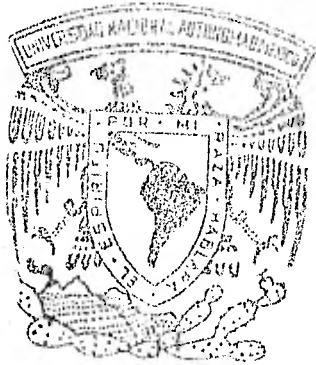


29  
173



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

**Facultad de Ingeniería**

**Excavaciones Profundas para el Metro de la Ciudad de México, Empleando Electrosmosis**

**T E S I S**

Que para obtener el título de:

**I N G E N I E R O C I V I L**

p r e s e n t a :

**ENRIQUE RODRIGUEZ MONTAÑO**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL

AVENIDA AL Pasante señor ENRIQUE RODRIGUEZ MONTANO  
P r e s e n t e .

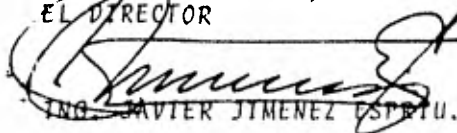
En atención a su solicitud relativa, me es grato transcribir a usted a continuación el tema que aprobado por esta Dirección propuso el Profesor Ing. Enrique del Valle Calderón, para que lo desarrolle como tesis en su Examen Profesional de Ingeniero CIVIL.

"EXCAVACIONES PROFUNDAS PARA EL METRO DE LA CIUDAD DE MEXICO, EMPLEANDO ELECTROSMOSIS"

- I. Introducción
- II. Antecedentes
- III. Estratigrafía
- IV. Procedimiento constructivo
- V. Estabilidad de la excavación
- VI. Bombeo electrosmótico
- VII. Mediciones de gasto y voltaje
- VIII. Comparación de la resistencia al corte antes y después de aplicada la electrosmosis
- IX. Movimientos generados en el suelo vecino
- X. Conclusiones.

Ruego a usted se sirva 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 suscribir 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.

Atentamente,  
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"  
Cd. Universitaria, a 10. de Octubre de 1981  
EL DIRECTOR

  
ING. JAVIER JIMENEZ ESPRIU.

EXCAVACIONES PROFUNDAS PARA  
EL METRO DE LA CD. DE MEXICO,  
EMPLEANDO ELECTROSMOSIS.

# I N D I C E

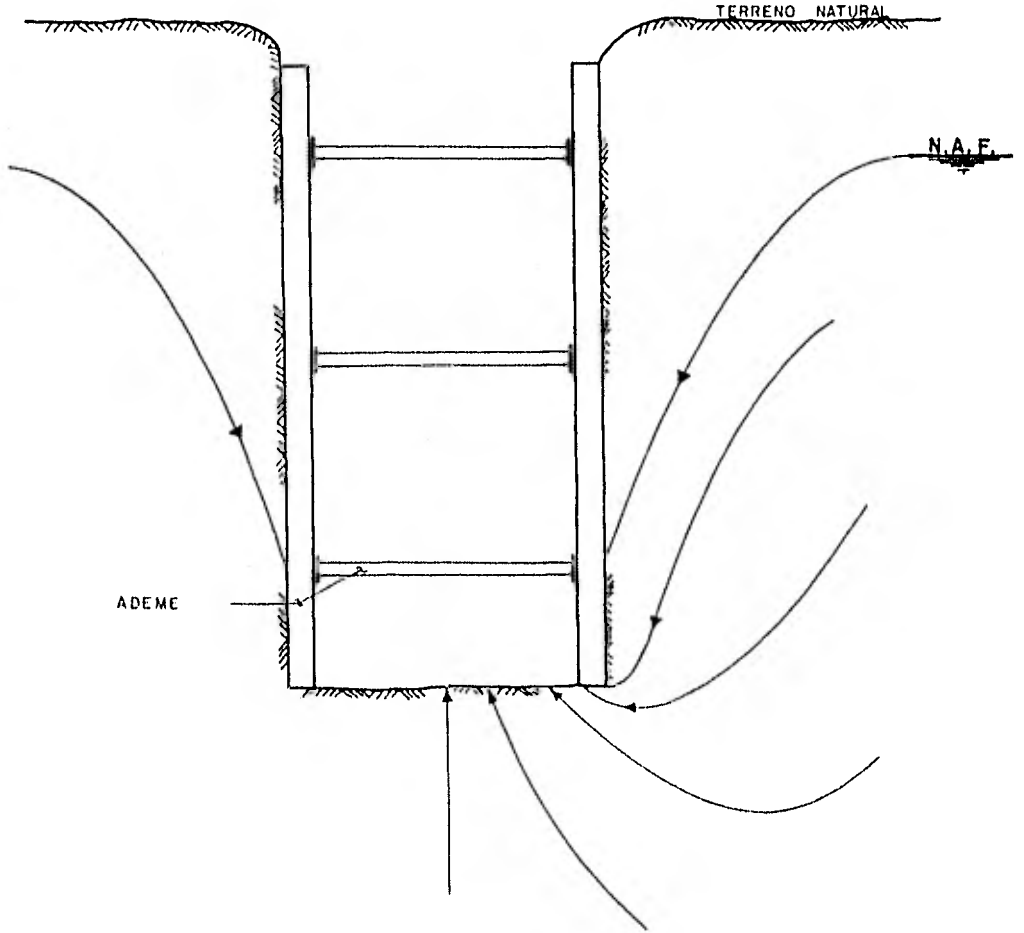
	PAGINA
I. INTRODUCCION	1
II. ANTECEDENTES	3
III. <sup>e</sup> ESTRATIGRAFIA	6
IV. PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO	9
V. ESTABILIDAD DE LA EXCAVACION	11
VI. BOMBEO ELECTROSMOTICO	15
VII. MEDICIONES DE GASTO Y VOLTAGE	20
VIII. COMPARACION DE LA RESISTENCIA AL CORTE ANTES Y DESPUES DE APLICADA LA ELECTROSMOSIS	25
IX. MOVIMIENTOS GENERADOS EN EL SUELO VECINO	32
X. CONCLUSIONES	34

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

Los problemas de inestabilidad que presentan las excavaciones profundas que se realizan en suelos constituídos por arcillas blandas bajo el nivel freático, son familiares para todo constructor que se ha visto en la necesidad de luchar contra esta clase de suelos. Las excavaciones en zanja presentan deslizamientos por el fondo, a pesar de que sus lados estén debidamente apuntalados.

Es importante considerar la influencia que tiene el flujo de agua hacia el interior de la excavación en la estabilidad de la misma, el cual, de no controlarse, crea en el fondo de la excavación fuerzas de filtración ascendentes que tienden a favorecer la falla, figura #1.

El propósito del presente trabajo es hacer una descripción general del Procedimiento Constructivo de las excavaciones profundas necesarias para alojar el cajón del Metro de la Ciudad de México a través del depósito de Arcillas Volcánicas altamente compresibles de la zona del lago de Texcoco. Se presentan también, resultados de pruebas de laboratorio antes y después de aplicar bombeo electrosmótico previo a la excavación, que muestra el incremento de la resistencia al corte en los suelos tratados.



