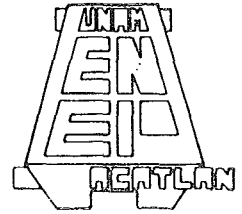




UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO



ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES "ACATLAN" INGENIERIA CIVIL

PROCESO DE ADQUISICION Y MAGNITUD DE LA CAPACIDAD DE CARGA EN PILOTES DE FRICCION.

M-0028720

TESIS PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

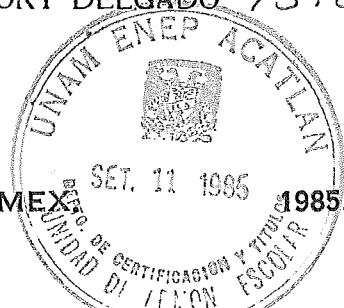
INGENIERO CIVIL

PRESENTAN:

GERMAN ANTONIO CARRILLO RUIZ 7593506-3

EDUARDO ROBERTO E. HJORT DELGADO 7593106-5

SANTA CRUZ ACATLAN, EDO. DE MEXICO 1985.





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.

PROCESO DE ADQUISICION Y MAGNITUD DE  
LA CAPACIDAD DE CARGA EN PILOTES  
DE FRICCION.

TESIS PROFESIONAL

GERMAN A. CARRILLO RUIZ.

EDUARDO R. E. HJORT DELGADO.

A MIS PADRES:

Sr. Sven Hjort Heyman.  
Sra. Guillermina Delgado de Hjort.

Eduardo

A MIS PADRES:

Ing. José Antonio Carrillo Díaz.  
Sra. Lidia Rufz de Carrillo.

Germán

A MIS HERMANOS:

Guillermo Arturo  
Sandra I. Elizabeth  
Ricardo A. Gustavo  
Karin I. Roxana.

Eduardo

A MI HERMANA:

Ma. Lidia Carrillo Rufz

Germán

A MI ESPOSA:

C. Araceli López de Hjort

Eduardo

A MI ESPOSA:

Rosario Acosta de Carrillo

Germán

Hacemos patente nuestro agradecimiento a  
las siguientes personas:

Ing. Arturo A. Bello Maldonado.  
Ing. Eduardo Anaya Mora.  
Ing. Gonzalo Silva Tamayo.  
Sr. Lorenzo Nery Silva.  
Srita. Teresa Ramos Rodríguez.  
Srita. Edith Reyes Eslava.



ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES ACATLAN  
COORDINACION DEL PROGRAMA DE INGENIERIA

UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

CI/103/1985.

SRES. GERMAN ANTONIO CARRILLO RUIZ  
Y EDUARDO ROBERTO HJORT DELGADO  
Alumnos de la carrera de Ingeniería  
Civil.  
P r e s e n t e s .

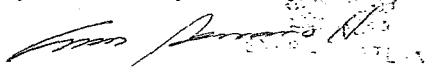
De acuerdo a su solicitud presentada con fecha, 6 de septiem  
bre de 1984, me complace notificarles que esta Coordinación tuvo a bien  
asignarles el siguiente tema de tesis: "Proceso de Adquisición y Magni  
tud de la Capacidad de Carga en Pilotes de Fricción", el cual se desa  
rollará como sigue:

- I.- Introducción.
- II.- Pruebas de Carga para Definir el Proceso de Adquisi  
ción y la Magnitud de la Capacidad de Carga en Pilo  
tes.
- III.- Resistencia de las Arcillas Remoldeadas.
- IV.- Comparación de Capacidades de Carga Definidas con -  
los Métodos de Cálculo Disponibles y las Obtenidas  
en las Pruebas de Carga Sobre los Pilotes.
- V.- Presiones, Cargas y Deformaciones Medidas en los Pi  
lotes.
- VI.- Pruebas Dinámicas en Pilotes.
- VII.- Conclusiones y Recomendaciones.

Asimismo fue designado como Asesor de Tesis el señor Ing  
Arturo A. Bello Maldonado, profesor de esta Escuela.

Ruego a ustedes tomar nota que en cumplimiento de lo especifi  
cado en la Ley de Profesiones, deberán prestar servicio social durante  
un tiempo mínimo de seis meses como requisito básico para sustentar  
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. Esta  
comunicación deberá imprimirse en el interior de la tesis.

A t e n t a m e n t e ,  
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"  
Acatlán, Edo. de Méx., a 26 de julio de 1985.



ING. HERMENEGILDO ARCOS SERRANO  
Coordinador del Programa de Ingeniería



## I N D I C E.

| CAP. |   | PAG. |
|------|---|------|
| I    | I N T R O D U C C I O N .   | 1    |
| II   | PRUEBAS DE CARGA PARA DEFINIR EL PROCESO DE ADQUISICION Y LA MAGNITUD DE LA CAPACIDAD DE CARGA EN PILOTES.                                      | 5    |
|      | II.1.- Programación de las pruebas.   |      |
|      | II.2.- Proceso de realización de las pruebas de carga.  |      |
|      | II.3.- Resultados obtenidos.  |      |
| III  | RESISTENCIA DE LAS ARCILLAS REMOLDEADAS.  | 21   |
| IV   | COMPARACION DE CAPACIDADES DE CARGA DEFINIDAS CON LOS METODOS DE CALCULO DISPONIBLES Y LAS OBTENIDAS EN LAS PRUEBAS DE CARGA SOBRE LOS PILOTES. | 30   |
|      | IV.1.- Capacidades calculadas y registradas en las pruebas.   |      |
|      | IV.2.- Hundimientos calculados y medidos para las pruebas de carga.   |      |

|     |  |    |
|-----|--|----|
| V   | PRESIONES, CARGAS Y DEFORMACIONES MEDIDAS<br>EN LOS PILOTES.   | 58 |
|     | V.1.- Mediciones en instrumentos embebi-<br>dos en los pilotos.  |    |
|     | V.2.- Presiones registradas en los gatos<br>hidráulicos planos instalados en la<br>superficie de desplante de las za-<br>patas.        |    |
| VI  | PRUEBAS DINAMICAS EN PILOTES.  | 81 |
|     | VI.1.- Descripción de la prueba dinámica.  |    |
|     | VI.2.- Teoría de la prueba dinámica.   |    |
|     | VI.3.- Conclusiones sobre el uso de las<br>pruebas de carga del tipo dinámi-<br>co en pilotos de fricción en la -<br>Ciudad de México. |    |
| VII | CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.  | 89 |
|     | VII.1.- Conclusiones.  |    |
|     | VII.2.- Recomendaciones.   |    |

## C A P I T U L O I.

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

La práctica de la ingeniería de cimentaciones ha demostrado que para las condiciones del subsuelo de la zona central de la ciudad de México, con arcillas suaves de alta compresibilidad y sujetas al fenómeno de hundimiento regional provocado por la reducción de niveles piezométricos en las capas de materiales granulares que se encuentran intercaladas entre los depósitos de arcilla, la utilización de pilotes de fricción presenta las mayores ventajas de comportamiento para estructuras que no pueden cimentarse superficialmente sobre los estratos de arcilla, bien sea por limitaciones en la capacidad de carga o por exceso en la magnitud de los hundimientos provocados.

Es interesante señalar que inclusive el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (Artículo 269) señala que el único tipo de cimentación profunda aceptable en la ciudad será el que haga uso de los pilotes de fricción, estando prácticamente desechadas las cimentaciones a base de pilotes de punta, a menos que se demuestre que tal sistema de cimentación no provocará efectos indeseables en la estructura misma y en las adyacentes. En las obras de ampliación del METRO de la ciudad de México han sido utilizados los pilotes de

fricción como sistemas de cimentación para un número importante de construcciones, la más relevante es la estructura elevada para la línea 4, que está formada a base de trabes postensadas libremente apoyadas en columnas y éstas transmiten su carga al subsuelo a través de una zapata que se apoya en pilotes de fricción.

