimetrales.	0.3:1	0.5:1
Rapidez de abatimiento del N.F.	0.58 m/día	0.87 m/día
Profundidad original del N.F.	2.50 m.	2.50 m.
Profundidad abatida del N.F.	10.00 m.	10.00 m.

So bombeó a presiones del orden de 4.5 kg/cm² mediante 4 --- bombas centrífugas. Se instalaron las puntas de succión a -- una profundidad de 12 m, en el edificio "A" y a 14 m, en el edificio "B".

Se aplicó una caída de potencial de 80 a 90 volts, y el amperaje consumido varió entre 450 y 800 amperes para lo cual se dispuso de tres generadores de corriente directa de 100 -- a 150 Kw de potencia cada uno.

En un plazo menor de 20 días se efectuó la instalación eléctrica y de bombeo (la cual consiste en perforación, limpieza y ademe de pozos, tendido de tubería, colocación de puntas de bombeo y conexión de ellas con la red de inyección y drenaje de agua; lecturas iniciales etc.) y se realizó el abatimiento del nivel freático en 15 días aproximadamente, con lo cual pudo iniciarse la excavación de inmediato.

4.3.2.- ANALISIS COMPARATIVO DE LA APLICACION DE LA ELECTROSMOSIS CON OTROS METODOS DE EXCAVACION.

A continuación se presentan tabulados algunos datos comparativos reales estimados muy interesantes.

CONCEPTO	ELECTROSMOSIS	ZANJAS ADEMADAS	TABLAESTACA Y TROQUELES.
Tiempo total de excavación y construcción de la cimentación.	2 meses 20 días	9 meses*	7 meses*
Expansiones --- máximas al centro de la excavación.	edificio A: = 10.3 cms.	-----	edificio A 142 cm (1) edificio B 137 cm (1)
Asentamientos--- máximos en la corona del talud.	edificio A: = 5 cm. edificio B: = 16 cm.	-----	-----
A 20 m de la corona del talud	edificio A: = 7 cm. edificio B: = 10 cm.	-----	-----

* Valores estimados.

(1) Valores calculados.

4.4.- TRATAMIENTO ELECTROSMOTICO PARA LA EXCAVACION DE LA CIMENTACION DEL EDIFICIO INSIGNIA DEL CONJUNTO URBANO NONOALCO TLALTELOLCO.

La Torre Nonoalco requiere de una cimentación especial que garantice las condiciones generales de estabilidad de la obra -- además, que permita al edificio seguir el hundimiento regional el Valle de México y que los sismos que se registran en la -- Ciudad de México no causen graves perjuicios a la estructura.

El diseño consistió en una cimentación semicompensada en la -- cual, parte de las cargas transmitidas al subsuelo por la estructura, son absorbidas por pilotes de fricción y el resto -- de la carga es compensada por un volumen de excavación.

El criterio de que una parte del peso del edificio es compensada excavando y desplantando la cimentación a cierta profundidad, se basa en que el peso del material excavado es substituído por el peso de la estructura construída o por la parte que se desea compensar. Este tipo de cimentación, cuando la compensación del peso de la estructura es total, se llama también -- "cimentación totalmente compensada".

La excavación para la cimentación de la Torre Nonoalco plantea una serie de graves problemas desde el punto de vista de la mecánica de suelos y de los procedimientos de construcción, -- problemas cuyas causas eran:

- a) Profundidad máxima de excavación 8.8 m.
- b) Bajo valor de la resistencia al corte del material.
- c) Arcillas altamente expansibles y compresibles.
- d) Nivel freático a 2.50 m, de profundidad.