FUERZAS DE FILTRACION DEBIDAS AL FLUJO DE AGUA

<b>U. N. A. M.</b>	
FACULTAD DE INGENIERIA	
TESIS PROFESIONAL	
ENRIQUE RODRIGUEZ MONTAÑO	
MEXICO, D.F.	FIG. No. 1

## II

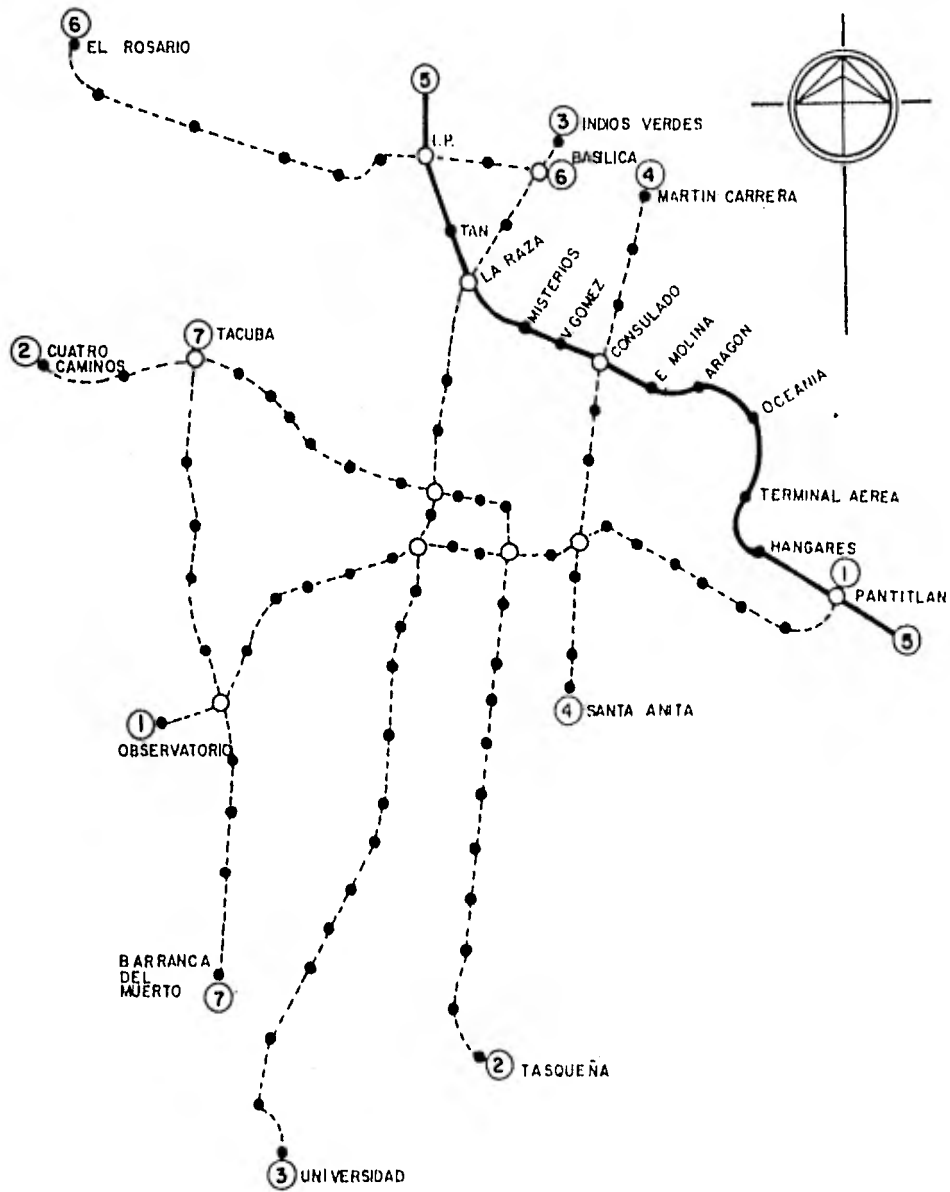
### A N T E C E D E N T E S

Dentro de la construcción de líneas nuevas del Ferrocarril Metropolitano de la Ciudad de México, está comprendida la línea 5. Esta línea atravesará la Ciudad de la Zona Oriente en Pantitlán hasta Vallejo al Norte, con una longitud aproximada de 13 Km., figura # 2.

El trazo de esta nueva línea pasa por una zona donde las arcillas típicas del Valle de México tienen una resistencia al corte muy baja. La localización en planta de la zona tratada con bombeo electromótico se indica en la figura # 3.

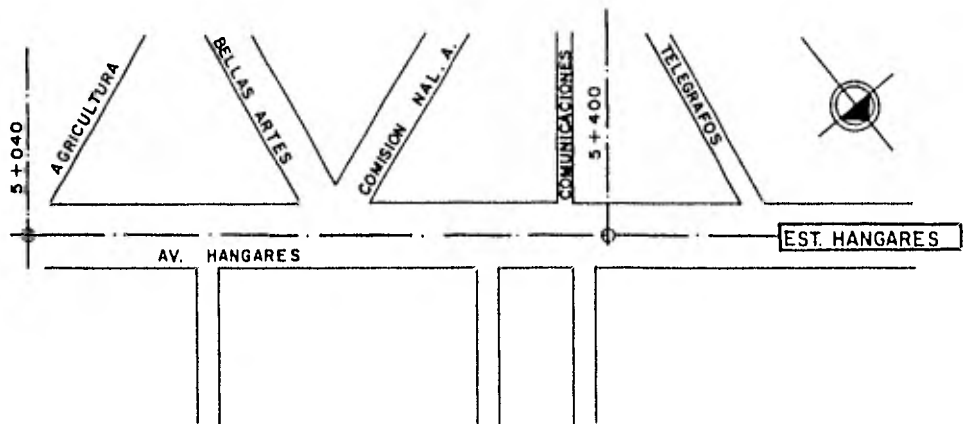
La estructura del Metro en esta zona está constituida por un cajón de sección rectangular de concreto armado, desplantado en promedio a 8 m. de profundidad. La excavación para la construcción de dicho cajón, es limitada por muros de concreto reforzado colados "in situ".





RED DEL SISTEMA DE TRANSPORTE  
COLECTIVO "METRO"

<b>U. N. A. M.</b>	
FACULTAD DE INGENIERIA	
TESIS PROFESIONAL	
ENRIQUE RODRIGUEZ MONTAÑO	
MEXICO, D.F.	FIG. No. 2



CROQUIS DE LOCALIZACION

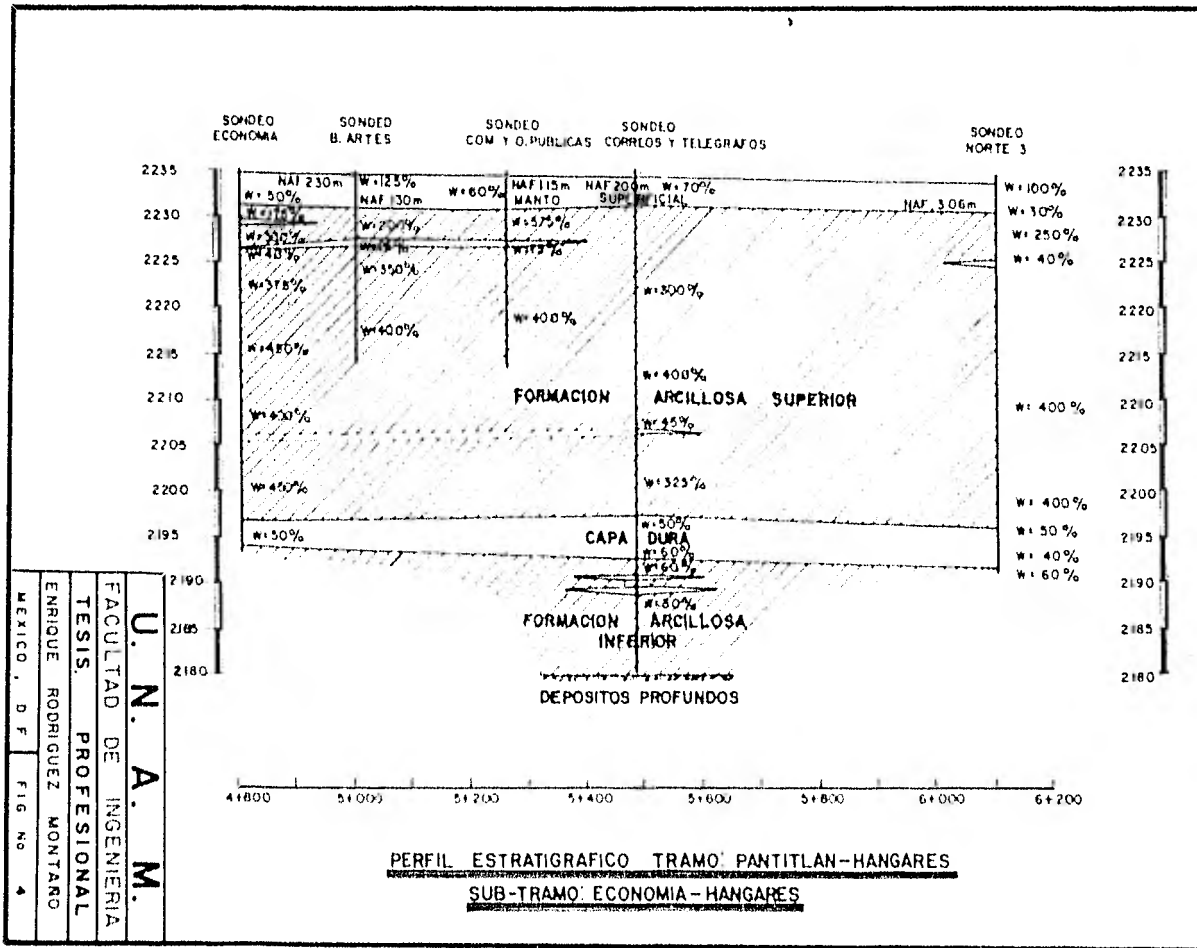
<b>U. N. A. M.</b>	
FACULTAD DE INGENIERIA	
TESIS PROFESIONAL	
ENRIQUE RODRIGUEZ MONTANO	
MEXICO , D.F	FIG. No. 3

## E S T R A T I G R A F I A

De acuerdo con la zonificación estratigráfica de la Ciudad de México (Ref. 1), este tramo se encuentra dentro de la llamada "Zona del Lago" caracterizada por sus gruesos espesores de arcilla blanda de alta plasticidad y origen lacustre, formada del sedimento de cenizas volcánicas, un alto contenido de agua y alta compresibilidad. La estratigrafía puede resumirse como sigue: (figura # 4).