El análisis y diseño de cimentaciones con pilotes de fricción es una de las tecnologías que más ampliamente se han desarrollado en México, por la obvia razón de resolver las cimentaciones de las importantes estructuras que se han construido en toda el área de la ciudad. Para el análisis y diseño de este tipo de cimentaciones, en general se hace uso, según se advierte en las publicaciones relativas, de los métodos de Terzaghi y del desarrollado por Leonardo Zeevaert; cabe hacer mención que para algunos casos particulares, los resultados que sobre la capacidad de carga se obtienen con estos métodos, -- arrojan resultados con diferencias significativas entre sí (Referencias 1 y 2).

El segundo aspecto a analizar y resolver para las cimentaciones, que es anticipar los hundimientos que se provocarán, -- constituye todavía para las cimentaciones con pilotes de fricción, un tema en proceso de investigación, pues actualmente -- para estimar tales hundimientos se hace uso de una serie de -- hipótesis simplificadoras y no puede decirse que exista un --

procedimiento de cálculo de hundimientos para cimentaciones con pilotes de fricción, que haya sido adecuadamente comprobado con los resultados de la observación de cimentaciones de este tipo.

Tomando en cuenta lo antes expresado y la importancia que tiene la estructura elevada de la línea 4 del METRO, el proceso de análisis y diseño de sus cimentaciones fue sometido a una serie de revisiones conceptuales durante la etapa de diseño, hasta asegurar que la solución adoptada constituye la opción que con mayor grado de seguridad tendrá un comportamiento satisfactorio en la vida útil de la estructura. No obstante, se planteó la necesidad de certificar el comportamiento de las cimentaciones a base de pruebas de carga ejecutadas en los pilotes hincados como parte de las mismas y de mediciones de presiones, cargas y esfuerzos en algunos de los elementos que forman parte tanto de la cimentación como de la estructura.

Adicionalmente, el programa de construcción de la línea 4 exigió la definición precisa del momento en que se puede contar con la capacidad de carga generada en los pilotes de fricción, por lo que las pruebas de carga en esos elementos se plantearon de manera tal que se pudiera definir el proceso de adquisición de resistencia y el lapso en que se puede asegurar que se ha generado la capacidad de carga total en los pilotes

de fricción hincados en las arcillas suaves de la ciudad de México.

El presente trabajo resume las mediciones y pruebas realizadas, los resultados obtenidos y las conclusiones y recomendaciones que de ellos se pueden derivar.

## C A P I T U L O I I

PRUEBAS DE CARGA PARA DEFINIR EL PROCESO DE ADQUISICION Y LA  
MAGNITUD DE LA CAPACIDAD DE CARGA EN PILOTES.

## II.1.- Programación de las pruebas.

La introducción de un pilote en los depósitos de arcillas suaves causa una perturbación, que de hecho es una destrucción total de la estructura de la arcilla y que prácticamente anula su resistencia al esfuerzo cortante por un tiempo. Este fenómeno tiene lugar, tanto si el pilote se introduce directamente en la masa del subsuelo, como si previamente se ejecuta una perforación retirando parte del material que va a ocupar el volumen del pilote; este último fue el proceso adoptado en la construcción de las cimentaciones de la línea 4 del METRO, con objeto de tratar de reducir la perturbación en la arcilla; sin embargo, no debe perderse de vista que la propia ejecución de la perforación causa en sí un remoldeo en la arcilla que queda en las paredes de la perforación y ésta, a su vez, será posteriormente desplazada y modificada en su estructura al introducir el pilote.

Es sabido que la arcilla de la ciudad de México presenta el fenómeno de tixotropía, caracterizado por la regeneración de la resistencia al esfuerzo cortante después del remoldeo

al transcurrir un cierto tiempo. Este lapso no habfa sido determinado y generalmente se estimaba que en 30 días se habrfia regenerado el total de la resistencia al esfuerzo cortante de la arcilla remoldeada; por esta razón se especificaba ejecutar hasta después de ese lapso, las pruebas de carga en los pilotes de fricción e incluso la continuación de la construcción que implicara la colocación de carga sobre dichos pilotes. Este lapso afectaba de manera importante a los procedimientos y secuencias de construcción, por lo que se planteó la necesidad de determinarlo mediante las propias pruebas de carga en los pilotes de fricción, ejecutadas a diferentes edades después de provocar la destrucción de la estructura de la arcilla por remoldeo.

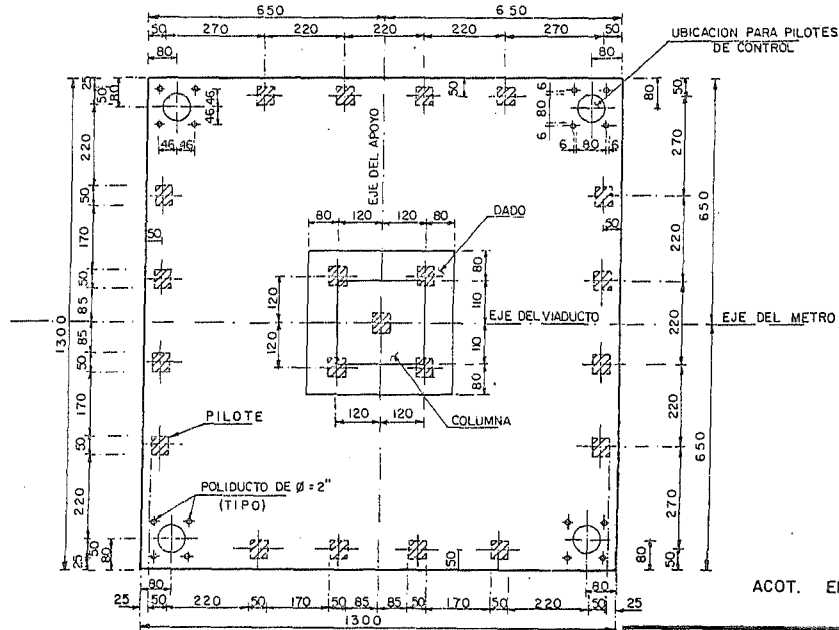
Adicionalmente, aún y cuando es común llevar a cabo las pruebas de carga de pilotes en elementos adicionales a los que forman la propia cimentación y ubicados fuera de ella, con el propósito de no interrumpir con la prueba el proceso de construcción, se consideró que para el caso de la línea 4 del METRO sería preferible ensayar algunos de los pilotes hincados para formar parte de sus cimentaciones, con el propósito de evitar las desviaciones que se pudieran tener, en cuanto a perturbaciones y efectos del hincado propio, cuando éste se realiza en pilotes que se sabe de antemano serán sometidos a pruebas de carga.



Las figuras 1 y 2 muestran la distribución típica definida para los pilotes en que se apoyan las zapatas de cimentación de la estructura elevada de la línea 4, tanto para el caso de tramos entre estaciones como para el caso de una estación, donde las cargas arrojadas por la estructura sobre las columnas son mayores y por lo tanto las dimensiones de las zapatas y el número de pilotes son considerablemente mayores.

La figura N° 3 muestra un corte típico de una de las zapatas de tramo, en la que se señala la ubicación relativa de los pilotes de fricción con respecto a la superficie y al primer estrato resistente de la ciudad. Esta ubicación relativa de los pilotes es prácticamente la misma a lo largo de toda la línea, ya que en general se especificó dejar un espacio del orden de 6 m. entre la punta de los pilotes y la parte superior del primer estrato duro. Las diferencias en la longitud de los pilotes obedecen exclusivamente a variaciones en la elevación de la parte superficial de este estrato; sin embargo, a lo largo de toda la línea, la longitud de los pilotes varió solamente entre 19 y 26 m.