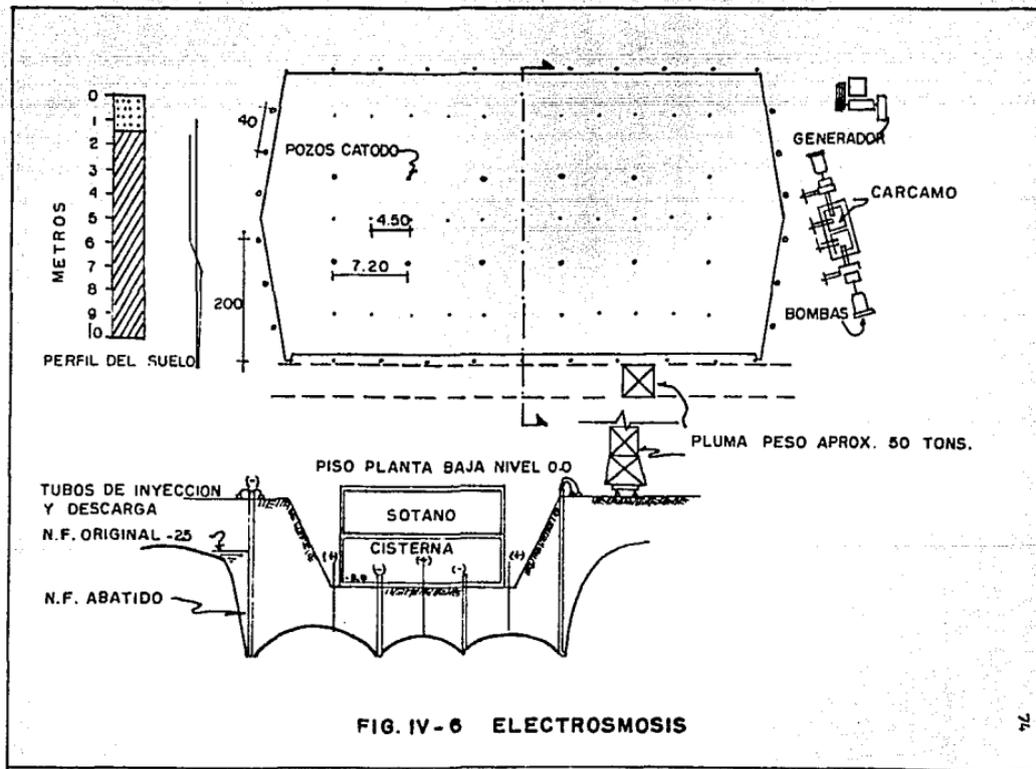
En caso de realizar los trabajos de excavación y construcción de la infraestructura por el método de zanjas y troqueles en el cual se disminuyen las expansiones, es de notarse que dichos trabajos serían realizados con lentitud y las dificultades y el costo crecerían en forma apreciable.

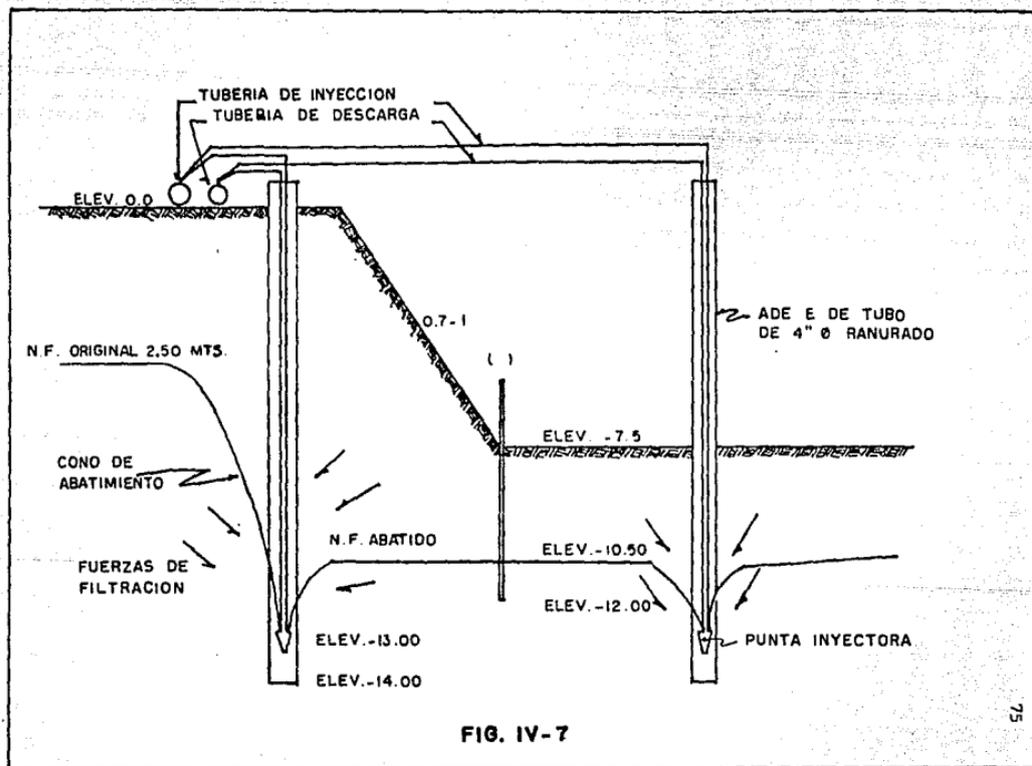
Para solucionar satisfactoriamente todos los requisitos de -- seguridad, economía y rapidez, se planeó la realización de la excavación mediante tratamiento electrosmótico, el cual des-- cribiremos a continuación.

