2047

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

ESCUELA NACIONAL DE INGENIERIA

ESTABILIZACION ELECTROSMOTICA DE LOS SUELOS

SU APLICACION A LA CIMENTACION DE UN EDIFICIO EN LA CIUDAD DE MEXICO

T E S I S

Que para obtener el título de:

INGENIERO CIVIL

presenta el pasante:

JOSE ANTONIO NIETO RAMIREZ

MEXICO, D. F. 1959

Universidad Nacional Autónoma de México
UNAM
Biblioteca Central
Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

A MIS PADRES Y HERMANOS.

A MI NOVIA.

A LA ESCUELA NACIONAL DE INGENIEROS.

A MIS MAESTROS Y COMPAÑEROS.

3683 P.

A LA MEMORIA DE MI ABUELITO,

DON FRANCISCO RAMIREZ MONTES

CON PROFUNDO AGRADECIMIENTO.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

ESCUELA NACIONAL DE INGENIERIA
Dirección
Núm. 73-1529
Exp. Núm. 73/214.2/

Al Pasante señor José Antonio NIETO RAMIREZ
P r e s e n t e .

En atención a su solicitud relativa, me es grato transcribir a usted a continuación el tema que aprobado por esta Dirección propuso el señor profesor Ingeniero Enrique Tamez G., para que lo desarrolle como tesis en su examen profesional de Ingeniero CIVIL.

ESTABILIZACION ELECTRO-OSMOTICA DE LOS SUELOS
SU APLICACION A LA CIMENTACION DE UN EDIFICIO EN LA CIUDAD DE MEXICO.

TEMARIO

1.- GENERALIDADES.- Sinopsis histórica.

2.- PRINCIPIO FUNDAMENTAL.-

Ley de Helmoltz.- Comparación del gasto hidráulico con el gasto electro-osmótico en un haz de tubos capilares.- Variación del flujo electro-osmótico con el gradiente de potencial.

3.- EFECTOS ELECTRO-OSMOTICOS EN MATERIALES COMPRESIBLES.

Pruebas de laboratorio efectuadas por L. Gasagrande - Hipótesis de trabajo.

4.- APLICACIONES PRACTICAS.-

Incremento del gradiente hidráulico en las arcillas del Valle de México.

a) Pruebas de laboratorio preliminares.-

b) Estudios en modelos a escala.

c) Trabajos de campo.

Localización de los electrodoso y las bombas.- Hincado de electrodos y tubos ranurados para las bombas.- Colocación de las bombas.- Instalación del generador eléctrico.-Colocación de los piezómetros y bancos profundos.

d) Observaciones de campo.-

UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

ESCUELA NACIONAL DE INGENIERIA
Dirección.
Núm. 73-1529
Exp. Núm. 73/214.2/

Lectura de los piezómetros.- Registros del potencial aplicado, gasto extraído, gasto inyectado.- Gráficas de abatimiento del nivel freático.- Lecturas de los bancos de nivel profundos.-

5.- ABATIMIENTO DEL NIVEL FREATICO.-

a) Con bombeo solamente.

b) Con electricidad solamente.

c) Con electricidad y bombeo simultáneos.-

Incremento del gradiente y del gasto.

6.- LA ELECTRO-OSMOSIS Y EL CONTROL DE LOS BUFAMIENTOS.-

Observación de los bufamientos ocurridos al excavar.- Preesfuerzo del terreno.-

7.- LA ELECTRO-OSMOSIS Y LA ESTABILIZACION DE TALUDES.-

Estudio de taludes con electrodos y sin ellos.

8.- VENTAJAS OBSERVADAS.-

9.- INCONVENIENTES ENCONTRADOS.-

10.- ESTUDIO COMPARATIVO DEL COSTO DE EXCAVACION POR M³.-

Método de zanjas.

Método de electro-ósmosis

11.- CONCLUSIONES.-

Ruego a usted tomar debida nota de que en cumplimiento de lo especificado por la Ley de Profesiones, deberá prestar Servicio Social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito indispensable para sustentar su examen profesional; así como de la disposición de la Dirección General de Servicios Escolares, en el sentido de que se imprima en lugar visible de los ejemplares de la tesis, el título del trabajo realizado.

Muy atentamente,

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
México, D.F. 23 de junio de 1959.
EL DIRECTOR

Ing. Antonio Dovalí Jaime

ADJ'MMO'eag.

ESTABILIZACION ELECTROSMOTICA DE LOS SUELOS.

SU APLICACION A LA CIMENTACION DE UN EDIFICIO EN LA CIUDAD DE MEXICO.

* *

T E M A R I O :

I.- GENERALIDADES.-

Sinopsis histórica.

II.- PRINCIPIO FUNDAMENTAL.-

Ley de Helmholtz.- Comparación del gasto hidráulico con el gasto electrosmótico en un haz de tubos capilares.- Variación del flujo electrosmótico con el gradiente de potencial.

III.- EFECTOS ELECTROSMOTICOS EN MATERIALES COMPRESIBLES.-

Pruebas de laboratorio efectuadas por Leo Casagrande - Hipótesis de trabajo.

IV.- APLICACIONES PRACTICAS.-

Incremento del gradiente hi -- dráulico en las arcillas del Valle de México.

a) Pruebas de laboratorio preliminares.-

b) Estudios en modelos a escala.

c) Trabajos de campo.

Localización de los electrodos y las bombas.- Hincado de electrodos y tubos ranurados - para las bombas.- Colocación de las bombas.- Instala - ción del generador eléctrico.- Colocación de los piezó metros y bancos profundos.

d) Observaciones de campo.-

Lectura de los piezómetros- Registros del potencial aplicado, gasto extraído, gas-

to inyectado.- Gráficas de abatimiento del nivel freático.- Lecturas de los bancos de nivel profundos.-

V.- ABATIMIENTO DEL NIVEL FREATICO.-

a) Con bombeo solamente.

b) Con electricidad solamente.

c) Con electricidad y bombeo simultáneos.-

Incremento del gradiente y del gasto.

VI.- LA ELECTROSMOSIS Y EL CONTROL DE LOS BUFAMIENTOS.-

Observación de los bufamientos ocurridos al excavar.- Preesfuerzo del terreno.-

VII.- LA ELECTROSMOSIS Y LA ESTABILIZACION DE TALUDES.-

Estudio de taludes con electrodos y sin ellos.

VIII.- VENTAJAS OBSERVADAS.-

IX.- INCONVENIENTES ENCONTRADOS.-

X.- ESTUDIO COMPARATIVO DEL COSTO DE EXCAVACION POR M^3.-

Método de zanjas.

Método de electrósmosis.

XI.- CONCLUSIONES.-

ESTABILIZACION ELECTROSMOTICA DE LOS SUELOS.

I.- GENERALIDADES.-

Introducción.-

Como todos sabemos, el subsuelo de la Ciudad de México está constituido principalmente por arcillas blandas - saturadas, y con un coeficiente de permeabilidad (k) del or - den de 10×10^{-9} cm/seg. En estas condiciones, al efectuar -- cualquier obra en la que se requiera hacer excavaciones de -- cierta importancia, como en el caso de abrir zanjas para alo- jar tuberías de agua potable o alcantarillado, o en el caso - particular de edificios cimentados por el método de compensa- ción total o parcial de cargas, se topa el ingeniero con pro- blemas más o menos importantes para lograr abatir el nivel -- freático, sostener las paredes de su excavación, mantener se- ca la misma, y evitar en lo posible los bufamientos del terre no que se traducirían posteriormente en asentamientos de la - construcción.

Como la arcilla es un material muy impermeable, el- abatimiento del nivel freático, previo a la excavación, re -- quiere bombeo ininterrumpido durante mucho tiempo, y es pre-- ciso en ciertos casos hincar tablaestacas para confinar la -- zona por excavar y una vez excavada ésta es preciso seguir -- bombeando para mantenerla seca.

Si el área excavada es muy grande, se presenta el-- problema de los bufamientos, que en algunos casos pueden ser- de cierta importancia y que causan después asentamientos con- siderables en la obra, dañando de paso a las construcciones - vecinas.

En los casos en que no sea necesario confinar con - tablaestacas, y se puedan dejar taludes en las paredes de la- excavación, dichos taludes deberán ser muy tendidos, ya que - la poca cohesión de la arcilla húmeda y el flujo del agua en- dichos taludes los haría fallar en caso de ser muy parados.

A fin de disminuir al mínimo los bufamientos del--- fondo de la excavación, se puede recurrir al método de zanjas ya que el área descubierta en cada caso es muy pequeña, pero- entonces se presenta la necesidad de ademar y troquelar las - paredes de la zanja, lo que implica mayor gasto, y más lentitud en la excavación que en el caso de excavar a cielo abierto, con el consiguiente aumento en los costos de la obra.

Todas estas dificultades, y algunas otras que se -- presentan siempre en las excavaciones en suelos como el de la ciudad, se pueden salvar, a un costo reducido, utilizando el- método de la estabilización del suelo por medio de la Elec -- trósmosis. Este procedimiento, que se ha venido desarrollan - do de un tiempo a esta parte en los Estados Unidos de Norte - américa y en algunos países de Europa, permite abatir rápida- mente y con un costo no muy grande de bombeo el nivel freáti- co, previamente a la excavación. Se puede además excavar gran des áreas, con bufamientos menores y gran ahorro de tiempo, y como aumenta la resistencia al corte en las arcillas, permite también excavar dejando taludes que de otro modo fallarían ne cesariamente.

En el momento actual se está utilizando la electróg mosis con gran éxito en la estabilización del suelo para la - cimentación del Conjunto Aristos, situado en la esquina de In surgentes Sur y Aguascalientes en esta ciudad.

En esta tesis se va a explicar qué es la electrósmosis, cómo se utiliza en la práctica, cuáles son los resultados obtenidos y cuánto cuesta en comparación con otros métodos de excavación que se usan en nuestra capital.

Sinopsis histórica.-

El principio en que se basa la electrósmosis fué descubierto a principios del siglo pasado, pero sus primeras aplicaciones en la práctica de la Ingeniería se realizaron unos 140 años después, a mediados de este siglo.

En la página 327 de la Memoria de la Sociedad de Naturalistas de Moscú, de 1809, se hace constar que, en 1807, - Reuss, científico ruso descubrió que al aplicar un potencial-eléctrico a un diafragma poroso, el agua se mueve a través de los poros hacia el cátodo, cesando este flujo al cortarse la-corriente y volviendo a iniciarse al volver a aplicar el potencial.

Más tarde, alrededor de 1850, Wiedemann y Quincke - realizaron por separado experimentos tratando de cuantificar-este fenómeno, sin llegar a obtener ninguna ecuación útil, pero fijando las bases para investigaciones posteriores.

Helmholtz, científico alemán dedujo una fórmula matemática para explicar este fenómeno en 1879, la cual, con -- ligeras modificaciones es la que se acepta en nuestros días .

Helmholtz partió de una suposición de Quincke, el - cual afirmaba, que en un tubo capilar, el agua que permanece-unida a las paredes del tubo está formada por una doble capa, la exterior cargada negativamente y la interior, con cargas - positivas.

Posteriormente Gouy, científico francés, Nutting, - Parks y Terzaghi, realizaron por separado pruebas para determinar el espesor de esa doble capa, que es muy importante en- la electrósmosis, los resultados obtenidos por ellos se ex -- pondrán en su debido tiempo.

En la actualidad, los Dres. Ingenieros Leo Casagrande y Karl Terzaghi son los científicos que más han destacado- en el estudio de la electrósmosis, y de sus aplicaciones prácticas.

II.- PRINCIPIO FUNDAMENTAL.-

Ley de Helmholtz o del flujo electrosmótico en tubos capila - res.-

Helmholtz, de acuerdo con la teoría de Quincke distin -- gue, en un tubo capilar lleno de agua, 2 zonas diferentes, -- una central, de agua libre, y una película adyacente a las paredes del tubo, que es lo que se llama doble capa, pues supone que dicha película está formada por 2 capas, la exterior,- más delgada, está rígidamente unida a las paredes, y cargada- negativamente, por lo que se llama parte fija de la doble capa, mientras que la interior, más gruesa y cargada positiva - mente recibe el nombre de parte móvil de la doble capa, ya -- que al aplicar un potencial eléctrico en los extremos del tubo capilar, los iones positivos de esa capa, se mueven en dirección al polo negativo, arrastrando consigo el cilindro central de agua libre.

En este caso, la distribución de la velocidad es como se muestra en la figura 1.-

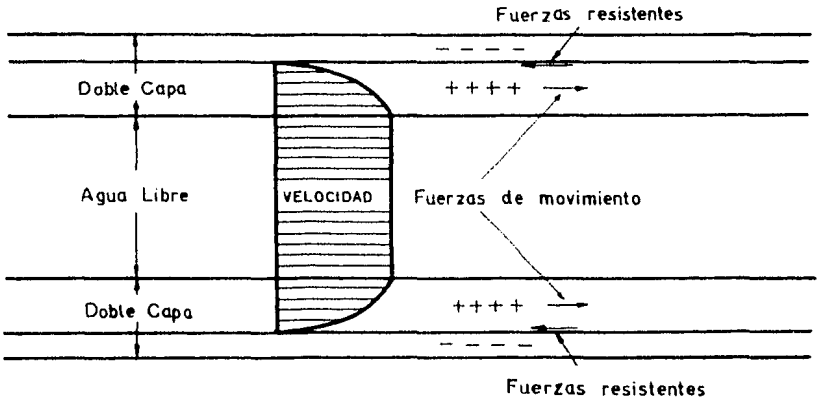


Fig. 1.- FLUJO ELECTROSMOTICO.

El fenómeno descrito anteriormente se llama flujo electrosmótico.

Si no se aplica ningún potencial eléctrico y en cambio se tiene un gradiente hidráulico, sólo se mueve el cilindro central de agua libre, quedando inmóvil toda la doble capa. En este caso el fenómeno se llama flujo hidráulico, y la distribución de velocidades en el agua libre es parabólica, como se vé en la figura 2, ya que el flujo es laminar.

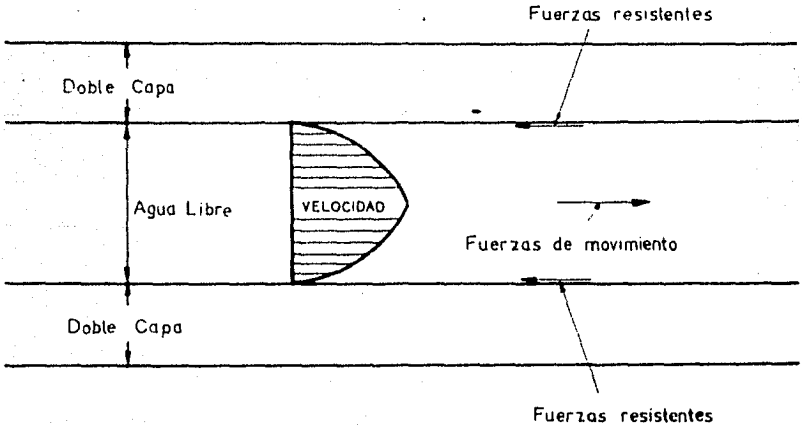


Fig. 2.- FLUJO HIDRAULICO

La velocidad en este caso es nula en la pared interior de la doble capa, y máxima en el centro del tubo capilar

El espesor de la doble capa depende del material que forma el tubo capilar, y de la concentración del electrolito en el agua. En el caso de los suelos, el electrolito está constituído por las sales disueltas en el agua freática.

En Mecánica de Suelos la doble capa es muy importante. Leo Casagrande encontró que la permeabilidad de la ha-

rina de roca mezclada con agua destilada, y usando para la -- pruebs también agua destilada, es del orden de 0.2 a 0.3 x -- 10^{-4} cm/seg. Y observó en cambio, que con una pequeña concentración de cloruro de sodio el coeficiente de permeabilidad - aumenta al orden de 0.9 a 1.5 x 10^{-4} cm/seg, es decir, unas - 5 veces, esto es debido a que el cloruro de sodio disminuye - el espesor de la doble capa, lo cual ya había sido probado antes por Gouy, que al experimentar observó que al aumentar la- concentración del electrolito disminuye el espesor de la doble capa.

La importancia de la doble capa en suelos muy finos como las arcillas y materiales coloidales resalta al observar que en ellos, la mayor parte de los poros tienen un diámetro- del orden de 100$\mu\mu$, y que, de acuerdo con Parks y Terzaghi, - el espesor de la doble capa es también del orden de 100$\mu\mu$, - por lo que el flujo hidráulico es prácticamente imposible en- esos suelos.

Una vez estudiadas brevemente las propiedades de la doble capa y conocida su importancia, estudiemos la fórmula - de Helmholtz, ya con las mejoras que se le han hecho:

$$q_e = \frac{E \cdot D \cdot r^2 \cdot \zeta}{4 \cdot \eta \cdot L} \qquad \text{.....(1)}$$ sistema C.G.S

En la cual:

q_e = Gasto obtenido por medio de electrósmosis en la unidad - de tiempo, a través de un solo tubo capilar. (cm^3/seg) -

E = Potencial eléctrico aplicado. (volts)

D = Constante dieléctrica del líquido. (abstracta)

(Esta constante varía con la temperatura. Para el agua - vale 81, para el hielo a -5°C vale 2.9, y para el vapor

de agua, a 4 atm de presión vale 1.00705).

r = Radio del tubo capilar. (cm)

ζ = Potencial electro-cinético o potencial zeta. (volts)
(Es el potencial existente entre la parte fija y la parte móvil de la doble capa).

η = Viscosidad del líquido. (poises)

L = Longitud del tubo capilar entre los electrodos. (cm).

Vamos a hacer las transformaciones siguientes:

$\frac{E}{L} = i_e$ Gradiente de potencial. (volts/cm)
(A semejanza de $\frac{H}{L} = i_h$, gradiente hidráulico).

$\frac{D \cdot \zeta}{4 \cdot \pi \cdot \eta} = c_1$ Constante para cada material. (cm^2/volts-seg)

$\pi \cdot r^2 = a$ Sección transversal del tubo capilar (cm^2)

Y la ecuación (1), para el flujo electrósmotico queda:

$$q_e = c_1 \cdot i_e \cdot a \qquad (2)$$

Y en consecuencia:

$$v_e = c_1 \cdot i_e \qquad (3)$$

Para el flujo hidráulico, de acuerdo con la Ley de Poisseuille para el flujo laminar, se tiene:

$$q_h = c_2 \cdot i_h \cdot a^2 \qquad (4)$$

$$v_h = c_2 \cdot i_h \cdot a \qquad (5)$$

* * * * *

Comparación del gasto hidráulico y el gasto electrosmótico --

en un haz de tubos capilares.-

Si se tiene un haz de N tubos capilares, cuya sección transversal total es A, y cuya porosidad es n, el flujo hidráulico a través del haz es:

$$Q_h = N \cdot q_h = N \cdot c_2 \cdot i_h \cdot a^2$$

Pero, $n = \frac{N \cdot a}{A}$; puesto que $n = \frac{V_v}{V}$

Y por otra parte, $e = \frac{V_v}{V - V_v} = \frac{\frac{V_v}{V}}{1 - \frac{V_v}{V}} = \frac{n}{1-n}$

$$n = \frac{e}{1+e}$$

$$N = \frac{A}{a} \frac{e}{1+e}$$

Y finalmente:

$$Q_h = \frac{A}{a} \frac{e}{1+e} \cdot c_2 \cdot i_h \cdot a^2$$

$$= a \cdot \frac{e}{1+e} \cdot c_2 \cdot i_h \cdot A$$

$$\therefore \quad Q_h = k_h \cdot i_h \cdot A \qquad (6)$$

Que es la Ley de Darcy, y en donde

$$k_h = \frac{e}{1+e} \cdot c_2 \cdot a \qquad (7)$$

Análogamente, para el mismo haz de N tubos capilares cuya sección total es A, y cuya relación de vacíos es e, se tendrá, para el flujo electrosmótico:

$$Q_e = N \cdot q_e = \frac{A}{a} \frac{e}{1+e} c_1 \cdot i_e \cdot a$$

$$= \frac{e}{1+e} \cdot c_1 \cdot i_e \cdot A$$

$$\therefore \quad Q_e = k_e \cdot i_e \cdot A \qquad (8)$$

En donde:

$$k_e = \frac{e}{1+e} c_1 \qquad (9)$$

Se observa en la ecuación (9), que el coeficiente de permeabilidad electrosmótica k_e , es independiente del área de la sección transversal del tubo capilar.

Las unidades en que se expresa este coeficiente son:

$$\frac{Q_e}{A}\frac{1}{i_e} = \frac{cm^3}{seg\ cm^2}\frac{cm}{volt} = \frac{cm^2}{seg\ volt}$$

Y las unidades del coeficiente de permeabilidad hidráulica son:

$$\frac{Q_h}{A}\frac{1}{i_h} = \frac{cm^3}{seg\ cm^2} \cdot 1 = \frac{cm}{seg}$$

Por analogía, se acostumbre decir que las unidades del coeficiente de permeabilidad electrosmótica son también cm/seg para un gradiente de potencial de un volt/cm.

Obsérvese también en la ecuación (3), que la velocidad del flujo electrosmótico es independiente del área de la sección recta del tubo capilar, mientras que en el flujo laminar, la velocidad es proporcional a dicha sección recta, como se ve en la ecuación (5).

* * * * *

Variación del flujo electrosmótico con el gradiente de potencial.-

Se ha encontrado experimentalmente, que para todos los fines de la práctica, el coeficiente de permeabilidad electros

mótica de la mayor parte de los suelos es de 0.5×10^{-4} cm/seg para un gradiente de potencial de un volt/cm. Los resultados de diversas pruebas realizadas por Leo Casagrande se muestran gráficamente en la figura 3.

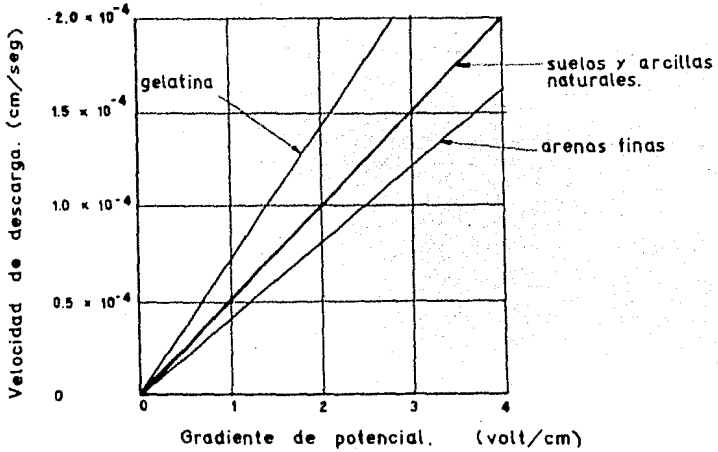


Fig. 3.- RELACION ENTRE FLUJO ELECTROSMOTICO Y GRADIENTE DE POTENCIAL PARA VARIOS MATERIALES.

La utilidad de la electrósmosis en la Ingeniería resalta al comparar este coeficiente de permeabilidad electrosmótica, con el coeficiente de permeabilidad hidráulica de los materiales finos como la arcilla. En efecto, el k_h de las arcillas del Valle de México, es del orden de 10×10^{-9} cm/seg es decir, unas 5000 veces menor que el k_e de las mismas arcillas.

Veamos qué gradiente hidráulico se necesitaría para producir un gasto igual al producido con un gradiente eléctrico de 1 volt/cm en un mismo haz de tubos capilares en arcillas como las del Valle de México:

$$q_e = k_e \cdot i_e \cdot A$$

$$q_h = k_h \cdot i_h \cdot A$$

Igualando ambas ecuaciones se tiene:

$$k_h i_h = k_e i_e$$

$$i_h = \frac{k_e}{k_h} 1$$

$$i_h = \frac{0.5 \times 10^{-4}}{10 \times 10^{-9}} = 5000$$

Esto significa que se necesitaría una carga de 5 Km a una distancia de 1 m para que se produjera dicho gasto.

III.- EFECTOS ELECTROSMOTICOS EN MATERIALES COMPRESIBLES.-

Cuando se aplica una diferencia de potencial entre dos electrodos colocados en los extremos de una muestra de suelo húmedo el agua de la parte móvil de la doble capa adyacente a las paredes de los poros, se mueve hacia el cátodo, arrastrando en su movimiento al cilindro central de agua libre. Las cargas positivas, al moverse hacia el cátodo, atraen a las cargas negativas de la parte fija de la doble capa, que está rígidamente unida a las paredes de los poros, con lo cual se causa una tensión en el agua de los poros, y una compresión en el esqueleto de los granos. Dicha compresión tiene una gran importancia como veremos más adelante.

Pruebas de laboratorio efectuadas por Casagrande.-

Con el fin de estudiar los efectos de la electrósmosis en suelos compresibles, Leo Casagrande realizó diversas pruebas de laboratorio con diferentes materiales y variando el gradiente de potencial y la colocación de los electrodos. Voy a hacer un breve resumen de algunas de estas pruebas y de los resultados obtenidos, ya que muchos de estos datos fueron de utilidad en las aplicaciones prácticas de la electrósmosis en el Conjunto Aristos.

A) Pruebas en un sistema cerrado.-

Se llaman sistemas cerrados aquellos en los que los electrodos están completamente rodeados por el material que se va a probar, o en contacto con los extremos de la muestra, pero sin acceso de agua libre

Al hacer pruebas en sistemas cerrados de arcilla,

Casagrande observó lo siguiente:

1) El contenido de agua va disminuyendo progresivamente, siendo mayor esta disminución en el material cercano al cátodo y menor en el que está cerca del ánodo.
2) El material se va consolidando, siendo mayor esta consolidación en las proximidades del cátodo, y menor cerca del ánodo; esta consolidación se manifiesta por la presencia de grietas de contracción y fisuras transversales que se forman con mayor intensidad cerca del cátodo.
3) La descarga de agua en el extremo de la muestra próximo al cátodo se mantiene constante durante varias semanas, para bajar gradualmente al final de la prueba, con un descenso correspondiente en la intensidad de la corriente eléctrica.
4) Durante un corto intervalo de tiempo al principio de la prueba, el agua fluye en el extremo que da al ánodo, y hay ligera consolidación del material en dicho extremo debido a la misma descarga, pero posteriormente se invierte el sentido de flujo y la consolidación, como se indicó anteriormente.
5) Aunque el voltaje aplicado en los electrodos se mantiene constante durante todo el desarrollo de una prueba, la intensidad de corriente se incrementa ligeramente al principio y luego se mantiene sensiblemente constante durante varias semanas, para el final del experimento descender gradualmente hasta 1/4 de su valor original. Estas variaciones de la intensidad de corriente son debidas a las variaciones de la resistencia específica del material al ir-

disminuyendo el contenido de agua.

6) Al comenzar la pruebs, el gradiente de potencial es uniforme desde el ánodo hasta el cátodo, pero poco tiempo después cambia rápidamente, teniendo una pendiente pequeña cerca del ánodo, y una pendiente muy pronunciada en las cercanías del cátodo, y con un gradiente de potencial más pequeño en la porción central del especimen, como se muestra en la figura 4.

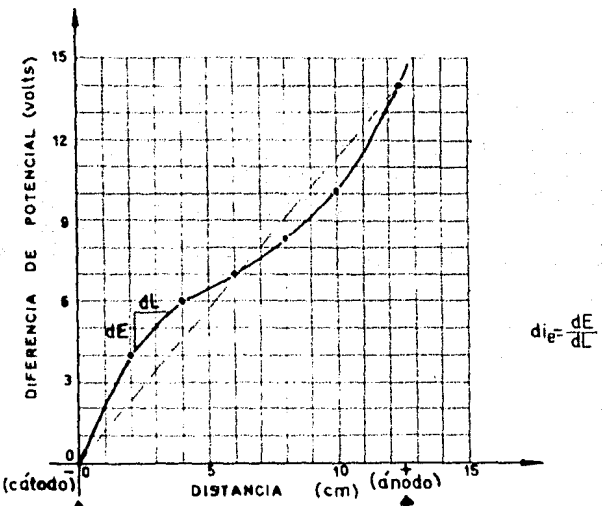


Fig. 4.- DISTRIBUCION DEL POTENCIAL.

7) La tensión en el agua de los poros se va desarrollando simultaneamente con la disminución del contenido de agua, y tiene aproximadamente la misma distribución, es decir, es mayor cerca del cátodo, y menor cerca del ánodo.

8) Cuando se aplica la electrósmosis en sistema cerrado a un especimen de gelatina, se observan fácilmente los efectos de consolidación y bufamiento, así como las grietas de contracción que se forman en el material, tal como se muestra

en la figura 5.

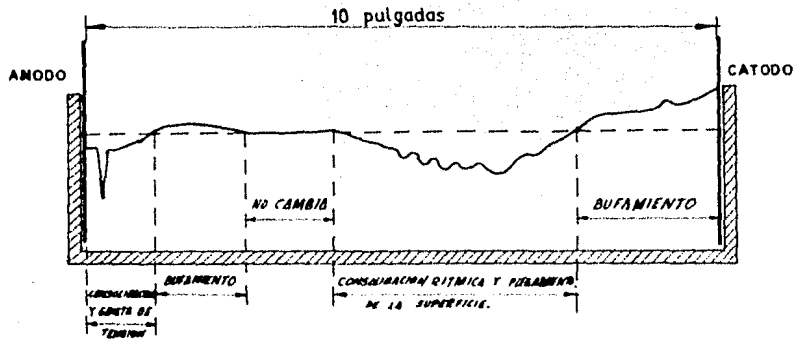


Fig. 5.- ESPECIMEN DE GELATINA DESPUES DE VARIAS SEMANAS DE PRUEBA EN SISTEMA CERRADO.

9) Al efectuar pruebas en arena fina, limpia, no se observó-- tensión en el agua de los poros.

B) Pruebas en un sistema abierto.-

Se llaman sistemas abier -- tos aquellos en los que los electrodos están separados de- los extremos del especimen por un espacio, el cual está -- lleno de agua, quedando entonces el especimen con sus ex - tremos libres.

Al probar especimenes de arcilla en sistema abier-- to, Casagrande observó que los fenómenos que ocurren en - las cercanías del cátodo son semejantes a los del sistema cerrado pero que en el extremo cercano al ánodo, la arci - lla se bufa intensamente, o bien se disgrega, quedando en- suspensión en el agua, según sea la magnitud del gradiente de potencial aplicado.

Al probar especimenes de materiales no cohesivos co mo arena fina, observó que la cara cercana al ánodo se dez liza hasta que llega a estar en equilibrio con una pendien

te muy pequeña, mientras que el extremo que da al cátodo-- se mantiene vertical, y que al quitar la corriente falla - totalmente dicha cara.

C) Estudio del caudal de agua descargado por medio de la electrósmosis.-

Con el fin de determinar la cantidad de agua - que es posible extraer por medio de la electrósmosis, Leo-Casagrande realizó diversas pruebas con arcilla de Londres manteniendo constante el gradiente de potencial, de 1 volt /cm, pero variando las condiciones de colocación de los -- electrodos, y de acceso del agua al especimen. Los resultados de cada una de las pruebas se consignan gráficamente - en la figura 6:

a) Electrodos en contacto con los extremos del especimen, y - agua libre fuera del ánodo y en la superficie de la muestra.

b) Electrodos en contacto con los extremos del especimen y -- agua libre fuera del ánodo, pero no en la superficie de la muestra.

c) Anodo dentro del especimen y cátodo en un extremo, sin acceso de agua libre.

d) Electrodos en contacto con los extremos del especimen, sin acceso de agua libre.

D) Determinación del contenido de agua a diferentes distancias del ánodo y en distintos intervalos de tiempo.-

Un experimento muy importante de los realizados por Casagrande fué-

el que efectuó con un limo arcilloso y con un gradiente de potencial de 0.48 volt/cm para determinar la distribución del contenido de agua entre los electrodos después de diferentes intervalos de tiempo.

Los resultados de esta prueba se muestran en la figura 8, y se observa que las curvas de distribución de agua en diversos tiempos van descendiendo de a a f , y parecen converger en A y en B.