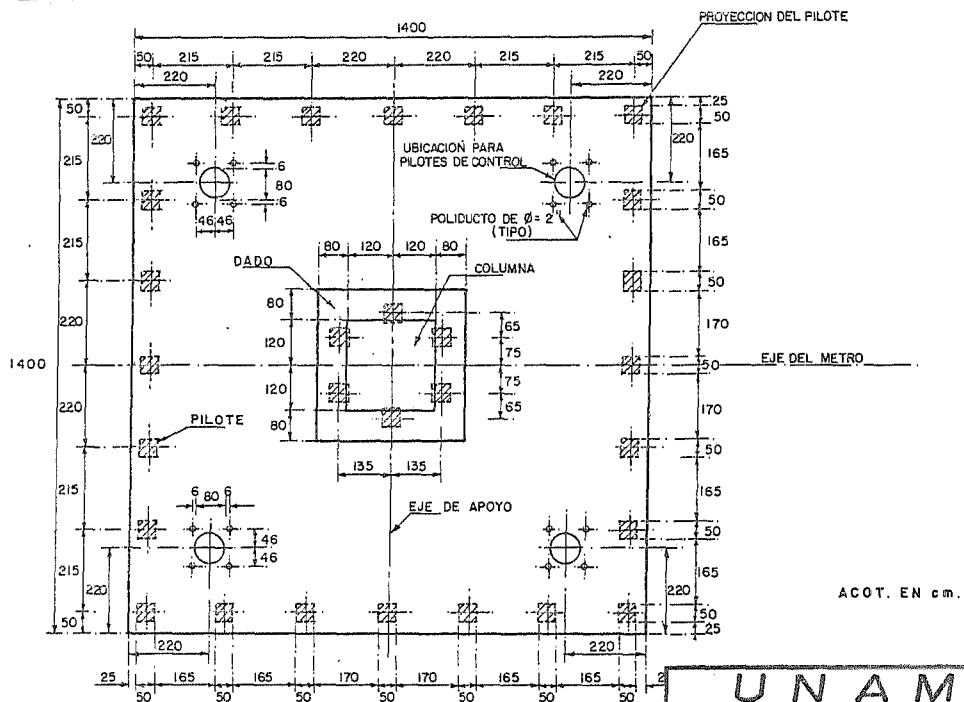
La disposición de los pilotes en que se apoyan las zapatas de cimentación, sugirió la posibilidad de ejecutar las pruebas de carga en los pilotes del centro y utilizar como pilotes de reacción a los que se encuentran en las orillas. De esta forma no resultaba necesario indicar anticipadamente en



**NOTAS .-**

- LA DISTANCIA ENTRE EJES DE ZAPATAS ES DE 30 Y 35 m. EN GENERAL.
- Nº DE PILOTES : 21

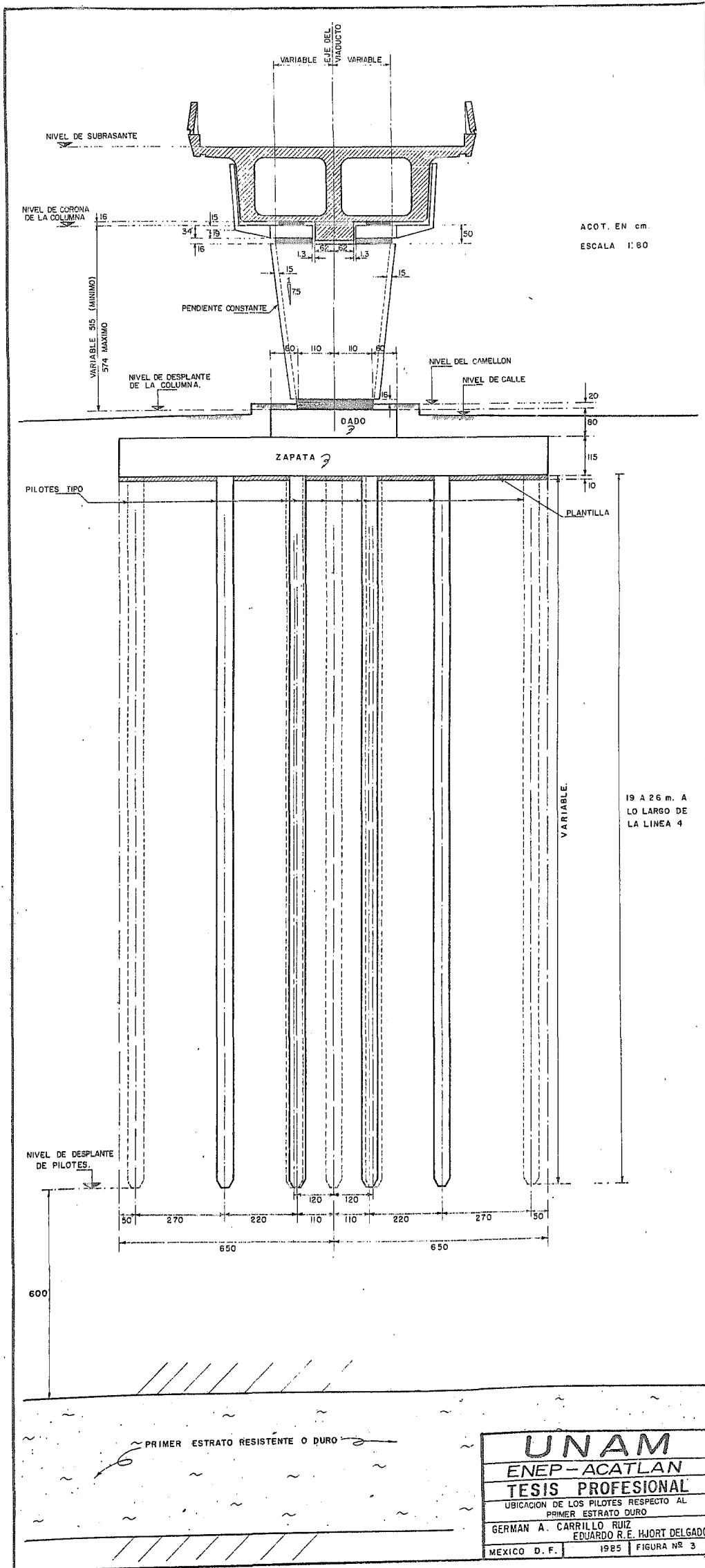
|  |      |             |
|--|------|-------------|
| <b>UNAM</b>  |      |             |
| <b>ENEP - ACATLAN</b>  |      |             |
| <b>TESIS PROFESIONAL</b>   |      |             |
| ZAPATA DE TRAMO ENTRE ESTACIONES<br>DISTRIBUCION TIPICA DE PILOTES |      |             |
| GERMAN A. CARRILLO RUIZ<br>EDUARDO R.E. HJORT DELGADO              |      |             |
| MEXICO D.F.  | 1985 | FIGURA Nº 1 |