Para disminuir al mínimo las expansiones, se estableció un -- abatimiento del nivel freático a una profundidad de 10.0 m, - lo cual se obtendría, además, la conservación de la resistencia al corte inicial y la gran facilidad de que todos los --- trabajos se realizarían en seco.

Para ello, se sometió al suelo a un tratamiento electrosmótico de acuerdo con la instalación de pozos cátodo y de ánodos que se esquematiza en la figura IV-6 y IV-7, para aumentar su permeabilidad y lograr el abatimiento en un plazo de 10 días en lugar de 3 ó 4 meses. Además de este fenómeno físico, ---- existe un intercambio químico de iones entre el suelo y los - ánodos, que da como resultado un incremento local de la re--- sistencia al corte y por lo tanto un aumento del factor de -- seguridad de los taludes.

Como se observa en la figura IV-7, la dirección de las fuer-- zas de filtración es un factor que aumenta la seguridad de la estabilidad de los taludes.





La instalación consistió en la perforación de 46 pozos de 25-cms, de diámetro, en los cuales se instalaron ademes ranurados de 10.0 cms, y de 15 m, de profundidad, dentro de los cuales iban colocadas bombas de tipo eyector, a una profundidad de 14 m. Se hincaron un número semejante de varillas de acero de 2.5 cms, de diámetro y de 12 m, de longitud, las cuales funcionarán como ánodos.

Se aplicó una caída eléctrica de 80 a 90 volts mediante dos generadores de corriente directa de 150 y 30 Kw respectivamente accionados por motores de diesel. Se utilizaron alternativamente dos bombas centrífugas Byron Jackson accionadas por motores diesel, a presiones del orden de 4 kg/cm².

El abatimiento del nivel freático desde su nivel original - 2.5 m, hasta la profundidad deseada de 10.0 m, fué realizada en 10 días, lo cual se registro mediante piezómetros especialmente diseñados para obtener respuesta rápida del valor de los abatimientos figura IV-8.

Se tuvo especial cuidado en la estabilización del talud norte en cuya corona estaba instalada una grúa móvil de 50 ton, de peso total gracias al tratamiento electromótrico no se tuvieron problemas de estabilidad en los taludes ni desplomes en la grúa.

Una vez terminada la instalación para el tratamiento electromótrico y lográndose el abatimiento deseado en un plazo de 10 días, se procedió a excavar la zona central y a construirse la parte correspondiente a la cimentación.

Debido a las especificaciones de diseño, no se excavó toda el área en una sola fase, sino que, después de terminar la construcción de la zona central, se excavaron las cuñas formadas por los taludes troquelando el corte vertical contra la cimentación ya realizada.