Desde la superficie del terreno y hasta 3m. de profundidad aproximadamente, se encuentra lo que se conoce como "Manto Superficial" constituido por capas de materiales limosos y limo-arenosos cuyo contenido natural de agua es en promedio 60%, su cohesión varía entre 2 y 6 ton/m<sup>2</sup> y su peso volumétrico es de 1.6 ton/m<sup>3</sup>. La compresibilidad de estos materiales es muy baja comparada con la de las arcillas subyacentes. El nivel freático se localiza entre 1.5m. y 2m. de profundidad.

Subyaciendo al "Manto Superficial" se encuentra una formación superior de arcilla volcánica compresible típica del Valle de México, cuyo espesor se profundiza hasta 37.5m. El contenido de agua de la arcilla varía entre 200% y 500%, su relación de vacíos entre 6 y 11 y su peso volumétrico es en promedio de 1.15 ton/m<sup>3</sup>. La resistencia al cor-



te obtenida a partir de pruebas de compresión axial sin confinar y de corte directo no drenado, arrojan valores variables entre 1.5 y 2 ton/m<sup>2</sup> antes de los 8m. de profundidad y valores más bajos de 1.3 ton/m<sup>2</sup> entre los 8m. y los 15m. de profundidad.

Continúan bajo la formación arcillosa superior, la primera capa dura (37.5 m. a 42.2 m.), la formación arcillosa inferior (42.2 m. a 55.0 m.) y los depósitos profundos, cuyas características no se describen por no ser objeto del problema.

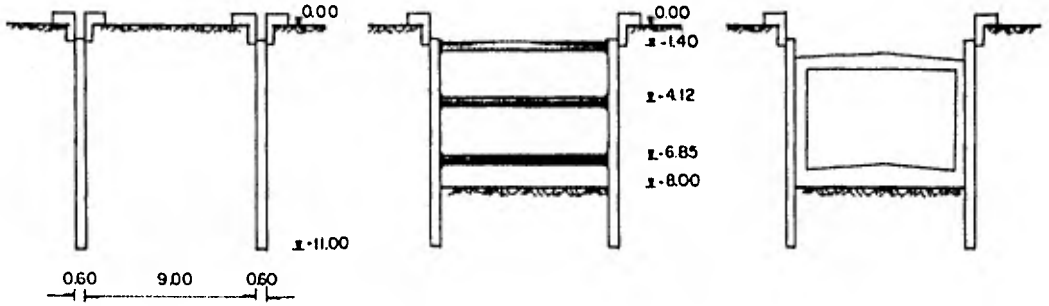
## IV

### PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO

El procedimiento constructivo consiste primeramente en excavar dos zanjas paralelas ademándolas con lodo bentonítico, enseguida se procede a colar, en cada una de ellas, un muro de concreto reforzado, los cuales constituyen la estructura de contención entre la cual se construirá el futuro cajón. A continuación se realiza la excavación del suelo contenido entre ambos muros, apuntalándolos conforme ésta avanza, para evitar movimientos laterales. Al llegar al fondo de la excavación se construye de inmediato la losa de fondo y posteriormente los muros interiores y la losa de techo. El procedimiento descrito anteriormente se muestra gráficamente en la figura # 5.

Antes de realizar la excavación se instala un sistema de pozos de bombeo con objeto de mantener seca la excavación y generar fuerzas de filtración favorables a la estabilidad tanto del fondo como del talud de avance.

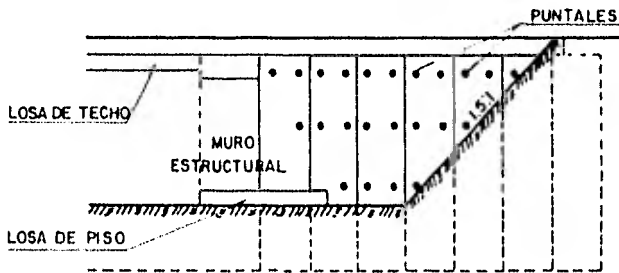
PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO



a) COLADO DE LA ESTRUCTURA EN ZANJA.

b) EXCAVACION Y COLOCACION DE PUNTALES.

c) COLADO DE LOSA INFERIOR, MUROS Y LOSA SUPERIOR.



d) SECUENCIA DE CONSTRUCCION EN CORTE LONGITUDINAL.

<b>U. N. A. M.</b>	
FACULTAD DE INGENIERIA	
TESIS PROFESIONAL	
ENRIQUE RODRIGUEZ MONTAÑO	
MEXICO, D.F.	FIG. No. 5

## ESTABILIDAD DE LA EXCAVACION

La excavación se realizará a una profundidad  $H = 8$  m. siendo la longitud de cada etapa de 7m. Aplicando el criterio de Bjerrum y Eide (ref. 2) para obtener el factor de seguridad F.S. contra la falla de fondo, se obtuvo:

$$F.S. = \frac{C \times N_c}{\gamma_m \times H} = \frac{1.30 \times 7.9}{10.33} = 0.99$$

D O N D E:

$N_c$  = Factor de capacidad de carga, en este caso igual a 7.9

$\gamma_m$  = Peso volumétrico del suelo.

Lo anterior significa que la excavación presentaba condiciones muy críticas de seguridad contra la falla por el fondo. Si valuamos el número de estabilidad "Ne" definido por Peck (ref. 3) como:



$$Ne = \frac{\gamma_m \times H}{c}$$

Obtenemos un valor de:

$$Ne = \frac{10.33}{1.30} = 7.95$$

De acuerdo con Peck, cuando la profundidad de la excavación corresponde a valores del número de Estabilidad "Ne" mayores de 6 o 7, se desarrolla un estado de equilibrio plástico en la arcilla del fondo de la excavación, se generan movimientos de tipo plástico en la masa del suelo y se producen asentamientos importantes en las zonas vecinas.

Se estudiaron varias alternativas para la excavación tendientes a evitar la falla de fondo, a continuación se mencionan algunas:

- a) Excavación de zanjas laterales para reducir la fuerza motriz ( $\gamma_m \times H$ ) que provoca la falla de fondo.
- b) Realizar inyecciones de consolidación con objeto de aumentar la cohesión en el subsuelo.
- c) Aplicación de bombeo electrosmótico para incrementar la cohesión del subsuelo y controlar las fuerzas de filtración.

La alternativa a) fue eliminada por no contarse con el suficiente espacio para la excavación de las zanjas laterales. Mientras que la segunda alternativa b) se desechó por resultar con un costo muy elevado, además de que debido a las características de dichas inyecciones el proceso resulta ser muy lento, afectándose el rendimiento de las demás operaciones constructivas.

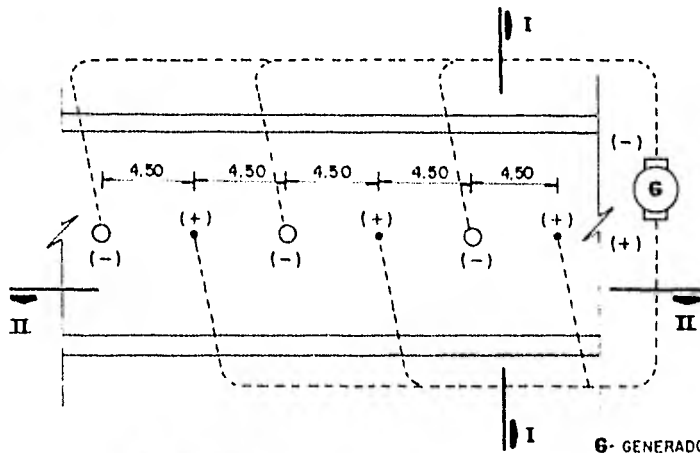
Una vez eliminadas las dos primeras alternativas se optó por utilizar la del bombeo electrosmótico, que resulta ser la más económica, pues de cualquier manera debe efectuarse una cierta extracción de agua. Con objeto de tener mayor experiencia e información en cuanto al aumento de la resistencia al corte de las arcillas al serle aplicada una corriente eléctrica, se decidió instrumentar dos secciones de acuerdo a lo indicado en los capítulos VII y VIII para finalmente ver la relación que existe entre Gasto-Voltaje-Incremento de Resistencia al corte.

Considerando que el tratamiento electrosmótico incrementa la resistencia al corte de la arcilla entre 10% y 15%, el factor de seguridad contra la falla de fondo se incrementará en la misma proporción:

Factor de seguridad antes de aplicar bombeo electrosmótico = 0.99

Factor de seguridad después de aplicar bombeo electrosmótico  
= 1.09 a 1.14

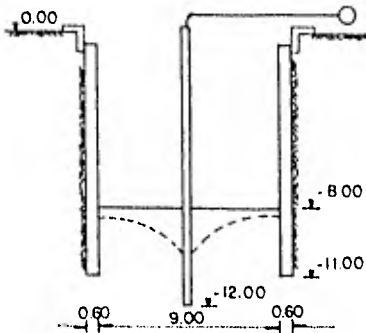
En la figura # 6 se muestra esquemáticamente la instalación del bombeo electrosmótico.