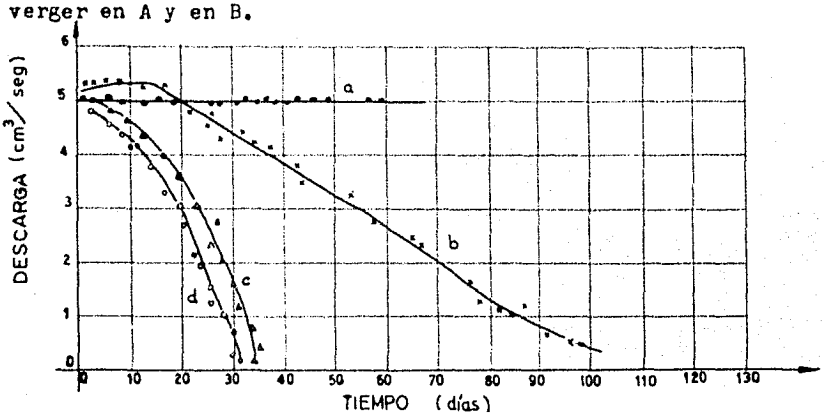


Fig. 6.- DESCARGA OSMOTICA DE AGUA EN PRUEBAS CON MODELOS DE ARCILLA DE LONDRES. i_e = 1 volt/cm

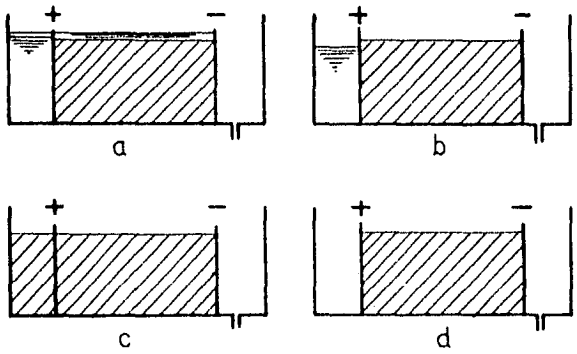


Fig. 7.- ESQUEMAS DE LOS TIPOS DE PRUEBAS.

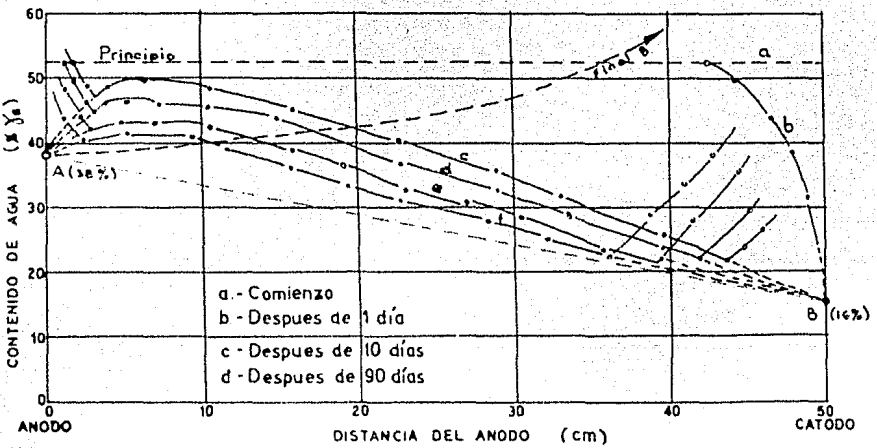


Fig. 8.- DISTRIBUCION DEL CONTENDIO DE AGUA EN DISTINTOS TIEMPOS. $i_e = 0.48$ volt/cm.

En la figura anterior, a representa la distribución del contenido de agua al comienzo de la prueba; b, dicha distribución después de un día; c después de diez días; d, después de noventa días, etc.

Efectuando pruebas semejantes, pero con otros valores del gradiente de potencial, se llegó a las conclusiones siguientes:

a) La pendiente de la recta que une los puntos A y B depende del gradiente de potencial, al aumentar éste, disminuye la pendiente.

b) Para un gradiente de potencial dado, el contenido final de agua en el punto A, es decir, en el extremo cercano al ánodo, es el mismo para todos los suelos que tengan igual coeficiente de permeabilidad electrosmótica (k_e) . Lo mismo puede decirse del contenido final de agua en el punto B, o sea, en el extremo del especimen cercano al cátodo.

c) El contenido de agua en el extremo cercano al cátodo tiende a cero con gradientes de potencial muy pequeños. Con gradientes de potencial muy altos, el contenido de agua en dicho extremo se aproxima al 28% del peso seco (γ_s).

Estas observaciones aparecen en la figura 9

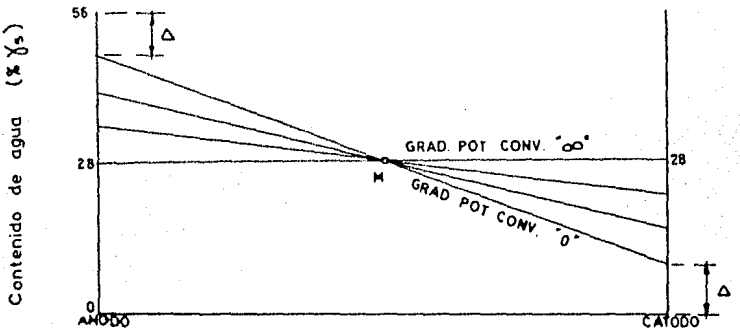


Fig. 9.- RELACION GENERAL ENTRE LA DISTRIBUCION DEL CONTENIDO DE AGUA Y EL GRADIENTE DE POTENCIAL.

E) Hipótesis del funcionamiento de la electrósmosis.-

De los resultados observados en las pruebas anteriores se deduce que las fuerzas de movimiento de la parte móvil de la doble capa, y las resistentes de la parte fija no están en equilibrio, pues en el ánodo hay tendencia al bufamiento mientras que en el cátodo hay compresión de los granos.- Con objeto de dar una explicación satisfactoria de los fenómenos observados Casagrande hace el estudio de un tubo capilar aislado y sumergido en agua, en cuyos extremos coloca 2 electrodos constituídos por anillos metálicos. El extremo del tubo cercano al ánodo lo supone cubierto por una membrana como se muestra en la figura 10-a, lo cual constituye un sistema cerrado.

Al aplicar la corriente eléctrica, y empezar a moverse hacia el cátodo la parte móvil de la doble capa, es necesario que haya un retorno de agua en el centro del capilar, con flujo del tipo laminar, y para ésto es necesario que haya un gradiente hidráulico del cátodo hacia el ánodo. Si se supone que el agua en el cátodo está a la presión atmosférica, puesto que ahí es la descarga, entonces la presión debe ser menor en el interior del tubo capilar. LLegando a un mínimo en el extremo que está en contacto con el ánodo. El valor de la presión ahí es u_s, como se muestra en la figura 10-b, que es la distribución de presiones en el tubo capilar.

La membrana que cubre el extremo cercano al ánodo vas estar sujeta a una diferencia de presión entre sus dos caras igual a u_s.

Multiplicando u_s por el área de la sección recta del tubo capilar, tendremos el valor de la fuerza axial que se aplica a las paredes del tubo por medio de la membrana.

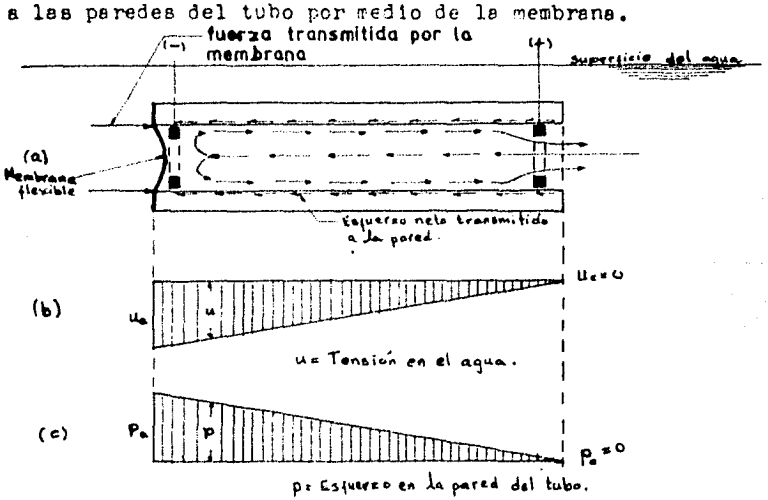


Fig. 10.- FLUJO ELECTROSMOTICO Y ESFUERZOS EN UN TUBO CAPILAR CERRADO EN EL ANODO. (SISTEMA CERRADO).

La fuerza axial aplicada en las paredes del tubo capilar tiende a mover a éste hacia la derecha como se muestra en la figura 10-a, pero es equilibrada por las fuerzas resistentes que la parte fija de la doble capa transmite a las paredes del capilar. Entonces las paredes del tubo capilar van a estar sujetas a una compresión, cuya distribución se muestra en la figura 10-c.

Esas fuerzas resistentes que van a equilibrar a la fuerza axial aplicada por medio de la membrana se pueden valuar fácilmente observando en la figura 11-a la distribución de velocidades en un tubo capilar abierto y sujeto a la electrósmosis. En ese caso la fricción s_1 uniformemente repartida en la frontera entre la parte fija y la parte móvil de la doble capa es proporcional a la tangente de α_1, que es el gradiente de velocidad electrosmótica en esa frontera. Esa fuerza de fricción se va a equilibrar con la fuerza p, actuando sobre la parte fija de la doble capa en dirección opuesta.

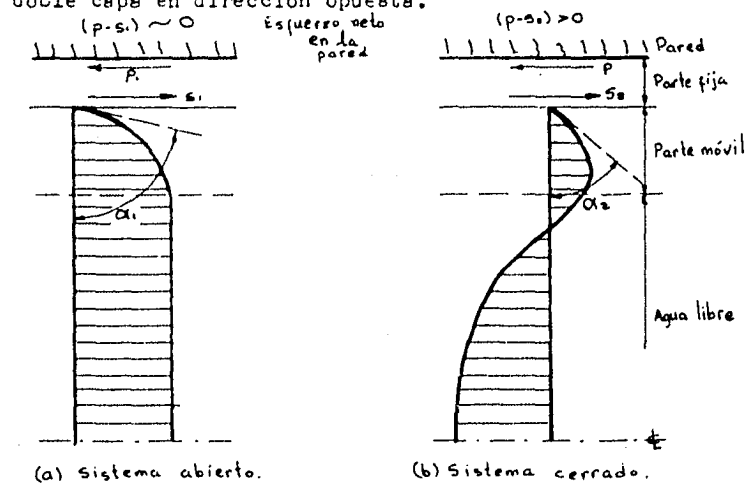


Fig. 11.- DISTRIBUCION DE LA VELOCIDAD EN TUBOS CAPILARES.

La figura 11-b muestra la distribución de velocidad en el mismo tubo capilar, pero con el extremo correspondiente al ánodo cerrado.

Este diagrama de velocidad se obtuvo superponiendo- a la distribución de la figura 11-a, una distribución parabólica de flujo laminar en sentido contrario.

El nuevo gradiente de velocidad en la frontera entre las partes fija y móvil de la doble capa es tan α_2, mucho menor que tanα_1; la fuerza p, sin embargo permanece constante,- pues sólo depende del gradiente de potencial, el cual es el - mismo que en el caso anterior.

Por lo tanto, en la pared se tendrá una fuerza del- cátodo hacia el ánodo, cuyo valor es $p - s_2$, puesto que $s_2 < s_1$

La fuerza total en el interior del tubo capilar, -- va a equilibrar a la fuerza axial aplicada por medio de la - membrana del ánodo.

IV.- APLICACIONES PRACTICAS.-

Incremento del gradiente hidráulico en las arcillas del Valle de México.-

Como se vió en el capítulo anterior, el coeficiente de permeabilidad hidráulica de las arcillas del Valle de México es del orden de 10×10^{-9} cm/seg, y el coeficiente de permeabilidad electrosmótica en el mismo material, del orden de 1.5×10^{-4} cm/seg, para un gradiente de potencial de un volt/cm, de acuerdo con resultados obtenidos en pruebas de laboratorio. Si tomáramos un prisma de las arcillas lacustres de la Ciudad, de 1 m de longitud, sujeto a una diferencia de cargas de agua de 1 m entre sus dos caras paralelas que están a 1 m una de otra, es decir, si le aplicáramos un gradiente hidráulico unitario, la velocidad media de flujo en ese prisma sería de unos 5 cm por año. En cambio, si a dicho prisma le aplicáramos entre sus dos caras una diferencia de potencial de un volt/cm, la velocidad de flujo sería 5000 veces mayor, es decir, sería casi de 5 cm por hora. Se observa que se tiene un ahorro considerable de tiempo de bombeo para lograr el abatimiento del nivel freático a la profundidad requerida por el proyecto. Esta ventaja, unida a otras que estudiaremos más adelante, dió por resultado que se optara por el procedimiento de electrósmosis para la estabilización del suelo durante la construcción de las obras siguientes en esta ciudad:

1.- Una pequeña porción del nuevo edificio del Palacio de Hierro en la esquina de Durango y Salamanca, en el año de 1956.

2.- El conjunto Aristos, ubicado en la esquina de Insurgentes

Sur y Aguascalientes, de septiembre de 1958 a la fecha---

3.- La planta de bombeo del río Consulado, a orillas del ca - nal del desagüe, en marzo, abril y mayo de 1959.

4.- Un tramo del colector # 15, en la Colonia Estrella, ini - ciándose actualmente.

De todas estas obras, mencionaré en particular el - caso del Conjunto Aristos, por ser en donde se aplicó el méto do en mayor extensión, y por haber estado presente durante to do el tiempo en que se realizaron los trabajos. De las otras aplicaciones prácticas de la electrósmosis en la Ciudad de - las que tengo noticia, sólo consignaré los datos más sobresalientes.

CONJUNTO ARISTOS.-

El conjunto Aristos será un edificio de locales comerciales y despachos, que se está construyendo actualmente en la esquina de la Avenida Insurgentes Sur y la calle - de Aguascalientes en la colonia Hipódromo de esta ciudad. Está formado por tres cuerpos principales, que se detallan a -- continuación:

Cuerpo A; constará de sótano, planta baja, primero y segundo pisos, 16 plantas tipo y azotea, y ocupa una superficie de 900 m^2.

Cuerpo B, constará de sótano, planta baja, primero y segundo pisos, 6 plantas tipo y azotea, y su superficie es de unos 2,000 m^2.

Cuerpo C, constituído por dos partes fundamentales: la zona de jardín, ocupando unos 1,200 m^2, y la zona de oficinas, que consta de sótano, planta baja y dos plantas tipo, y-

cuya superficie total es de 5,900 m^2.

Se calcularon las presiones de contacto de los diversos cuerpos, obteniéndose los valores siguientes:

Cuerpo A: 11.4 ton/m^2

Cuerpo B: 7.0 ton/m^2

Cuerpo C: 3.5 ton/m^2

Se hizo el diseño de la cimentación por contacto -- con compensación de cargas, obteniéndose para el edificio C una excavación de 3.00 m, para el edificio B, de 4.50 m, y para el edificio A, de 5.50 m. El edificio A no quedó totalmente compensado con dicha profundidad de desplante, por lo que- se completó con 66 pilotes de fricción, de 20 x 60 cm, y con- una longitud de 13.76 m.

En el lugar ocupado por el conjunto, existieron anteriormente locales comerciales y casa habitación, por lo que - se considera que estuvo sometido a una sobrecarga previa de - 1.5 ton/m^2.

En el plano 2, se indica un corte de cada uno de -- los diferentes cuerpos, donde se puede observar la profundidad de desplante a la que se construyó cada cimentación.

a) Pruebas de laboratorio preliminares.-

Se efectuaron 2 sondeos de exploración, de los cuales se obtuvieron muestras -- parcialmente alteradas por medio de muestreador de media caña Dichas muestras se enviaron al laboratorio, donde se realizaron los ensayes indicados en seguida:

Clasificación visual en estado húmedo y en estado -

seco

Contenido natural de humedad (ω).

Límites de Atterberg. (L_ω = límite líquido, L_P = Límite plástico, I_P = Indice de plasticidad).

Pesos volumétricos. (peso volumétrico en estado natural) (γ).

Densidad de sólidos (S_s).

Compresión simple, q_u (resistencia en compresión directa).

Se hizo también un sondeo contínuo, del cual se obtuvieron muestras inalteradas de 4" de diámetro, con dichas muestras se efectuaron además de las pruebas realizadas con las muestras alteradas, los ensayes siguientes:

Consolidación estándar.

Pruebas de extracción de pilotes a escala reducida.

Los resultados de las pruebas realizadas en estas muestras, se consignan graficamente en la figura 13. No se incluyen los datos obtenidos en ensayes con muestras alteradas.

En la figura 14, se da un perfil geológico aproximado del suelo, de acuerdo con los datos aportados por los sondeos.

De la figura 13, se puede concluir lo siguiente:

1) El lugar donde se construye el edificio cae dentro de la zona llamada de transición.
2) El espesor arcilloso compresible, es de 12.00 m más o menos.
3) El nivel de las aguas freáticas se localiza a los 2.20 m de profundidad.

4) La resistencia a la compresión simple varía aproximadamente en forma lineal con la profundidad.

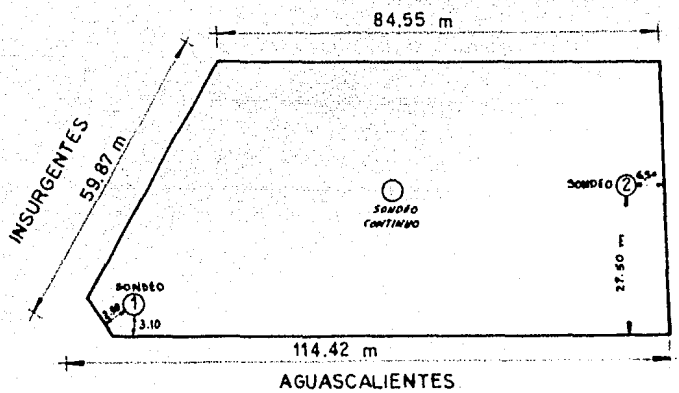
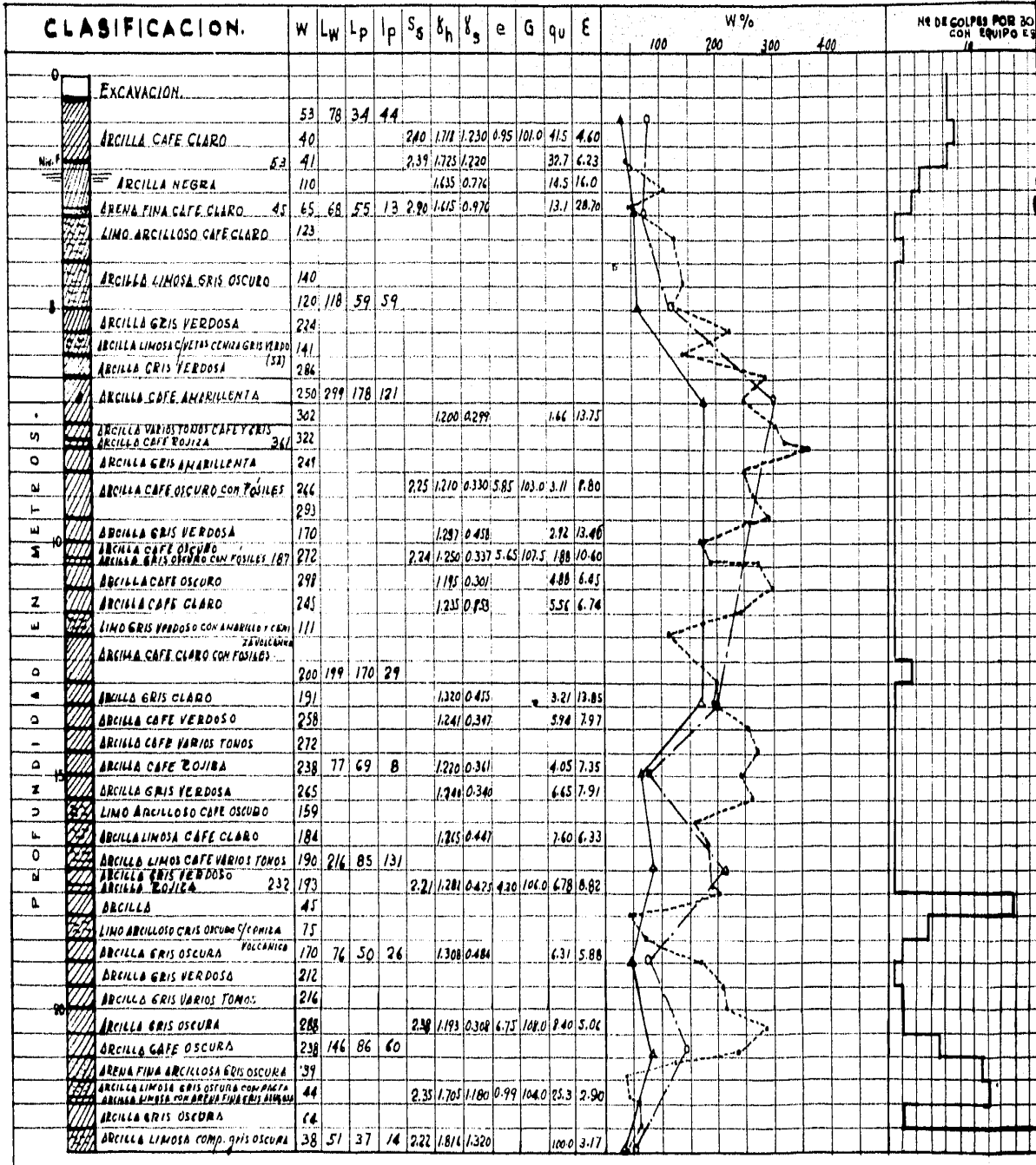


Fig. 12.- LOCALIZACION DE LOS SONDEOS.

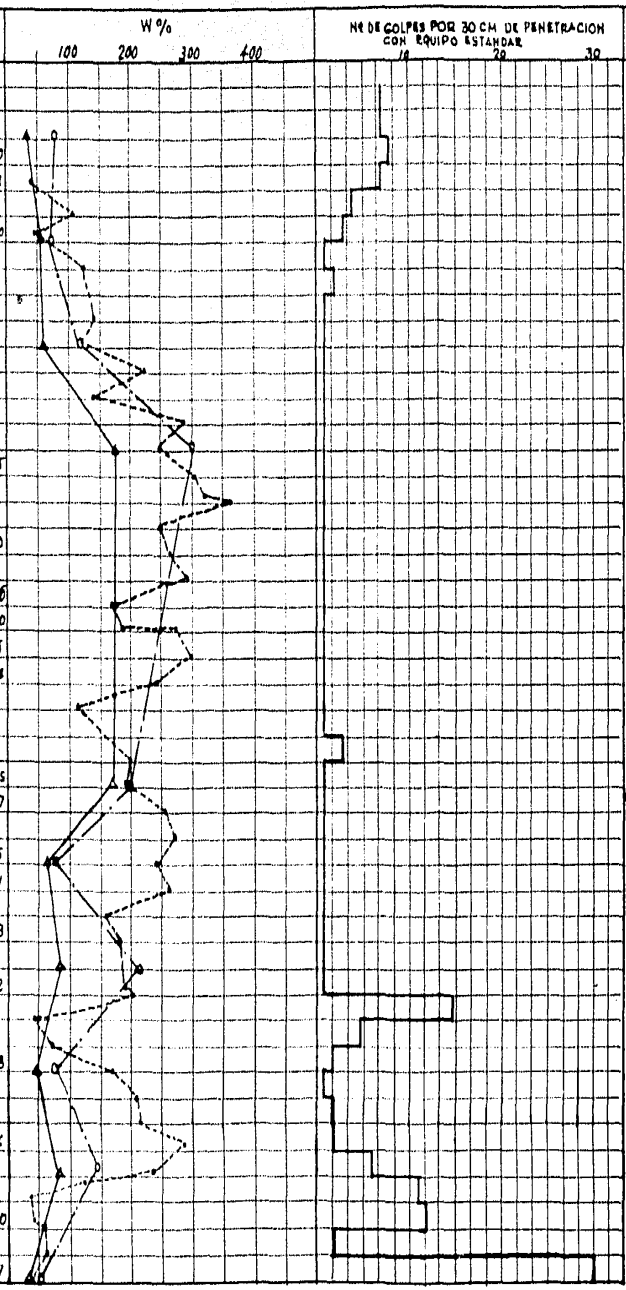
De acuerdo con los datos suministrados por el laboratorio, se hizo una gráfica de la relación entre la descarga producida, y la profundidad de excavación, la cual se utilizó para diseñar la compensación de cargas y las profundidades de desplante, eso gráficamente se muestra en la figura 15.

Se calcularon también en el laboratorio los bufa -- mientos máximos posibles en cada uno de los cuerpos, de acuerdo con las curvas de descarga obtenidas para cada profundidad Estos bufamientos fueron estimados en 16 cm para el cuerpo C, al centro del área, y se consideró además un bufamiento remanente de 8 cm durante la vida del edificio, debido a la fuerte descarga, ocasionada por la excavación. Los bufamientos en el cuerpo E, se estimaron en unos 12 cm.

Como el cuerpo A no está totalmente compensado, se utilizaron las curvas de Fadum para obtener los incrementos -


CLASIFICACION.
w
Lw
Lp
Ip
Ss
γh
γs
e
G
qu
ε
W %
100
200
300
400
Nº DE GOLPES POR 30
CON EQUIPO E
EXCAVACION.
ARCILLA CAFE CLARO
ARCILLA NEGRA
ARENA FINA CAFE CLARO
LIMO ARCILLOSO CAFE CLARO
ARCILLA LIMOSA GRIS OSCURO
ARCILLA GRIS VERDOSA
ARCILLA LIMOSA C/VETAS CENIZA GRIS VERDO
ARCILLA GRIS VERDOSA
ARCILLA CAFE AMARILLENTA
ARCILLA VARIOS TONOS CAFE Y GRIS
ARCILLA CAFE ROJIZA
ARCILLA GRIS AMARILLENTA
ARCILLA CAFE OSCURO CON FOSILES
ARCILLA GRIS VERDOSA
ARCILLA CAFE OSCURO
ARCILLA GRIS OSCURO CON FOSILES
ARCILLA CAFE OSCURO
ARCILLA CAFE CLARO
LIMO GRIS VERDOSO CON AMARILLO Y CENI
ARCILLA CAFE CLARO CON FOSILES
ARCILLA GRIS CLARO
ARCILLA CAFE VERDOSO
ARCILLA CAFE VARIOS TONOS
ARCILLA CAFE ROJIZA
ARCILLA GRIS VERDOSA
LIMO ARCILLOSO CAFE OSCURO
ARCILLA LIMOSA CAFE CLARO
ARCILLA LIMOS CAFE VARIOS TONOS
ARCILLA GRIS VERDOSO
ARCILLA ROJIZA
ARCILLA
LIMO ARCILLOSO GRIS OSCURO C/CENIZA
ARCILLA GRIS OSCURA
ARCILLA GRIS VERDOSA
ARCILLA GRIS VARIOS TONOS
ARCILLA GRIS OSCURA
ARCILLA CAFE OSCURA
ARENA FINA ARCILLOSA GRIS OSCURA
ARCILLA LIMOSA GRIS OSCURA COMPACTA
ARCILLA GRIS OSCURA
ARCILLA LIMOSA comp. gris oscura
DEPOSITOS
VOLCANICOS
SIMBOLOS.
ARCILLA
LIMO
ARENA
GRAVILLA
RELLENO ARTIFICIAL.

L_W	L_p	I_p	S_s	γ_h	γ_s	e	G	q_u	E
78	34	44							
			2.40	1.178	1.230	0.95	101.0	41.5	4.60
			2.39	1.725	1.220			32.7	6.23
				1.635	0.776			14.5	16.0
68	55	13	2.90	1.415	0.976			13.1	28.70
118	59	59							
299	178	121							
				1.200	0.299			1.66	13.75
			2.25	1.210	0.330	5.85	163.0	3.11	9.80
				1.287	0.458			2.92	13.46
			2.24	1.250	0.337	5.65	107.5	1.88	10.60
				1.195	0.301			4.88	6.45
				1.235	0.953			5.56	6.74
199	170	29							
				1.320	0.455			3.21	13.85
				1.241	0.347			5.94	7.97
77	69	8		1.220	0.361			4.05	7.35
				1.200	0.340			6.65	7.91
				1.245	0.447			7.60	6.33
216	85	131							
			2.21	1.281	0.425	4.20	104.0	6.78	8.82
76	50	26		1.308	0.484			6.31	5.88
			2.38	1.193	0.308	6.75	108.0	9.40	5.06
146	86	60							
			2.35	1.705	1.180	0.99	104.0	25.3	2.90
51	37	14	2.22	1.814	1.320			100.0	3.17



SIGNOS.

w.= contenido de humedad natural (%)

L_W= límite líquido. (%)

Lp= límite plástico (%)

Ip= índice plástico

γ_s= densidad de sólidos

γ_h= peso volumétrico húmedo (ton/m^3)

γ_s= peso volumétrico seco (ton/m^3)

e = relacion de vacíos

G= grado de saturación (%)

q_u= resistencia exic. no confinada (ton/m^2)

E.= deformación unitaria en la (%)

W = ...

L_W= ——•——•——

Lp= △——△——△

S.

ARCILLA | LIMO | ARENA | GRAVILLA | RELLENO ARTIFICIAL.

U.N.A.M.

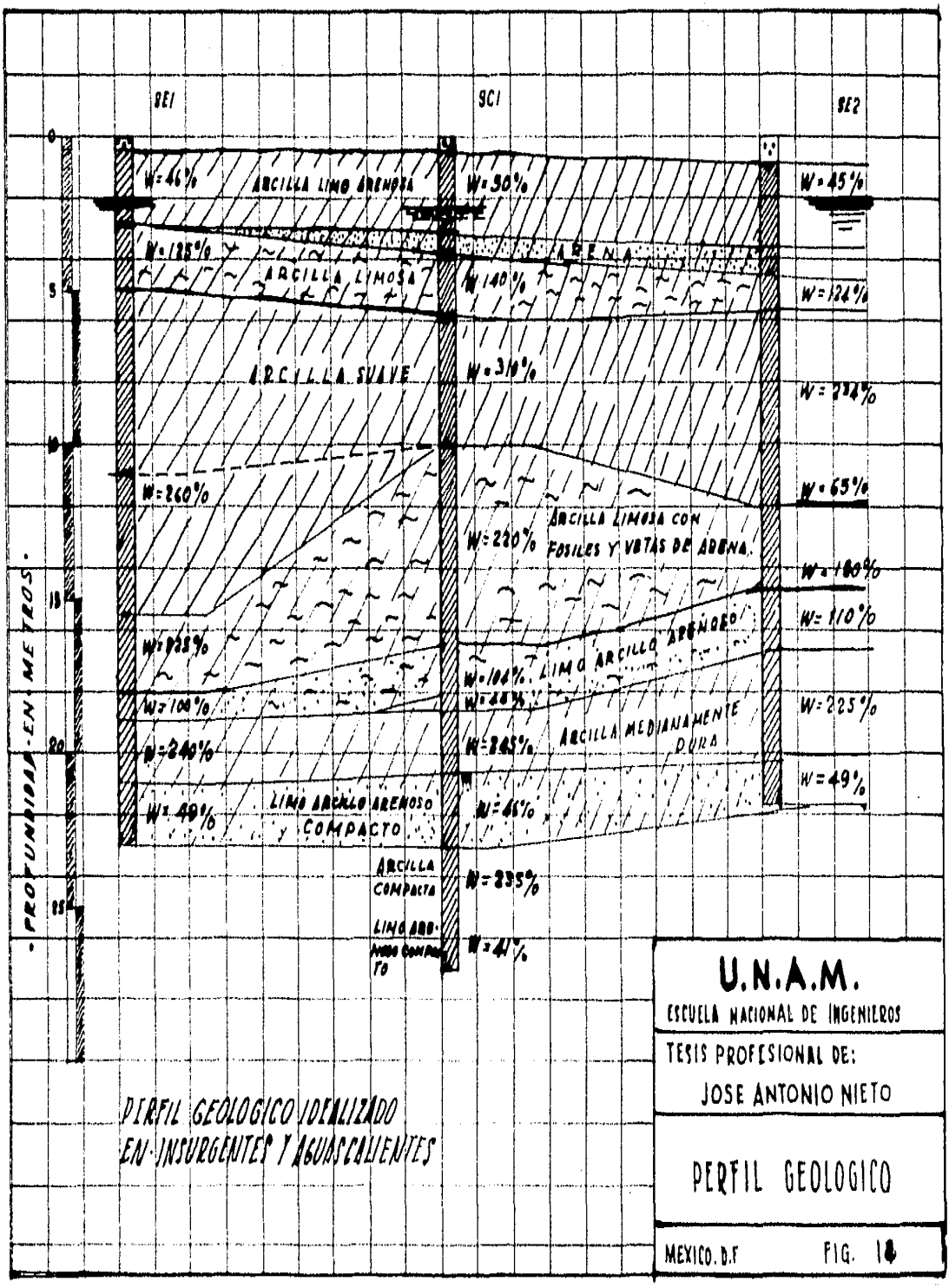
ESCUELA NACIONAL DE INGENIEROS

TESIS PROFESIONAL DE

JOSE ANTONIO NIETO

VARIACIONES DE LAS PROPIEDADES DEL SUBSUELO CON RELACION A LA PROFUNDIDAD.