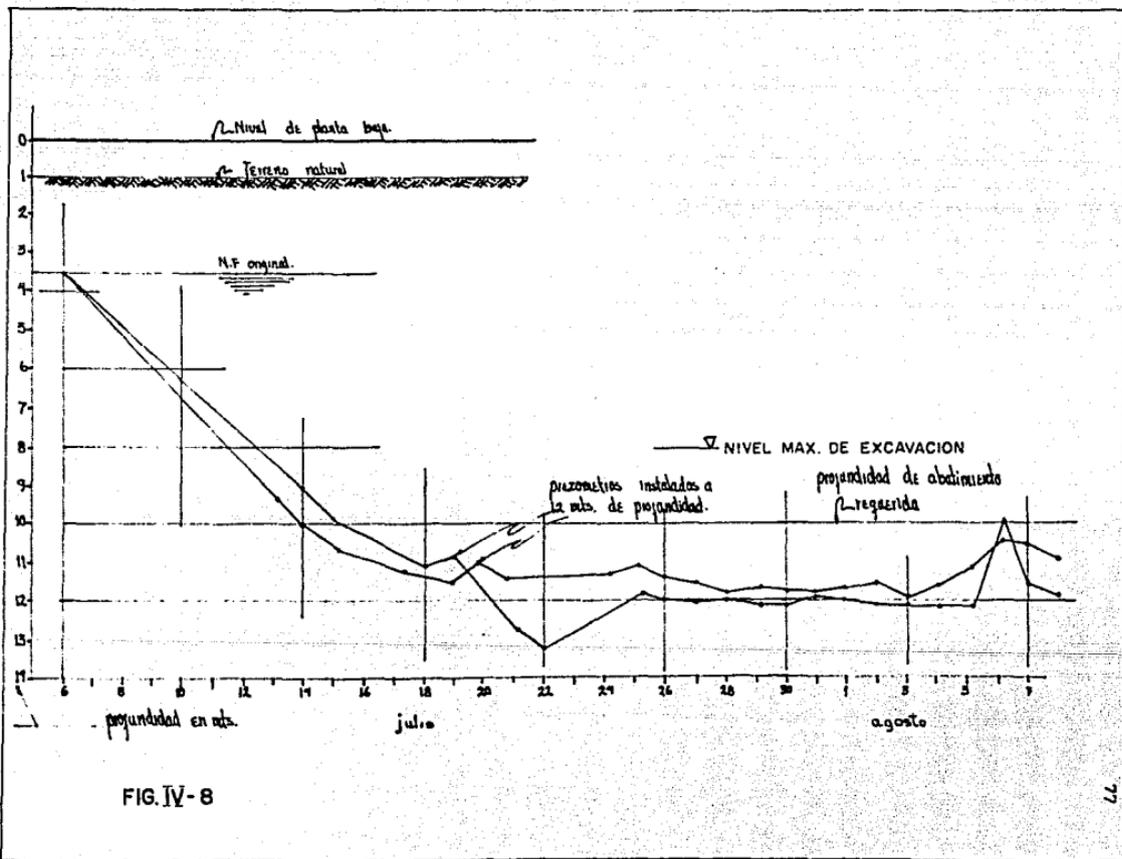


FIG. IV-8

Una vez terminada la construcción de las cisternas y los sótanos, se procedió a lastrar la cimentación y así suspender el tratamiento electrosmótico. El lastre se iría disminuyendo conforme avanzara la construcción del edificio.

Es de señalarse que durante la excavación de la cimentación no se tuvo un sólo problema de estabilidad de taludes y del fondo, que las expansiones fueron reducidas al mínimo y que fue posible ejecutar todos los trabajos en un plazo reducido y contando con todas las facilidades que se derivan de operar en grandes áreas y con suelo seco.

4.5.- ABATIMIENTO DEL NIVEL FREÁTICO POR MEDIO DE BOMBEO ELECTROSMÓTICO PARA LA CONSTRUCCION DE LA ESTACION CHABACANO DE LA LINEA 9 DEL METRO.

Con objeto de reducir las expansiones del fondo de la excavación, controlar las fuerzas de filtración, mejorar la estabilidad de los taludes y realizar la excavación en seco, fue necesario abatir el nivel de aguas freáticas mediante la utilización del bombeo electrosmótico en la estación Chabacano de la línea 9 en zona de cabeceras.