**PLANTA**

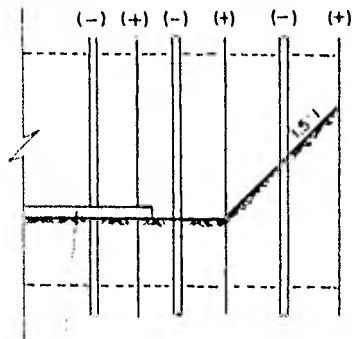
INSTALACION EN PLANTA DEL SISTEMA DE BOMBEO ELECTROSMOTICO.

- G- GENERADOR
- POZO CATODO (-)
- VARILLA ANODO (+)



**CORTE I-I**

CORTE TRANSVERSAL



LOSA DE PISO

**CORTE II-II**

CORTE LONGITUDINAL

**BOMBEO ELECTROSMOTICO.**

<b>U. N. A. M.</b>	
FACULTAD DE INGENIERIA	
TESIS PROFESIONAL	
ENRIQUE RODRIGUEZ MONTAÑO	
MEXICO, D.F.	FIG. No. 6

## VI

### BOMBEO ELECTROSMOTICO

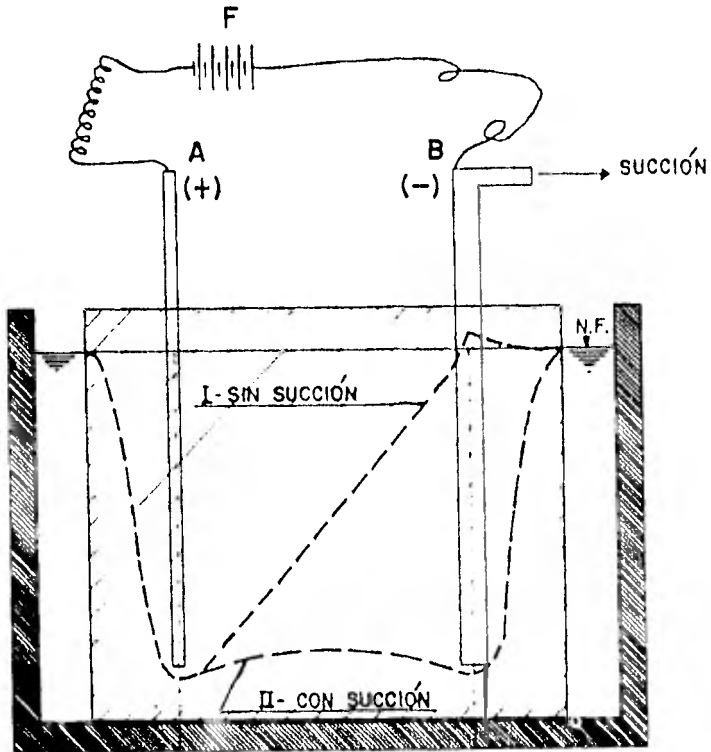
Es bien sabido que, por la baja permeabilidad hidráulica de los suelos arcillosos, el caudal de agua que fluye hacia el interior de una excavación es pequeño y se controla fácilmente. Sin embargo, las fuerzas de filtración que se desarrollan a consecuencia de este flujo constituyen el factor más importante de la inestabilidad. Este fenómeno es bien conocido en la excavación de arenas saturadas, en las cuales el control de dichas fuerzas de filtración mediante bombeo externo acarrea un notable incremento en la estabilidad de los taludes, además de permitir realizar los trabajos de construcción subsecuentes sin los problemas derivados de la presencia de agua en la excavación. El control de las filtraciones mediante el bombeo previo a las operaciones de excavación no solamente permite abatir el nivel freático en la zona por atacar, eliminando al mismo tiempo las fuerzas por filtración en los taludes y en el fondo, sino que favorece, además, el desarrollo de fuerzas capilares en el agua que permanece adherida a las partículas del suelo que antes estaba 100% saturado; tales esfuerzos capilares se traducen en un incremento temporal de la resistencia al corte (Cohesión Aparente) y por consiguiente, la estabilidad de la excavación se ve doblemente favorecida por el abatimiento del nivel freático.

En la actualidad se logran controlar, en forma semejante, las fuerzas de filtración e incrementar temporalmente la resistencia al corte de los limos y arcillas blandas saturadas, mediante la aplicación de una corriente eléctrica al suelo, combinada con la acción de dispositivos de bombeo. La presencia de la corriente eléctrica en el suelo origina una serie de fenómenos de naturaleza fisico-química, cuya aplicación a la construcción resulta de gran interés cuando se trata con materiales de esta clase.

## FUNDAMENTOS

El dispositivo que muestra la figura # 7 representa un prisma de arcilla blanda colocado dentro de un tanque de material aislante de la electricidad y rodeado de agua; dentro del suelo se coloca una barra metálica A y un tubo metálico B con perforaciones en su pared. El nivel piezométrico dentro del prisma de suelo será; para estas condiciones, horizontal. Si los elementos metálicos, A y B, se conectan ahora a una fuente de corriente continua o directa, F, se inicia el desarrollo de varios fenómenos:

El agua dentro del prisma de arcilla emigra del electrodo positivo, A, hacia el negativo, B, con una velocidad que, dependiendo del voltaje aplicado y la separación entre electrodos, puede ser del orden de 100 a 10,000 veces mayor que aquella con la que fluiría a través del mismo suelo bajo un gradiente de agua unitario. Este fenómeno del flujo del agua a través de los poros del suelo bajo la acción de un gradiente de potencial eléctrico se conoce con el nombre de ELECTROSMOSIS. Tras un lapso de algunos minutos de aplicado el potencial a los electrodos, el agua se acumula y brota alrededor del negativo, y alrededor del positivo se observan pequeñas grietas en dirección radial, indicando con ello el desarrollo de un estado de tensiones en el agua del suelo vecino al electrodo, lo cual provoca contracción y agrietamiento. Es evidente que en tales condiciones, la presión que existía en el agua de los poros del suelo antes de aplicar la corriente, no solo desaparece sino que adquiere un valor ne-



U. N. A. M.	
FACULTAD DE INGENIERIA	
TESIS PROFESIONAL	
ENRIQUE RODRIGUEZ MONTANO	
MEXICO, D.F.	FIG No. 7

gativo; la correspondiente curva del nivel piezométrico afecta entonces una forma semejante a la que ilustra la curva I. Si al mismo tiempo que se conecta la corriente eléctrica, se produce una succión en el tubo perforado del electrodo negativo, la superficie de abatimiento asume una forma semejante a la curva II. La rapidez con que se alcance el abatimiento y el desarrollo de tensiones en la masa de suelo afectada es una función del gradiente de potencial medio,  $I = V/L$ , expresado en voltios por centímetro de separación entre electrodos; el consumo de energía necesaria para lograr estos efectos depende de dicho gradiente eléctrico por una parte, y por la otra, de la conductividad eléctrica del suelo, la cual está íntimamente ligada a la concentración y clase de iones que existen en el agua del suelo y los que están químicamente adheridos a las partículas coloidales denominados bases intercambiables. Es costumbre expresar la conductividad eléctrica de un suelo en miliamperios por centímetro cuadrado de sección transversal a la corriente, bajo un gradiente de potencial de un voltio por centímetro. Tanto la rapidez con que se logra el abatimiento de la carga piezométrica como el desarrollo del estado de tensiones en el agua del suelo tienen gran importancia práctica en la estabilización de excavaciones en suelos finos, blandos y saturados.



## VII

### MEDICIONES DEL GASTO Y DEL VOLTAJE

Para estudiar el proceso de bombeo electrosmótico se escogieron dos secciones; la primera localizada en el cadenamiento 5 + 040 y la segunda en el cadenamiento 5 + 400, como se indica en la figura # 3.

La longitud de cada tramo o módulo de bombeo electrosmótico constituido por un sistema de 7 pozos, abarcó una distancia de 31.5 m. y el tratamiento se aplicó durante un periodo de 8 días, procediéndose al inicio de la excavación cuando el tratamiento alcanzó esta edad. El bombeo se suspendió en cada pozo cuando se construyó la losa de fondo.

La excavación se dividió en etapas de 7m. de longitud con objeto de lograr el máximo factor de seguridad posible contra una falla de fondo, así como de reducir las expansiones inmediatas.