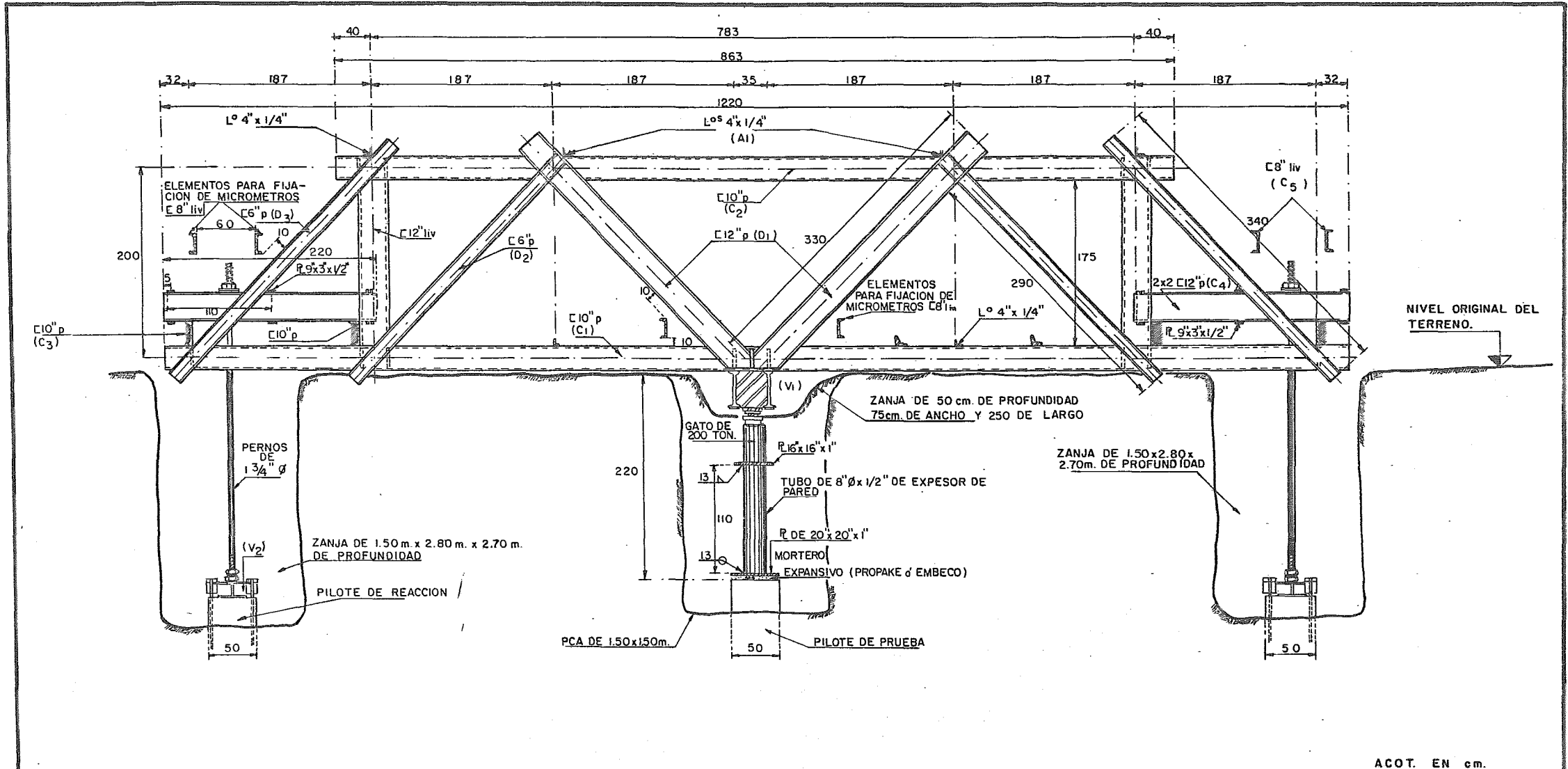
ACOT. EN cm.

- NOTAS**
- Nº DE PILOTOS MOSTRADOS : 30
  - EN GENERAL : 28 a 32 PILOTES.

|  |      |             |
|--|------|-------------|
| <b>UNAM</b>  |      |             |
| <b>ENEP - ACATLAN</b>                                |      |             |
| <b>TESIS PROFESIONAL</b>                             |      |             |
| ZAPATA DE ESTACION<br>DISTRIBUCION TIPICA DE PILOTES |      |             |
| GERMAN A. CARRILLO RUIZ                              |      |             |
| EDUARDO R.E. HJORT DELGADO                           |      |             |
| MEXICO D.F.  | 1985 | FIGURA Nº 2 |



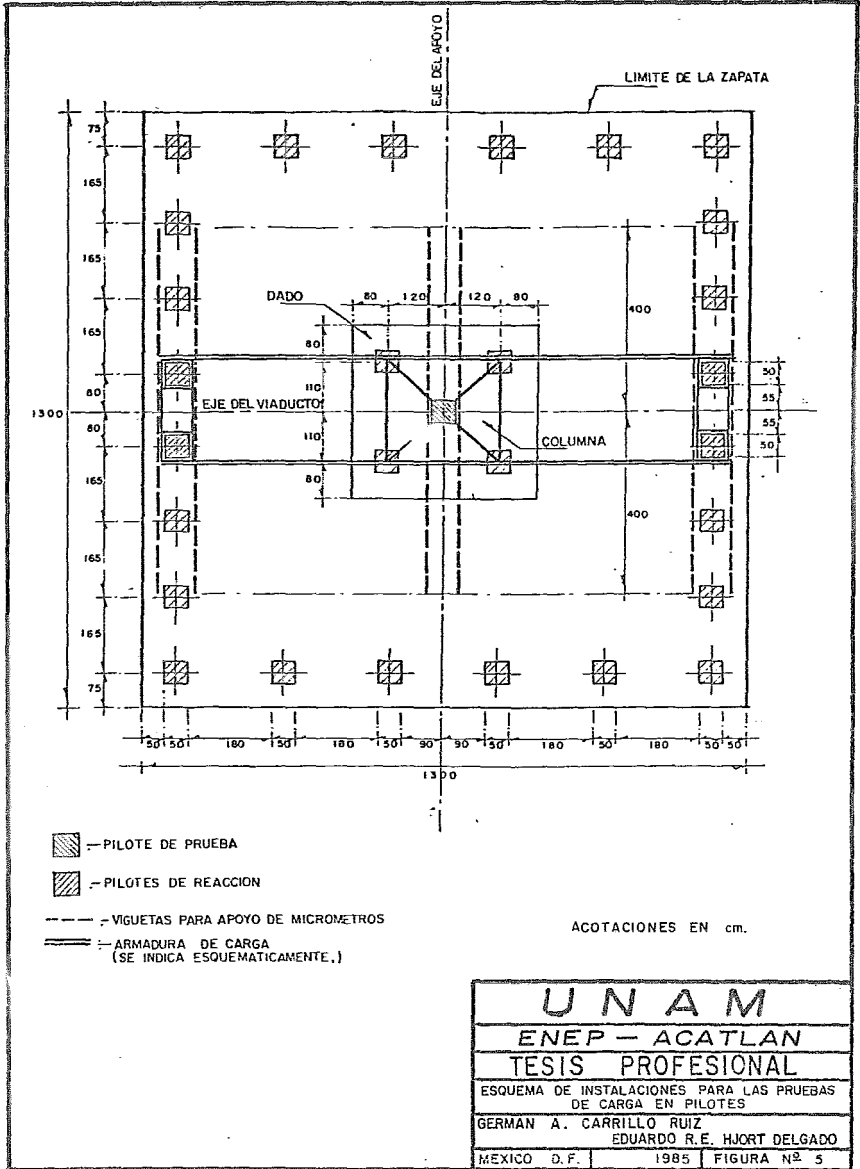
**UNAM**  
**ENEP-ACATLAN**  
**TESIS PROFESIONAL**  
 UBICACION DE LOS PILOTES RESPECTO AL  
 PRIMER ESTRATO DURO  
 GERMAN A. CARRILLO RUIZ  
 EDUARDO R.E. HJORT DELGADO  
 MEXICO D. F. 1985 FIGURA Nº 3



|   |      |             |
|---|------|-------------|
| <b>UNAM</b>   |      |             |
| <b>ENEP - ACATLAN</b>   |      |             |
| <b>TESIS PROFESIONAL</b>  |      |             |
| ESQUEMA DE LA ESTRUCTURA PARA TRANSMISION<br>DE CARGA USADA PARA LAS PRUEBAS EN LINEA 4 |      |             |
| GERMAN A. CARRILLO RUIZ<br>EDUARDO R.E. HJORT DELGADO                                   |      |             |
| MEXICO D. F.  | 1985 | FIGURA N° 4 |