El bombeo electrosmótico consistió en inducir una corriente eléctrica al suelo por medio de un electrodo positivo (varilla de acero) y un electrodo negativo (pozo de bombeo), la cual provoca que el agua del subsuelo aumente su velocidad de migración del electrodo positivo al electrodo negativo.

La localización de los pozos y varillas se muestran en la figura IV-9.

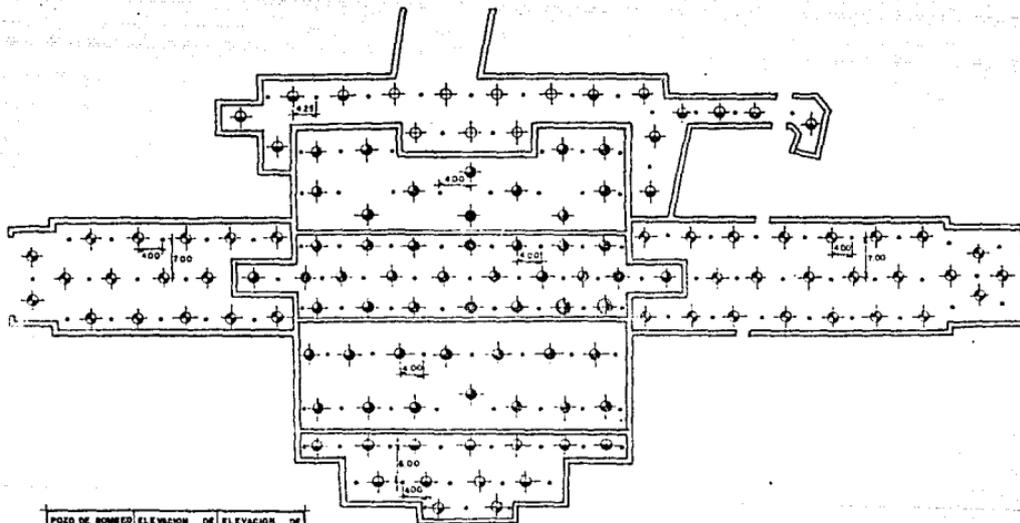
Para la ejecución de cada pozo debieron seguirse los siguientes pasos:

4.5.1.- La LOCALIZACION de los pozos de bombeo y la profundidad de los pozos se indican en la figura IV-9.

4.5.2.- PERFORACION DE LOS POZOS DE BOMBEO.

Los pozos con un diámetro de 30 cm, se perforaron con broca triconica, utilizandose en la limpieza de la perforación exclusivamente agua a presión.

4.5.3.- LIMPIEZA DE LAS PERFORACIONES.



POZO DE BOMBEO SIMBOLOGIA	ELEVACION DE DEPLANTE (m)	ELEVACION DE SUCCION (m)
⊕	22.20	23.20
⊙	18.78	17.15
⊗	19.70	18.70
⊕	16.88	13.55
⊕	21.78	22.75
⊕	18.10	20.10
⊕	19.00	20.00

⊕ VARRILLA (ARRODO) 1" 8

FIG.IV-9

LOCALIZACION DE POZOS DE BOMBEO
ESTACION - CHABACANO
LINEA N° 9

Para la limpieza se emplearán cucharas de percusión para extraer el azolve grueso y, después de terminar esta operación se lavo la perforación con agua a presión. Se considero limpiada ésta hasta que el agua retorno libre de partículas, tomando en cuenta que por ningún motivo se instalarón, el ademe y el filtro dentro de perforaciones que no se hayan limpiado.

4.5.4.- ADEME DE LA PERFORACION.

Antes de ademar la perforación fue necesario mantenerla llena de agua hasta rebosar, para evitar que sus paredes se cerrarían.

Los ademes de los pozos de bombeo utilizados fuerón tubos de 4" de diámetro ranurados en toda su longitud excepto 2.50 m, en el extremo superior y 0.50 m, en su extremo inferior; estos ademes estan provistos de tres aletas formadas por varillas de 3/4" cuyo diámetro circunscrito debiera ajustarse a las paredes de la perforación.