El gradiente eléctrico que se decidió utilizar, de acuerdo con experiencias anteriores en la ciudad, varió entre 0.12 y 0.2 volt/cm. Como ánodos se usaron varillas corrugadas de acero de 3/4" de diámetro y como cátodos los pozos de bombeo, constituidos por ademes de acero ranurados de 5" de diámetro, dentro de los cuales se instaló una bomba de tipo eyector de 1" x 1 1/4". La separación entre ánodos y cátodos fue de 4.5 m. (fig. #6) por lo que para cumplir con los gradientes especificados, la caída de potencial eléctrico queda comprendida entre 54

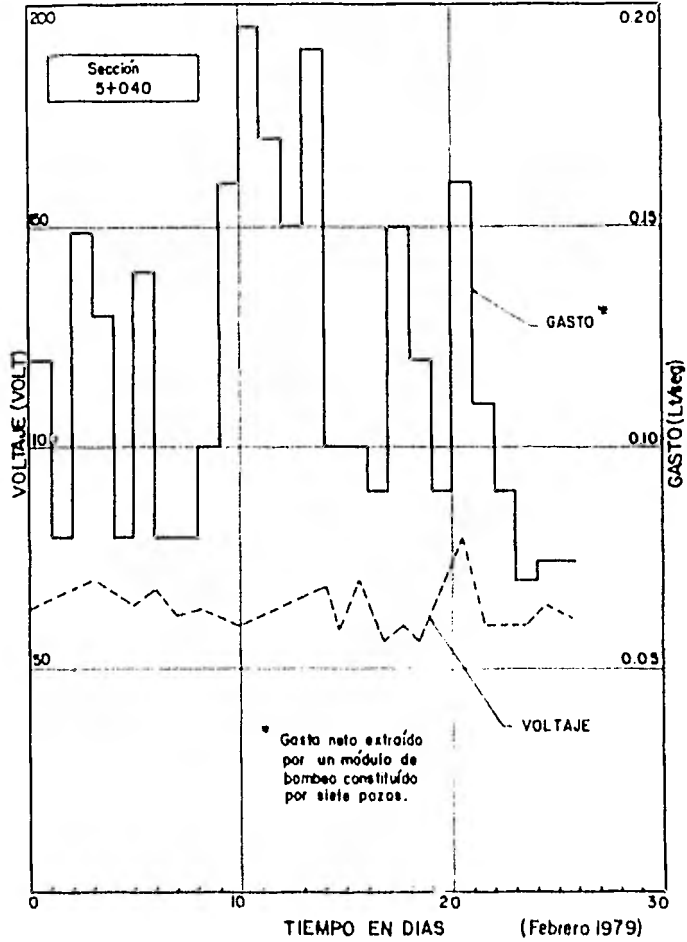
y 90 volts.

Se llevó en cada sección un registro de la variación del voltaje y del gasto con el tiempo. En las figs. 8 y 9 se presentan estas gráficas donde puede observarse que la caída de potencial eléctrico aplicada al suelo durante el período del tratamiento, varió entre 60 y 70 volts.

Así mismo se observó que el gasto obtenido en el módulo constituido por siete pozos distribuidos en una longitud de 31.5 m., varió entre 0.05 y 0.15 Lt/seg con valores promedio de 0.06 Lt/seg para la sección 5 + 040 y de 0.12 Lt/seg para la sección 5 + 400.

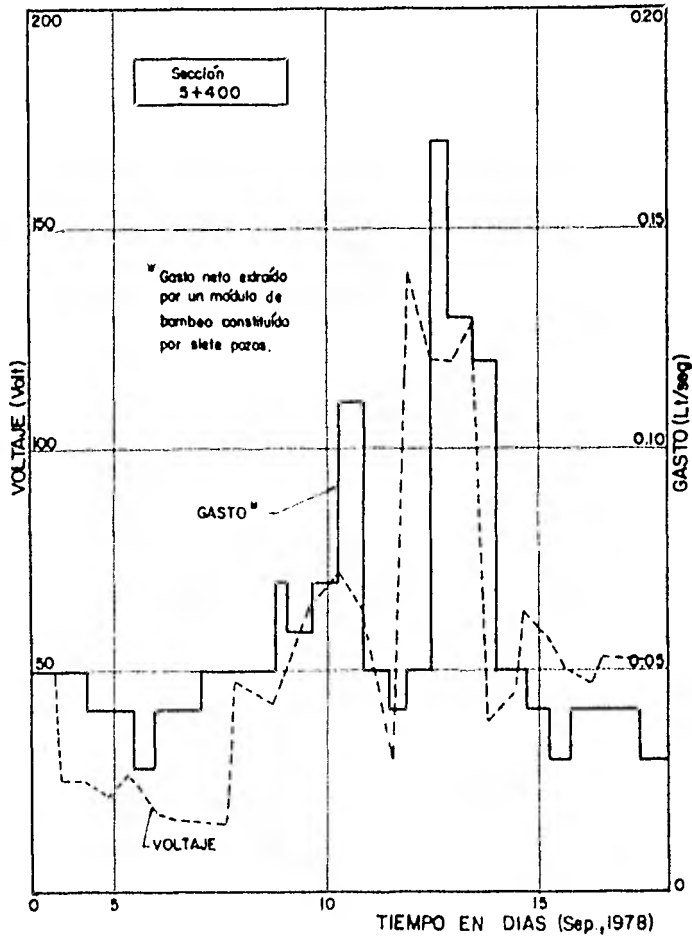
Se observó también que casi siempre que el voltaje aplicado al sistema de bombeo aumenta, hay un aumento sensible e inmediato del gasto extraído. Durante las primeras horas del tratamiento el suelo consume gran cantidad de energía, que con el tiempo va disminuyendo hasta estabilizarse en valores promedio de 40 amperes.

Si se toma en cuenta el gasto neto promedio extraído por módulo de bombeo durante los días que duró el tratamiento se puede tener una idea aproximada del valor en que el bombeo electrosmótico ha afectado al contenido de agua de la arcilla. Si consideramos que desde el nivel



SECCION 5+040  
 TRAMO: ECONOMIA -- HANGARES LINEA-5  
 GRAFICAS "VOLTAJE - TIEMPO" Y "GASTO - TIEMPO"

<b>U. N. A. M.</b>	
FACULTAD DE INGENIERIA	
TESIS PROFESIONAL	
ENRIQUE RODRIGUEZ MONTAÑO	
MEXICO, D.F.	FIG. No. 8



SECCION 5+400  
 TRAMO: ECONOMIA - HANGARES LINEA-5  
 GRAFICAS "VOLTAJE-TIEMPO" Y "GASTO-TIEMPO"

<b>U. N. A. M.</b>	
FACULTAD DE INGENIERIA	
TESIS PROFESIONAL	
ENRIQUE RODRIGUEZ MONTARO	
MEXICO, D.F.	FIG. No. 9

freático hasta la profundidad de los muros existe exclusivamente arcilla cuya relación de vacíos es en promedio de 7 y su grado de saturación de 100 %, el volumen de agua extraído durante el tratamiento resulta de 56 m<sup>3</sup>, por lo que la disminución en el contenido natural de agua de la arcilla es de apenas un 3%.

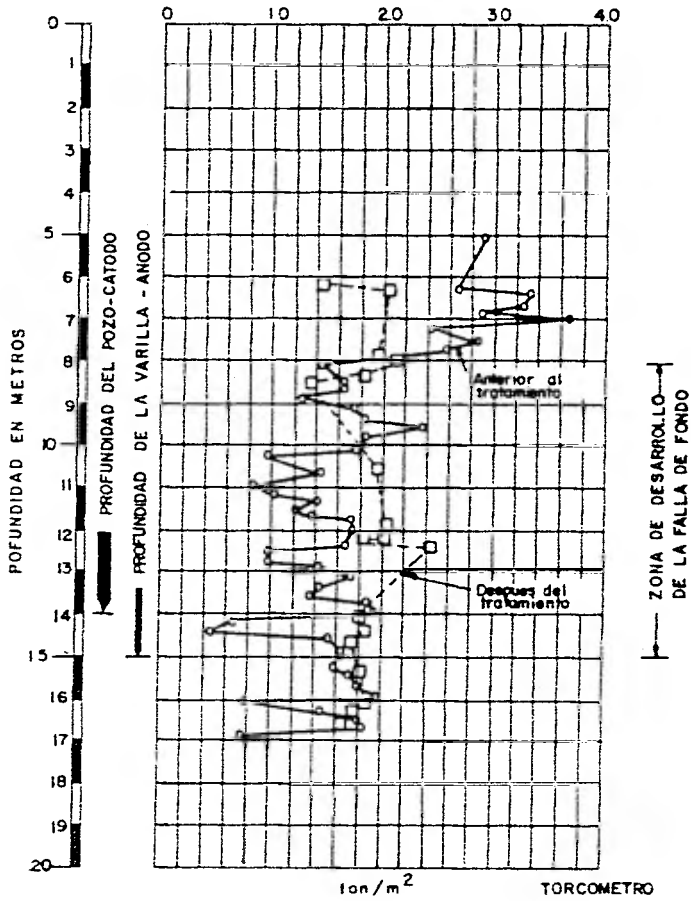
## VIII

### COMPARACION DE LA RESISTENCIA AL CORTE ANTES Y DESPUES DE APLICADA LA ELECTROSMOSIS

Con objeto de conocer el cambio en el valor de la resistencia al corte de la arcilla, se efectuaron cuatro sondeos de exploración a 17 m. de profundidad, dos antes de aplicar el tratamiento y dos después de aplicado, de los cuales se obtuvieron muestras inalteradas para efectuar pruebas de resistencia al corte.