MEXICO, D.F. | FIG. 13



PERFIL GEOLOGICO IDEALIZADO
EN INSURGENTES Y AGUASCALIENTES

U.N.A.M.

ESCUELA NACIONAL DE INGENIEROS

TESIS PROFESIONAL DE:

JOSE ANTONIO NIETO

PERFIL GEOLOGICO

MEXICO. D.F FIG. 18

de presión a diferentes profundidades. Dichos incrementos se muestran en la figura 16.

El asentamiento máximo correspondiente a este cuerpo, calculado por este método resultó de 61 cm, en caso de no compensar las cargas.

En el caso de que se usen pilotes de fricción tal como se indicó anteriormente, el asentamiento total correspondiente en el centro del edificio se estimó en 15 cm.

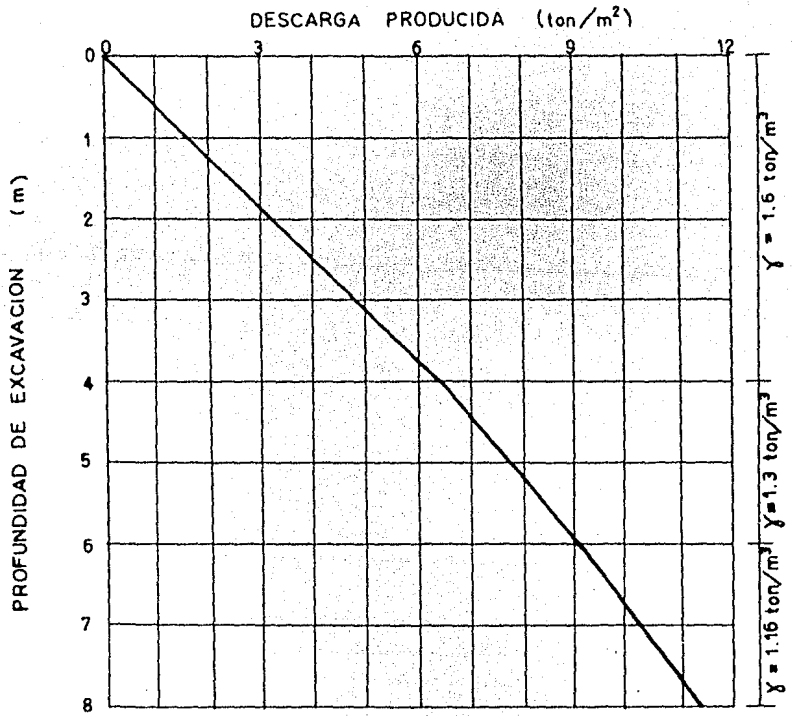


Fig. 15.- RELACION DE LA DESCARGA PRODUCIDA Y LA PROFUNDIDAD DE EXCAVACION.

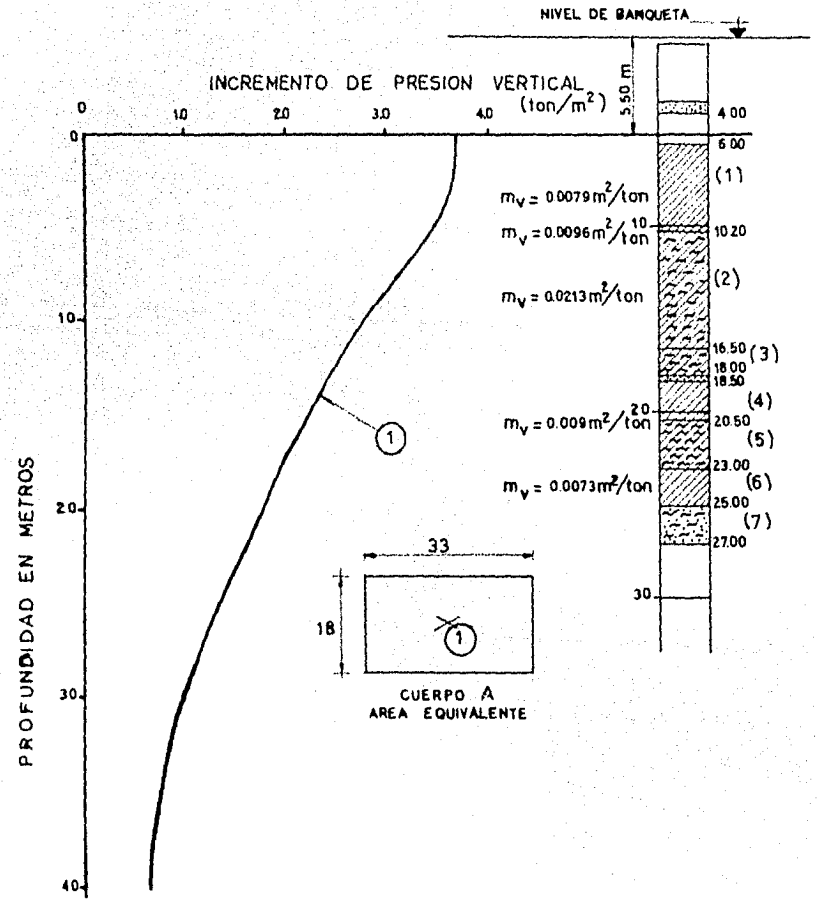


Fig. 16.- INCREMENTO DE PRESION A DIFERENTES PROFUNDIDADES.

Se estudió también en el laboratorio la carga unitaria para producir una falla por esfuerzo cortante, y conocer así el factor de seguridad de las estructuras contra una falla de ese tipo.

Empleando la expresión de Terzaghi-Peck:

$$q = 2.85\ q_u(1 + 0.3\ B/L) + \gamma \cdot D$$

En donde:

q = carga de falla.

q_u = resistencia del suelo en compresión directa.

B = ancho del área cargada.

L = largo del área cargada.

γ = peso volumétrico del suelo en estado natural.

D = profundidad de desplante.

q_u vale en promedio 5.00 ton/m^2 en los materiales localizados de 4.00 a 18.00 m de profundidad, por lo que se obtuvo:

$q = 2,85 \cdot 5.0(1 + 0.3\ 16/55) + 1.6\ h$

$q = 15.50\ ton/m^2 + 1.6\ h$

Y dando un factor de seguridad igual a 3, la carga neta permisible resultó de:

$$q = 5.17 + 1.6\ h\ ton/m^2$$

Sustituyendo en esta ecuación, el valor h, por la profundidad de desplante de cada uno de los cuerpos de que consta el conjunto, se vé que en todos los casos, la carga unitaria real es menor que la carga de falla, por lo que estamos del lado de la seguridad.

Además de todos los ensayos indicados anteriormente en el laboratorio se efectuaron pruebas para determinar la permeabilidad electrosmótica de muestras de arcilla tomadas en los sondeos realizados en el lugar de la obra, dichas pruebas realizadas con un aparato que se muestra esquemáticamente en la figura siguiente, nos dieron un valor promedio de k_e, de 1.5×10^{-4} cm/seg, que es semejante al valor encontrado por Leo Casagrande en sus experimentos.

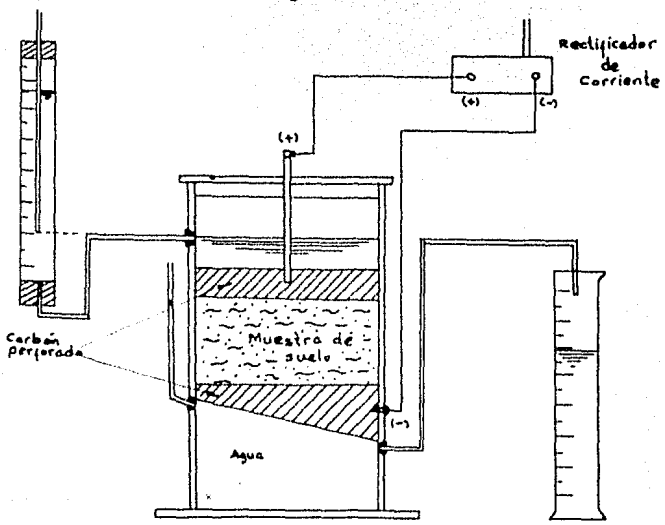


Fig. 17.- APARATO PARA DETERMINAR LA PERMEABILIDAD ELECTROSMOTICA.

b) Estudios con modelos a escala.-

Se construyó un aparato de prueba que se muestra esquemáticamente en la figura, siguiente, y por medio del cual se determinó, con modelos a escala, el valor del potencial necesario en el terreno, el tiempo que tardaría en abatirse el nivel freático hasta la profundidad deseada, etc.

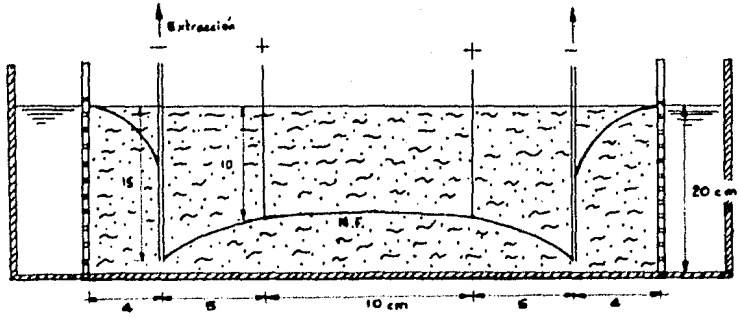


Fig. 18.- APARATO PARA PRUEBAS DE ELECTROSMOSIS EN MODELOS A ESCALA.

Se llevó un registro de la diferencia de potencial aplicado entre los electrodos, la separación de los mismos, la variación de la intensidad de corriente, la conductividad específica del suelo (que varía a medida que se le extrae agua al suelo), la cantidad de agua extraída, y el tiempo empleado en el experimento.

De acuerdo con los resultados de la prueba, y con la teoría de los modelos a escala, se puede estimar lo siguiente:

1) La intensidad de la corriente:

$$I = \frac{2\pi \cdot \lambda \cdot H \cdot E}{L\left(\frac{L}{r}\right)} \qquad (10)$$

En la cual:

I = Intensidad de corriente en amperes.

λ = Conductividad específica del terreno en amp/cm^2 para un gradiente de potencial de un volt/cm.

H = Longitud de los electrodos bajo el nivel del suelo, en cm.

E = Diferencia de potencial aplicado entre los electrodos en volts.

L = Distancia entre ánodo y cátodo, en cm.

r = Radio de los electrodos, en cm.

$L(\frac{L}{r})$ = Logaritmo natural de L/r cantidad abstracta.

La ecuación dimensional correspondiente a la ecuación anterior es:

$$\text{amperes} = \frac{\text{amp/cm}^2 \times \text{cm} \times \text{volt}}{\text{volt/cm}}$$

Por lo que se vé que la ecuación es correcta.

La intensidad de corriente, sin embargo, es varia -

ble, debido principlemente a la desecación del suelo, lo cual disminuye su conductividad, y a la corrosión de los electro - dos del ánodo, lo cual disminuye su r.

2) El gasto que se puede extraer por el método electrosmótico se puede determinar de la siguiente manera:

$$d_{qe} = k_e \cdot i_e \cdot A = k_e \cdot i_e \cdot 2\pi \cdot x \cdot H$$

$$= k_e \cdot 2\pi \cdot x \cdot H \cdot \frac{dE}{dx}, \text{ ya que } i_e = \frac{E}{x}$$

La expresión anterior nos indica el gasto que en -- tre en un cilindro de radio x, cuyo eje de figura es el electrodo negativo, y en donde H es la profundidad del electrodo bajo el nivel del suelo, y L, la distancia entre ánodo y cátodo, tal como se muestra en la figura 19.

La expresión anterior se puede escribir así:

$$d_{qe} = k \cdot 2\pi \cdot H \cdot \frac{x\, dE}{dx}$$

Integrando esta expresión entre sus extremos de --- variación se tiene:

$$q_e \int_r^L \frac{dx}{x} = 2\pi k_e \cdot H \int_0^E dE$$

$$q_e \cdot \left[Lx \right]_r^L = 2\pi \cdot k_e \cdot H \cdot E$$

$$q_e \cdot L\left(\frac{L}{r}\right) = 2\pi \cdot k_e \cdot H \cdot E$$

$$q_e = \frac{2 \cdot \pi \cdot k_e \cdot H \cdot E}{L\left(\frac{L}{r}\right)} \qquad (11)$$

Donde:

q_e = gasto en cm^3/seg.

k_e = coeficiente de permeabilidad electrosmótica en cm./seg

por 1 volt/cm.

E = diferencia de potencial en volts.

L = distancia entre los electrodos en cm.

r = radio de los electrodos, en cm.

H = profundidad de los electrodos bajo el nivel del suelo, en cm.

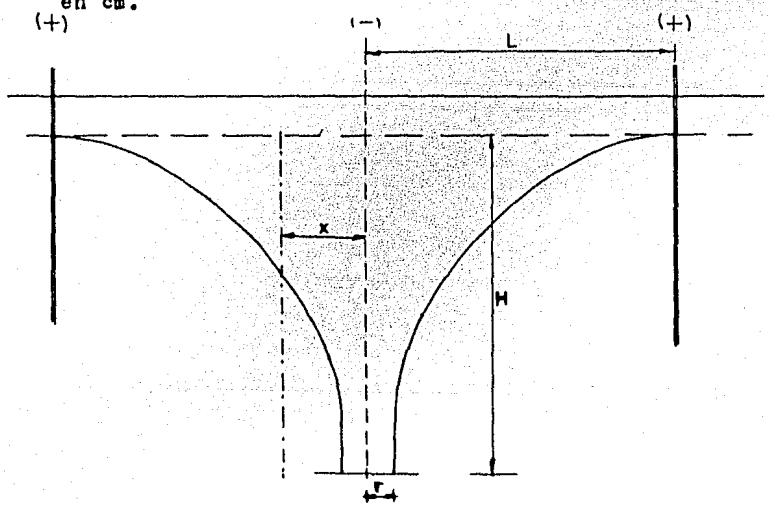


Fig. 19.- DETERMINACION DEL GASTO QUE LLEGA AL CATODO.

La ecuación anterior nos permite estimar el gasto - que es posible extraer en el cátodo.

Nótese la semejanza de esta ecuación con la (10) -- debido a que la intensidad de corriente es en la electrici -- dad, lo que el gasto en la hidráulica.

3) El tiempo necesario de aplicación de la corriente eléctrica en el campo se determinó valiéndonos de la teoría de modelos, de la manera siguiente:

La relación entre el volumen de agua extraído de la muestra, y el consumo de energía eléctrica, de acuerdo con

los datos del experimento, es aproximadamente lineal, tal como se muestra en la figura siguiente:

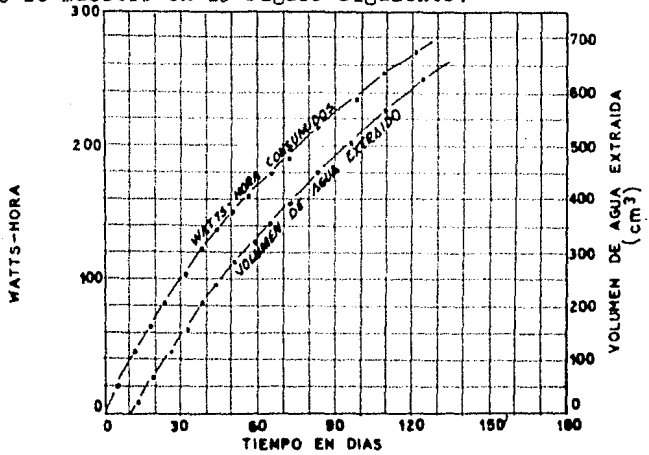


Fig. 20.- RELACION DEL VOLUMEN DE AGUA EXTRAIDO Y EL CONSUMO DE ENERGIA ELECTRICA.

Sabemos además, que el consumo de energía eléctrica en un tiempo determinado es:

$$\omega = E \cdot I \cdot t \qquad (12)$$

ω = consumo de energía en watts-hora.

E = diferencia de potencial en volts.

I = intensidad de corriente en amperes.

t = tiempo transcurrido en horas.

Si nos valemos de la teoría de modelos, y de la relación lineal entre el consumo de corriente, y el volumen extraído, podremos escribir, comparando el consumo de corriente del modelo y del prototipo:

$$\frac{\omega_p}{\omega_m} = \frac{V_p}{V_m} = \frac{L^3_p}{L^3_m} = L^3_r \qquad (13)$$

De la ecuación (10) tendremos:

$$\lambda = \frac{1}{2\pi H E} L\left(\frac{L}{r}\right)$$

Manteniendo constante la relación L/r en modelo y - prototipo, lo cual es muy fácil, se tiene:

$$\lambda_r = \frac{I_r}{H_r \cdot E_r}$$

$$I_r = H_r \cdot E_r \cdot \lambda_r$$

Y como el modelo y el prototipo están hechos del mismo material, se tendrá:

$$\lambda_r = \frac{\lambda_p}{\lambda_m} = 1$$

$$I_r = E_r \cdot H_r \qquad (14)$$

Sustituyendo este valor (14) en la ecuación (12), - nos queda:

$$\omega_r = E^2_r \cdot H_r \cdot t_r \qquad (15)$$

Sabemos también que: $i_e = \frac{E}{L}$; de donde: $E = i_e \cdot L$

Y remplazando este último valor en la ecuación (15) se tiene:

$$\omega_r = i^2_{e_r} \cdot L^2_r \cdot H_r \cdot t_r \qquad (16)$$

Pero como tanto L_r, como H_r están en la misma relación, pues ambos son unidades de longitud (cm) se tiene:

$$\omega_r = i^2_{e_r} \cdot L^3_r \cdot t_r \qquad (17)$$

Igualando esta ecuación, con la número (13), se --

tiene:

$$L^3_r = i^2_r \cdot t_r \cdot L^3_r$$

$$i^2_r \cdot t_r = 1$$

De donde:

$$\frac{i^2_p}{i^2_m} \frac{t_p}{t_m} = 1$$

$$t_p = t_m \left(\frac{i_p}{i_m}\right)^2 \qquad ---(18)$$

Con lo cual es posible determinar el tiempo necesario para obtener los mismos resultados en el prototipo, que en el modelo, conociendo el gradiente de potencial que se vaa aplicar en el campo, el que se aplica en el modelo, y recordando que se debe tener la misma relación en el prototipo y en el modelo para la profundidad de electrodos, y su separación.

c) TRABAJOS DE CAMPO.-

Una vez obtenidos en el laboratorio todos los datos necesarios para conocer el comportamiento del suelo en el lugar de la obra durante y después de la aplicación de la electrósmosis, y todos los datos de tipo técnico, tales como potencia del generador eléctrico, potencial necesario, separación de electrodos, potencia de las bombas para extracción del agua, tiempo necesario de aplicación de la corriente eléctrica y del bombeo, para lograr el abatimiento del nivel freático, a la profundidad deseada se procedió a hacer las instalaciones requeridas por la electrósmosis, las cuales describiré con detalle en seguida.

1) Localización de los electrodos y de las bombas.-

En el plano 3 se muestra la planta del cuerpo B, que fué donde se aplicó primero el método, y se indican las tres zonas no contiguas en que se utilizó el procedimiento de electrósmosis ya que en las dos zonas intermedias no fué necesario aplicarlo, pues el nivel freático se mantuvo relativamente abatido gracias al bombeo en las tres zonas mencionadas.

Por ser esta la primera vez que se aplicaba la electrósmosis en gran escala en la Ciudad de México, se tropezó con ciertas dificultades en el abatimiento de la zona I, debido a la presencia de una capa de arena no consignada en el perfil del suelo, y a la localización defectuosa de los ánodos y los cátodos (bombas), pero esas dificultades se corrigieron en la zona II, y ya en la zona III los-

resultados fueron altamente satisfactorios. Voy a describir - brevemente cada una de las zonas y a comentar los efectos que produjo la localización de los ánodos y los cátodos en cada - una de ellas.

ZONA I.-

En esta primera zona, que es la que está más próxima- al lindero poniente del edificio, ya se había realizado una - pequeña excavación por el método de las zanjas, abatiendo el- agua por medio de drenes, se había colado el muro de conten-- ción de la colindancia con la casa vecina, y alrededor de 8 m del muro de contención de la calle de Aguascalientes, así como algunas trabes aisladas.

El hecho de que se hubieran abierto esas zanjas, - sobretodo la del eje Y_6, que interrumpía la continuidad del - suelo, obligó a que no se hincaran electrodos en el lado po - niente de dicha zona, sino que se colocaran 3 bombas de pozo- profundo en el centro de la misma, y electrodos alternados, - solamente en el lado oriente, tal como se muestra en el plano 3. Esa colocación de nuestros electrodos positivos, y de las- bombas conectadas al polo negativo, sólo produjo gradiente e- lectrosmótico en una dirección, de los ánodos hacia los cáto- dos (bombas) por lo que el abatimiento fué más lento, como se verá más adelante, al estudiar las gráficas de abatimiento -- del nivel freático. El gradiente de potencial aplicado en es- ta zona fué de 0.12 volts/cm.

ZONA II.-

En la zona II, se modificó la colocación de los e -- lectrodos y de las bombas. Se localizaron los ánodos alterna- dos con los tubos ranurados de bombeo, (cátodos) a lo largo - de todo el perímetro de la zona en cuestión. En el plano 3, -

se indican los electrodos positivos con una cruz, y los tubos de bombeo con un circulito. Se hizo también una innovación en el sistema de bombeo, ya que se utilizaron, además de las tres bombas de pozo profundo que se habían usado en el caso anterior, nueve pozos-punta (well-points), conectados en serie a una bomba centrífuga, con el fin de tener completas las 12 estaciones de bombeo que se necesitaban de acuerdo con el proyecto. Se colocaron además 4 ánodos en el interior del área por excavar.

Los resultados en esta segunda zona fueron mejores que los obtenidos en la primera, como era de esperarse, debido al aumento en el número de pozos de bombeo, y al cambio en la colocación de los electrodos, sin embargo, no fueron todo lo satisfactorios que se pudiera desear, debido principalmente a que se tenía un número alto de pares de electrodos lo cual impidió, debido a la potencia del generador disponible, aplicar un potencial mayor de 0.17 volts/cm.

El gradiente de potencial hacia los pozos, era más intenso en la dirección a lo largo del perímetro de la zona considerada, que del centro de dicha zona hacia afuera.

ZONA III.-

En esta zona, se modificó la colocación de nuestros ánodos y nuestros cátodos. Estos últimos, o sea los tubos de las bombas se colocaron espaciados a lo largo de todo el perímetro de la zona cuyo nivel se deseaba abatir, siendo en total 19 pozos, en todos los cuales se colocaron puntas Jacuzzi accionados por dos bombas centrífugas. Los electrodos positivos se colocaron en el interior de la zona en cuestión, aproximadamente frente a los pozos, pero a una distancia de unos-

seis metros de ellos. Se colocaron 12 ánodos . Los resultados en esta tercera zona mejoraron los resultados obtenidos anteriormente con la electrósmosis, ya que el abatimiento en el - interior del área limitada por las bombas fué muy rápido, y - en cambio en las zonas adyacentes fué una cosa relativamente- lenta.

EDIFICIO A.-

El plano 4 nos muestra la planeación de las 3 zonas en que se va a atacar la cimentación del edificio A; en - la actualidad sólo se ha excavado la zona I, y se ha hecho la instalación electrosmótica de la zona II. Antes de iniciarse- el hincado de los pilotes de fricción del edificio A, se realizó un experimento con electrósmosis en la esquina Noreste - de dicho cuerpo, cuyos resultados merecen ser mencionados. - Con dichos resultados se planeó el tratamiento electrosmótico para la cimentación de este cuerpo.

EXPERIMENTO ELECTROSMOTICO EN EL CUERPO A.-

En el plano, 5 se- indica la colocación de los electrodos, tubos ranurados para- bombeo y estaciones piezométricas que se utilizaron en el experimento electrosmótico en el terreno que se realizó en el - cuerpo A del conjunto Aristos.

El experimento, consistió a grandes rasgos en determinar el abatimiento del nivel freático logrado primero con - la utilización exclusivamente del bombeo por medio de pozos - punta durante un cierto tiempo; más tarde, después de permi - tir la recuperación de dicho nivel, observar el abatimiento -

logrado con la aplicación durante un cierto tiempo de una diferencia de potencial entre los electrodos, pero sin bombear- y finalmente, después de una nueva recuperación del nivel - - freático, medir el abatimiento logrado aplicando corriente eléctrica y bombeo simultáneos al suelo, es decir, la electrósmosis completa.

Los resultados de este experimento se consignan en - el capítulo V, en forma detallada.

ZONA I.-

Aprovechando los nuevos datos suministrados por el -- experimento, se realizó la colocación de los electrodos y los tubos de bombeo de esta primera zona, tal como se muestra en- el plano 4, donde se observa que esta colocación es semejante a la de la zona III del cuerpo B, es decir con las bombas (catodos) en el perímetro y los electrodos positivos dentro.

El bombeo se realizó también por medio de puntas Jacuzzi pero formando dos sistemas independientes, accionado, - cada uno con una bomba centrífuga.

ZONA II.-

Esta zona se etacó en forma semejante a la zona I, - por lo que no necesita mayor descripción.

2) Hincado de los electrodos y de los tubos ranurados para -- las bombas.-

Los electrodos que se utilizaron en las tres zonas - cuyo nivel freático se abatió electrosmóticamente en el cuerpo B, estaban constituídos por tubos de 2" de diámetro, y 12m de longitud, a los cuales se les soldaron unas placas de 10 - cm de ancho y de 1.00 m de longitud, colocadas en dos lados--

diametralmente opuestos del tubo, y espaciadas a lo largo del mismo 1.00 m, tal como se muestra en la figura 21, el objeto de las placas era incrementar el área de contacto con el suelo.

Posteriormente en el experimento realizado en el edificio A, y en las zonas de este edificio, los electrodos estuvieron constituídos por varillas corrugadas de fierro, de 8 m de longitud y 1" de diámetro.

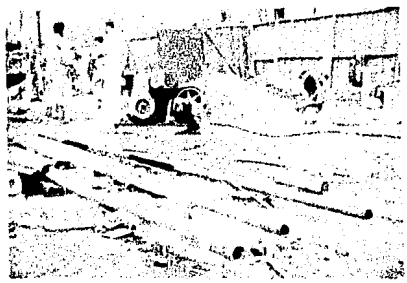


Fig. 21.- ELECTRODOS DEL CUERPO B.

El hincado de los electrodos del primer tipo se realizó por medio de un martillo de caída libre, de 80 Kg de peso, con una altura de caída de 1.20 m. El hincado de las varillas no tuvo ningún problema, ya que se metieron a mano con el peso de cuatro hombres colgándose de ellas.

Fig. 22.- ELECTRODOS HINCADOS.

Los tubos de bombeo fueron tubos ranurados de 8" de diámetro y 15 m de longitud, en la Zona I del Edificio B y parte de la Zona II. En las restantes Zonas tratadas, los cátodos fueron tubos de 4" ranurados y 12 m de longitud. Los cátodos se colocaron en pozos abiertos previamente

por medio de palas de postear. El espacio entre el tubo y el pozo se llenó con grava para que le sirviera de filtro.

La conexión de los cables positivos a los electrodos se hizo por medio de zapatas soldadas en los mismos, y provistas de un tornillo para fijar los cables, tal como se aprecia en la figura 22.

En el cuerpo B, la conexión de los cables negativos a los tubos ranurados se hizo también por medio de zapatas, pero en el cuerpo A, se optó por utilizar como cátodos dos varillas de 1" de diámetro y 12 m de longitud, hincadas a unos 7 cm a cada lado del tubo ranurado, con el fin de lograr mejor contacto entre el cátodo y el suelo. La figura 23, nos muestra la colocación de las puntas Jacuzzi y su conexión eléctrica. La figura 24, la colocación de las bombas de pozo profundo.

Fig. 23.- TUBO DE BOMBEO CON PUNTAS JACUZZI.

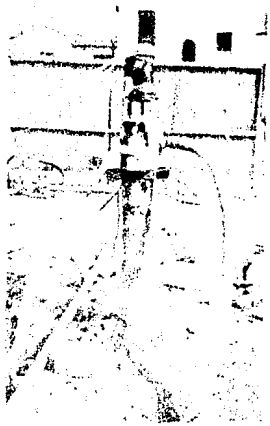


Fig. 24.- TUBO DE BOMBEO CON BOMBA DE POZO PROFUNDO.

3) Colocación e instalación de las bombas.-

En el caso de las bombas de pozo profundo, la succión se realiza por un tubo -- que va dentro del tubo ranurado y la descarga por medio de -- una manguera que descarga en un canalón de salida. En el caso de las puntas Jacuzzi la inyección se hizo por medio de una - tubería de 2 1/2" trabajando a presión, de la cual se abastecen los tubos de inyección de los diferentes pozos. El agua - que sale de los tubos de descarga de los mismos se lleva por- medio de mangueras a un sistema de canalones que desalojan -- el agua fuera de la zona.

4) Instalación del generador eléctrico.-

Como se requería un - generador de corriente directa para abastecer los electrodos- positivos y negativos, se tomó corriente alterna de 220 volts la cual accionaba un motor eléctrico, cuyo movimiento se - - transmitía a un generador de corriente directa, con un voltaje máximo de 130 V, y una intensidad de corriente de 360 amperes.

5) Colocación de los piezómetros y bancos profundos.-

Con el - fin de registrar las variaciones del nivel freático a medida- que se efectuaba el bombeo con la ayuda de la electrósmosis,- se instalaron, de acuerdo con la colocación que se muestra en el plano 3, diferentes estaciones piezométricas. Cada una de- estas estaciones estaba constituída por tres piezómetros, cuyos extremos inferiores estaban colocados a diferentes profundidades uno de otro. Por lo general, se colocó uno a 15 m, o-

tro a 12 m, y el tercero a 10 m de profundidad. El extremo -- inferior de cada piezómetro se colocó dentro de un filtro de grava de unos 40 cm de altura y el espacio entre cada uno de ellos se llenó con bolas de bentonita sódica. En un principio los piezómetros estuvieron constituídos por tubos de sarán en cuyo extremo inferior se colocaba un recipiente de plástico - perforado, lleno de arena bien graduada. Las lecturas se ha-- cían por medio de una sonda eléctrica. Como este tipo de piezómetro no indicaba con la rapidez necesaria los cambios en - nivel freático, se diseñó un nuevo piezómetro, constituído en su parte inferior por un recipiente de plástico perforado, - lleno de arena bien graduada, y llevando en su parte superior una cabeza metálica, dentro de la cual, separado de la arena por medio de una piedra porosa se colocó un diafragma metálico muy delgado, conectado a un alambre delgado aislado, que - subía por el interior del tubo de plástico del piezómetro. -- Muy próxima al diafragma, y aislada del metal de la cabeza, - se colocó una punta metálica, unida a otro alambre delgado y- aislado que subía también por el tubo de plástico. La parte - superior del piezómetro estaba constituída por un cilindro metálico, hueco, que conectaba por un extremo al tubo de plástico, y por el otro tenía una rosca tal como se muestra en la - figura 25. A los lados del cilindro metálico, y debidamente - aisladas, salían las dos puntas de los alambres que venían -- dentro del tubo.