Las aletas se colocaron en toda la longitud del ademe con el objeto de centrarlo dentro de la perforación.

4.5.5.- RANURADO DE LOS ADEMES.

Los ademes se ranuraron con el objeto de que el agua por bombear penetrará libremente a su interior. Con ranuras de 30 cm de longitud y 3 mm, de ancho (1/8"). El porcentaje de área de filtración del tubo no debe de ser menor de 3% ni mayor del 5% del área perimetral del tubo.

4.5.6.- MALLA ALREDEDOR DEL ADEME.

Para evitar que el filtro pasara al interior del ademe se coloco una malla del número 8 alrededor del ademe. La malla se sujeto firmemente del ademe con el objeto de que no se desprendiera durante las maniobras de instalación.

4.5.7.- F I L T R O.

Entre las paredes del pozo y las del ademe se coloca un filtro de arena gruesa y grava limpias, cuya granulometría comprendida en tamaños de 1 cm, para el máximo y 0.25 para el mínimo. El material empleado contenía partículas de todos los tamaños intermedios, cribándose y lavándose previamente a sus colocaciones para eliminar todos sus materiales finos que con tenga y que pudieran obstruir el filtro durante el funcionamiento.

4.5.8.- DESARROLLO DEL FLUJO HIDRAULICO.

Con el fin de establecer el flujo hidráulico en el pozo y hacer con ello más eficaz el bombeo, después de colocado el ademe y el filtro, se agitó el interior del ademe con una cuchara de percusión como opción en el caso de que no hubiera funcionado el procedimiento antes mencionado, se utilizaría hielo seco al fondo del pozo para que el monóxido de carbono liberado, destape los espacios entre partículas que hayan sido bloqueadas.

4.5.9.- B O M B A S.

Para la extracción del agua del interior de los pozos, se utilizaron bombas de pozo profundo tipo eyector de 1" x 1/4" operadas a una presión de 5 kg/cm². El nivel de succión de las bombas se colocó 1.0 m, por arriba de la elevación correspondiente a la perforación de cada uno de los pozos.

Se procedió a hincar en el terreno varillas de acero de 1" de diámetro, que constituyeron el ánodo del sistema, hasta 1.0 m por abajo de la elevación de desplante del pozo de bombeo al daño más profundo. Con el fin de evitar la corrosión de las varillas estas se cubrieron con pintura ahulada en los tramos comprendidos entre 0.0, y 2.5, y de 8.0 a 9.25 m, de profundidad.

4.5.10. OPERACION DEL SISTEMA.

Se conectarón los electrodos provistos, tanto el cátodo (negativo) como el ánodo (positivo), a una fuente de corriente continua; el gradiente eléctrico aplicado se vario entre - 0.20 a 0.30 volts/cm. Una vez estabilizado el sistema, lo cual ocurrio aproximadamente a las 4 horas, se mantuvo hasta el final del tratamiento un gradiente variable entre 0.12 a 0.15 volts/cm, en los pares de electrodos que integran el sistema.

El bombeo se programo de tal manera que para iniciar la excavación de cualquier etapa, se conto con un periodo previo de bombeo de 5 días en los pozos que se localizarón dentro del área de excavación de la etapa en cuestión.

El bombeo solo se pudo iniciar cuando se terminaron de construir los muros tablaestaca correspondientes a la zona por bombear en una longitud de 50,0 m, como mínimo medidos en el sentido del avance.

La suspensión del tratamiento electrosmótico en cada pozo se realizó en el momento en que se inició el colado de la planta de la zona en que se encontraba dicho pozo.

Con el fin de controlar el funcionamiento del sistema, se llevo un registro diario de los siguientes aspectos:

a) Se tomarón lecturas de la presión de las bombas que operán en cada pozo, con una frecuencia de dos veces por día, con los datos obtenidos se elaboró una gráfica presión contra tiempo.

b) Nivel Dinámico.-

Se tomarón lecturas del nivel dinámico de los pozos (profundidad del espejo de agua), con una frecuencia de una vez por día y se elaboraron gráficas nivel dinámico vs tiempo durante

el periodo de bombeo.

c) Gasto extraído.