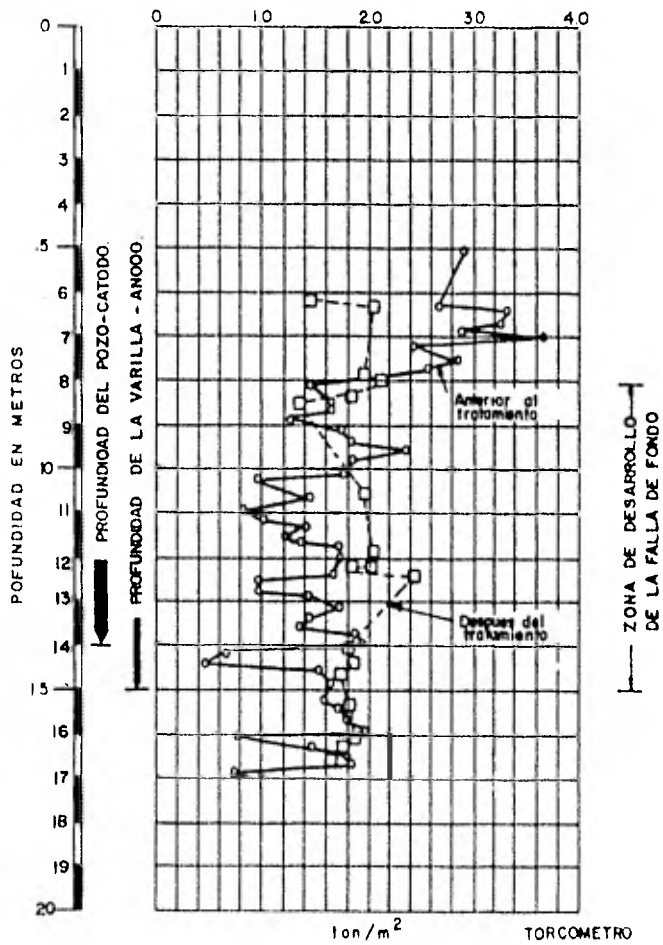
Las pruebas que se efectuaron fueron de veleta miniatura de laboratorio de 1" (torcómetro) y de resistencia a la compresión axial sin confinar. Los resultados de estas pruebas se muestran en las figuras 10, 11, 12 y 13 en las que puede observarse lo siguiente:

Las pruebas de veleta miniatura indican un incremento de la resistencia al corte de 28% para el sondeo 5 + 040 y de 35% para el sondeo 5 + 400. En tanto que las pruebas de resistencia a la compresión axial sin confinar indican un incremento promedio de 24% para el sondeo 5 + 040 y de 26% para el sondeo 5 + 400.



SONDEO 5+040  
 RESISTENCIA AL CORTE OBTENIDO DE PRUEBAS  
 DE VELETA MINIATURA (TORCOMETRO).

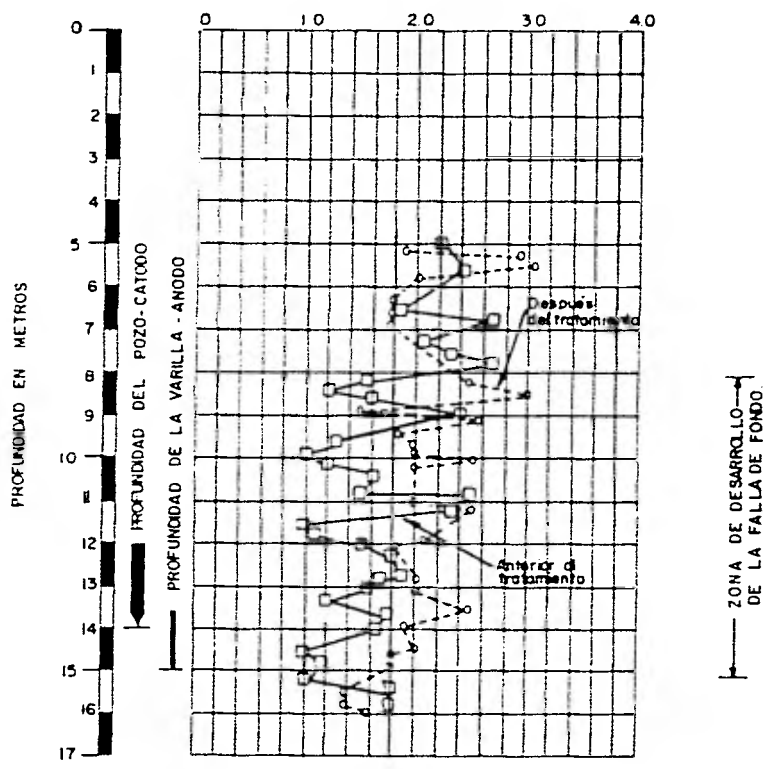
<b>U. N. A. M.</b>	
FACULTAD DE INGENIERIA	
TESIS PROFESIONAL	
ENRIQUE RODRIGUEZ MONTAÑO	
MEXICO, D.F.	FIG. No. 10



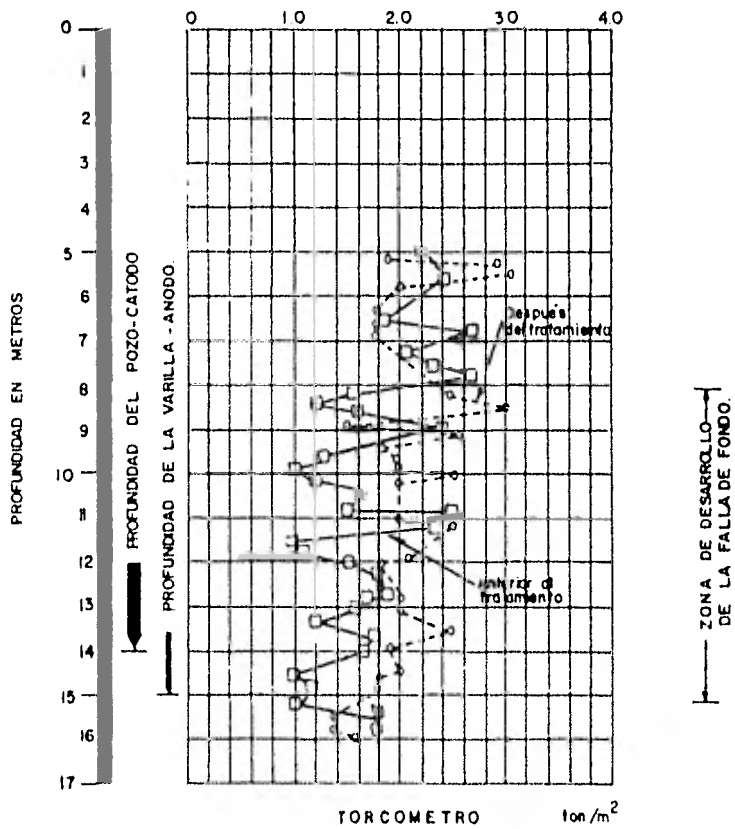
SONDEO 5+040  
 RESISTENCIA AL CORTE OBTENIDO DE PRUEBAS  
 DE VELETA MINIATURA (TORCOMETRO).

<b>U. N. A. M.</b>	
FACULTAD DE INGENIERIA	
TESIS PROFESIONAL	
ENRIQUE RODRIGUEZ MONTAÑO	
MEXCO., D.F.	FIG. No. 10



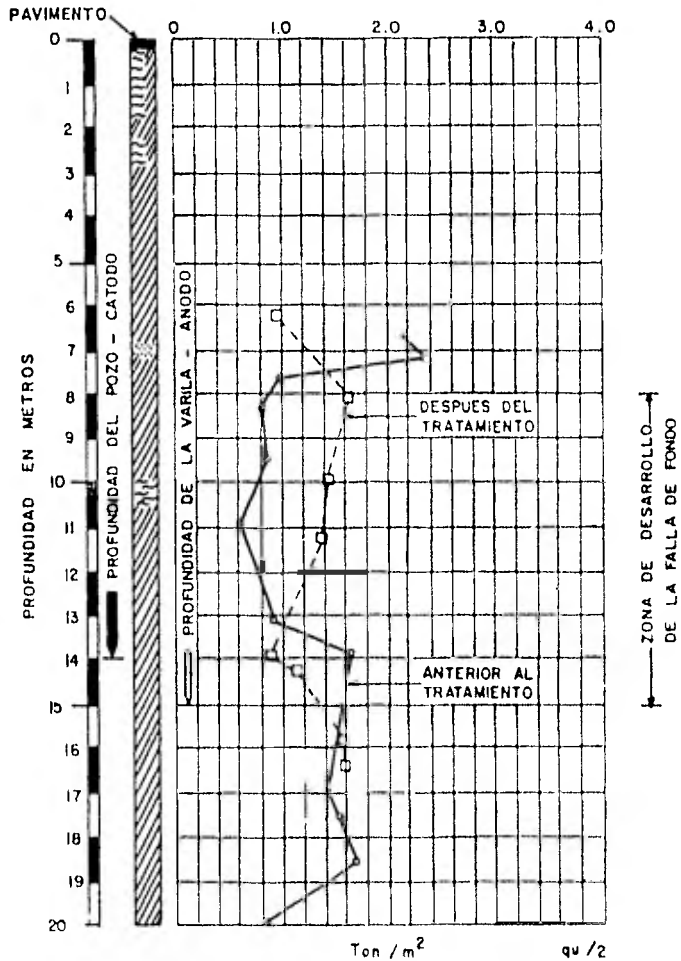


TORCOMETRO  $\text{ton/m}^2$   
 SONDEO 5+400  
 RESISTENCIA AL CORTE OBTENIDO DE PRUEBAS  
 DE VELETA MINIATURA (TORCOMETRO).