cuales pilotes se ejecutarían las pruebas de carga, sino que éstos podrían ser seleccionados en cualquier zapata, dependiendo de la configuración estratigráfica hallada, de las variaciones en las propiedades del subsuelo detectadas, de los incidentes ocurridos durante el proceso de hincado o simplemente, a base de señalar que debía realizarse una prueba de carga a separaciones tales a lo largo de la línea, que incluyeran a un determinado número de pilotes; en principio se planteó que se debería realizar una prueba de carga por cada 100 pilotes hincados; no obstante, de acuerdo con las observaciones de la estratigrafía, el conocimiento de las propiedades del subsuelo y los resultados de las pruebas de carga realizadas, el número total de éstas fue de 17, para un total aproximado de 3824 pilotes hincados para la línea 4 entre las estaciones Martín Carrera y Santa Anita. Para realizar las pruebas de carga en los pilotes centrales, tomando la reacción en los pilotes de las orillas de la zapata, se diseñó y fabricó una armadura capaz de soportar la distribución de cargas necesaria y de tal manera que fueran ajustables las ubicaciones de los elementos de conexión a los 4 pilotes de reacción, teniendo en cuenta las variaciones geométricas que en la distribución de los pilotes requirieron las zapatas de la estructura en su desarrollo longitudinal.

La figura N° 4 muestra un corte de la armadura diseñada y de la posición en que se colocó normalmente para realizar



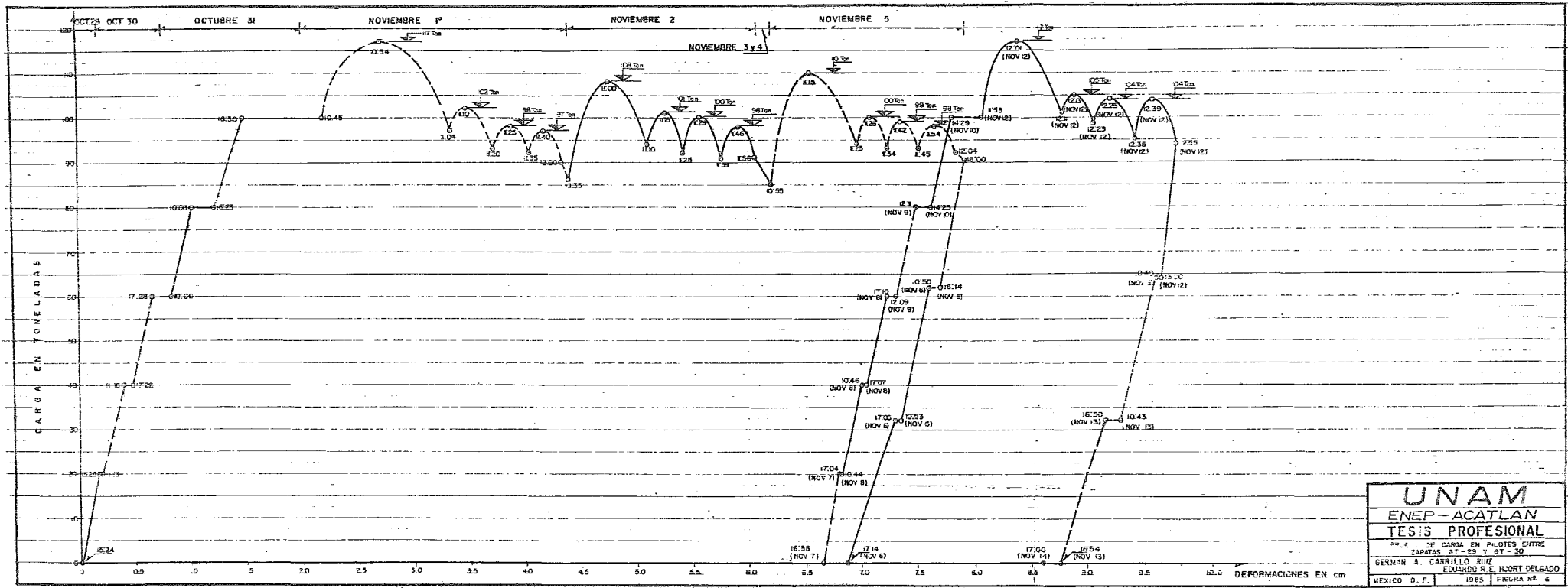
las pruebas de carga. La figura N° 5 muestra una posición típica en planta de la armadura con relación al pilote cargado y a los 4 pilotes de reacción de las orillas. Cabe señalar que la distancia entre el pilote central y los pilotes de las orillas, es en general mayor de 6 m y siendo los pilotes cuadrados de 50 X 50 cm de sección transversal, esta separación equivale a 12 veces la dimensión del pilote.

#### II.2.- Proceso de realización de las pruebas de carga.

Las pruebas se realizaron aplicando incrementos graduales y sucesivos de la carga y midiendo la penetración causada en el pilote, certificando la estabilización de los desplazamientos verticales después de cada incremento de carga, excepto en aquel que produjo la falla del pilote, pues en éste, normalmente ocurre una penetración súbita del elemento probado.

La figura N° 6 muestra un resultado típico de las pruebas de carga realizadas, donde puede verse que a partir de cero los incrementos de carga fueron de 20 ton; en cada uno de ellos se dejó transcurrir el tiempo suficiente para que se estabilizara la deformación provocada por ese incremento. En la figura se muestra que la capacidad de ese pilote en particular alcanzó 117 ton, habiéndose producido una penetración de aproximadamente 3.3 cm al alcanzar la falla; cuando ésta se presentó ocurrió una penetración súbita del pilote, con lo cual la carga en el





UNAM  
 ENEP - ACATLAN  
 TESIS PROFESIONAL  
 DE CARGA EN PLATES ENTRE  
 ZAPATAS 31-29 Y 31-30  
 GERMAN A. CARRILLO RUIZ  
 EDUARDO S. E. HORT DELGADO  
 MEXICO D. F. 1985 FIGURA Nº 6