Se vé entonces que en este tipo de piezómetro no sube el agua por el tubo, sino que sólo deforma el diafragma metálico hasta hacerlo tocar la punta próxima a él. Las lecturas se hacen, conectando en la rosca de la parte superior, un tubo pa-

ra inyectar aire a presión, y uniendo los extremos de los dos alambres laterales a los terminales de un miliamperímetro. Al incrementar la presión del aire, llega un momento en que ésta equilibra la presión inferior del agua, y hace que el diafragma metálico se separe de la punta, con lo cual se interrumpe el cirtuito. Al marcar el miliamperímetro la interrupción del circuito, se lee la presión aplicada en el tubo, y esa presión se transforma en altura de agua.

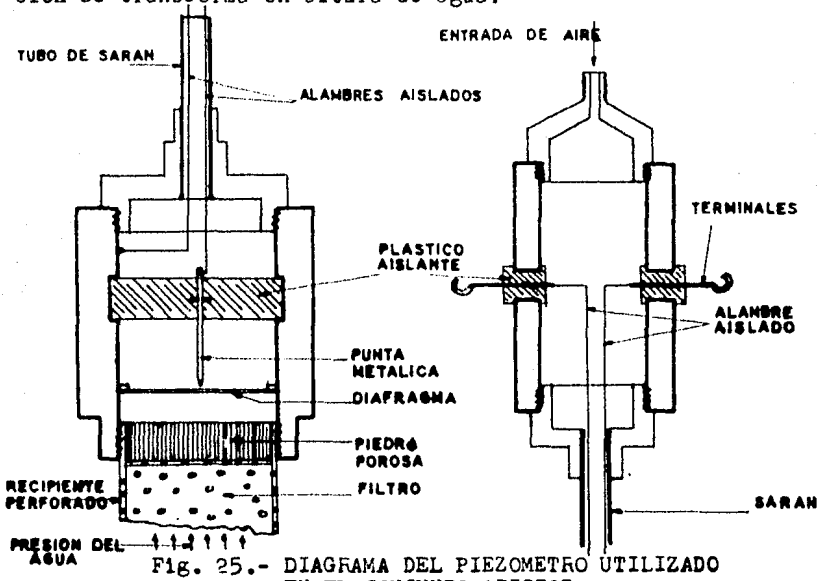


Fig. 25.- DIAGRAMA DEL PIEZOMETRO UTILIZADO EN EL CONJUNTO ARISTOS.

Para colocar los bancos profundos, se abrieron pozos con la pala de postear, y en el fondo se colocaron dichos bancos de nivel, y luego se introdujo en el pozo una tubería de concreto o de fierro para proteger el banco. Las lecturas se hacían por medio de una extensión metálica para el estadal, de longitud mayor que la profundidad del pozo.

d) OBSERVACIONES DE CAMPO.-

Con el fin de conocer el comportamiento de la electrósmosis, en relación con el nivel freático y con los movimientos del terreno, se llevó un registro cuidadoso de los datos siguientes:

1) Lectura de los piezómetros.-

Se explicó anteriormente el mecanismo de la lectura de los piezómetros, aquí sólo consignaremos, que diariamente, a la misma hora, se efectuó la lectura de los piezómetros de cada estación piezométrica, con el fin de determinar la profundidad a la que estaba el nivel freático, y saber cuándo era oportuno iniciar las excavaciones. Esas lecturas, fueron debidamente registradas, y se construyeron gráficas de abatimiento del nivel para cada uno de los tubos de todas las estaciones piezómetricas en las zonas en las que se aplicó la electrósmosis.

2) Registros del potencial aplicado, gasto extraído, gasto inyectado.-

En todos los casos se trató de aplicar el máximo gradiente de potencial posible de acuerdo con la potencia del generador y la colocación de los electrodos. Se llevó nota de las variaciones en dicho potencial por causas ajenas a la voluntad del operador.

El gasto extraído se determinó por medio de medidores tipo Parshall, colocados en los canalones de descarga, y se anotó su valor por lo menos una vez cada día. El gasto inyectado, se determinó midiendo el volumen extraído por la succión en un tanque de abastecimiento de agua, y -

dividiendo el volumen inyectado, entre el tiempo empleado en-
inyectarlo.

3) Gráficas del abatimiento del nivel freático.-

Se consignan en hojas por separado, para cada una de las diferentes zonas. (VÉR TABLAS III, IV, V, y las gráficas correspondientes)

4) Lecturas de los bancos de nivel profundos.-

En tablas por-
separado, en el capítulo VI, se pueden observar esos valores.

En las figuras siguientes se presentan diversos aspectos de las excavaciones efectuadas en el edificio B, en - las zonas donde se aplicó la electrósmosis.-

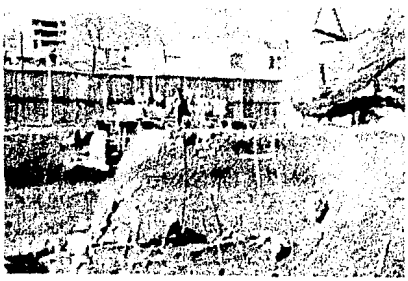


Fig. 26.- EXCAVACION EN LA ZONA I.

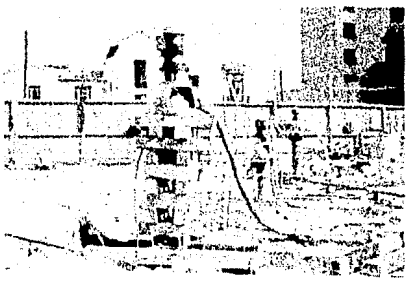


Fig. 27.- BOMBAS DE POZO PROFUNDO EN LA ZONA II

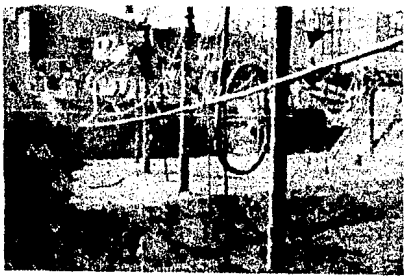


Fig. 28.- EXCAVACION DE LA ZONA II.

Fig. 29.- ZONA II TOTALMENTE EXCAVADA.

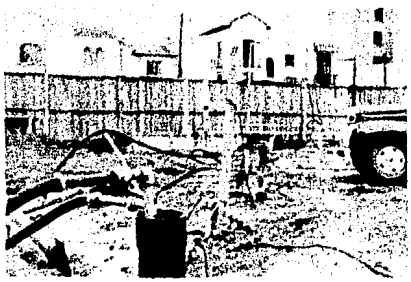


Fig. 30.- POZOS - PUNTA DE LA ZONA II.

Fig. 31.- CORROSION DE LOS ELECTRODOS.

V.- ABATIMIENTO DEL NIVEL FREATICO.-

Un ejemplo muy interesante de la influencia de la electrósmosis en la rapidez del abatimiento del nivel freático, es el caso del experimento efectuado en el cuerpo A, previamente al hincado de pilotes, el cual se reseñó brevemente en páginas anteriores. Aquí lo vamos a describir con mayor extensión. El plano 5, indica la colocación de los electrodos, las bombas, y los piezómetros en la zona en que se realizó el experimento. Se colocó además un medidor Parshall para determinar el gasto extraído en los canalones.

En las tablas I, II y III, se consignan los datos obtenidos en el campo.

a) Con bombeo solamente.-

El día 14 de enero, una vez hincados los electrodos, y colocados los well-points, se empezó a bombear, sin conectar la corriente eléctrica a los electrodos.

En el momento de iniciar el bombeo, la profundidad del nivel freático con respecto al nivel de la superficie del terreno era 3.92 m, 3.84 m y 2.72 m, en cada uno de los piezómetros.

El día 30 del mismo mes, 16 días después de iniciado el experimento, se suspendió el bombeo, y entonces la lectura del nivel freático en los tres piezómetros fué de 4.85 m, 4.52 m, y 3.68 m respectivamente. Es decir, se tuvo un abatimiento de 93 cm en el piezómetro 1, 68 cm en el piezómetro 2, y 96 cm en el 3. Se vé que todos los datos son congruentes.

El bombeo continuó suspendido hasta el día 12 de febrero, es decir durante 13 días, en los cuales se recuperó el nivel freático, hasta leerse en los tres piezómetros, 3.13, - 3.04, y 2.91 respectivamente.

Se observa de los datos anteriores, que el abati - miento del N. F. en el material que forma la cimentación del cuerpo A, es sumamente lento, ya que se requirieron 16 días - de bombeo ininterrumpido para lograr un abatimiento de sólo - 85 cm, en promedio. Si se optara por este método para abatir el nivel con el fin de excavar en seco en la cimentación del edificio A, cuya profundidad máxima está 6.24 m abajo del nivel del piso, se requeriría bombeo ininterrumpido durante un período de tiempo de unos dos meses, siempre y cuando se conservara una colocación de bombas tal que el área de influencia de cada una fuera aproximadamente la misma que le correspondía a cada una de las bombas del experimento.

b) Con electricidad solamente.-

Después de haberse permitido la recuperación del nivel freático., el día 13 de febrero se inició el tratamiento eléctrico solamente, sin bombear. Se observó de acuerdo con las lecturas de los piezómetros que se muestran en la tabla I, que en sólo dos días de aplicación de la corriente, el nivel se abatió unos 35 cm - máximos, pero después se observó una recuperación hasta - que el día 27 de febrero, se tuvo sólo un abatimiento con respecto al nivel original, del orden de 20 cm. Se dañó el piezómetro 3, con lo cual no fué posible hacer más determinaciones con dicho aparato.

c) Con electricidad y bombeo simultaneos.-

Este método de abatimiento, que es lo que constituye la electrósmosis completa, se inició el día 27 de febrero siendo entonces las lecturas de la profundidad del nivel freático, de 3.35 en el piezómetro 1, y de 3.24 en el piezómetro 2. La bomba de 4" que alimentaba los 4 well-points, inyectaba 3.3 lts/seg, y la presión aplicada en cada punta fué de - --- 41 lb/in^2. El gasto medido en el medidor Parshall era de --- 3.4 lts/seg, con lo que el gasto neto era de sólo 0.1 lt/seg. El gradiente de potencial aplicado fué de 0.35 al principio,- y luego se levantó a 0.50 volts/cm, manteniéndose así hasta - el día 3 de febrero, y luego se bajó a 0.31 volts/cm, a 0.22- y finalmente a 0.16 volts/cm, hasta la terminación de la prueba. Diariamente se hicieron tres lecturas de todos los aparatos, tal como se muestra en la tabla II.

El día 4 de febrero, a las 8 horas, la profundidad- del nivel freático determinada en el piezómetro 1, fué de -- 6.99 m, con lo que se observa que se logró en sólo 6 días un- abatimiento de 3.64 m. Ese día se fundió el serén de dicho -- piezómetro, y pocos días después el del piezómetro 2, debido- al intenso calentamiento del suelo. La prueba se continuó hasta el día 12 de febrero, tal como se muestra en la tabla .

Se observa entonces, que para lograr el abatimiento del nivel freático hasta la profundidad requerida por la excavación del edificio A, utilizando el procedimiento de elec -- trósmosis, se requerirían sólo 6 días de bombeo, con lo que- se ahorran varias semanas de bombeo, y de retraso de la obra.

Las figuras de la hoja siguiente muestran algunos-- aspectos de los electrodos, los well-points y los piezómetros

utilizados durante el experimento.

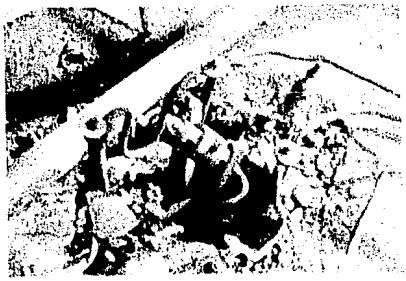


Fig. 32.- ANODOS, Y PIEZOMETRO.

Fig. 33.- MEDIDOR PARSHALL.

Fig. 34.- CATODOS Y WELL-POINTS.

TABLA # I

EXPERIMENTO CON ELECTROSMOSIS EN EL CUERPO A.
I.- BOMBEO SOLAMENTE II.- ELECTRICIDAD SOLAMENTE.

FECHAS	Lectura manom. Hg			L.M. × 0.272			Profundidad del Niv. F.			OBSERVACIONES.
	I	II	III	I	II	III	I	II	III	
Ene 14	17.1	----	----	4.65	----	----	3.35	----	----	SE INICIO EL BOMBEO.
16	15.0	15.3	19.4	4.08	4.16	5.28	3.92	3.84	2.72	
19	14.7	14.9	17.6	4.00	4.05	4.78	4.00	3.95	3.28	CAMBIO DE BOMBA.
22	15.2	15.2	15.1	4.13	4.14	4.11	3.87	3.86	3.89	
24	14.7	15.5	16.8	4.00	4.22	4.56	4.00	3.78	3.44	
27	13.6	13.7	17.1	3.70	3.72	4.66	4.30	4.28	3.34	
28	11.6	13.5	15.7	3.15	3.66	4.26	4.85	4.34	3.74	
29	11.3	12.9	15.9	3.07	3.51	4.32	4.93	4.49	3.68	
30	11.6	12.8	15.9	3.15	3.48	4.32	4.85	4.52	3.68	SUSPENSION DE BOMBEO.
31	13.4	15.2	16.4	3.64	4.14	4.46	4.36	3.86	3.54	
Feb 3	16.8	17.5	17.3	4.57	4.76	4.71	3.43	3.24	3.29	
4	17.0	17.8	17.4	4.63	4.84	4.74	3.37	3.16	3.26	
5	17.1	18.2	17.6	4.65	4.94	4.78	3.35	3.06	3.22	
6	17.5	18.2	17.5	4.76	4.94	4.76	3.24	3.06	3.24	
9	17.5	17.4	18.0	4.76	4.74	4.90	3.24	3.26	3.10	
10	17.8	18.2	17.9	4.85	4.94	4.86	3.15	3.06	3.14	
11	17.5	18.2	17.8	4.76	4.94	4.84	3.24	3.06	3.16	
12	17.9	18.3	18.7	4.87	4.96	5.09	3.13	3.04	2.91	TRATAMIENTO ELECTRICO.
14	16.2	17.9	17.5	4.40	4.87	4.76	3.60	3.13	3.24	
15	14.7	15.5	17.0	4.00	4.22	4.63	4.00	3.78	3.37	
16	16.4	16.5	17.7	4.46	4.46	4.82	3.54	3.54	3.18	
17	15.8	17.5	18.8	4.30	4.76	5.12	3.70	3.24	2.88	
18	15.5	17.5	18.7	4.21	4.76	5.10	3.79	3.24	2.90	
19	17.3	17.9	18.5	4.70	4.86	5.02	3.30	3.14	2.98	
20	16.0	18.5	18.5	4.25	5.02	5.02	3.75	2.98	2.98	
21	17.7	18.3	17.8	4.82	4.98	4.85	3.18	3.02	3.15	
23	16.5	17.8	----	4.49	4.84	----	3.51	4.16	----	SE FUNDIO PIEZOMETRO.
24	16.5	17.5	----	4.49	4.76	----	3.51	3.24	----	SE BOMBEO 2 HORAS.
25	16.5	17.5	----	4.49	4.76	----	3.51	3.24	----	
26	16.8	17.5	----	4.57	4.76	----	3.43	3.24	----	REPOSO.
27	17.1	17.5	----	4.65	4.76	----	3.35	3.24	----	ELECTROSMOSIS COMPLETA

TABLA # II

III.-Electricidad y Bombeo Simultaneos. (Electrosmosis completa)

Fecha	Prof. Nivel freático m			Gasto Bomba (00 l/seg	Presión en c/punta (lb/in²)				Gasto por punta (l/seg)				Amperaje Max.	Voltaje Max.	kw	ie	Observaciones		
	1	2	3	l/seg	1	2	3	4	1	2	3	4					Parshall	Gasto	Gasto neto.
Feb. 27																	Principio de Pruebas.		
(10.35)	3.35	3.24	----	3.3	41	41	41	41	19	90	22	24	114	90	10.26	0.35	4.5	3.40	0.1
(11.20)	----	----	----	---	41	41	41	41	19	20	24	23	89	90	8.00	0.35	---	----	----
(11.25)	----	----	----	---	--	--	--	--	--	--	--	--	98	100	9.8	0.38	---	----	----
(12.30)	3.86	3.73	----	---	41	41	41	41	--	--	--	--	90	97	8.7	0.37	---	----	----
(16.00)	----	----	----	---	--	--	--	--	--	--	--	--	85	94	8,0	0.36	---	----	----
(16.15)	4.22	4.06	----	---	41	41	41	41	20	24	25	25	118	130	15.3	0.50	---	----	----
(21.00)	----	----	----	---	--	--	--	--	--	--	--	--	105	127	13.3	0.48	---	----	----
28																			
(1.0)	----	----	----	---	--	--	--	--	--	--	--	--	106	128	13.6	0.49	---	----	----
(11)	----	----	----	---	41	41	41	41	--	--	--	--	90	128	11.5	0.49	---	----	----
(18)	4.92	4.33	----	3.3	41	41	41	41	21	124	25	25	90	128	11.5	0.49	5.0	3.45	0.15
(22)	----	----	----	---	--	--	--	--	--	--	--	--	90	128	11.5	0.49	---	----	----
Marzo									M A R Z O										
1																			
(0)	----	----	----	---	--	--	--	--	--	--	--	--	90	128	11.5	0.49	---	----	----
(8)	4.81	4.35	----	3.2	41	41	41	41	21	25	25	25	72	131	9.4	0.51	4.5	3.45	0.15
(12)	----	----	----	---	--	--	--	--	--	--	--	--	--	---	----	----	---	----	----
(17)	4.84	4.41	----	---	41	41	41	41	20	24	25	25	60	131	7.8	0.51	5.0	3.56	0.36
(24)	----	----	----	---	--	--	--	--	--	--	--	--	60	131	7.8	0.51	---	----	----
2																			
(8)	----	----	----	3.3	41	41	41	41	--	--	--	--	46	133	6.1	0.51	---	----	----
(15)	----	----	----	---	--	--	--	--	--	--	--	--	90	131	11.8	0.50	---	----	----

TABLA # II (CONTINUA).

Marzo 2																		
(24)	----	----	----	---	--	--	--	--	--	--	--	--	45	131	5.9	0.50	---	----	----
3																	SE BAJÓ EL VOLTAJE	
(8)	----	----	----	3.3	41	41	41	41	21	23	25	25	45	132	5.9	0.51	5.5	----	----
(16)	----	----	----	---	--	--	--	--	--	--	--	--	60	60	3.6	0.23	---	3.43	0.13
(24)	----	----	----	---	--	--	--	--	--	--	--	--	78	81	6.3	0.31	---	----	----
4																			
(8)	----	----	----	3.2	40	40	40	40	21	22	23	25	74	82	6.1	0.31	4.5	3.54	0.34
(16)	----	----	----	---	40	40	40	40	--	--	--	--	74	82	6.1	0.31	---	----	----
(24)	----	----	----	---	--	--	--	--	--	--	--	--	54	55	3.0	0.21	---	----	----
5																			
(8)	----	----	----	3.3	40	40	40	40	20	24	24	25	58	57	3.3	0.22	4.5	3.48	0.18
(16)	----	----	----	3.3	--	--	--	--	--	--	--	--	60	59	3.5	0.23	---	----	----
(24)	----	----	----	---	--	--	--	--	--	--	--	--	60	58	3.5	0.22	---	----	----
6																			
(8)	----	----	----	3.2	40	40	40	40	21	23	25	24	46	42	1.93	0.16	4.0	3.47	0.27
(16)	----	----	----	---	--	--	--	--	--	--	--	--	40	41	1.64	0.16	---	----	----
(24)	----	----	----	---	--	--	--	--	--	--	--	--	40	41	1.64	0.16	---	----	----
7																			
(8)	----	----	----	3.3	40	40	40	40	21	22	26	23	40	42	1.68	0.16	4.5	3.51	0.21
(16)	----	----	----	---	---	--	--	--	--	--	--	--	39	41	1.60	0.16	---	----	----
(24)	----	----	----	---	--	--	--	--	--	--	--	--	39	41	1.60	0.16	---	----	----
8																			
(8)	----	----	----	3.3	40	40	40	40	20	24	25	25	40	42	1.68	0.16	4.5	3.44	0.14

TABLA # II (CONCLUYE)

Marzo 8																		
(16)	----	----	----	---	--	--	--	--	--	--	--	--	40	42	1.68	0.16	---	----	----
(24)	----	----	----	----	--	--	--	--	--	--	--	--	40	42	1.68	0.16	---	----	----
9																			
(8)	----	----	----	3.3	40	40	40	40	36	94	25	25	40	42	1.68	0.16	4.5	3.38	0.08
(16)	----	----	----	---	--	--	--	--	--	--	--	--	-38	43	1.63	0.17	---	----	----
(24)	----	----	----	---	--	--	--	--	--	--	--	--	38	42	1.60	0.16	---	----	----
10																			
(8)	----	----	----	3.3	41	41	41	41	24	25	25	22	38	42	1.60	0.16	4.0	3.34	0.04
(16)	----	----	----	---	--	--	--	--	--	--	--	--	38	42	1.60	0.16	---	----	----
(24)	----	----	----	---	--	--	--	--	--	--	--	--	37	42	1.56	0.16	---	----	----
11																			
(8)	----	----	----	3.3	41	41	41	41	25	24	25	25	37	42	1.56	0.16	4.5	3.24	----
(16)	----	----	----	---	--	--	--	--	--	--	--	--	36	41	1.48	0.16	---	----	----
(24)	----	----	----	---	--	--	--	--	--	--	--	--	36	41	1.48	0.16	---	----	----
12																			
(8)	----	----	----	3.2	40	40	40	40	26	25	25	24	36	40	1.44	0.15	4.5	3.20	----
(16)	----	----	----	---	--	--	--	--	--	--	--	--	36	40	1.44	0.15	---	----	----
(17)	----	----	----	---	--	--	--	--	--	--	--	--	36	40	1.44	0.15	SE SUSPENDIO LA PRUEBA.		

VI.- LA ELECTROSMOSIS Y EL CONTROL DE LOS BUFAMIENTOS.-

Cuando se efectúa una excavación de alguna profundidad, con el fin de alojar la cimentación de un edificio, se ha observado, que el terreno del fondo de la excavación se levanta, conforme se va descargando el terreno, y que ese bufamiento se acentúa cuando se deja algún tiempo descargado el terreno. Esta elevación del fondo de la excavación, que en algunos casos puede llegar a ser considerable, es lo que se llama bufamiento del terreno, y es debido a la descarga del suelo, que estaba anteriormente sujeto a una carga de preconsolidación, formada por el material que se quitó. Después de construir el edificio, y aún durante la construcción, se ha observado que se producen asentamientos del suelo, a medida que se le vuelve a colocar carga, ahora la carga del edificio. Esos asentamientos son casi del mismo orden que los bufamientos que experimentó el fondo de la excavación, y causan una serie de problemas; ya que, además de afectar las condiciones de estabilidad de la estructura, dañan a las construcciones vecinas, y a las instalaciones de uso público, tales como las banquetas, tuberías de abastecimiento de agua y de alcantarillado, etc.

En estas condiciones, ha sido preocupación constante del ingeniero, el reducir los bufamientos producidos por la descarga del suelo, a un mínimo, para evitar esos asentamientos diferenciales. Con tal finalidad, se han recomendado las siguientes medidas de seguridad.-

1) Si la excavación tiene una profundidad menor de 3.00 m, se pueden excavar grandes áreas a cielo abierto, sin que los-

bufamientos sobrepasen por lo general los valores tolerables

2) Si la excavación tiene una profundidad comprendida entre los 3.00 y los 5.00 m de profundidad, se recomienda excavar por el método de trincheras, cuya anchura máxima en el fondo sea de unos 8 a 10 m, y dejando taludes laterales de 1:1, con lo cual los bufamientos estarán comprendidos entre 10 y 20 cm.

3) Si las excavaciones son de una profundidad mayor que 5.00 m, se debe usar el método de excavación por medio de zanjas ademadas, de una anchura no mayor de 2.50 m, y en las cuales se deben colar a la mayor brevedad posible las trabes principales de cimentación, para después extraer el material que queda encerrado entre varias trabes, y colar la losa que las une. Siguiendo éste procedimiento, los bufamientos serán aproximadamente del orden de 10 cm.

Es obvio que las condiciones más desfavorables desde el punto de vista de los bufamientos que pueden ocurrir es aquel en el que las excavaciones tienen una profundidad mayor de los 5.00 m y en los cuales se recomienda el método de las zanjas ademadas.

Este método, sin embargo, presenta grandes inconvenientes, el mayor de los cuales es el tiempo necesario para excavar, sobretodo tratándose de áreas considerables. Además el costo del ademe es algo que también es digno de tomarse en cuenta, así como el riesgo de los trabajos, pues siempre se puede tener el caso de que falle el ademe, causando pérdidas y desgracias.

En el caso de las zanjas ademadas, se acostumbra abatir el nivel freático por medio de pozos de bombeo, y una vez excavada en seco la zanja, se construyen drenes en la --

parte inferior de la misma, con el fin de recoger las filtra--- ciones y llevarlas al cárcamo más cercano, tal como se muestra en la figura 35.

En esas condiciones, el flujo del agua, es de abajo - hacia arriba, tal como se indica en la misma figura, y tienden las fuerzas de filtración a incrementar los bufamientos propios del terreno, los cuales de por sí pueden ser grandes, debido a la disminución de la resistencia al corte del material ocasiona da por la descarga.

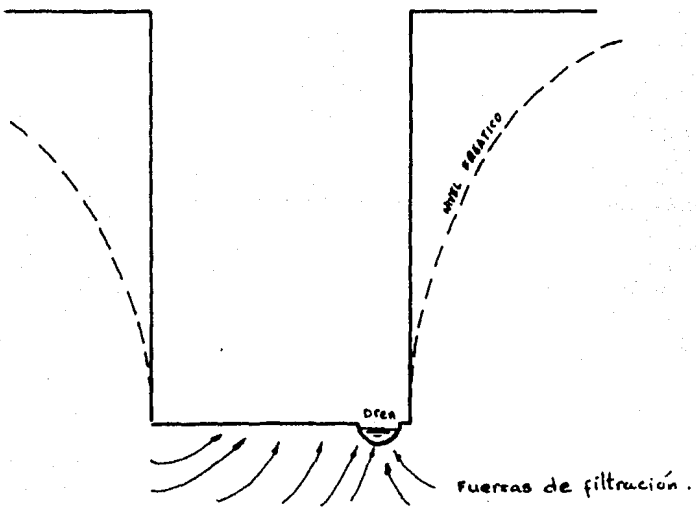


Fig. 35.- EXCAVACION TIPICA POR MEDIO DE ZANJAS ADEMADAS. (No se indica el ademe)

Se ha observado, tanto en el estudio de la teoría --- como en los resultados de las pruebas efectuadas por Leo Casa - grande, que la electrósmosis incrementa la compresión en los materiales arcillosos en los cuales se desarrolla, y causa tensiones en el agua de los poros de dichos materiales. Esta propiedad

importantísima de la electrósmosis, se puede aprovechar con el-fin de reducir a un mínimo los bufamientos producidos por la -- descarga del material arcilloso en excavaciones profundas, que-ocupan áreas grandes.

En la figura 36, se muestra esquemáticamente, el corte de una excavación, en la cual se ha aplicado la electrósmosis y se indica la dirección del flujo del agua.

Nótese que la electrósmosis va a ayudar al control de los bufamientos de dos maneras:

1) Sobrecarga previa a la excavación.-

Al aplicar la electrósmosis a un suelo, y abatir el nivel freático en él hasta la -- profundidad deseada de acuerdo con el proyecto, el peso del-material que está bajo el nivel freático original, y sobre - el nuevo nivel, y que anteriormente estaba sumergido en el-- agua freática, carga ahora sobre el terreno de la parte inferior, con lo cual le causa una prefatiga, o sobrecarga previa a la excavación, con lo cual, al excavar y quitar ese mate - rial, los bufamientos se van a reducir. Este mismo efecto - puede lograrse abatiendo el nivel freático sin necesidad de-electrósmosis, pero en ese caso el tiempo empleado se incrementa considerablemente, como ya se estudió.

2) Inversión de la dirección del flujo.-

Como se procura que la profundidad máxima de los electrodos sea notablemente menor que la de los tubos ranurados para bombeo, como se muestra - en la figura anterior, el flujo electrosmótico del agua, del-ánodo al cátodo, se produce de dentro de la excavación hacia fuera, y de arriba hacia abajo, con lo cual las fuerzas de -

filtración son de sentido contrario a las que se tenían en el-- caso de las zanjas, y debido a la tensión creada en el agua de- los poros, reducen considerablemente el valor de los bufamien - tos.

Además del control de los bufamientos, el abatimiento del nivel freático tal como se muestra en la figura 36, por el- método de la electrósmosis tiene otra gran ventaja, y es que abate el nivel precisamente en el área donde se requiere que sea - abatido, con lo que el bombeo es más eficaz; en efecto, el área limitada por los cátodos (bombas), y en cuyo interior están los ánodos, tiene un flujo electrosmótico de adentro hacia afuera,- mientras que el agua exterior vendrá hacia las bombas con gra - diente hidráulico, que es mucho más lento, por lo que el abati- miento fuera del área deseada es mínimo, con lo cual se afectan menos las construcciones vecinas.

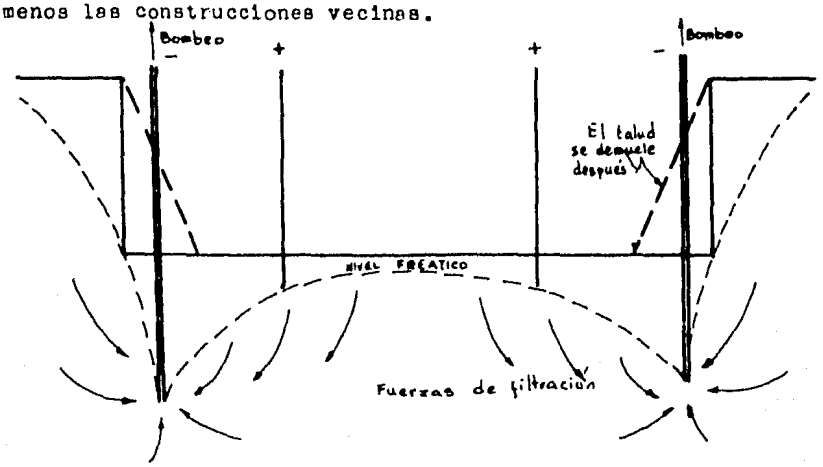


Fig. 36.- EXCAVACION TIPICA POR MEDIO DE LA ELECTROSMOSIS.