SONDEO 5+400  
RESISTENCIA AL CORTE OBTENIDO DE PRUEBAS DE VELETA MINIATURA (TORCOMETRO).

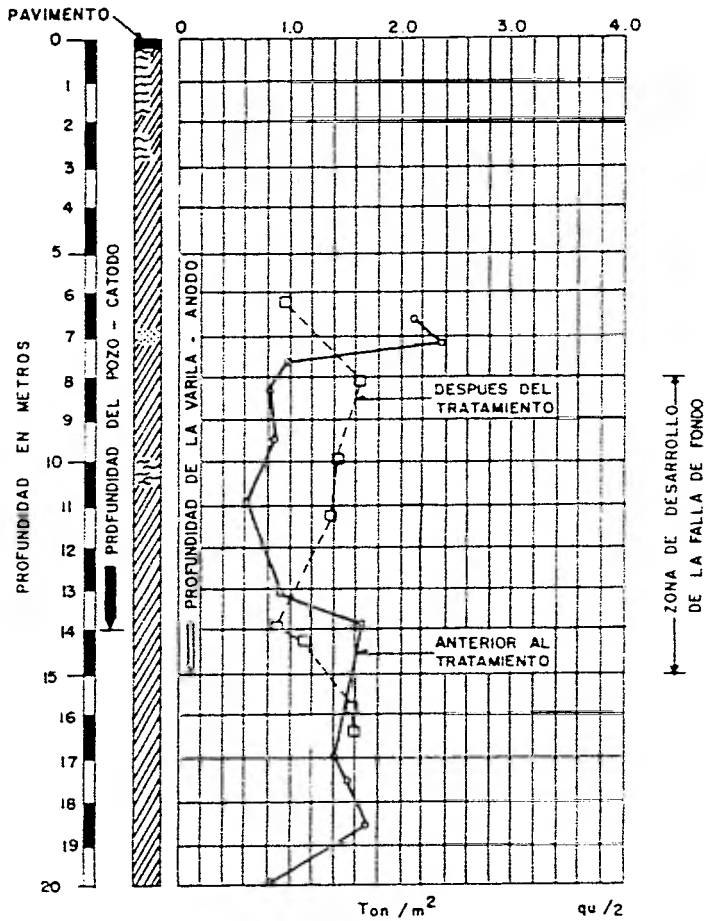
<b>U. N. A. M.</b>	
FACULTAD DE INGENIERIA	
TESIS PROFESIONAL	
ENRIQUE RODRIGUEZ MONTAÑO	
MEXICO, D.F.	FIG. No 11



SONDEO 5 + 040

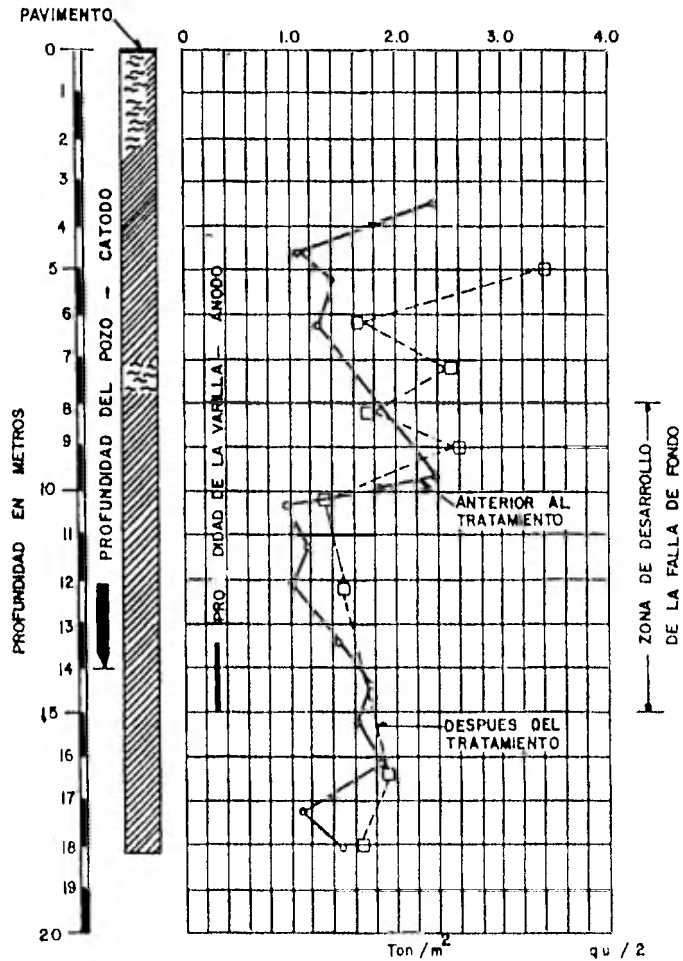
RESISTENCIA AL CORTE OBTENIDA DE PRUEBA DE COMPRESION AXIAL NO CONFINADA ( $q_u / 2$ )

<b>U. N. A. M.</b>	
FACULTAD DE INGENIERIA	
TESIS PROFESIONAL	
ENRIQUE RODRIGUEZ MONTAÑO	
MEXICO, D.F.	FIG. No 12



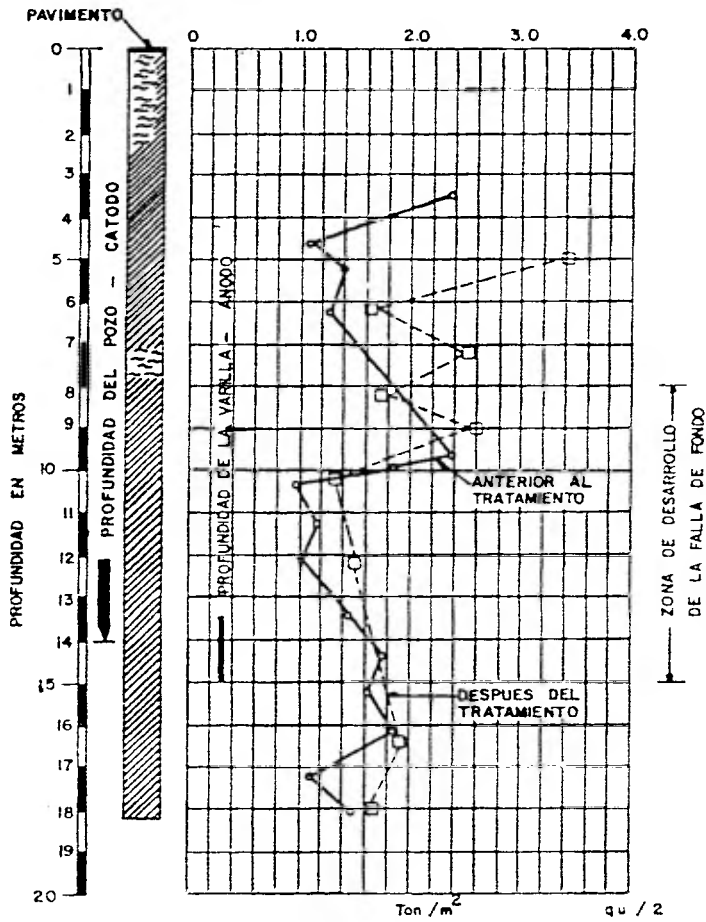
SONDEO 5 + 040

RESISTENCIA AL CORTE OBTENIDA DE PRUEBA DE COMPRESION AXIAL NO CONFINADA ( $q_u / 2$ )



SONDEO 5+400  
 RESISTENCIA AL CORTE OBTENIDA DE PRUEBA DE  
 COMPRESION AXIAL NO CONFINADA (  $q_u / 2$  )

<b>U. N. A. M.</b>	
FACULTAD DE INGENIERIA	
TESIS PROFESIONAL	
ENRIQUE RODRIGUEZ MONTAÑO	
MEXICO , D.F.	FIG. No. 13



SONDEO 5+400  
RESISTENCIA AL CORTE OBTENIDA DE PRUEBA DE  
COMPRESION AXIAL NO CONFINADA (  $q_u / 2$  )

<b>U. N. A. M.</b>	
FACULTAD DE INGENIERIA	
TESIS PROFESIONAL	
ENRIQUE RODRIGUEZ MONTAÑO	
MEXICO , D.F.	FIG. No. 13

Puede observarse en las figuras 10, 11, 12 y 13 que el incremento en la resistencia al corte de las arcillas, logrado una vez realizado el bombeo electrosmótico, es más significativo cuando estas son de una consistencia muy blanda (cohesión  $\leq 1.25 \text{ ton/ m}^2$ ), lo contrario sucede cuando las arcillas son de consistencia media, pues el fenómeno se invierte como lo muestra la figura 10, en la que puede observarse que entre los 5m. y los 8.5 m. de profundidad la resistencia disminuye. Se aprecia también que para las arcillas de consistencia blanda la resistencia no tiene cambios significativos.