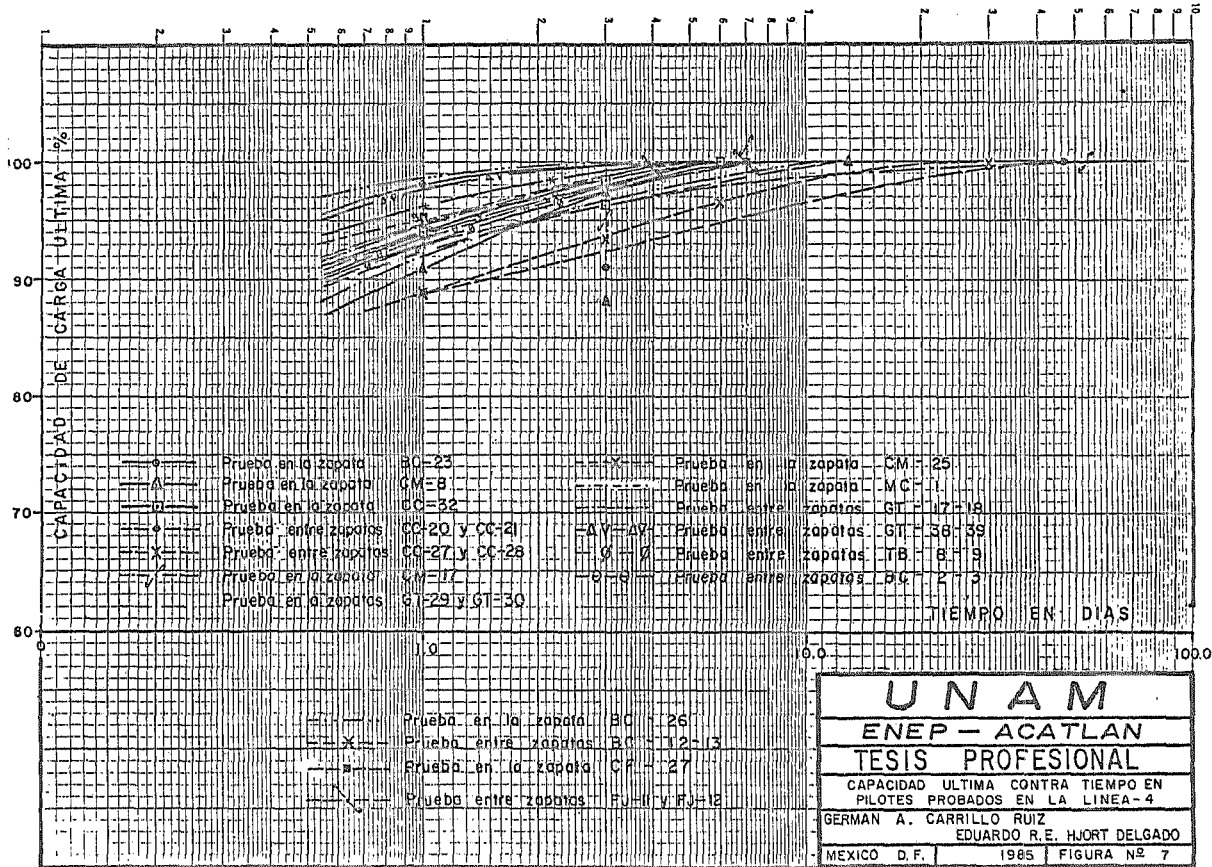
gato hidráulico utilizado para tal efecto, se redujo a un valor inferior al de la capacidad. Inmediatamente después se incrementó la carga para observar como se comporta la capacidad de un pilote que se obliga a penetrar; puede verse en la figura que la carga necesaria para desplazar al pilote decrece sucesivamente con la penetración, si bien, la reducción de capacidad es de sólo 20 ton al hacer penetrar el pilote aproximadamente 1 cm después de alcanzar su capacidad máxima. En la figura se puede observar también que después de un lapso de espera, de 23 horas en el caso señalado, la resistencia del pilote acusa una regeneración, pues alcanza un valor mayor al último obtenido en el proceso de penetración y al aplicar rápidamente nuevos incrementos de carga se obtiene otra vez una capacidad residual de 98 ton; para el caso que se presenta, después de la segunda serie de incrementos de carga para obligar la penetración del pilote y habiéndose alcanzado del orden de 60 mm de penetración, después de 71 horas de reposo desde la última falla, el pilote vuelve a regenerar su capacidad, alcanzando ahora 110 ton de capacidad máxima y al obligarlo a penetrar alrededor de 15 mm adicionales, la capacidad residual vuelve a ser del orden de 98 toneladas. Como fue repetitivo en las pruebas, en este momento el pilote se descargó totalmente y después de un proceso de aplicación de carga lenta, se vuelve a obtener una capacidad de 117 toneladas, 7 días después de la última falla provocada en él, y que corresponde exactamente con la primera magnitud de la capacidad de carga

alcanzada.

El proceso de carga antes descrito es típico de las pruebas realizadas en cada pilote, obligando a fallarlo a diferentes lapsos después de haber producido una falla previa en él. Aún más, la primera falla provocada en cada pilote se produjo a diferentes tiempos después del hincado del mismo, con lo cual se obtiene una relación entre el tiempo después de haber destruido la estructura de la arcilla, ya sea con el hincado del pilote o por haberlo obligado a penetrar con desplazamientos del orden de 15 mm, y midiendo la capacidad de carga alcanzada después de haber remoldeado la arcilla.

### II.3.- Resultados obtenidos.

La figura N° 7 muestra un resumen de los resultados obtenidos con el proceso de carga descrito; puede verse que la capacidad de los pilotes se regenera con el tiempo a partir del momento en que se remoldeó la arcilla en el perímetro del pilote y alcanza valores que van del 89 al 99% un día después del remoldeo y del 96 al 100%, diez días después del remoldeo. Se señala que se realizaron determinaciones a tiempos de 16 horas y hasta 53 días después de haber efectuado el remoldeo de las arcillas y todos los resultados caen en una zona bien definida, que permite asegurar que se pueden alcanzar capacidades de carga de los pilotes, del orden del 90% a las 24 horas de haber re-



**UNAM**  
**ENEP - ACATLAN**  
**TESIS PROFESIONAL**  
 CAPACIDAD ULTIMA CONTRA TIEMPO EN  
 PILOTES PROBADOS EN LA LINEA-4  
 GERMAN A. CARRILLO RUIZ  
 EDUARDO R.E. HJORT DELGADO  
 MEXICO D.F. 1985 FIGURA N° 7

moldeado la arcilla y del orden del 95%, cuando menos, a los 7 días después de haber remoldeado el material arcilloso adyacente al pilote.

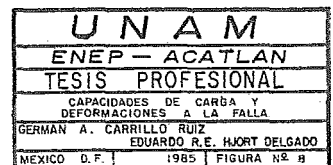
Es notorio también que para la mayor parte de los pilotes ensayados, a los 7 días después del remoldeo por hincado o por falla inducida en el pilote, se alcanza el 100% de la capacidad de carga máxima determinada para ellos.

La tabla de la figura N° 8 muestra además un resumen de las capacidades máximas definidas en los pilotes ensayados, así como la magnitud de la penetración ocurrida al alcanzar la máxima capacidad de carga, tanto en la primera aplicación como en las posteriores, cuando el pilote se descargó totalmente y se volvió a iniciar el proceso de carga.

En resumen, puede decirse que de las pruebas de carga realizadas en los pilotes de fricción, éstos alcanzan una capacidad a la falla comprendida entre 90 y 100 toneladas, que dicha falla se alcanza con penetraciones del orden de 22 a 43 mm, que el 90% de esa capacidad se alcanza a 24 horas después del remoldeo y entre el 98 y el 100% se alcanza 7 días después del remoldeo provocado, ya sea por el hincado del pilote o por haberlo obligado a penetrar bajo la carga aplicada.

CAPACIDADES DE CARGA Y MAGNITUDES DE LA DEFORMACION A LA FALLA  
PRUEBAS DE CARGA EN LINEA 4.

| PRUEBA   | EDAD DESDE EL -<br>HINCADO O DESDE<br>LA ULTIMA FALLA<br>(DIAS) | CAPACIDAD DE CARGA<br>(TONS) | DEFORMACION A LA<br>FALLA (CMS) |
|----------|---|------------------------------|---------------------------------|
| GT-17-18 |   | 140.0                        | 1.96 ~ 2.50                     |
| GT-29-30 | 157   | 117.0                        | 2.72 ~ 3.24                     |
|          | 7   | 117.0                        | 1.72 ~ 2.13                     |
| GT-38-39 | 261   | 120.0                        | 1.86 ~ 2.42                     |
| TB-8-9   |   | 106.0                        | 2.20 ~ 2.57                     |
| BC-2-3'  |   | 123.0                        | 2.70 ~ 3.31                     |
| BC-12-13 |   | 100.0                        | 2.38 ~ 2.98                     |
|          | 7   | 109.0                        | 2.06 ~ 2.60                     |
|          | 5   | 107.0                        | 1.75 ~ 2.21                     |
| BC-23    | 35  | 94.0                         | 3.75 ~ 4.26                     |
| BC-26    |   | 118.0                        | 3.22 ~ 4.22                     |
| CC-20-21 | 94  | 105.0                        | 2.84 ~ 3.50                     |
|          | 7   | 90.0                         | 1.78 ~ 2.46                     |
| CC-27-28 | 57  | 99.0                         | 3.08 ~ 3.81                     |
|          | 6   | 95.5                         | 2.09 ~ 2.68                     |
| CC-32    | 125   | 111.0                        | 2.70 ~ 3.54                     |
|          | 6   | 111.5                        | 2.27 ~ 3.09                     |
| CM-8     | 38  | 99.0                         | 2.52 ~ 3.25                     |
|          | 13  | 99.5                         | 1.78 ~ 2.26                     |
| CM-17    |   | 99.0                         | 2.48 ~ 3.08                     |
|          | 7   | 100.5                        | 1.91 ~ 2.45                     |
| CM-25    |   | 100.0                        | 2.35 ~ 3.17                     |
| MC-1     |   | 108.0                        | 3.06 ~ 4.04                     |
| CF-27    | 113   | 120.0                        | 3.50 ~ 3.83                     |
|          | 7   | 129.0                        | 2.35 ~ 3.02                     |
| FJ-11-12 |   | 100.0                        | 2.09 ~ 2.46                     |
|          | 7   | 102.0                        | 2.00 ~ 2.55                     |