Observación de los bufamientos ocurridos al excavar en el conjunto Aristos.-

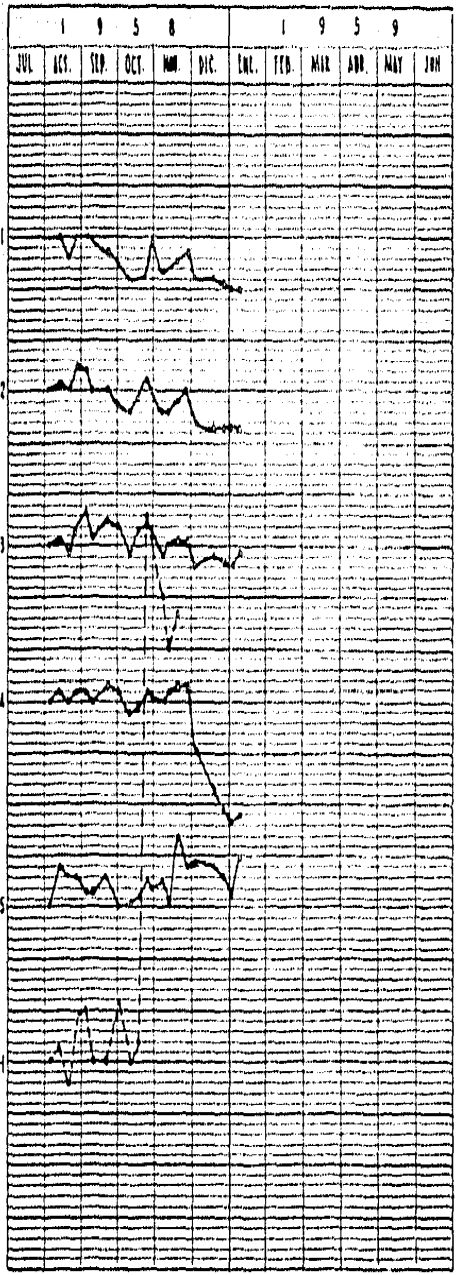
Se dijo anteriormente que los bufamientos máximos calculados en el centro del área de cada edificio, eran los siguientes:

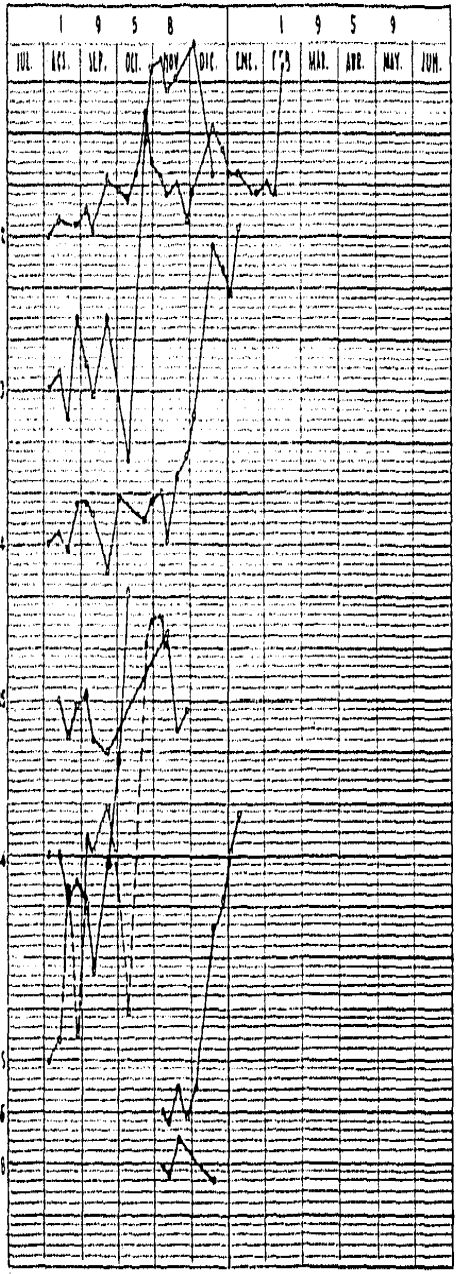
Edificio C: 15 cm.

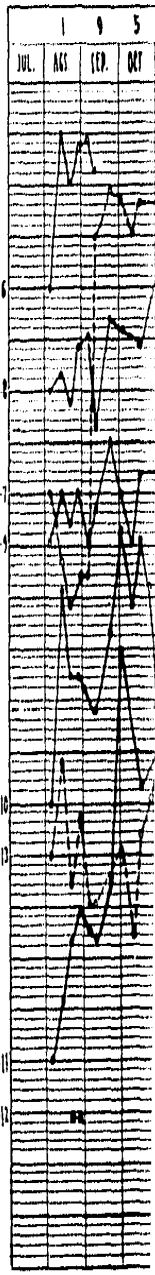
Edificio C: 12 cm.

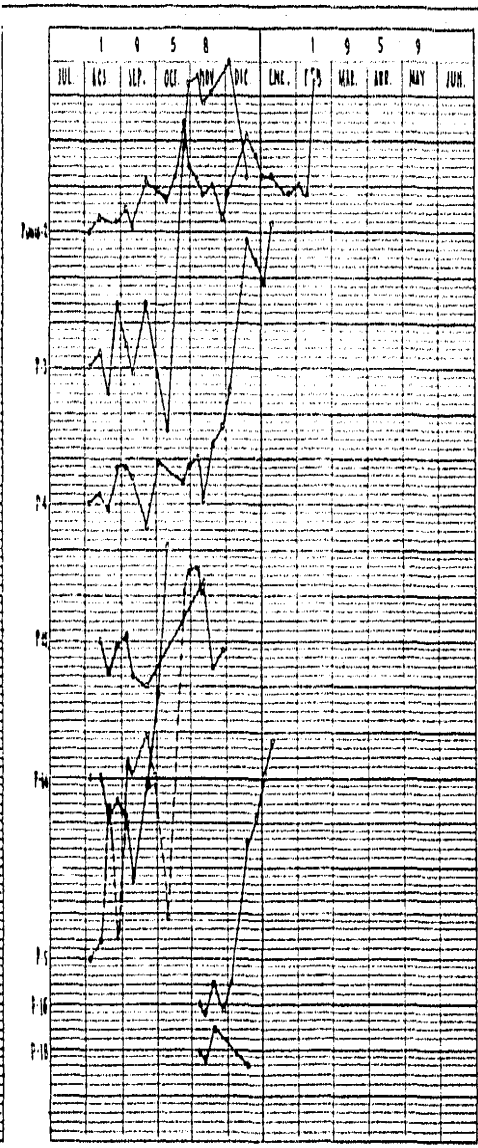
Edificio A: 15 cm.

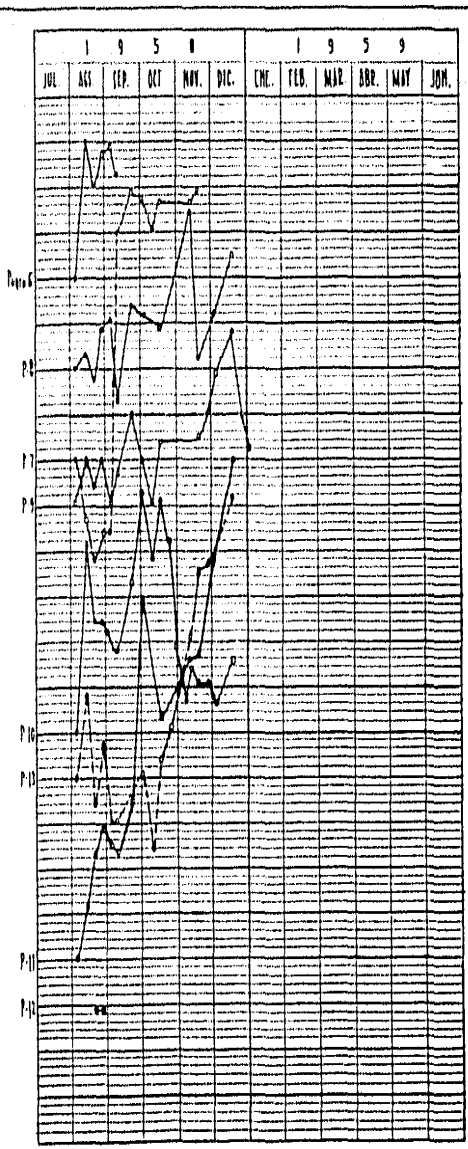
Ya en la realidad, se observó que después de la excavación, los bufamientos máximos ocurridos en el edificio C, -- donde no se utilizó la electrósmosis fueron del orden de 12 cm mientras que en el B, excavado con ayuda de la electrósmosis,- fueron de 4.5 cm, tal como se muestra en las tablas de registro de niveles, en páginas anteriores. *(VER FIGURAS A, B, C y D).*

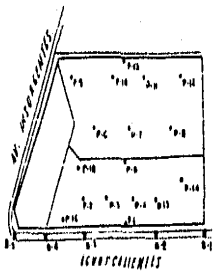

1958
1959
JUL.
AGS.
SEP.
OCT.
NOV.
DIC.
ENE.
FEB.
MAR.
ABR.
MAY.
JUN.


1958
1959
JUL.
AGS.
SEP.
OCT.
NOV.
DIC.
ENE.
FEB.
MAR.
ABR.
MAY.
JUN.


1959
JUL.
AGS.
SEP.
OCT.







Croquis de Localización

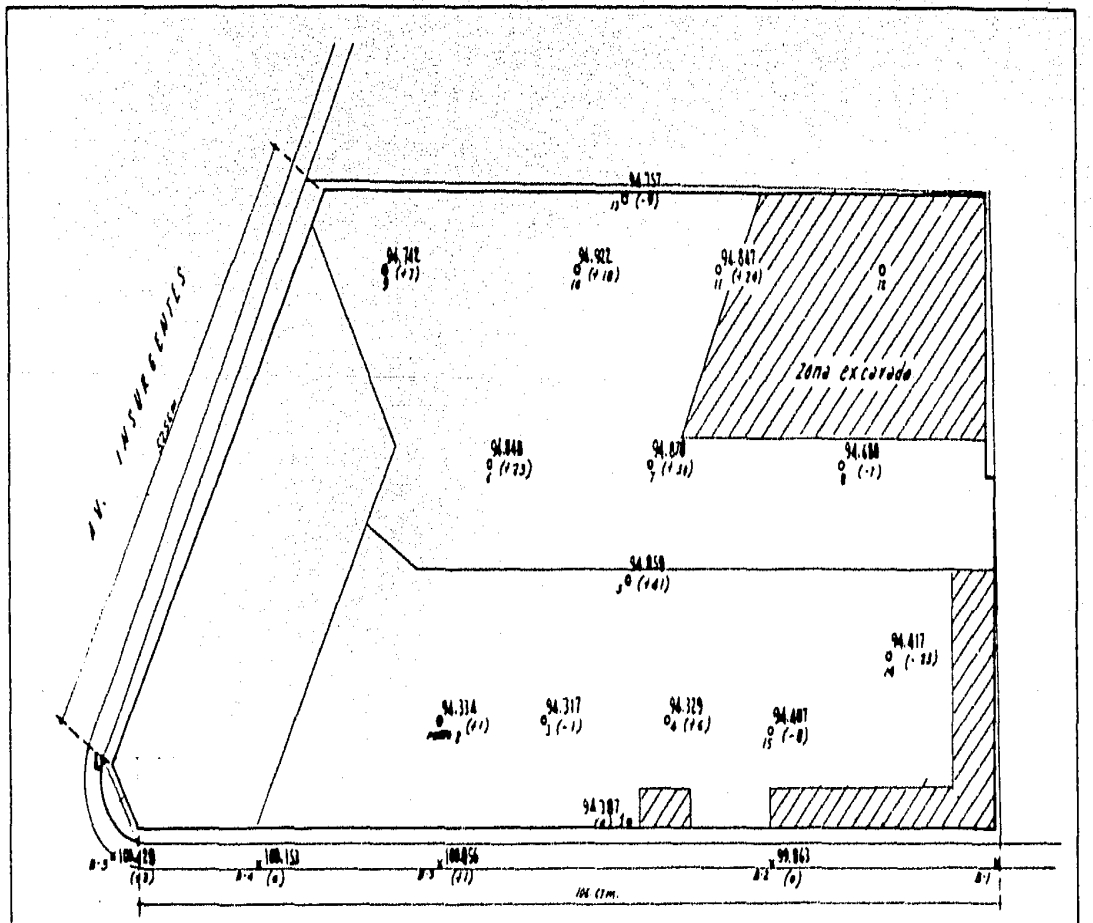
NOTA:
Despiece mostrado en líneas,
1cm : 1cm.

U.N.A.M.
ESCUELA NACIONAL DE INGENIEROS

TESIS PROFESIONAL DE:
JOSE ANTONIO NIETO.

Bancos Profundos

MEXICO-D.F. | FIG. A



NOTA :

Los números entre paréntesis indican el desplazamiento vertical observado, en milímetros.

\+ Expansión

\- Asentamiento

NOTA :

Periodo de observación:
Del 4 de agosto de 1958 al 10 de septiembre de 1958

U.N.A.M.

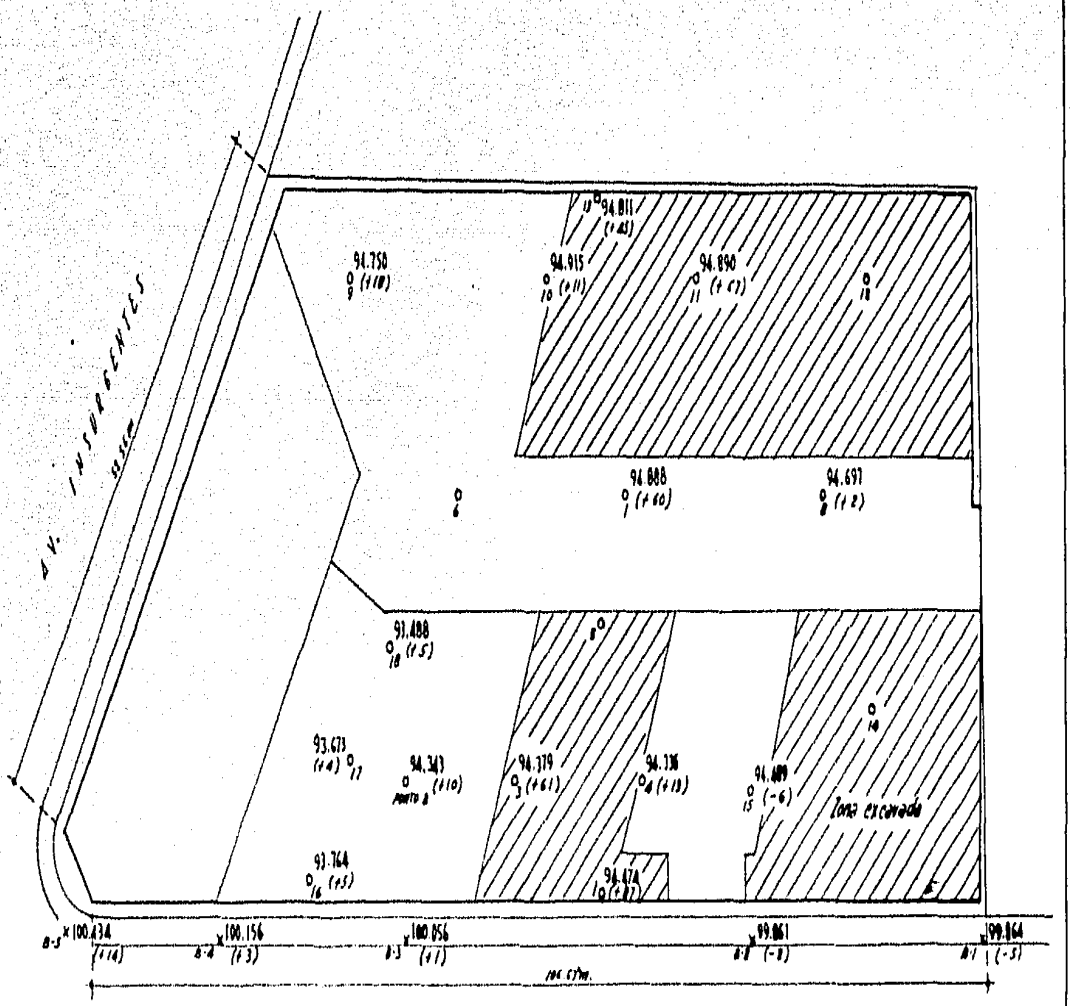
ESCUELA NACIONAL DE INGENIEROS

TESIS PROFESIONAL DE

JOSE ANTONIO NIETO

BANCOS PROFUNDOS

MEXICO, D.F. | FIG. 8



NOTA :

Los números entre paréntesis indican el desplazamiento vertical observado en milímetros

\+ Expansión

\- Asentamiento

NOTA :

Período de observación:
Del 4 de agosto de 1958 al 19 de Noviembre de 1958.

U.N.A.M.

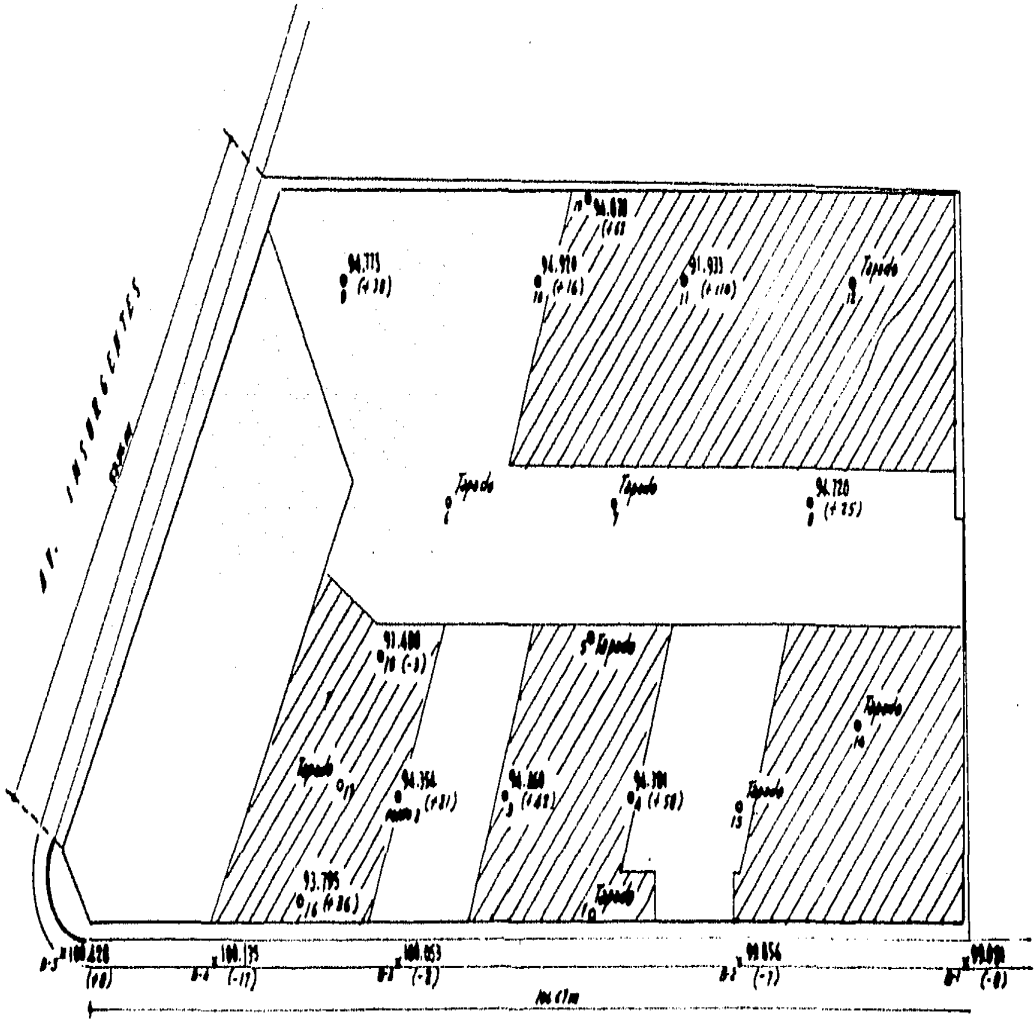
ESCUELA NACIONAL DE INGENIEROS.

TESIS PROFESIONAL.

JOSE ANTONIO NIETO

BANCOS PROFUNDOS

MEXICO, D.F. | FIG. 6



NOTA:

Los números entre paréntesis indican el desplazamiento vertical observado, en milímetros.

\+ Expansión

\- Asentamiento

NOTA:

Período de observación:
del 4 de agosto de 1958 al
18 de diciembre de 1958.

U.N.A.M.
ESCUELA NACIONAL DE INGENIEROS

TESIS PROFESIONAL DE
JOSE ANTONIO NIETO

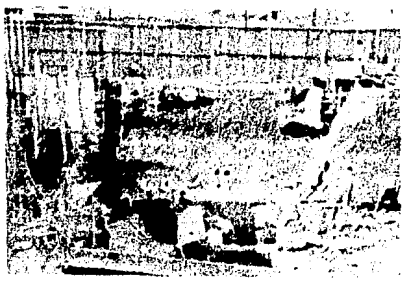
BANCOS PROFUNDOS

MEXICO, D.F. | FIG. D

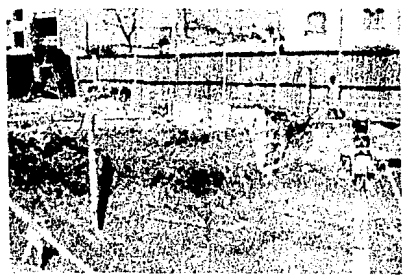
VII.- LA ELECTROSMOSIS Y LA ESTABILIZACION DE TALUDES.-

Estudio del equilibrio de taludes sin electrodos, y con ellos.- Un aspecto muy importante de la electrósmosis aplicada a los fines de la Ingeniería, es el incremento de resistencia al -- corte produce en los suelos arcillosos, y que constituye una notable ayuda a la estabilización de los taludes en las excavaciones a cielo abierto. En las excavaciones del conjunto -- Aristos, así como en la excavación para el cárcamo de las bombas de la estación de bombeo del río Consulado, se estabilizaron los taludes con la ayuda de la electrósmosis, obteniéndose resultados muy satisfactorios.

En las figuras siguientes se muestran algunos casos de taludes estabilizados por medio de la electrósmosis en el cuerpo B, especialmente en zonas cercanas a zanjas que se habían atacado previamente.



Zona I, cuerpo B.



Zona II cuerpo B.

El principio en que se base ésto no puede ser más sencillo. Si en la parte superior de un talud por excavar se hincan electrodos de una longitud mayor que la profundidad de la --

excavación, y se conectan alternadamente al ánodo y al cátodo,- al hacer pasar una corriente eléctrica por los electrodos, el - agua de los poros se mueve de los ánodos hacia los cátodos. Este movimiento dá por resultado una tensión en el agua de los -- cercanos al ánodo, y un aumento de agua en las cercanías del cátodo. Si tomamos en consideración que se está bombeando a medida que se efectúa la excavación, y que una vez terminada ésta,- se sigue bombeando con la ayuda de drenes en el fondo de la misma, vemos que agua que se acumula en los cátodos, es sacada por bombeo, y que la tensión en los poros va aumentando gradualmente a medida que se extrae más agua, siendo siempre mayor cerca de los ánodos, y menor cerca de los cátodos, Sabemos también -- que al extraer el agua entre dos partículas arcillosas, a medida que disminuye el contenido de ésta, se va reduciendo el ra - dio de los meniscos que el agua absorbida forma en la unión de- dichas partículas. Mientras menor es el radio de un menisco, es mayor la tensión superficial que pueden desarrollar éstos, con- lo que se incrementa notablemente la cohesión entre las partículas .

El mecanismo de incremento de resistencia explicado-- arriba, nos explica el por qué algunos taludes, calculados con- los valores de c, determinados en el laboratorio, y que debían- haber fallado durante la excavación del conjunto Aristos, se -- mantuvieron en pie, sin el menor indicio de falla.

Otra razón del por qué aumente el factor de seguridad en taludes de excavaciones estabilizadas con electrósmosis, es- que como los bufamientos son mínimos, la resistencia al corte - de los suelos que se encuentran abajo del fondo de la excavación no sufre ninguna disminución por expansión de las arcillas vol-

cánicas, sino que por el contrario, se incrementa notablemente en las cercanías de los electrodos positivos. Este incremento se debe a las razones ya mencionadas.

En el conjunto Aristos, se hizo el estudio de la estabilidad de los taludes correspondientes a colindancias con predios vecinos, y de los que quedaban en el alineamiento de las calles de Aguascalientes y de Insurgentes. El más importante de todos los casos observados, fué el de la colindancia del Cuerpo C, con una casa vecina en el lindero Sur del edificio. Ese talud, cuya altura era de 3.50 m, y que además tenía una sobrecarga de 2.0 ton/m^2, se analizó considerando el valor del talud de 0.5 : 1, y se vió que fallaría al hacer la excavación. Para evitar esa falla, se hincaron electrodos en la parte superior como se muestra en la figura 37. A pesar de que el talud que se dejó al excavar fué de 0.4 : 1, no hubo el menor indicio de falla ni de bufamiento del fondo, ni se afectó la casa vecina.

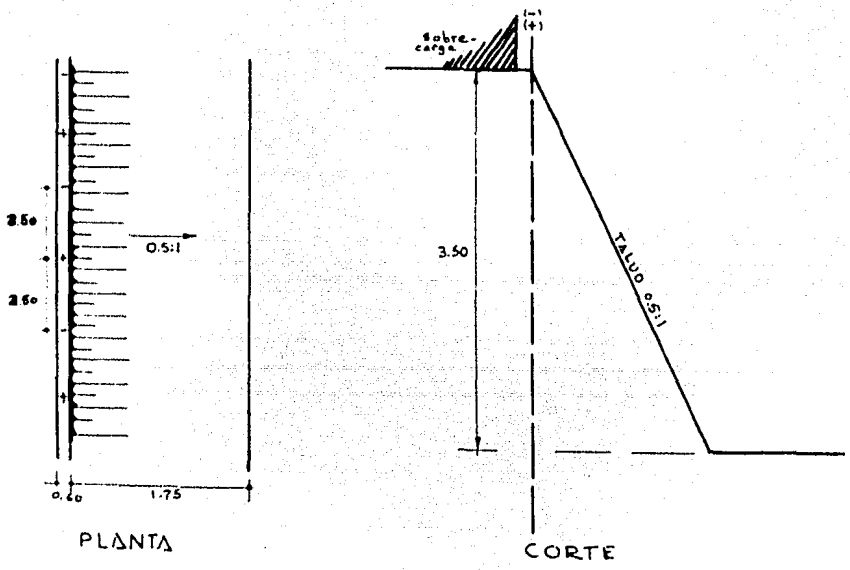
En la figura 38 se muestra el análisis de la estabilidad del talud por el método Sueco, el factor de seguridad fué de 0.813 con talud de 0.5 : 1, así que con 0.4 : 1, debió ser menor.

Como el talud no falló, su F. S. mínimo debió ser 1, es decir, el valor de c se incrementó a 3.07, es decir, un incremento del 23% sobre su valor original, que era 2.5, sin tomar en cuenta que el valor real del talud fué 0.4 : 1.

$$F.S. = \frac{(N - s)\tan\varphi + c \cdot L}{\Sigma T + W \cdot d}$$

pero $\varphi = 0$ y $s = 0$.

$$\therefore \quad F.S. = \frac{c \cdot L}{\Sigma T + W \cdot d}$$



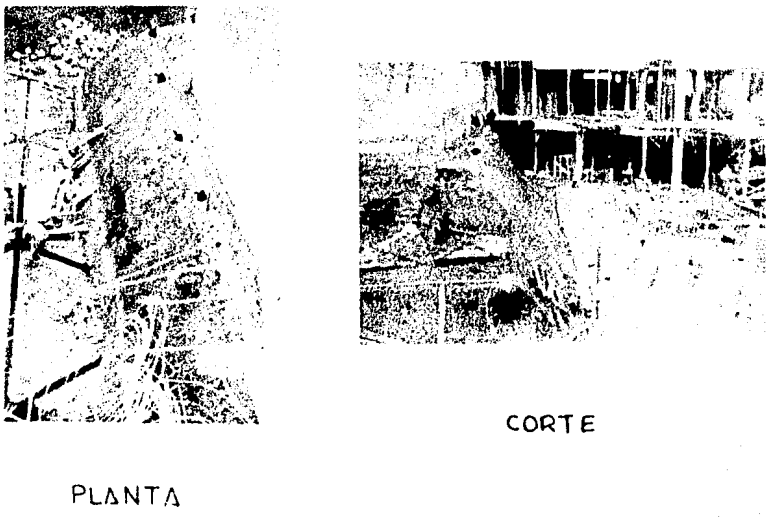


FIG. 37.- COLOCACION DE LOS ELECTRODOS.

γ_{sat} = Peso volumétrico del material saturado = 1.5 ton/m^3.

c = Cohesión = $\frac{q_u}{2}$ = 2.5 ton/m^2.

L = Longitud del arco de círculo dentro del terreno.

T = Fuerzas tangenciales.

W = Sobrecarga

d = Distancia de la sobrecarga al centro del círculo.

$$F.S. = \frac{2.5 * 5.10}{5.23 * 10.42} = \frac{12.78}{15.65} = 0.813$$

∴ El talud falla.

Para que no falle, se requiere que F. S. ≥ 1

Si F. S. = 1, se tiene:

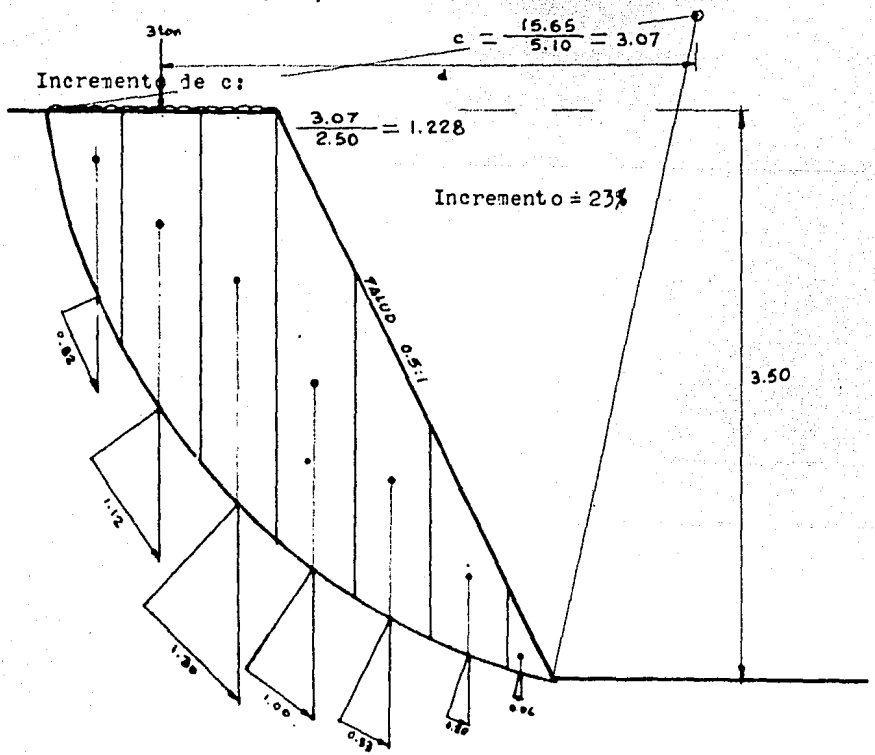


Fig. 38.- ANALISIS DE ESTABILIDAD DEL TALUD.

ESTABILIZACION DEL FONDO DE UNA EXCAVACION.-

Otro ejemplo de la ayuda que la electrósmosis presta a la estabilidad de los suelos, fué la excavación de la planta de bombeo del Río Consulado.

Anteriormente a esta excavación, se había observado que en las zanjas para alojar el colector de la calle Canal del Norte se habían presentado fallas por el fondo de la excavación el cual había subido hasta 1 m de su nivel original, formándose grietas paralelas a ambos lados de la zanja y a 4 m de la orilla de las mismas. La zanja tenía 3 m de ancho y 8 m de profundidad, y la resistencia al corte calculada en el momento de la falla resultó menor que la que tenía antes de la excavación. Esta disminución se cree que fué originada por los bufamientos debido a la descarga causada al excavar el material.

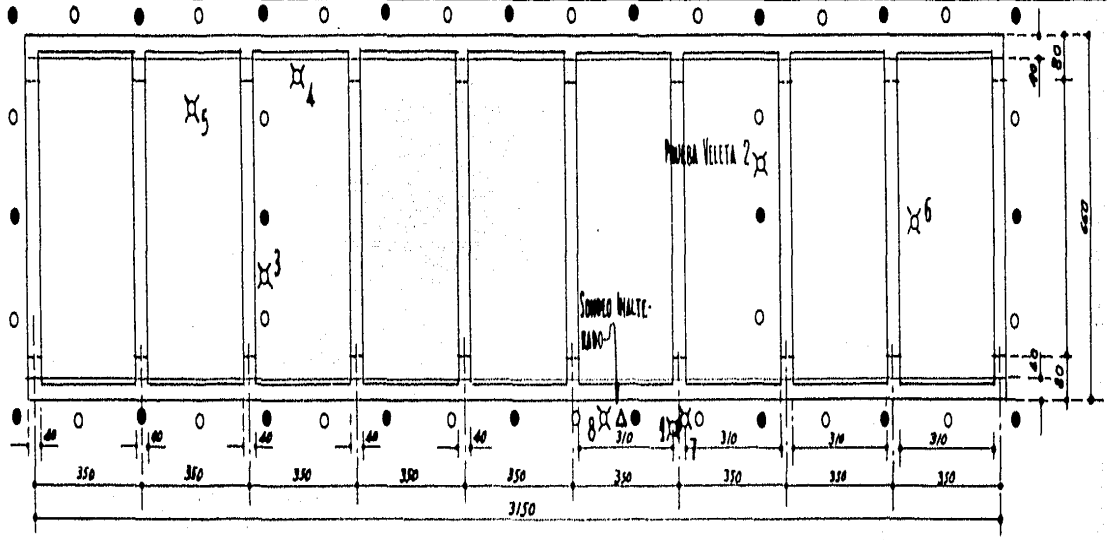
Entonces, como el cárcamo que se planeaba construir era de 5 m de ancho, 32 m de largo y 11 m de profundidad, se hizo la estabilización del fondo por el método electrosmótico. Al efecto se instalaron ánodos y cátodos como se muestra en la figura 39.