Lo mencionado en el párrafo anterior parece estar relacionado con el estado de tensión que adquiere el agua perteneciente al suelo cuando le es aplicada una corriente eléctrica. Es decir, que si el suelo no contiene demasiada agua, aparecerán pequeñas grietas en éste, propiciando lógicamente la disminución de la resistencia al corte del mismo. Con un contenido de humedad alto, mayor al Límite Líquido ( $w\% > LL$ ) o cercano a éste, el suelo se comporta como fluido, por lo que al quitarle el exceso de humedad y poner el agua en estado de tensión, se obtiene un incremento en la resistencia. De lo anterior puede desprenderse que el uso de la electrólisis y del bombeo no deben realizarse en forma indiscriminada, pues un suelo cohesivo al cual se le aplique un exceso del voltaje, podría variar su consistencia primeramente de muy blanda a media y posiblemente empezar a perder resistencia, debido al exceso de voltaje aplicado, resultando este tratamiento contraproducente.

Desde luego que el número de pruebas de resistencia al corte, así como el número de sondeos realizados en este tramo sometido a tratamiento electrosmótico es bajo. Si se requiere determinar un valor más preciso que pueda posteriormente tomarse como base para análisis similares, será necesario intensificar el número de sondeos y de pruebas de laboratorio. Sin embargo, bajo las condiciones de bombeo aquí descritas, es posible establecer que en la mayoría de los casos cuando menos se ha obtenido un incremento del 20% de la resistencia al corte de la arcilla por efectos del tratamiento.



## IX

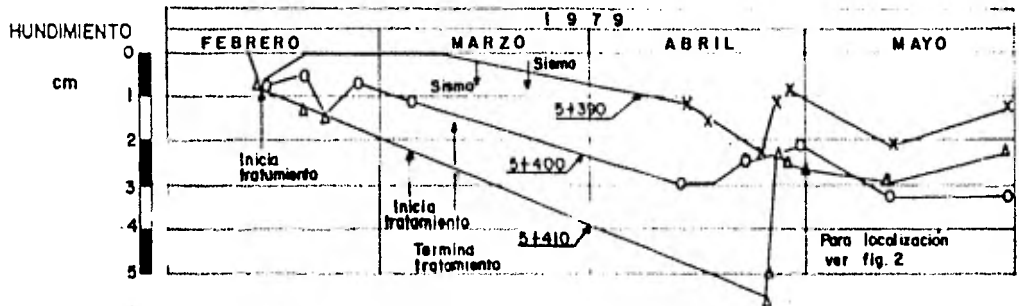
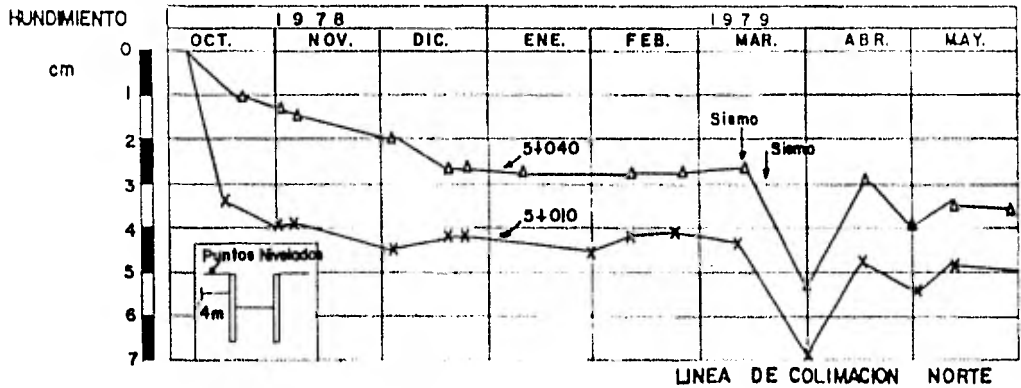
### MOVIMIENTOS GENERADOS EN EL SUELO VECINO

Se instalaron bancos de nivel superficial, constituyendo líneas de colimación, localizados a 4 m. de distancia de los muros de concreto. Estos bancos se ubicaron en los cadenamientos 5 + 040 y 5 +,400. En la figura # 14 se observa el comportamiento que presentó el suelo vecino a la excavación y del cual se puede mencionar lo siguiente:

Al iniciar el tratamiento se observó una tendencia de hundimiento que se acentuó durante el período de la excavación hasta alcanzar un valor de 2 cm. Finalmente el hundimiento total de la zona superficial vecina a la excavación en ambas secciones varió entre 4 y 5 cm., estabilizándose en un período aproximado de dos meses posterior al fin del tratamiento y no produjo ningún daño en la zona vecina.

En vista de que la arcilla del fondo alcanza condiciones de deformación plástica que genera movimientos en la superficie, los hundimientos producidos por la electrósmosis en la zona vecina a la excavación son aún menores que los registrados en la zona de excavación, ver figura # 14.

En la misma figura 14, puede observarse que los sismos de los días 14 y 21 de marzo de 1979, no provocaron asentamientos de cuidado o inestabilidad de la excavación.



MOVIMIENTOS VERTICALES EN LA SUPERFICIE VECINA A LA EXCAVACION.

**U. N. A. M.**

FACULTAD DE INGENIERIA

TESIS PROFESIONAL

ENRIQUE RODRIGUEZ MONTAÑO

MEXICO, D.F.

FIG. No 14

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

De acuerdo con lo descrito en los párrafos anteriores, pueden mencionarse las siguientes conclusiones:

- 1.- El uso del bombeo electrosmótico durante un período aproximado de ocho días previos a la excavación, logró incrementar la resistencia al corte de la arcilla del Valle de México, en la mayoría de los casos cuando menos 20%. Será necesario en el futuro hacer más pruebas de laboratorio para definir con precisión el valor de este incremento.
- 2.- El gradiente eléctrico que se aplicó para lograr este incremento varió entre 0.12 y 0.2 volt/cm.
- 3.- Bajo las condiciones en que fue aplicado el bombeo electrosmótico (voltaje-tiempo-gasto) los resultados más idóneos, en cuanto a incremento de resistencia, se obtuvieron en arcillas muy blandas.
- 4.- La duración del tratamiento electrosmótico fue en promedio de ocho días en tramos de 31.5 m. de longitud; bajo estas condiciones, los hundimientos máximos que se presentaron en las zonas vecinas

no excedieron de 5 cm. en un periodo de cuatro meses y no produjeron ningún daño.

- 5.- El gasto neto extraído durante el tratamiento para un módulo de bombeo, fue en promedio de 0.08 lt/seg.
- 6.- El incremento a la resistencia al corte de la arcilla se logró sin cambios apreciables en su contenido de agua, lo que implica que para las arcillas del Valle de México, cuyo coeficiente de permeabilidad es del orden de  $10^{-7}$  cm/seg, no se requiere extraer gran cantidad de agua para lograr un incremento en su resistencia al corte.
- 7.- El tratamiento electrosmótico permitió llevar un talud de avance con una inclinación mayor a la que inicialmente se había calculado.

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

- 1.- MARSAL R. MAZARI M., "El subsuelo de la Ciudad de México" contribución del Instituto de Ingeniería de la UNAM al primer Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos, México 2a. Edición 1969.
- 2.- BJERRUM L. EIDE O. "Estability of Struttred Excavations in Clay" Geotechnique No.6 p.p.32 - 47 Londres 1956.
- 3.- PECK R. B. "Deep Excavations and Tunneling in Soft Ground" State of Art Report, VII ICSMFE, México 1969 p.p.276 - 277
- 4.- ISTME.- "Especificaciones del Procedimiento Constructivo del Tramo Churubusco - Hangares en el subtramo comprendido entre el Km. 5 + 000 y el 5 + 514 de la Linea 5 del Metro". Septiembre de 1978, México, sin publicar.
- 5.- TAMEZ E. Y FLAMAND C. "Electrósmosis aplicada a la construcción" SOLUM, S.A. Publicación Interna No. 5 México 1963.