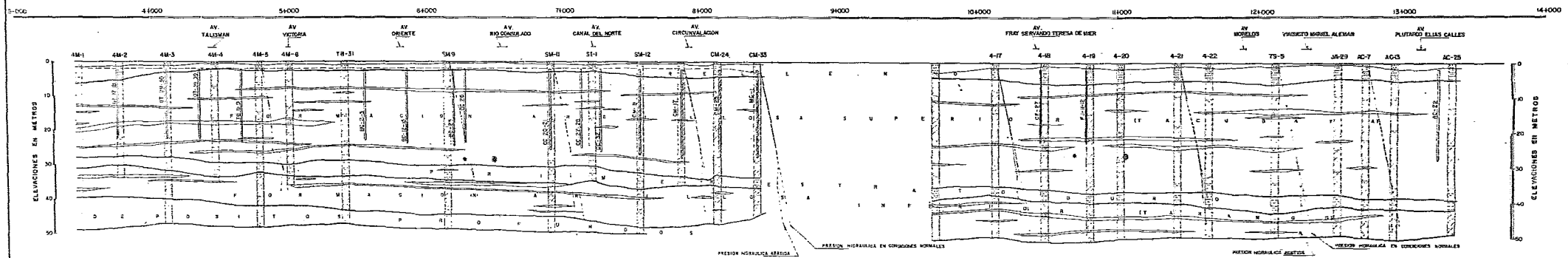
## C A P I T U L O I I I

## RESISTENCIA DE LAS ARCILLAS REMOLDEADAS.

Con el propósito de comparar el modo de adquisición de resistencia de las arcillas remoldeadas, obtenido de las pruebas de carga realizadas en los pilotes, con el que puede obtenerse de muestras analizadas en el laboratorio, se realizó una serie de ensayos tendientes exclusivamente a definir el efecto del remoldeo en la resistencia al esfuerzo cortante de las arcillas y el proceso con el que esta regeneración tiene lugar por el efecto de tixotropía. Se ensayaron a compresión simple muestras inalteradas de las arcillas halladas en toda la profundidad, desde la superficie hasta la ubicación del primer estrato duro, en un sondeo ubicado en Inguarán y Canal del Norte; muestras gemelas de las ensayadas en estado natural fueron remoldeadas y en ellas se determinó su resistencia a compresión simple a diferentes edades después del remoldeo. Con este proceso se pudo definir el tiempo que toma la regeneración tixotrópica, así como la máxima resistencia alcanzada después del remoldeo; se pudo determinar así la sensibilidad de las arcillas, dada por la relación entre la resistencia a la compresión simple en estado natural y la correspondiente máxima obtenida después de haber alcanzado la regeneración total.

La figura N° 9 muestra un perfil estratigráfico a lo

PERFIL ESTRATIGRAFICO A LO LARGO DE LA LINEA 4 DEL METRO.



- SÍMBOLOS**
- ▨ REBLLENDO
  - ▧ GRAVEDA
  - ▩ ARENA
  - SILTOS
  - PEDREGALES

**UNAM**  
 ENEP - ACATLÁN  
 TESIS PROFESIONAL  
 PERFIL ESTRATIGRAFICO A LO LARGO DE LA LINEA 4 DEL METRO  
 CONFECHO & COLABORADORES  
 MARZO 2011



COMPARACION DE VALORES DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESION SIMPLE OBTENIDOS EN  
MUESTRAS DEL MISMO ESTRATO ARCILLOSO EN LINEA-4

| VALORES PROMEDIO DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESION SIMPLE, kg/cm <sup>2</sup> |                                |                               |                            |                             |                              |
|---|--------------------------------|-------------------------------|----------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| SONDEO<br>ESTRATO   | SONDEO DE APOYO<br>KM 5+002.50 | INGUARAN Y ORIENTE 87<br>SM-9 | INGUARAN Y ESTEÑO<br>SM-11 | INGUARAN Y C. NORTE<br>SI-1 | INGUARAN Y PINTORES<br>SM-12 |
| ARCILLA<br>TACUBAYA I   | 0.222                          | 0.503                         | 0.297                      | 0.353                       | 0.385                        |
| ARCILLA<br>TACUBAYA II  | 0.617                          | 0.607                         | 0.213                      | 0.351                       | 0.409                        |
| ARCILLA<br>TACUBAYA III   | —                              | 0.492                         | 0.528                      | 0.435                       | 0.520                        |
| ARCILLA<br>TACUBAYA IV  | 0.540                          | 0.553                         | 0.507                      | 0.586                       | 0.689                        |
| ARCILLA<br>TACUBAYA V   | —                              | 0.987                         | —                          | 0.750                       | —                            |

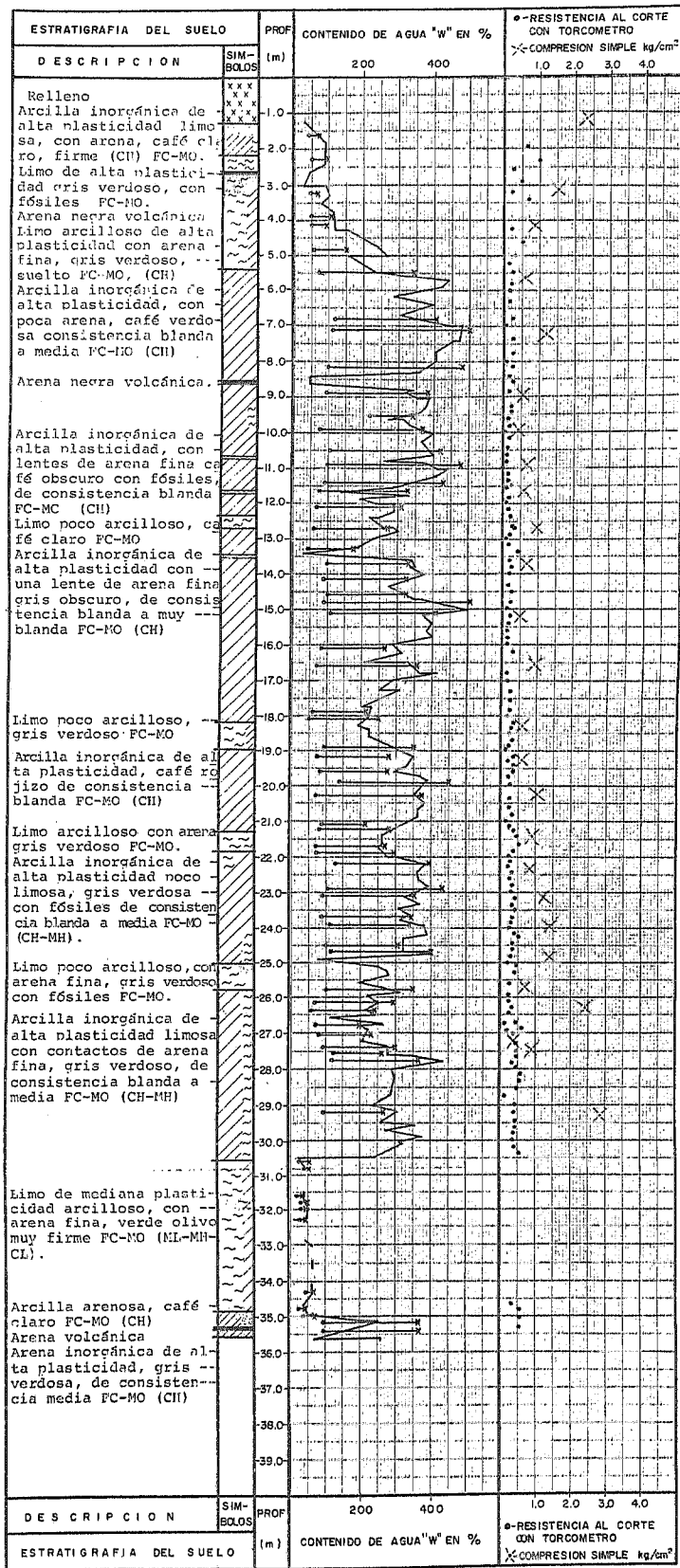
|   |      |              |
|---|------|--------------|
| <b>UNAM</b>   |      |              |
| <b>ENEP - ACATLAN</b>                                 |      |              |
| <b>TESIS PROFESIONAL</b>                              |      |              |
| VALORES DE QU PARA CADA<br>ESTRATO ARCILLOSO, L-4.    |      |              |
| GERMAN A. CARRILLO RUIZ<br>EDUARDO R.E. HJORT DELGADO |      |              |
| MEXICO D.F.   | 1985 | FIGURA N° 10 |