Se vió que el valor de la resistencia al corte mínima para conservar el equilibrio, debía ser de 1.5 ton/m^2, y con un F.S. de 1.5, la resistencia requerida debía ser de 2.25 ton/m^2.

Por medio de la veleta, se determinó la resistencia al corte en el pozo 1 antes de la excavación, y se vió que era del orden de 5.80 ton/m^2, tal como se muestra en la figura 40.-

A los 5 m de profundidad, una nueva determinación de esa resistencia en el pozo 2 nos dio 4.20 ton/m^2.

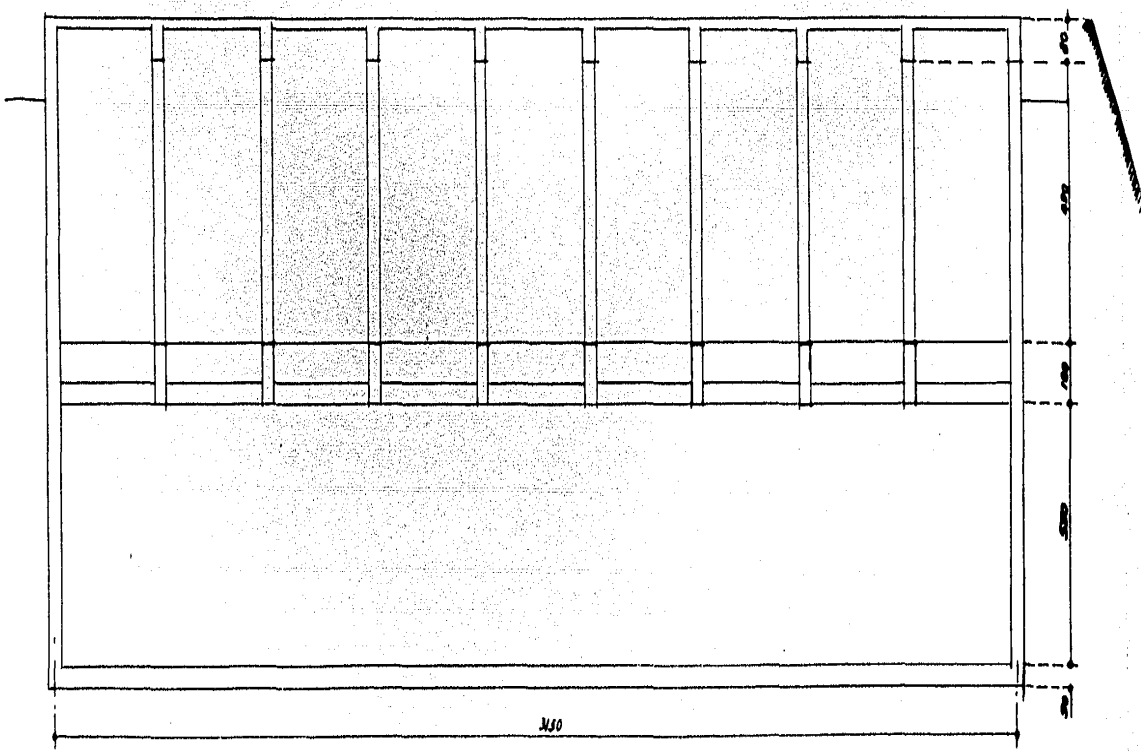
Después de aplicar el tratamiento y de excavar se hi-

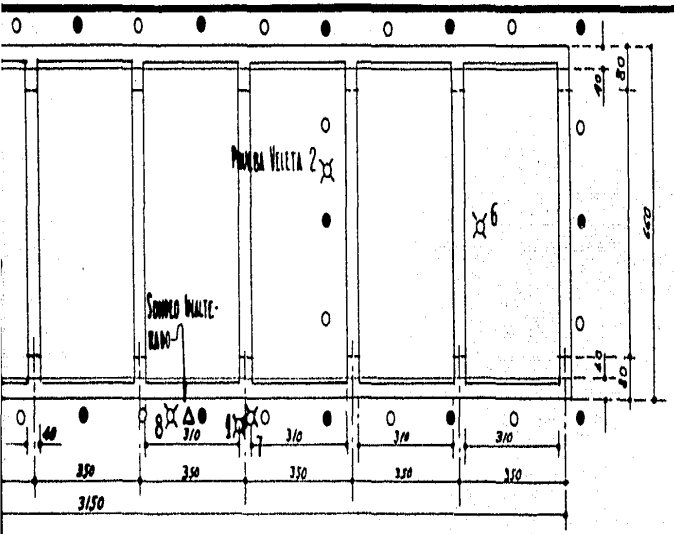


PLANTA GENERAL

ESC. 1:100

SECCION LONGITUDINAL



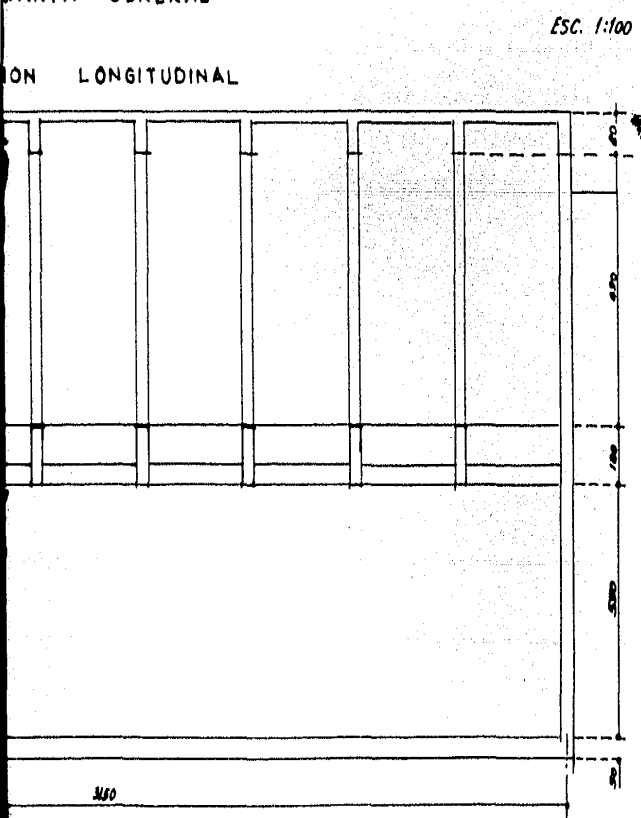


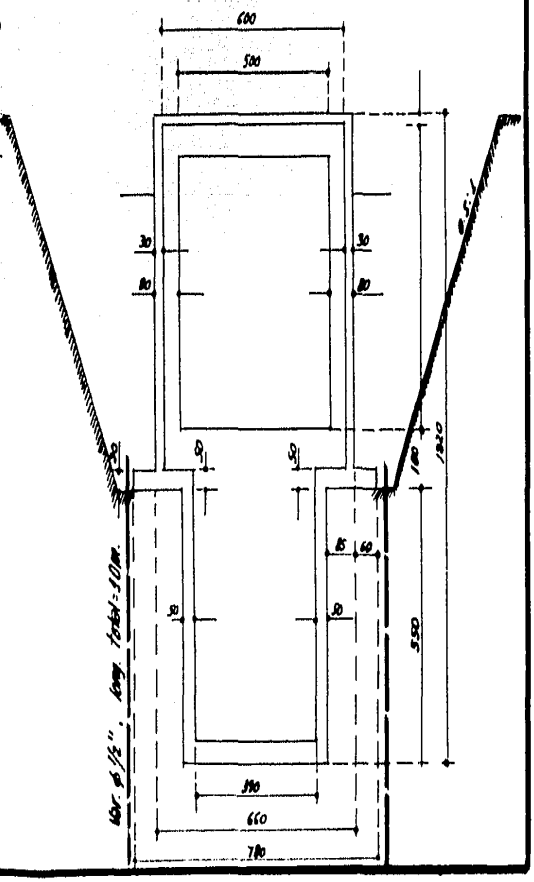
PLANTA GENERAL

ESC. 1:100

SECCION LONGITUDINAL

SECCION TRANSVERSAL





- Electrodos positivos
- Electrodos negativos
- Prueba veleta
- Sondeo Inalterado

U. N. A. M.

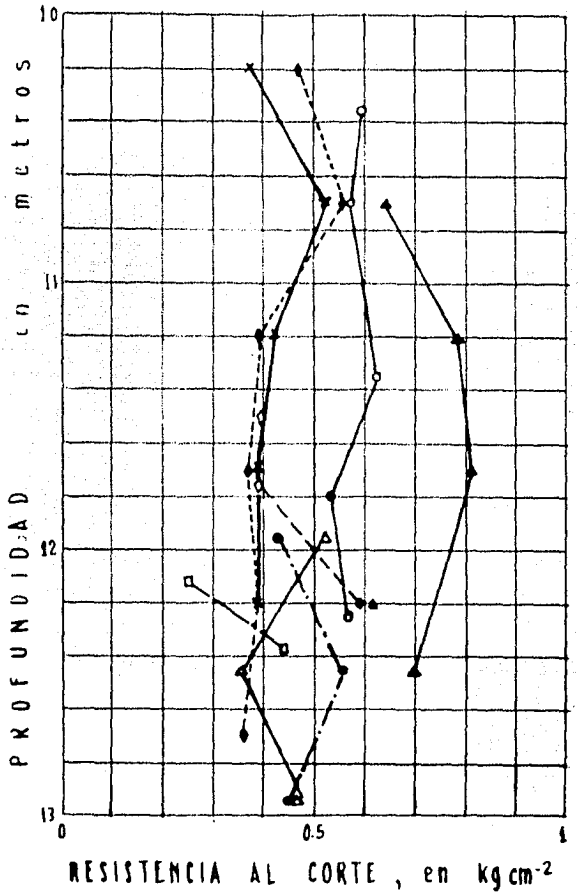
ESCUELA NACIONAL DE INGENIEROS

TESIS PROFESIONAL DE:

JOSE ANTONIO NIETO.

ESTABILIZACION ELECTROSMOTICA

MEXICO D.F. | FIG. 39



- ○ POZO 1
- × POZO 2
- △ POZO 3 (ENTRE ELECTRODOS)
- ● POZO 4 (RETIRADO ")
- □ POZO 5 (" " RECIEN EXCAVADO)
- ◇ POZO 6 (CENTRO ")
- ▲ POZO 7 (A 0.5 m DE UN POSITIVO)
- ◆ POZO 8 (ENTRE ELECTRODOS)

U.N.A.M.

ESCUELA NACIONAL DE INGENIEROS.

TESIS PROFESIONAL DE:

JOSE ANTONIO NIETO.

RESULTADOS GRAFICOS.

MEXICO. D.F.

FIG. 40.

cieron nuevas determinaciones de esa resistencia en los pozos - 3, 4, 5, 6 y 7, arrojando valores de 4.00 a 8.00 ton/m^2, excepto en el pozo 5, donde se halló el valor de 2.5 ton/m^2.

Entonces se observa, que en la mayoría de los casos,- no sólo no disminuyó la resistencia al corte, sino que se man-- tuvo constante, y cerca de los electrodos positivos se incrementó en un 20% . Al desarrollar todos los trabajos se tuvo un factor de seguridad superior a 2, excepto en las cercanías del pozo 5.

Aquí se pueden apreciar también las ventajas de la electróosmosis para controlar los bufamientos en las excavaciones pues en este caso fueron del orden de 10 cm.

VIII.- VENTAJAS OBSERVADAS.-

Como ya se ha estudiado con todo -- detalle tanto la teoría de la electrósmosis, como las aplicaciones prácticas de este procedimiento en la estabilización del -- suelo en cimentaciones en la ciudad de México, ahora me limitaré solamente a ennumerar las ventajas observadas en la aplicación de este procedimiento. En este capítulo, además de mis observaciones personales, consignaré los datos que me fueron aportados mediante una encuesta realizada entre diversos ingenieros que han trabajado con la electrósmosis, así que se incluye el - punto de vista tanto del contratista, como del dueño de la o--- bra, y del director de la misma.

Las principales ventajas derivadas del procedimiento- de estabilización electrosmótica de los suelos son:

1) Rápido abatimiento del nivel freático.
2) Estabilización de taludes por el incremento de la cohesión.
3) Disminución del valor de los bufamientos observados en el -- fondo de las excavaciones.
4) Mayor facilidad de excavación, pues es posible utilizar ma-- quinaria pesada.
5) Mayor rapidez de excavación.
6) Mayor seguridad en los trabajos.
7) Menos errores en los trazos, debido a que se tiene toda el á reas descubierta, a diferencia del método de zanjas, en donde sólo se descubren pequeñas zanjas cada vez.
8) Como se cuela la losa de cimentación de una sola vez, se evi tan diferencias de nivel entre las diferentes secciones, como puede ocurrir en el método de zanjas.

IX.- INCONVENIENTES ENCONTRADOS.-

En este capítulo se incluyen - los resultados de mis propias observaciones durante la aplica-- ción de la electrósmosis, como los datos proporcionados por la- encuesta.

En la aplicación del método de electrósmosis a la estabilización de las cimentaciones en la ciudad de México, se observaron los siguientes inconvenientes:

1) Necesidad de personal especializado, tanto para efectuar las instalaciones eléctricas, como para efectuar las diferentes- lecturas de aparatos durante la aplicación del método.
2) Imposibilidad de conocer el incremento de resitencia al corte en las arcillas, por lo que no se puede calcular el factor de seguridad en los taludes.
3) Peligro relativo para el personal de excavación y afine, debido a la corriente eléctrica en los electrodos.
4) Dificultades en las operaciones de extracción de tubos ranurados y electrodos, después de aplicada la electrósmosis.
5) Hay pocos datos experimentales correctos que nos permitan determinar con toda exactitud el abatimiento del nivel freático y el tiempo necesario de bombeo.

X.- ANALISIS COMPARATIVO DEL COSTO DE EXCAVACION POR M^3.

Método de zanjas.

Método de electrósmosis.

En el estudio de los costos en Ingeniería encontramos la clasificación siguiente:

1.- COSTO DIRECTO.-

- a) Materiales
  - De construcción
  - Accesorios.
- b) Mano de obra
  - Especializada.
  - No especializada.
- c) Equipo
  - Amortización o renta.
  - Reparaciones
  - Refacciones
  - Consumos
  - Transportes

2.- COSTO INDIRECTO.-

- a) Administración en obra
  - Instalaciones
  - Personal
    - Técnico
    - Administrativo
    - De vigilancia
  - Transportes
  - Servicio Médico
  - etc.

b) Administración central { Oficinas
Personal
Impuestos
Seguros, licencias
Servicio legal, etc.

3.- IMPREVISTOS.-

4.- FINANCIAMIENTO.-

En el estudio comparativo de costos de excavación por m^3 por el método de zanjas ademadas y por el método de electróosmosis, voy a considerar que el costo indirecto, los imprevistos y el financiamiento son iguales para cualquiera de los dos métodos, y analizaré solamente el costo directo.

Como caso particular voy a referirme exclusivamente a la excavación de la zona I del edificio A, que se realizó por el método de electróosmosis, y compararé el costo, con el que se hubiera tenido de haberse efectuado por medio de zanjas ademadas, considerando que en este último caso, la excavación no podría efectuarse por medio de pala mecánica, sino exclusivamente a base de palas y chundes.

a) Método de zanjas ademadas.-

En el plano VI se muestra la localización de las zanjas que convendría excavar, y que incluirían a los ejes I, II, III, IV, y H, J, K, L y ya que en ellos la profundidad de excavación es mayor que en los ejes 1, 2, 3, 4. El edificio B, que empieza a partir del eje 4, ya está terminándose de construir, por lo que no se deja talud de ese lado.

Supondremos zanjas de 2.50 m de ancho y una profundidad promedio de 5.92 m. Después de coladas las trabes que van dentro de las zanjas, se excava el material restante.

En los muros perimetrales 1' y L, se ademaría por medio de precolados de concreto, tal como se indica en las especificaciones, tanto para la excavación en zanjas, como en la electrósmosis.

El ademe en todos los demás casos se haría con madera de 1 1/2" x 8" x 10', colocada en sentido horizontal, y formando un tupido completo, del nivel 0.00 hasta el fondo de la zanja. Cada 1.50 m colocaríamos postes verticales de 8" x 8" hasta el fondo de la excavación, como se muestra en la figura 41, hincándolos unos 40 cm bajo el nivel del fondo de la misma.

Se pondrían troqueles formados por polín de 4" x 4" x 2.00 m, bien acuñados, y clavados a los postes.

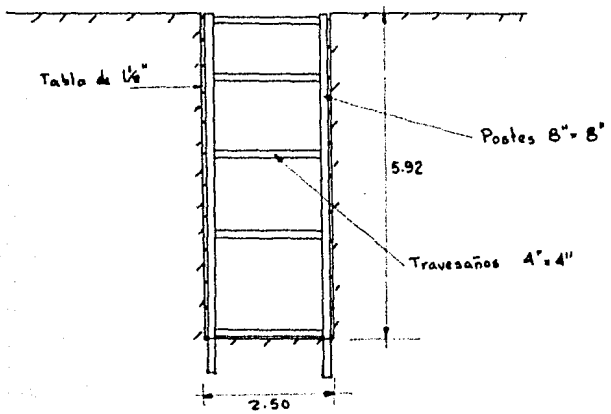


Fig. 41.- CORTE DE UNA ZANJA TIPICA.

1.- Estudio del costo de excavación de 5 m lineales de zanja.-

a) Materiales:

Tabla: 60×1 1/2"×8"×5.00 m = 60×1.5×8×5:(12×3.28) = 990 ft-tablón

Polín: 17×4"×4"×2.00 m = 17×4×4×2 : (12×3.28) = 150 ft-tablón

Viga: 7×8"×8"×6.40 m = 7×8×8×6.40 : (12×3.28) = 740 ft-tablón

1,880 ft-tablón

Desperdicio (10%) = 188 ft-tablón

2,068 ft-tablón

Clavo de 6": 5 Kg x 2,068 : 1,000 = 10 Kg

Cuñas: 34 piezas.

Fleje: 7 x 1.60 m = 11.20 m

A toda la madera aquó consignada se le deben considerar solamente dos usos, pues se acaba muy pronto debido a la humedid y a las intensas presiones que soporta.

b) Mano de Obra:

Volumen por excavar = 5×2.50×5.92 = 74.00 m^3

Capacidad de un chunde = 20 dm^3

Número de chundes = $\frac{74,000}{20}$ = 3,700 chundes.

Tiempo de carga y descarga = 2 minutos.

Tiempo de viaje ida y vuelta = 4 minutos.

En 5 m lineales, se utilizarán 3 peones con pala, y 9 con chunde.

Cada chundero debe hacer $\frac{3,700}{9}$ = 411 viajes.

Si la eficiencia es de 70%, se tiene:

Tiempo de excavación = 411×6×0.60 = 1,730 minutos.

= 29 horas.

Se requieren también 2 hombres ademando la zanja, --- trabajando sólo la mitad del tiempo, es decir, 14 horas, y se -

considerará 6 horas de trabajo de un cabo.

c) Equipo para excavación:

9 chundes.

3 palas.

2 caminnes de 5 yd^3/de capacidad.

Análisis de un volteo de 5 yd^3:

Amortización horaria	13.12
Combustibles y lubricantes	3.25
Reparaciones menores	1.20
Chofer	5.00
	$ 22.57/hora

d) Costo de la excavación de 5 m lineales.-

Materiales:

Madera: $\frac{2,068}{2}$ ft-tab. a 1.10 = 1,140.00

Clavo: 10 Kg a 2.85 = 28.50

Cuñas: 34 piezas a 0.10 = 3.40

Fleje: 11.20 m a 0.40 = 4.48

$ 1,176.38/

Mano de obra:

Horas-peón: 376 horas a 1.75 = 657.00

Horas-cabo: 6 horas a 2.25 = 13.50

$ 670.50.

Equipo:

Chundes: $\frac{9}{10}$. 85.0 = 7.65

Palas: $\frac{3}{10}$ a 13.50 = 4.05

Camiones: 2 29 a 22.57 = 1,310.00

$ 1,321.70

Total $ 3,168.58

Volumen por excavar = 74.00 m^3

Costo pot m^3 = $\frac{3,168.58}{74.00}$ = $ 42.80

2.- Estudio del costo de excavación de 74.00 m^3 a cielo abierto

a) Materiales.-

No lleva.

b) Mano de obra.-

Igual al caso anterior.

c) Equipo.-

Igual al caso anterior.

d) Costos.-

Mano de obra	670.50
Equipo	1,321.70
	$ 1,992.20

Costo de excavación por m^3 = $\frac{1,992.20}{74.00}$ = $ 27.00/m^3

3.- Costo de bombeo.-

Se ha estimado que el abatimiento del nivel freático hecho con bombeo solamente, hasta la profundidad requerida por la excavación, sería de unos dos meses. Vamos a considerar en este caso 50 días de bombeo, y supondremos que se requirió instalar 7 bombas centrífugas de 3", con motor de gasolina.

La renta mensual de cada bomba es : $ 632.00

Análisis de una bomba de 3".-

Amortización horaria	0.87
Combs. y lubricantes	0.60
Reapraciones menores	0.20
	$ 1.67/hora.

Costo de bombeo total = 7×1.67×50×24 = $ 14,000.00

Volumen de excavación total = 2,120 m^3

Costo de bombeo por m^3 = $\frac{14,000.00}{2,120.00}$ = $ 6.60/m^3

Se promedian los costos de excavación con zanjas y a cielo abierto, de acuerdo con el volumen que se excava por cada uno de estos métodos, y ese promedio se suma con el costo de -- bombeo; la suma nos dá el costo total de excavación por m^3 por el método de zanjas ademadas.

COSTO TOTAL DE EXCAVACION POR m^3 CON EL METODO DE ZANJAS ADEMADAS: $ 47.60

4.- Excavación a cielo abierto, abatiendo el nivel freático con electrósmosis.-

En el caso de que se use la electrósmosis, - es necesario dejar taludes en los linderos de Insurgentes y de Aguascalientes, y éstos excavarlos después de colada la losa de planta baja, con el fin de troquelar los precolados contra las columnas del sótano.

Volumen excavado a cielo abierto	2,010 m^3
Volumen excavado en taludes	110 m^3
	2,120 m^3

ε) Materiales.-

Tubo de fierro negro, de 3" = 17^12.00 =	204.00 m
Tubo de fe. galv. de 3"	78.00 m
Coples de 3", galvanizados.	51 pzas.
Tubo de 1 1/4", galv. = 2"17^13.00 =	442.00 m
Codos de 1 1/4"	34 pzas.
Puntas Jacuzzi.	17 pzas.

Canalones de lámina		90.00 m	
Cable eléctrico de cobre		180.00 m	
Mangueras de 1 1/4"		170.00 m	
Varilla de 1":	Anodos	136.00 m	
	Catodos	408.00 m	
		544.00 m	2,176.00 Kg.

b) Mano de obra.-

Hombres perforando pozos	3*17	=51 días-hombre.
" colocando varilla	6*5	=30 días-hombre.
" instalando tubería	6*3	=18 días-hombre.
" instalando puntas	6*2	=12 días-hombre.
" instalando canalones	6*1	= 6 días-hombre.
Operador generados	2*10	=20 días-operador.
" bombas	2*10	=20 días-operador.

c) Equipo.-

Un generador de C.D. de 3 K-w; durante 14 días.

Amortización horaria.	12.25
Energía eléctrica.	10.00
Reparaciones menores.	1.00
	$ 23.25/hora.

Dos bombas de 3", con motor de gasolina.

Amortización horaria	2.04
Reparaciones menores	1.00
Energía eléctrica	2.00
	$ 5.04/hora.

Draga de arrastre de 3/4 yd^3, montada en orugas.

Amortización horaria	78.50
Combs. y lubricantes	5.72
Reparaciones menores	3.25
	$87.47/hora.

Producción horaria de la draga =70 m^3/hora.

Horas de trabajo = 29 horas.

10 camiones de 5 yd3

d) Costos.-

Materiales.-

De acuerdo con la lista mencionada, y considerando 10 usos a todos, excepto a las mangueras, a las cuales se les consideraron 20 usos, y a los ánodos, que sólo tienen un uso, se obtuvo:

$ 6,018.00

Mano de Obra.-

116×14.00 = 1,624.00

40×25.00 = 1,000.00

$ 2,624.00

Equipo.-

Draga: 29×87.47 = 2,540.00

10 camiones: 10×29horas a 22.57 = 6,550.00

Generador: 336 horas a 23.25 = 7,850.00

Bombas: 2×335 horas a 5.04 = 3,380.00

$ 20,320.00

Costo total de excavación: 28,962.00

Costo por m^3 = $\frac{28,962.00}{2,010.00}$ = $ 14.40/m^3

5.- Excavación en taludes.-

Haciendo un análisis semejante al de las zanjas:

Costos:

Materiales	588,19
Mano de Obra	670.50
Equipo	1,321.70
	$ 2,580.39

$$\text{Costo por } m^3 = \frac{2,580.39}{74.00} = \$\ 34.90/m^3$$

Costo total de excavación:

Excavado en talud: 110 x 34.90 = 3,830.00

Excavado a cielo abierto: 2,010 x 14.40 = 28,962.00

$ 39,792.00

$$\text{Costo total por } m^3 = \frac{32,092.00}{2,120.00} = \$\ 15.50/m^3$$

COSTO TOTAL DE EXCAVACION POR m^3 POR EL METODO DE ELECTROSMOSIS

$ 15.50

Se observa que el costo de excavación con electrósmosis es mucho más bajo.

XI.- CONCLUSIONES.-

De acuerdo con el análisis de costos efectuado en el capítulo anterior, y con los resultados observados en las aplicaciones prácticas que hasta hoy se han hecho con la electrósmosis en la ciudad de México, y cuyas ventajas e inconvenientes se consignan en hojas anteriores, se concluye que:

1) Siempre que el volumen de obra sea lo suficientemente grande para permitir la excavación por medio de maquinaria pesada,- es conveniente económicamente el uso de la electrósmosis.
2) En aquellos casos en los que el volumen de obra no es muy -- grande, el uso de la electrosmosis está restringido a los casos en los que puede haber peligro de falla de taludes o defalla por el fondo de las excavaciones, y que pueden ocasionar pérdidas de vidas o de bienes.
3) En los casos en que el abatimiento del nivel freático puedacausar daños a las construcciones vecinas, es muy recomendable utilizar el procedimiento de electrósmosis, para que elabatimiento del nivel freático quede restringido a la zona - que se desea atacar.
4) También se recomienda el empleo de este procedimiento en las construcciones en las cuales los asentamientos de tipo diferencial en los apoyos pueden ser funestos para la estabilidad de la construcción, ya que en la mayor parte de los casos esos asentamientos fueron debidos a bufamientos previos a la construcción, los cuales pueden ser controlados con laelectrósmosis.

NOTA.- Todos los casos mencionados anteriormente se refieren a excavaciones en arcillas, o materiales finos.

BIBLIOGRAFIA.-

1) Contributions to Soil Mechanics. 1941 - 1953.
Electro - Osmotic Stabilization of Soils. Leo Casagrande.

2) Aplicaciones de los principios de la Mecánica de Suelos en el Diseño del Borde de la Yerbabuena.
Tesis Profesional. Ingeniero Carlos Luis Flamand. (1956)

3) Estabilización Electrosmótica de la Excavación en la Planta de Bombeo del Río Consulado. Mayo de 1959.
Ingenieros Enrique Tamez González y Carlos Luis Flamand.

4) Electrósmosis en los Suelos. Dr. Ing. Leo Casagrande.
(Traducción del Ing. Ignacio Sainz Ortiz)

5) Review of Past and Current Works on Electro - Osmotic Stabilization of Soils.
Dr. Ing. Leo Casagrande.

6) Estudio de Mecánica de Suelos para la Cimentación del Conjunto Aristos.
Diseño Racional, S. A.

7) Estudio de Mecánica de Suelos para la Cimentación del Conjunto Aristos.
Solum, S. A.

---o-O-o---

Vayan estas líneas con agradecimiento al Ingeniero Enrique Tamez González, y al Ingeniero Carlos L. Flamand Rodríguez, por su gran ayuda en la preparación de esta tesis.

JOSE ANTONIO NIETO RAMIREZ.

T A B L A # III

ZONA I. CUERPO B.

FECHAS.	Est. Piezom. 1			Est. Pizom. 2			Est. Piezom. 3		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III
Sept 5 A.M.	5.84	10.70	5.85	16.00	4.73	4.30	----	-----	-----
5 P.M.	5.85	10.64	5.84	16.00	4.77	4.34	----	-----	-----
6	6.26	10.61	5.91	14.00	4.83	4.34	----	-----	-----
7	6.28	6.90	6.10	11.95	----	4.35	----	-----	-----
8	6.34	6.20	6.51	11.85	2.83	4.37	5.19	10.31	6.89
9 A.M.	6.39	7.29	6.54	12.75	2.81	4.49	3.74	9.71	6.76
P.M.	6.59	7.40	6.79	12.74	2.95	4.40	5.32	9.30	6.67
10	6.60	7.70	7.05	12.99	2.95	4.58	5.50	9.17	6.56
11	6.65	8.05	7.00	12.91	3.02	4.51	5.62	8.75	7.56
12	6.90	8.19	6.97	12.96	3.09	4.32	5.79	8.52	6.40
13	6.97	8.31	7.24	13.02	3.09	4.69	5.91	8.33	6.39

T A B L A # IV

ZONA II. CUERPO B.