Se tomarón lecturas del gasto total extraído en cada una de las estaciones de bombeo con una frecuencia de una vez por día y se elaboraron gráficas de gasto vs tiempo desde el inicio hasta la suspensión del bombeo.

d) voltaje y Amperaje.-

Se controlo el gradiente eléctrico especificado entre vari---llas ánodo y pozo cátodo con objeto de mantener uniformidad - en el bombeo para ello, se tomarón lecturas tanto de la dife---rencia de potencial como de la intensidad de corriente aplica---da al sistema en cada uno de los pares de electrodos con una frecuencia de dos veces por día.

Con estos datos se elaboraron gráficas de voltaje vs tiempo y amperaje vs tiempo para cada par de electrodos escogidos, has---ta que en el pozo cátodo quede suspendido el sistema de bom---beo electrosmótico.

En la figura IV-10 se muestra la instalación del sistema.

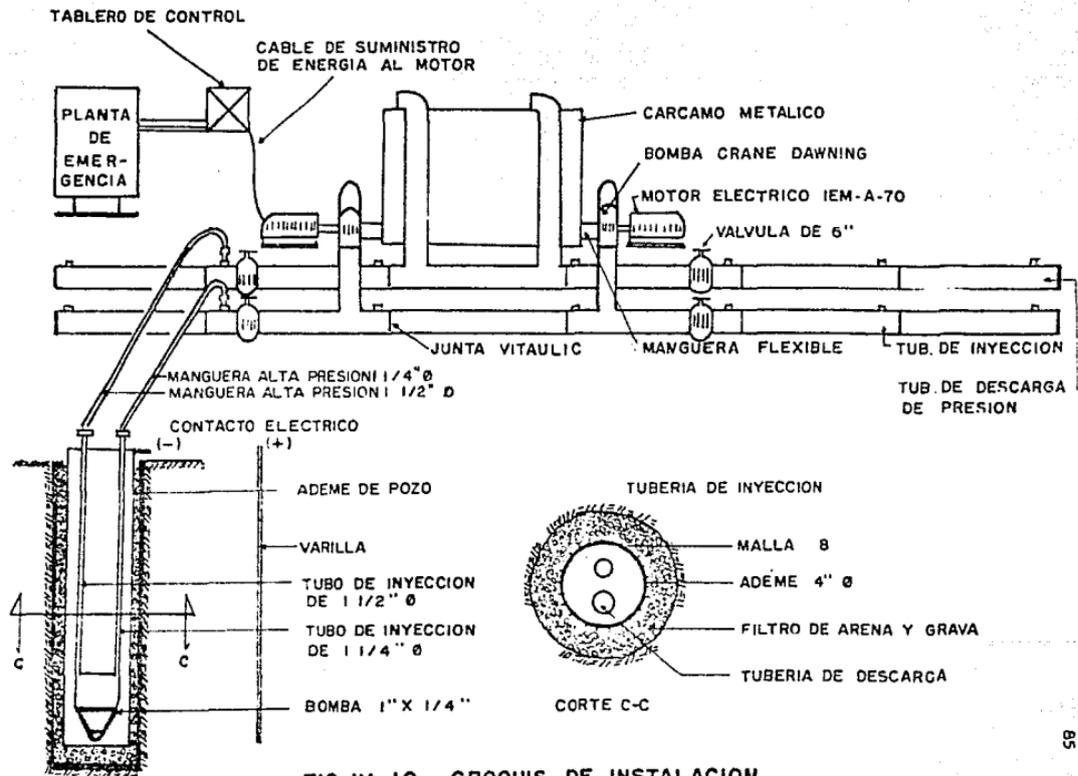


FIG. IV-10 CROQUIS DE INSTALACION

CONCLUSIONES.