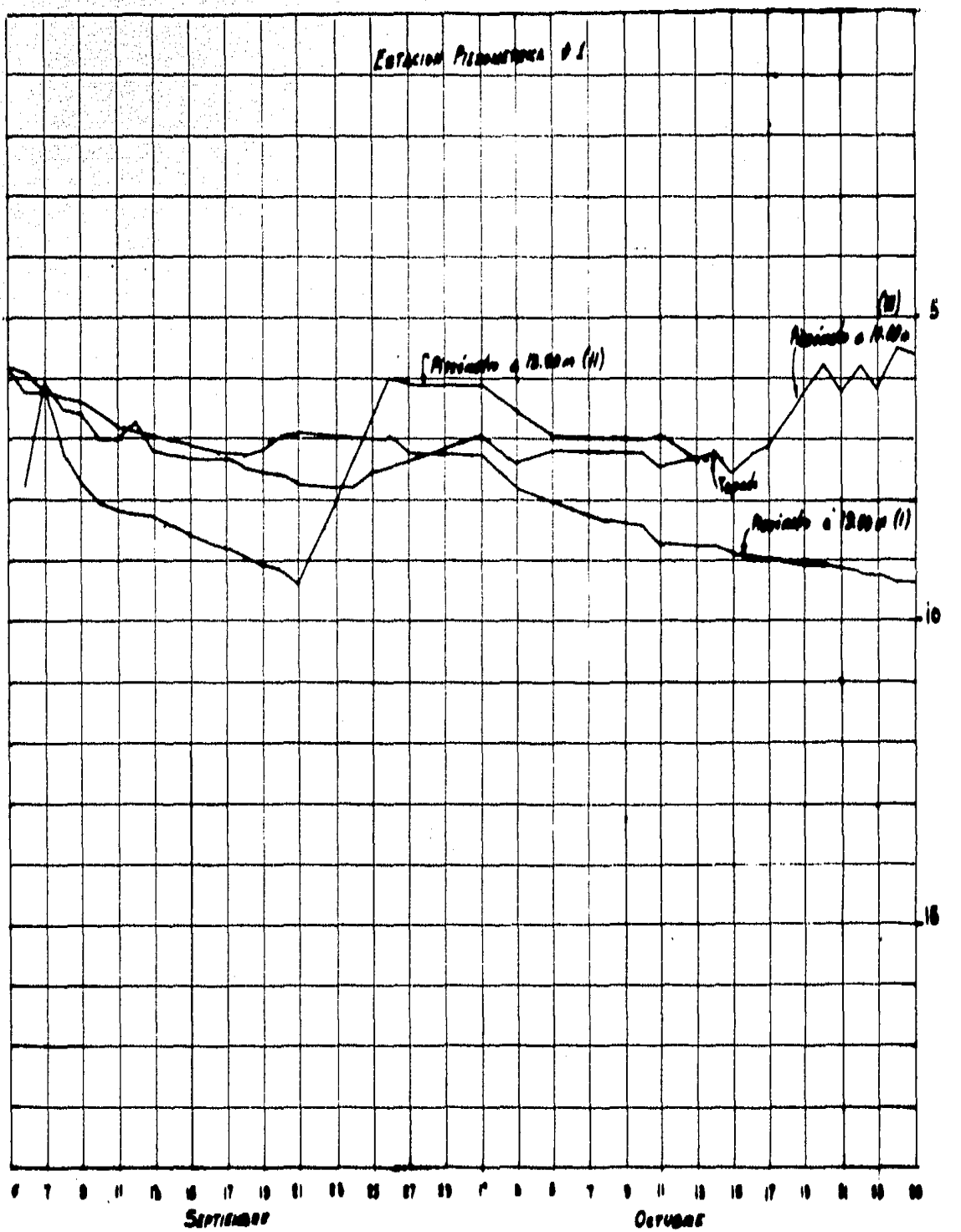
FECHAS	Est. Piezometrica 3			Est. Piezom. 4			Est. Piezom. 5		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III
Sept. 26	7.60	7.89	6.37	6.22	10.27	4.88	------	----	----
27	8.55	7.92	6.25	----	-----	----	------	----	----
28	8.58	7.91	6.23	----	-----	----	------	----	----
29	8.55	7.88	7.25	----	-----	----	------	----	----
30	8.55	7.92	6.25	----	-----	----	------	----	----
Oct. 1	8.60	7.93	6.27	----	-----	----	------	----	----
2	8.60	7.93	6.27	----	-----	----	------	----	----
3	8.31	7.90	6.24	8.03	8.39	4.22	------	----	----
4	----	----	----	----	-----	----	------	----	----
5	----	B	O M	B	E	O	----	------	----	----
6	8.53	7.83	6.25	14.90	7.59	4.00	11.30	6.57	2.11
7	----	----	----	-----	----	----	------	----	----
8	8.73	7.82	6.38	10.39	7.31	4.05	11.67	6.67	2.23
9	8.95	7.96	6.48	10.53	7.31	4.04	11.93	6.77	2.39
10	8.88	7.86	6.33	10.60	7.29	4.01	12.02	6.85	2.60
11	8.95	7.87	6.25	10.77	7.34	3.92	12.11	6.86	2.72
12	----	----	----	------	----	----	-----	----	Tap.
13	9.09	7.74	6.36	10.84	8.01	4.01	11.80	6.94	----
14	9.27	7.91	6.27	10.85	7.11	3.93	12.17	7.13	----
15	9.29	7.89	6.47	10.86	7.31	4.00	12.43	7.17	----
16	9.31	7.76	6.91	10.86	7.59	3.84	12.37	7.22	----
17	9.37	7.98	6.98	10.86	7.84	3.98	12.44	7.34	----
18	----	----	----	-----	----	----	-----	-----	----
19	9.51	7.95	6.19	11.04	7.84	4.00	12.67	7.35	----
20	9.51	7.95	6.19	11.04	7.84	4.00	12.67	7.35	----
21	9.63	7.88	6.17	11.16	8.13	3.96	12.68	7.64	----
22	9.68	7.92	6.19	11.24	8.21	4.14	13.18	7.60	----
23	9.58	8.08	6.29	11.31	8.18	4.03	12.98	7.50	----
24	9.24	7.89	6.13	11.28	8.64	4.09	12.77	7.67	----
25	9.35	7.89	6.09	11.54	8.89	4.43	12.71	7.62	----
26	----	----	----	-----	----	----	-----	----	----
27	9.29	7.92	6.07	11.52	8.98	4.36	12.92	7.85	----
28	9.26	7.93	5.77	11.48	8.64	4.33	12.88	7.86	----

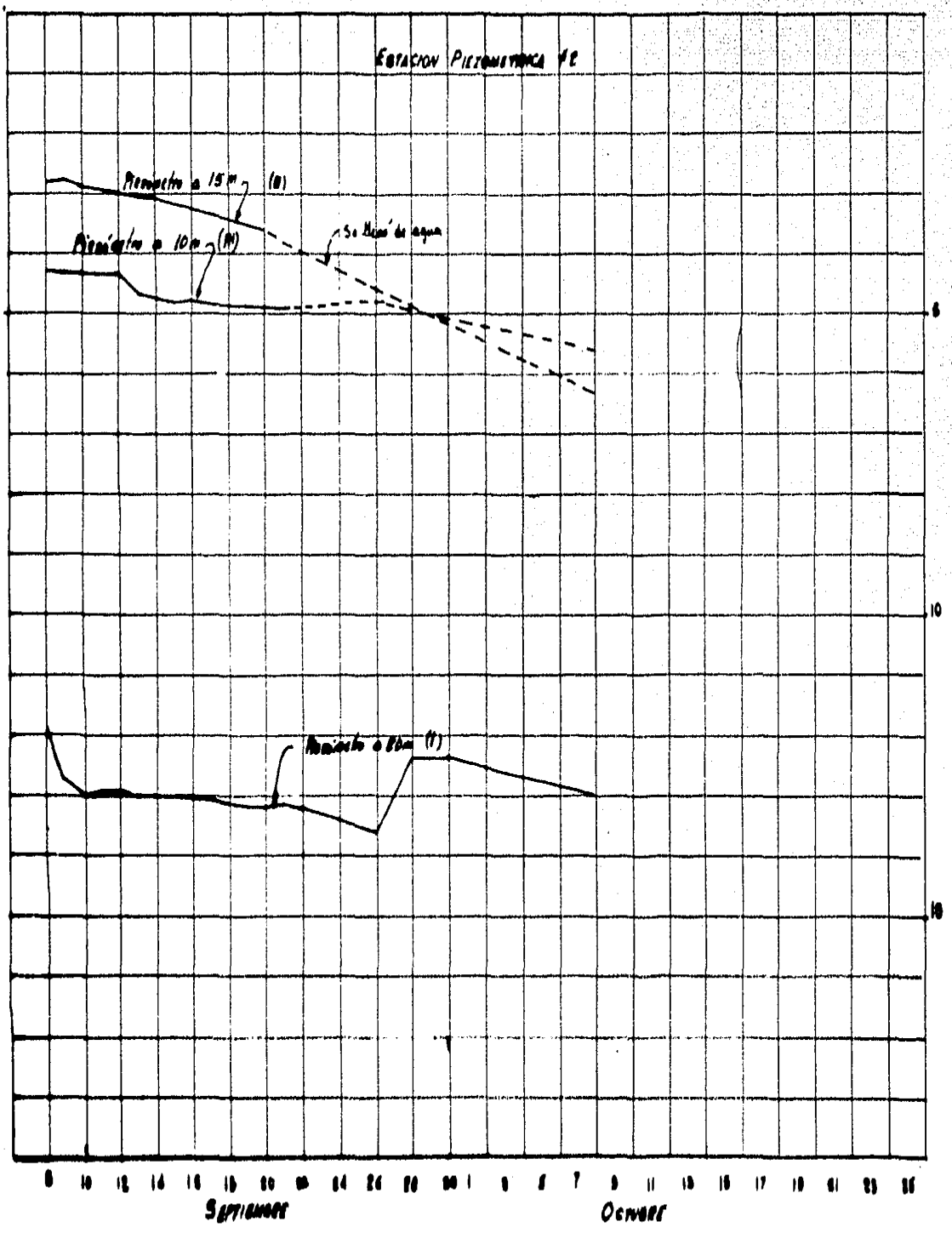
T A B L A # V

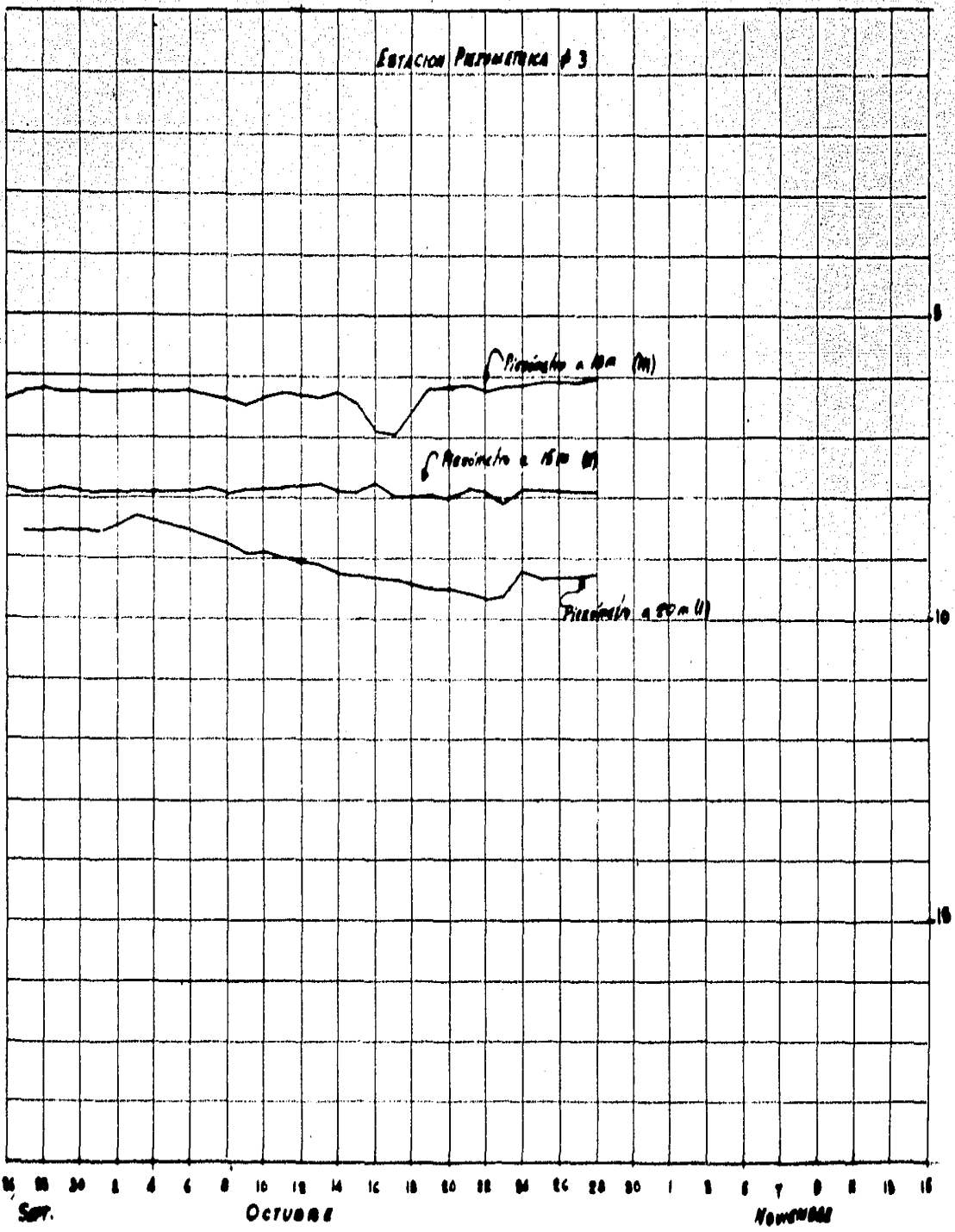
ZONA III. CUERPO B.

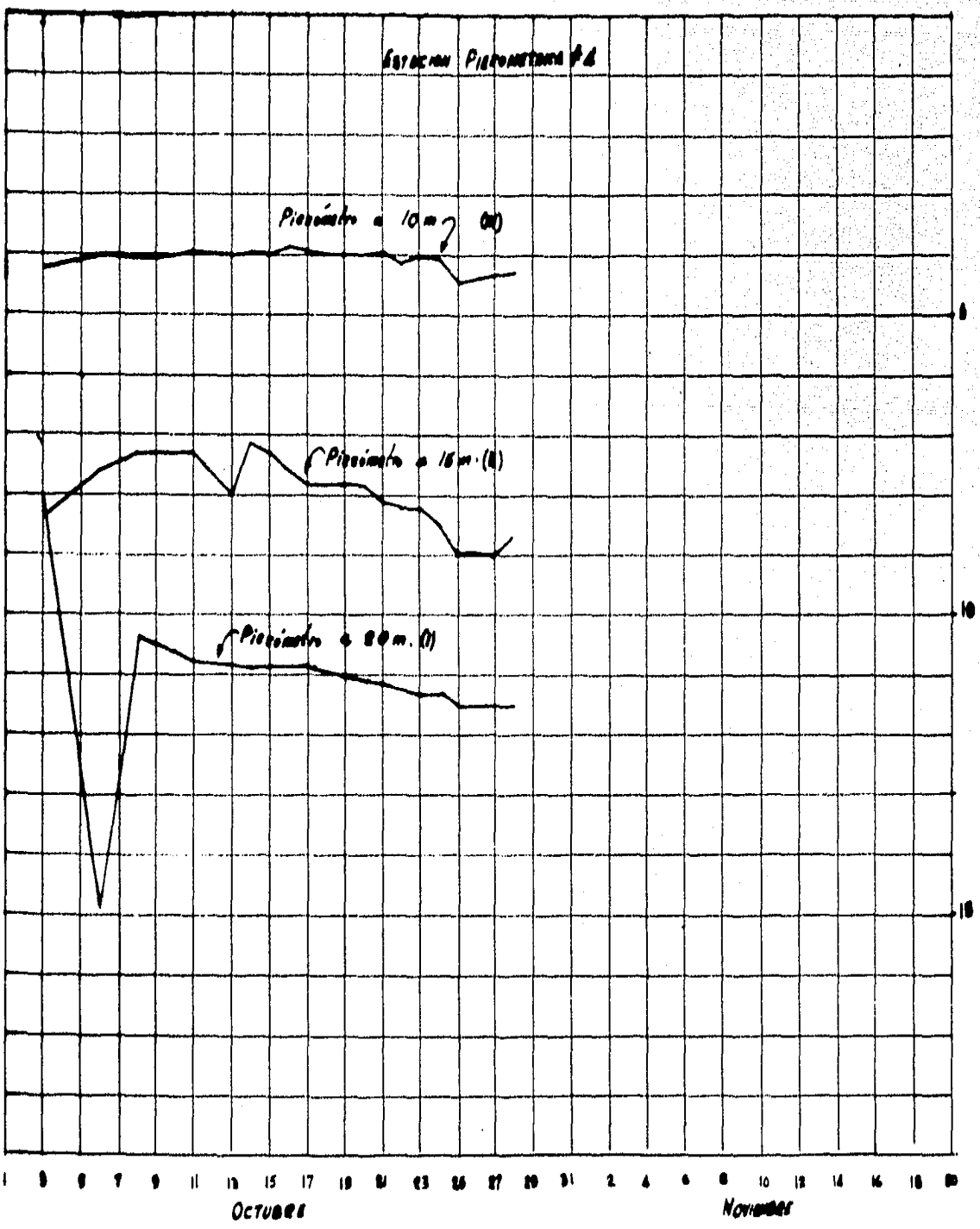
FECHA		EST. PIEZOMETRICA 6			EST. PIEZOMETRICA 7			NOTAS
		I	II	III	I	II	III	
Octubre	25.-	5.59	3.12	5.51	----	----	----	----------
	26.-	7.09	3.51	5.06	----	----	----	----------
	27.-	7.09	3.51	5.06	----	----	----	----------
	28.-	7.13	3.93	4.81	----	----	----	----------
	29.-	7.26	4.01	4.60	3.35	----	----	----------
	30.-	7.23	4.01	4.45	3.27	----	----	----------
	31.-	7.32	3.96	4.24	3.30	----	----	----------
Nov.	1.-	7.34	4.11	4.14	3.36	----	----	----------
	5.-	7.41	4.09	3.85	3.45	3.36	1.79	----------
	6.-	7.40	4.07	3.83	3.58	3.35	1.81	----------
	10.-	7.52	4.10	3.83	3.33	3.52	1.88	----------
	11.-	7.57	4.13	3.74	3.20	3.48	1.93	----------
	12.-	7.62	4.17	3.68	3.12	3.51	1.84	----------
	13.-	7.72	4.21	3.68	3.12	3.52	1.87	----------
	15.-	----	----	----	3.18	3.64	1.98	----------
	17.-	----	----	----	3.05	3.36	2.01	----------
	18.-	----	----	----	3.45	3.65	2.02	----------
	19.-	----	----	----	3.66	3.80	2.03	----------
	21.-	----	----	----	4.12	3.66	1.96	----------
	25.-	----	----	----	4.39	3.64	2.09	----------
	26.-	----	----	----	4.32	3.72	2.11	----------
	27.-	----	----	----	4.49	3.86	2.09	----------
	29.-	----	----	----	4.49	4.48	2.14	----------
Enero	2.-	----	----	----	4.42	3.65	2.09	----------
	3.-	----	----	----	4.59	3.82	2.43	----------
	4.-	----	----	----	4.46	2.94	0.73	----------
	9.-	----	----	----	4.34	2.60	0.81	----------

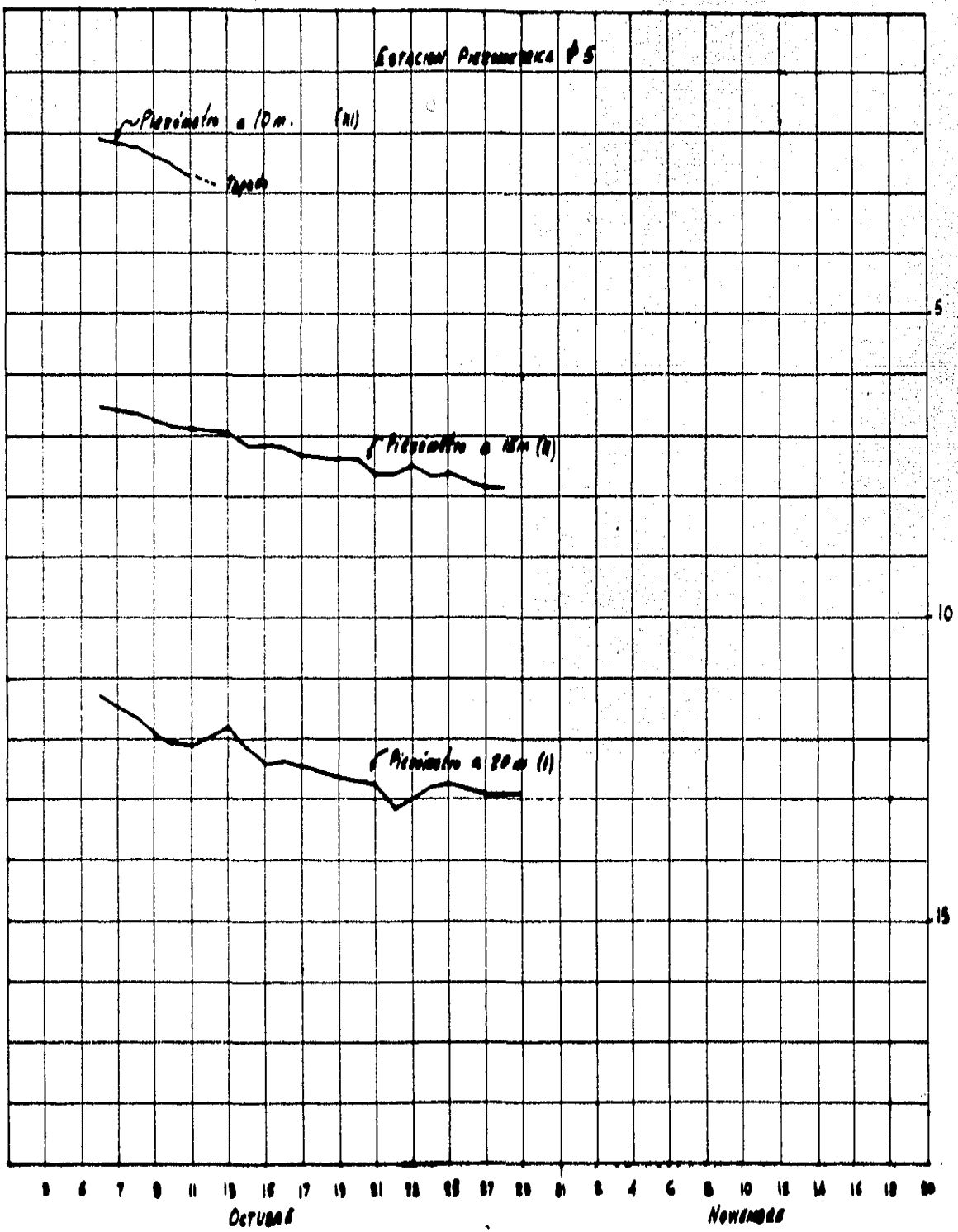
Ver las gráficas de la profundidad del nivel freático que se-obtuvieron de estas tablas.

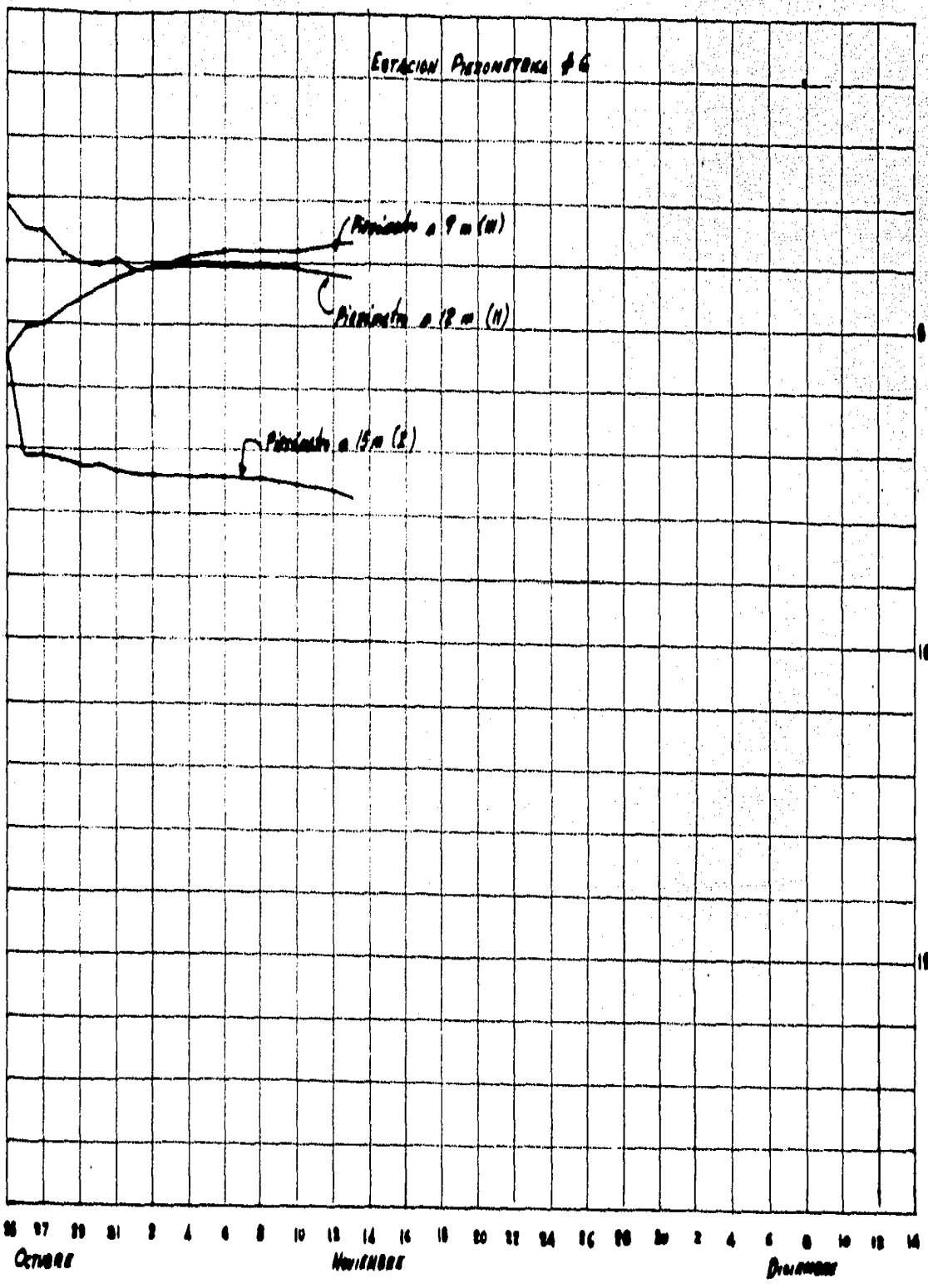

Estación Piezométrica # 1
Piezómetro a 13.00 m (II)
Tapado
5
10
15
Septiembre
Octubre

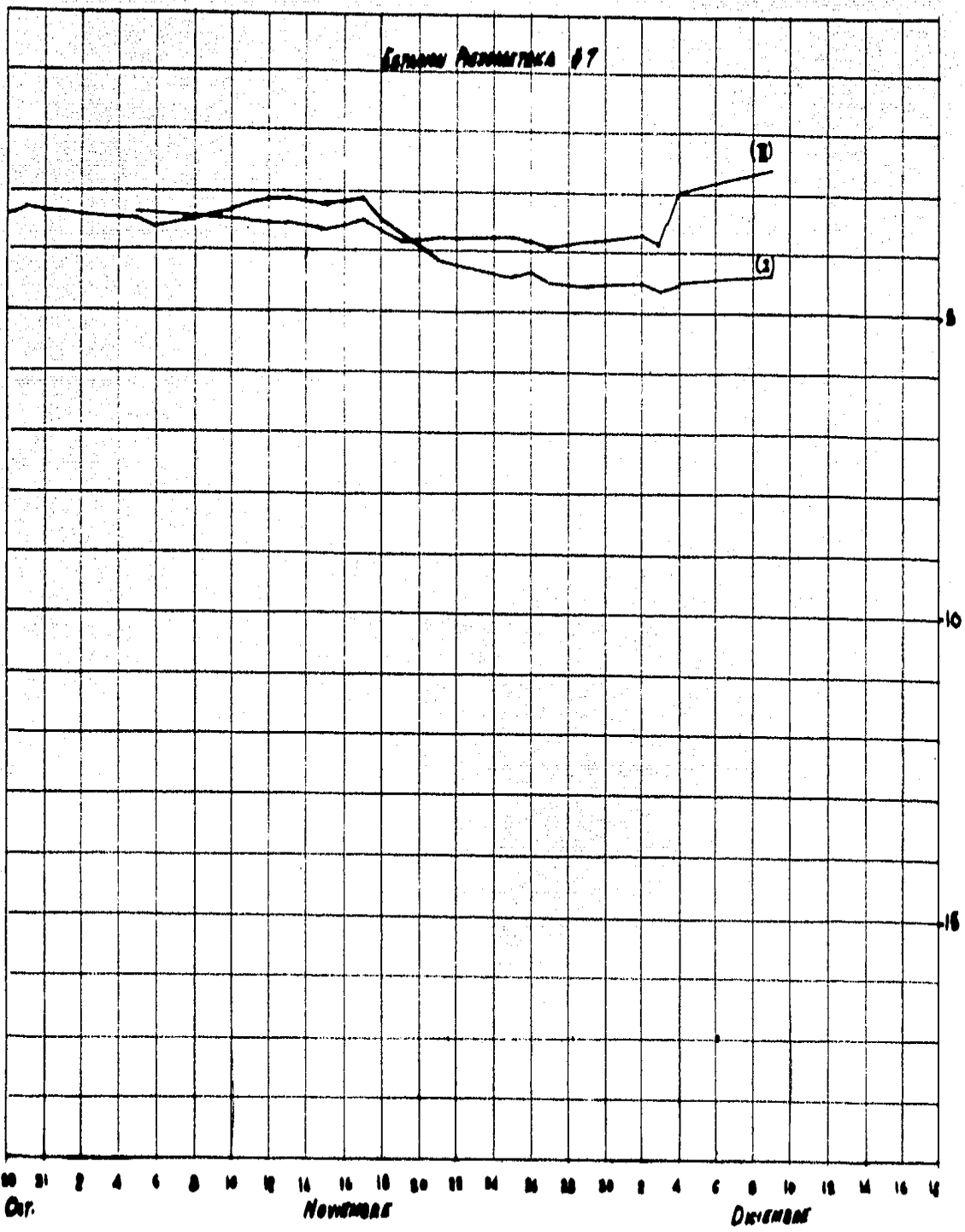

Estación Piezométrica Nº 2
Piezómetro a 15 m (B)
Piezómetro a 10 m (M)
Piezómetro a 8 m (T)
Se mide el agua
5
10
15
Septiembre
Octubre

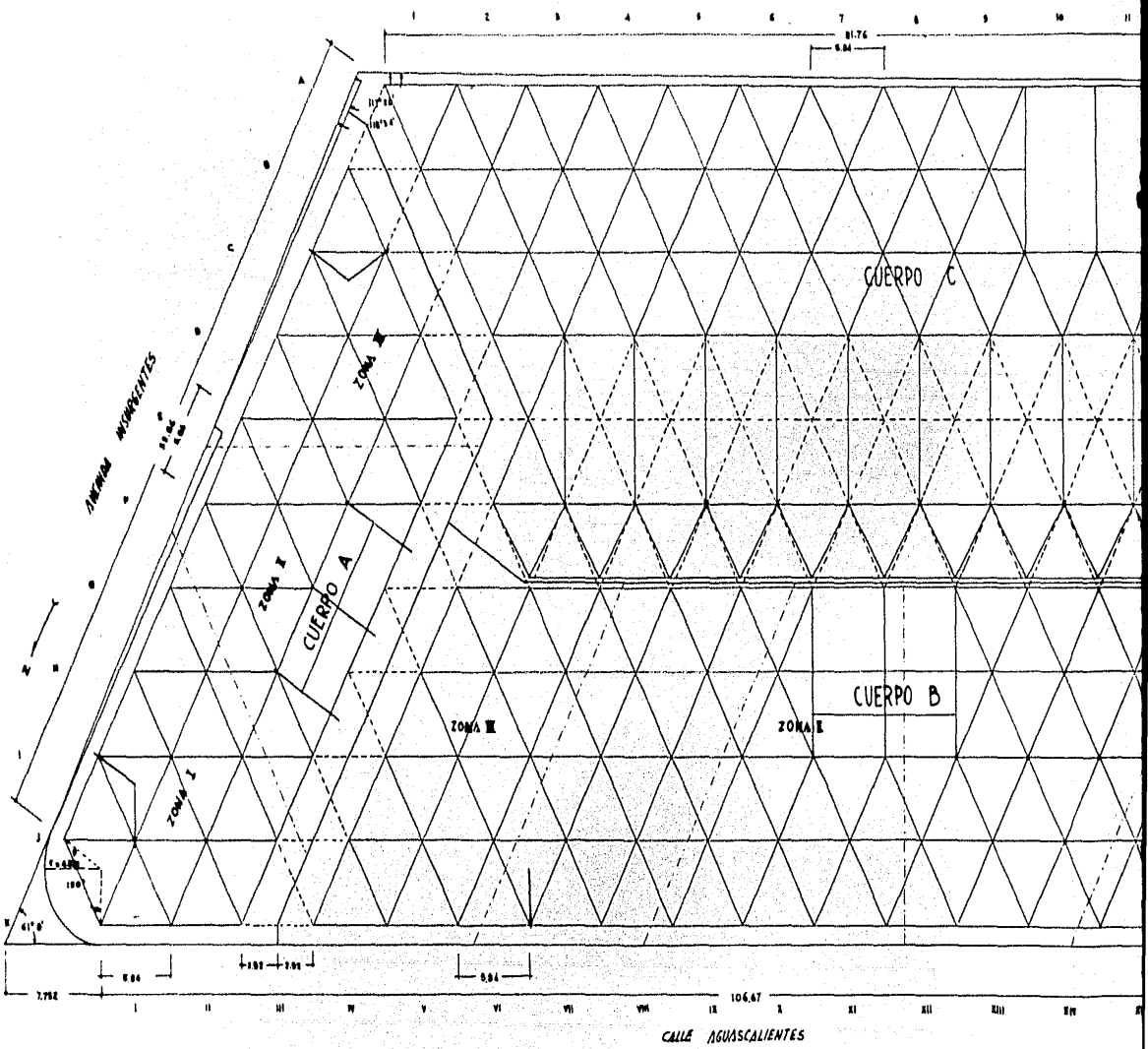

Estación Piezométrica # 3
Piezómetro a 10 m (M)
Piezómetro a 15 m (M)
Piezómetro a 20 m (I)
5
10
15
Sept.
Octubre
Noviembre


Estacion Piezometrica #4
Piezómetro a 10 m. (A)
Piezómetro a 16 m. (B)
Piezómetro a 20 m. (C)
8
10
18
OCTUBRE
NOVIEMBRE


Estacion Pluviometrica # 5
Pluviometro a 10 m. (III)
Pluviometro a 15m (II)
Pluviometro a 80 m (I)
5
10
15
Octubre
Noviembre

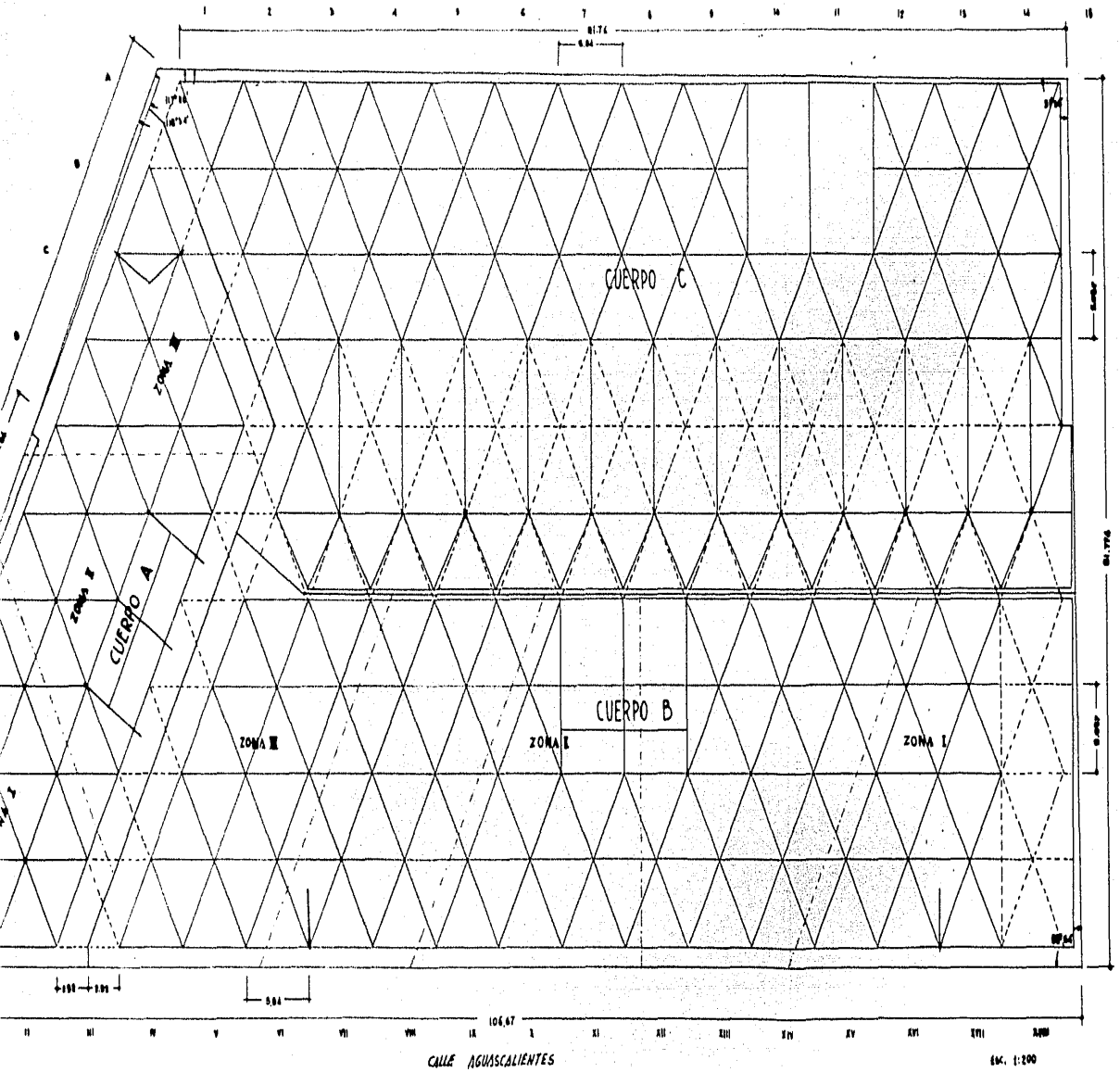

ESTACION PIEZOMETRICA # 6
Piezometro a 9 m (M)
Piezometro a 12 m (M)
Piezometro a 15 m (E)
8
10
16
26 27 29 31 3 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30 2 4 6 8 10 12 14
OCTUBRE
NOVIEMBRE
DICIEMBRE


Барометр Ассманна № 7
(1)
(2)
8
10
16
Окт.
Ноябрь
Декабрь



PLANTA DE EJES DE CIMEN

ZONAS TRATADAS CON ELECTROSM



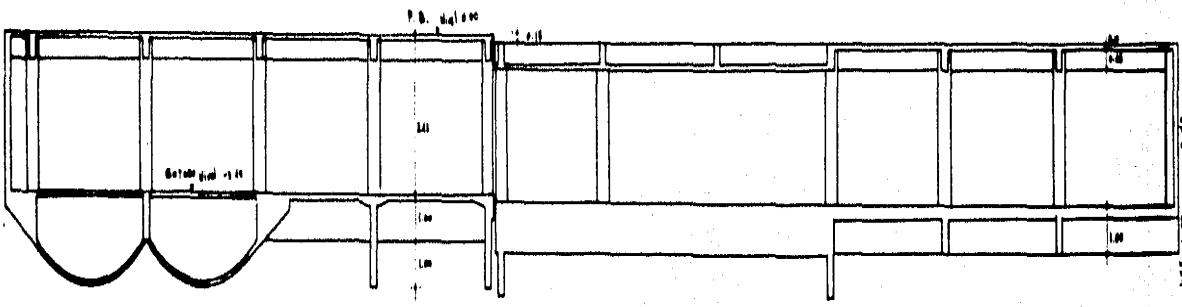
CALLE AGUASCALIENTES

esc. 1:200

PLANTA DE EJES DE CIMENTACION

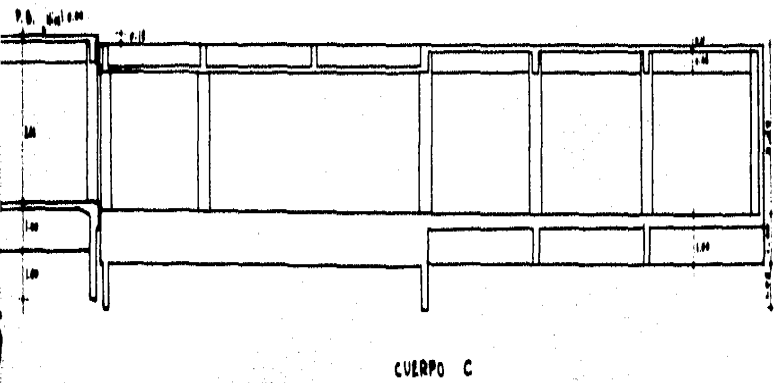
ZONAS TRATADAS CON ELECTROSMOSIS

U.N.A.M. ESCUELA NACIONAL DE INGENIERIA.	
TESIS PROFESIONAL: JOSE ANTONIO NIETO	
CONJUNTO ARISTOS.	
Mexico, D.F. julio de 1990	PLANO 1

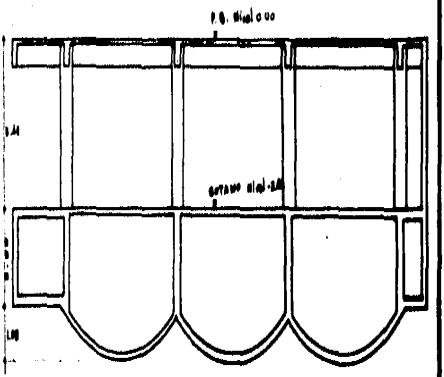


CUERPO B

CUERPO C



CUERPO C

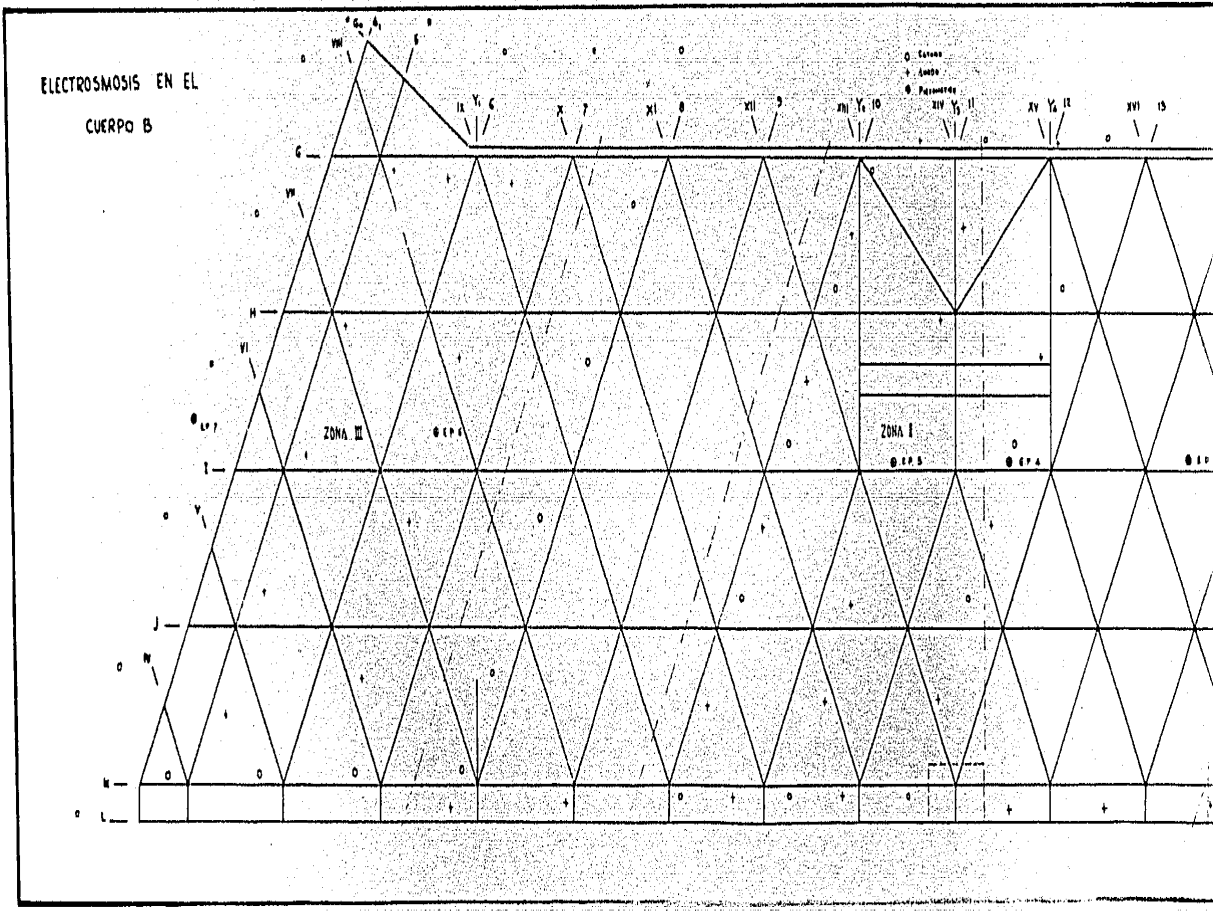


CUERPO A

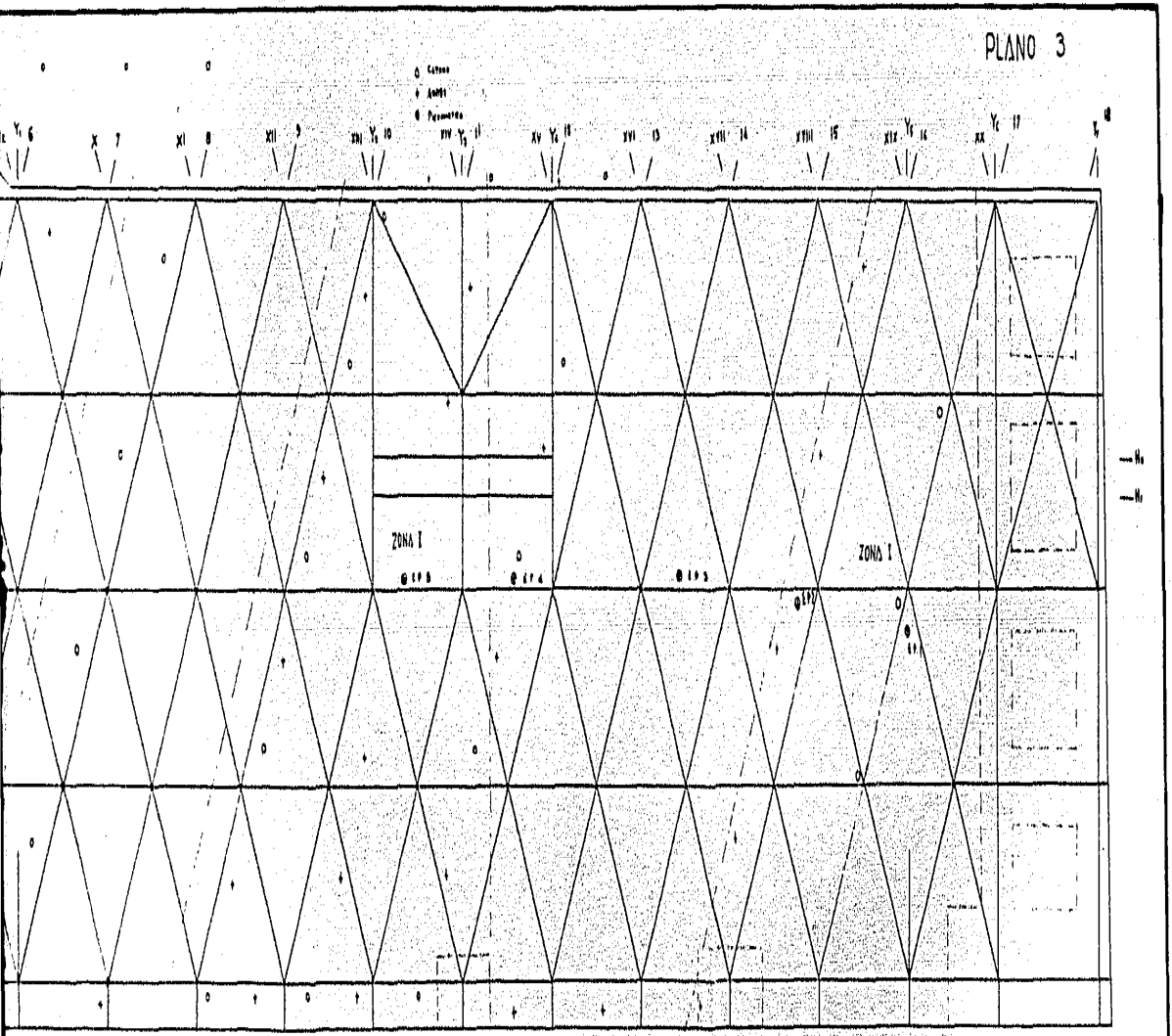
U.N.A.M. ESCUELA NACIONAL DE ARQUITECTURA	
TESIS PROFESIONAL JOSE ANTONIO NIETO	
• CONJUNTO ARISTOS • CORTES TRANSVERSALES	
Mexico, D.F. 1980	PLANO 2

ELECTROSMOSIS EN EL

CUERPO B

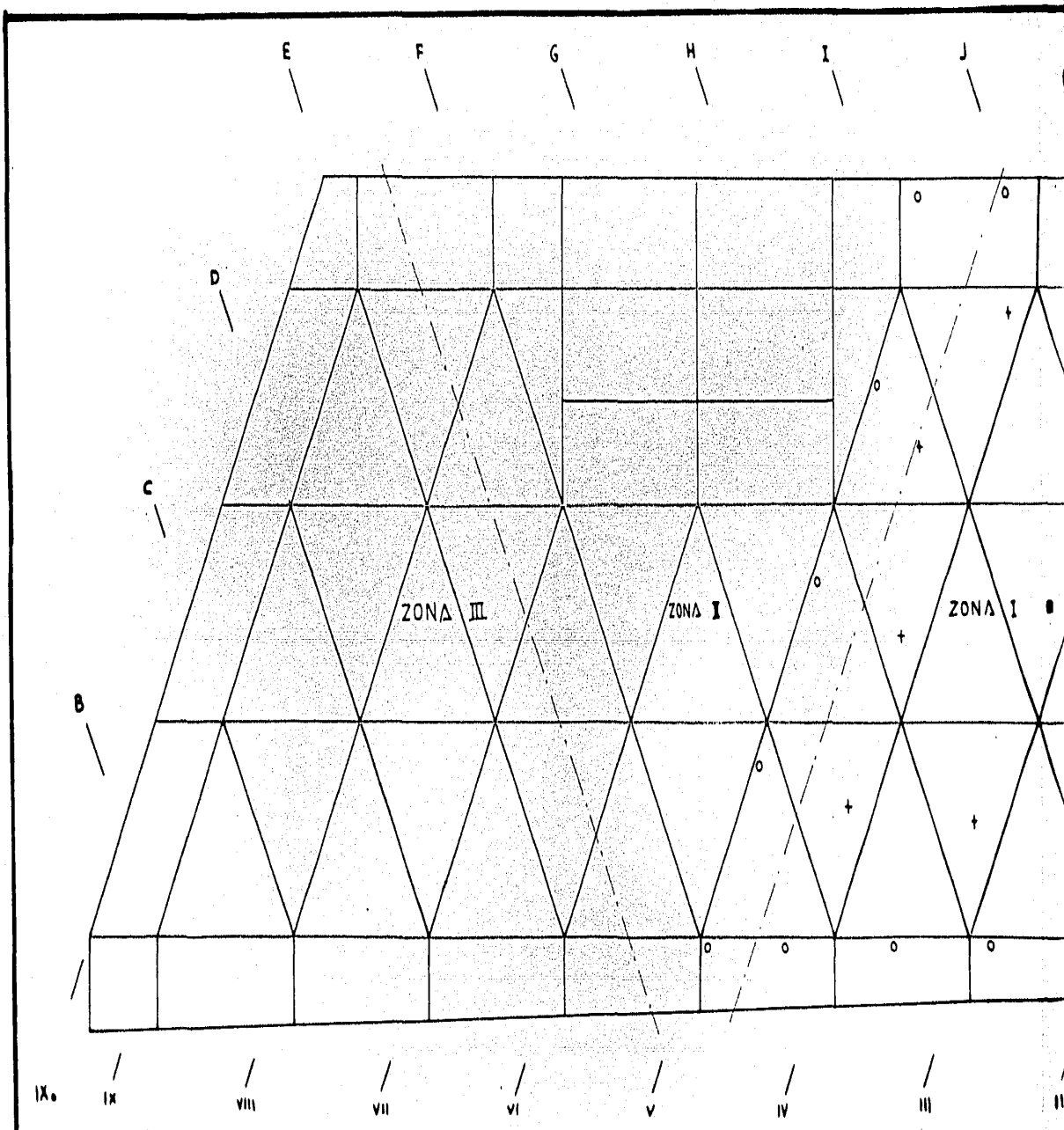


PLANO 3



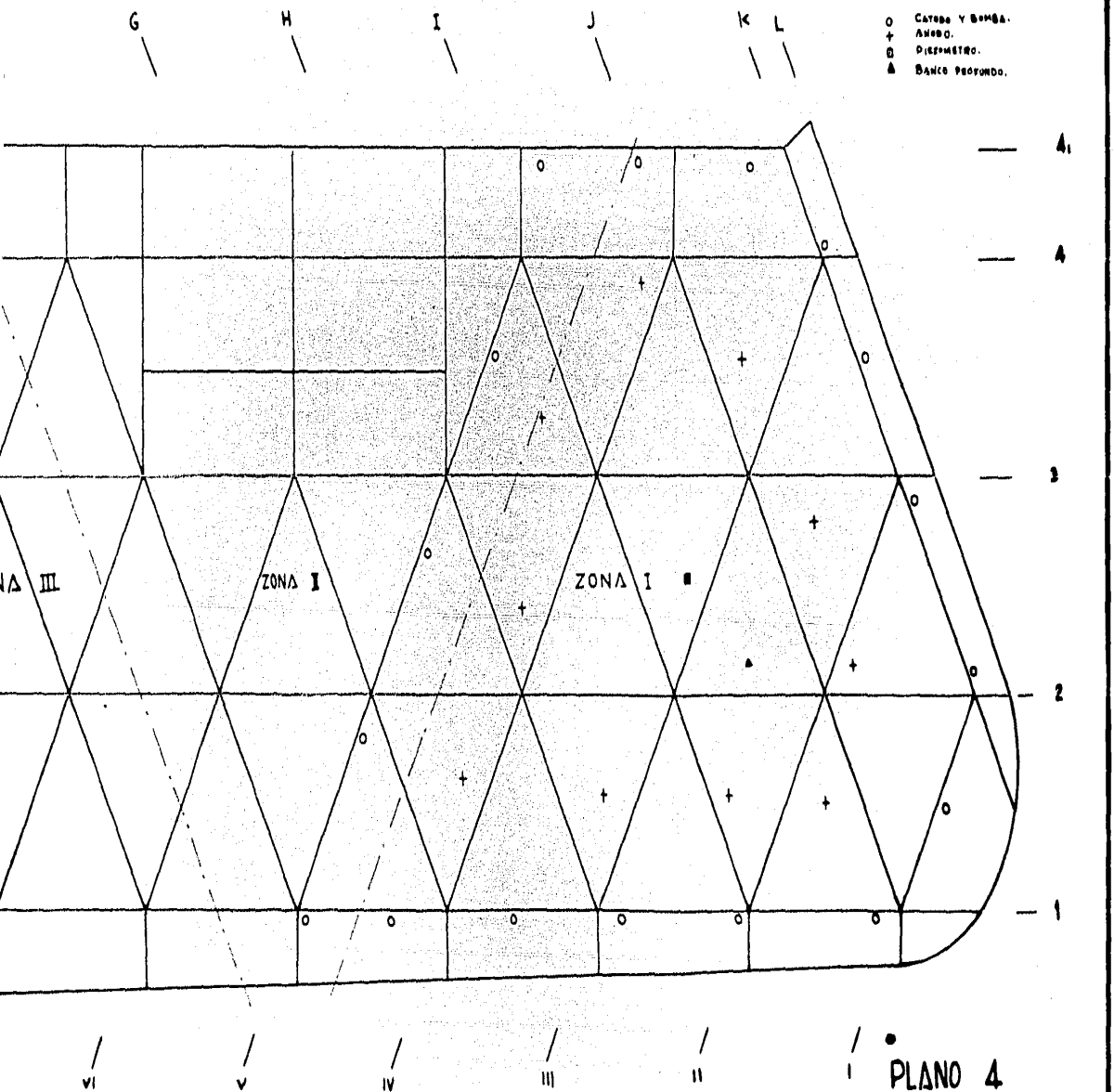
TESIS PROFESIONAL

JOSE ANTONIO NIETO.



CUERPO A

ELECTROSMOSIS EN LA ZONA I.

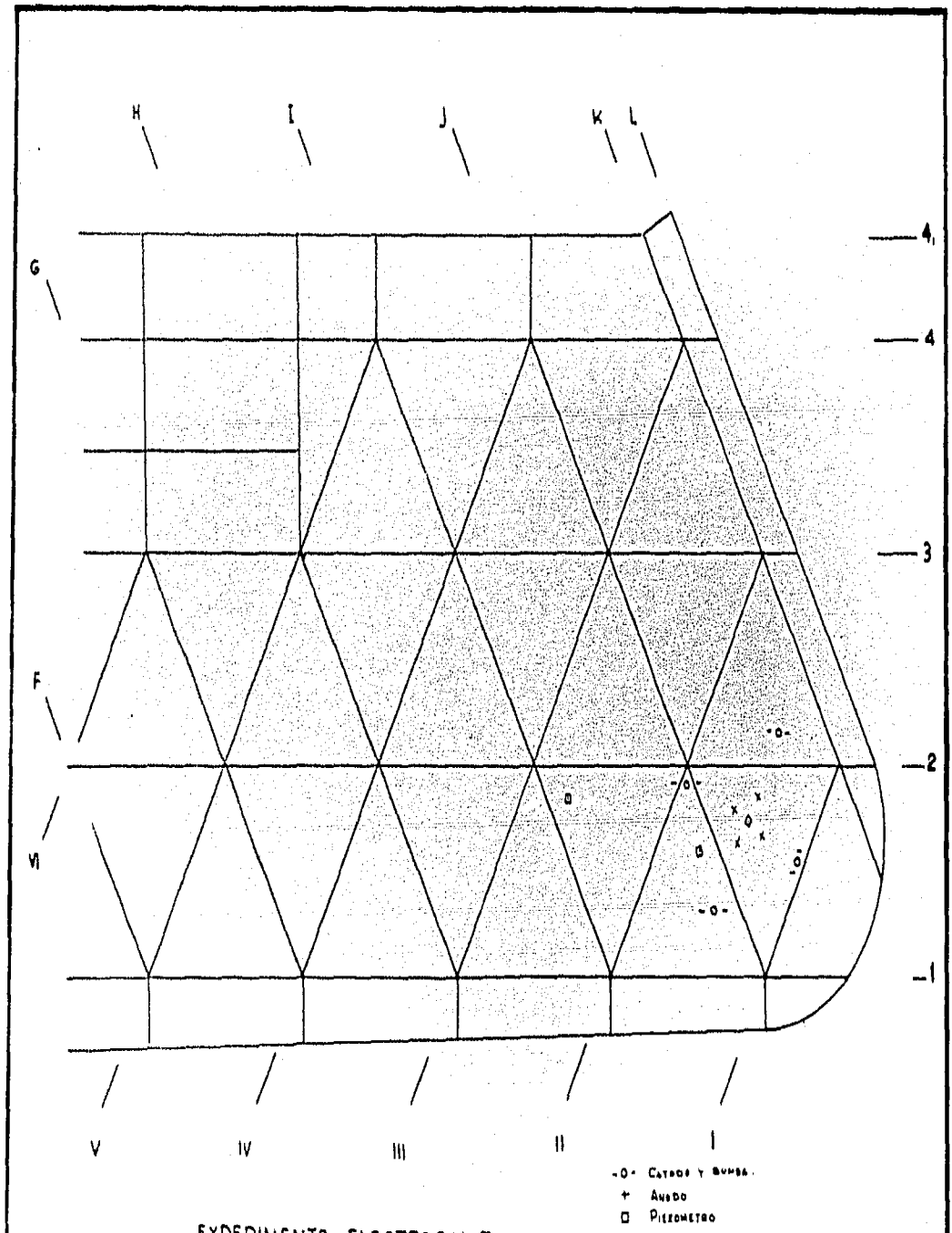


ELECTROSMOSIS EN LA ZONA I.

PLANO 4

TESIS PROFESIONAL

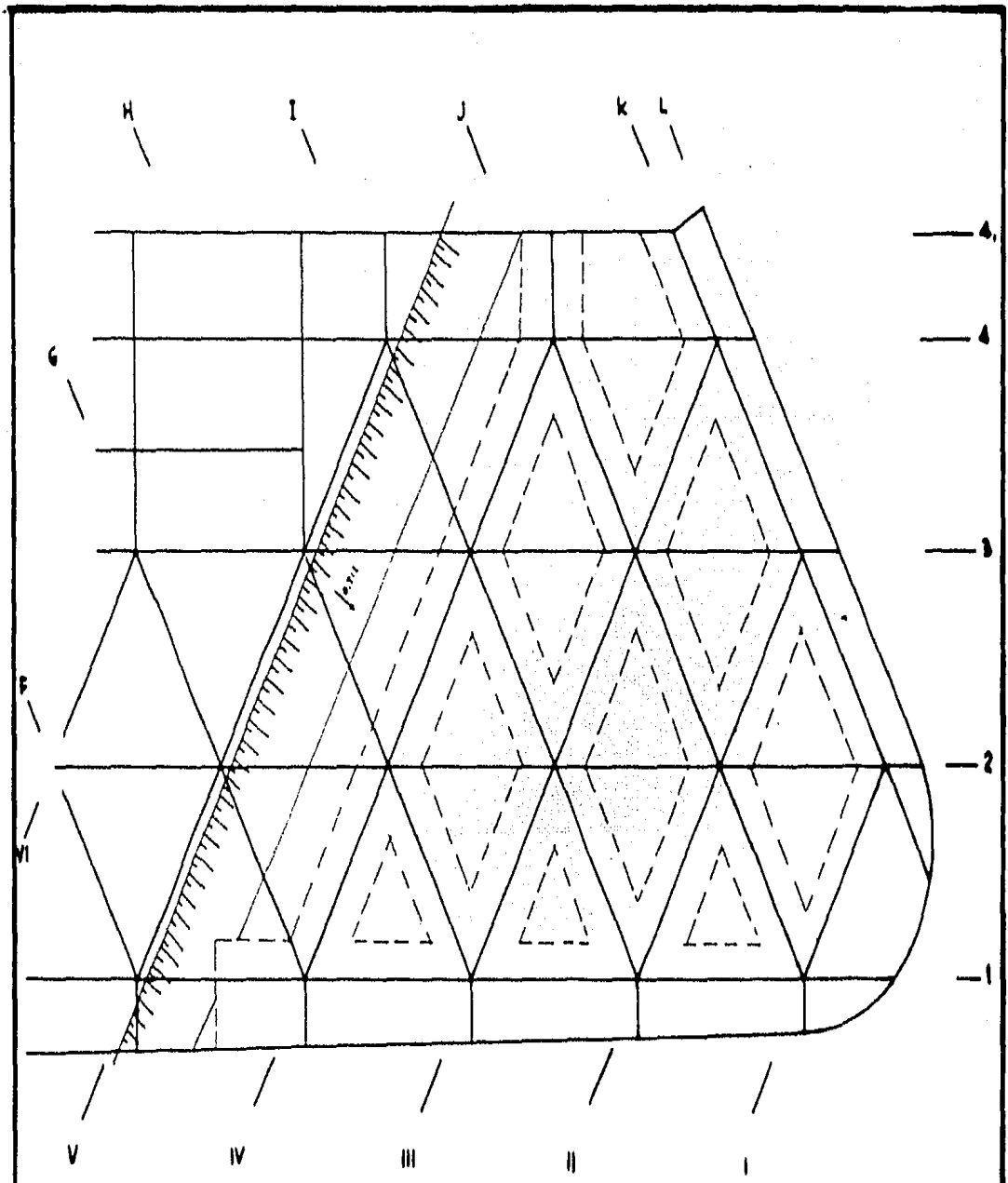
JOSE ANTONIO NIETO.



EXPERIMENTO ELECTROSMOTICO
CUERPO A

PLANO 5

TESIS PROFESIONAL
JOSÉ ANTONIO NIETO



PROBABLE EXCAVACION
POR ZANJAS
ADEMADAS

CUERPO A
ZONA 1

PLANO 6

TESIS PROFESIONAL
JOSE ANTONIO NIETO