La energía eléctrica aplicada a los suelos finos blandos y saturados facilita la ejecución de excavaciones profundas abatiendo con rapidez el nivel freático, eliminando las fuerzas de filtración que son desfavorables para la estabilidad y --- creando en la zona afectada por el fenómeno electrosmótico un estado de tensiones en el agua del suelo. Estos tres factores favorecen la estabilidad de los taludes de las excavaciones y permiten ejercer un control sobre la magnitud de las expansiones del fondo.

Se precisarán en un caso práctico real gradientes eléctricos bajos y, por lo tanto, fáciles de lograr para neutralizar flujos hidráulicos generados por gradientes hidráulicos importantes; en este hecho reside la aplicación de la electrosmosis a la ingeniería civil.

Del análisis de los datos reportados en el capítulo 4 (electrosmosis para la excavación de la cimentación del edificio de la Tesorería), es interesante notar que además de las --- enormes ventajas de la aplicación de la electrosmosis, el costo total de la excavación se redujo notablemente.

Con esto se solucionaron todos los requisitos de seguridad, --- economía, y rapidez.

En el caso de excavaciones en arcillas blandas y expansivas --- como las del Valle de México, se producen expansiones del fondo de la excavación, como consecuencia de la descarga que sufren los suelos que quedan bajo el nivel del fondo, al retirar el material que se encuentra arriba de ese nivel. En este caso el abatimiento local del nivel freático, previo a la ex-

cavación, produce una sobrecarga local de igual magnitud que la descarga que provocará posteriormente la excavación. Si el abatimiento se realiza en un tiempo corto, alrededor de una semana, los hundimientos locales no exceden de unos 10 cms. Este abatimiento rápido se consigue con el auxilio de la electrólisis.

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

AUTOR: JUAREZ BADILLO, RICO RODRIGUEZ.
TITULO DE LA OBRA: MECANICA DE SUELOS (FLUJO DE AGUA EN SUELOS).
NUMERO DE EDICION: TERCERA.
PAIS: MEXICO, D.F.
EDITORIAL: LIMUSA, S.A.
AÑO: 1984.
VOLUMEN: III.
N° DE PAGINAS. 414.

AUTOR: JUAREZ BADILLO , RICO RODRIGUEZ.
TITULO DE LA OBRA: MECANICA DE SUELOS (FUNDAMENTOS DE MECANICA -
DE SUELOS).
NUMERO DE EDICION: TERCERA.
PAIS: MEXICO.
EDITORIAL: LIMUSA S.A.
AÑO: 1978.
VOLUMEN: I
N° DE PAGINAS: 641.

AUTOR: VICENTE VARGAS A.
TITULO DE LA OBRA: TECNICAS Y ANALISIS DE COSTOS DE POZOS PROFUN
DOS Y AGUAS SUBTERRANEAS.
NUMERO DE EDICION: PRIMERA.
PAIS: MEXICO, D.F.
EDITORIAL: LIMUSA S.A.
AÑO: 1976.
VOLUMEN: I
N° DE PAGINAS: 514.

AUTOR: RALPH B. PECK, WALTER E. HANSON, THOMAS H. --
THORNBURN.
TITULO DE LA OBRA: INGENIERIA DE CIMENTACIONES.
TRADUCIDA POR EL : ING. JOSE LUIS LEPE SAUCEDO.
NUMERO DE EDICION: SEGUNDA.
PAIS: MEXICO, D.F. (TRADUCCION).

EDITORIAL: LIMUSA S.A.
AÑO: 1982.
VOLUMEN: UNICO.
N° DE PAGINAS. 557.

TITULO DE LA OBRA: MEMORIA TECNICA DE LAS OBRAS DEL DRENAJE PROFUNDO DEL DISTRITO FEDERAL.

PAIS: MEXICO, D.F.
EDITADO POR: TUSA.
VOLUMEN: II
N° DE PAGINAS: 362.

TRABAJO DE INVESTIGACION DE LA EMPRESA SOLUM DEL GRUPO ICA.

TRABAJO DE INFORMACION DE LA EMPRESA ISTME DEL GRUPO ICA.