largo de la línea 4, en la que puede verse que la formación del subsuelo es prácticamente uniforme.

La tabla de la figura N° 10 muestra una comparación de las resistencias a compresión simple obtenidas para las arcillas muestreadas a profundidades tales que corresponden al mismo estrato, en diferentes ubicaciones a lo largo de la línea. En la figura N° 9 se muestran también los sitios en que fueron determinadas las presiones hidráulicas actuantes en los diferentes estratos granulares, con el propósito de determinar la presión efectiva actual. En el mismo perfil se compara la presión hidráulica registrada con la que existiría bajo condiciones hidrostáticas normales, con objeto de mostrar la magnitud del incremento de presión efectiva causado por el abatimiento del agua del subsuelo. Debe recordarse que este incremento de presiones es el causante del hundimiento regional que todavía tiene lugar en la ciudad y que es de aproximadamente 8 cm por año en la actualidad. Para la zona de la línea 4 esta cifra tiene validez y representatividad.

La figura N° 11 muestra la estratigrafía determinada en el sitio explorado y muestreado con el propósito exclusivo de obtener muestras para determinar la sensibilidad de las arcillas y definir el proceso de adquisición de resistencia después del remoldeo. En el perfil se muestra la configuración obtenida de las resistencias a compresión simple en estado

METRO LINEA - 4  
INGUARAN - CANAL DEL NORTE



S I M B O L O S

- RELLENO
- ARCILLA
- LIMO
- ARENA
- GRAVA
- FÓSILES
- VIDRIO VOLCANICO
- X - LIMITE LIQUIDO L.L.
- - LIMITE PLASTICO L.P.

**UNAM**  
ENEP - ACATLAN  
TESIS PROFESIONAL

PERFIL ESTRATIGRAFICO TIPICO

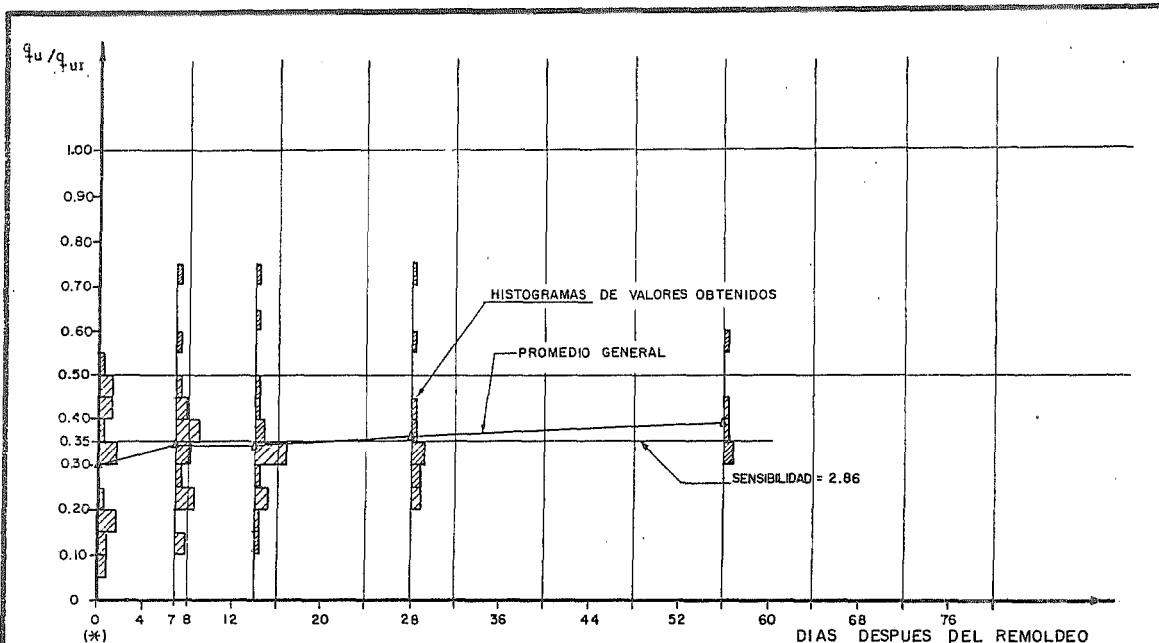
GERMAN A. CARRILLO RUIZ  
EDUARDO R.E. HJORT DELGADO

MEXICO D. F. 1985 FIGURA Nº 11

natural, además de las identificaciones usuales de los materiales, los contenidos de agua típicos de las formaciones del subsuelo de la Ciudad de México y la ubicación de los límites de consistencia en relación con los contenidos de agua.

La figura N° 12 muestra los resultados obtenidos para la resistencia a compresión simple de arcillas remoldeadas y ensayadas a diferentes edades después del remoldeo; puede verse que la regeneración tixotrópica se presenta en lapsos que no exceden de 7 días, a juzgar por la zona donde se puede considerar que la curva media de resistencia se hace asintótica.

De la figura N° 12 puede verse que la magnitud de la máxima resistencia a compresión simple obtenida para las arcillas remoldeadas es del orden de 0.35 de la resistencia a compresión simple en estado natural, lo que significa que la sensibilidad de las arcillas de la Ciudad de México es del orden de 2.86. La resistencia remoldeada sería la mayor que podría considerarse para definir la capacidad de carga de los pilotes de fricción, pues el material adyacente a las paredes de éstos ha sufrido el proceso de remoldeo y su resistencia depende de la regeneración tixotrópica. Se enfatiza que las resistencias a compresión citadas corresponden a ensayos no confinados, es decir, ejecutados en muestras que fueron remoldeadas dentro del tubo de muestreo y ahí mismo se permitió la regeneración tixotrópica, sin confinamiento propiamente dicho, sino contan-



$q_u$  = RESISTENCIA A COMPRESION SIMPLE EN MUESTRAS REMOLDEADAS

$q_{uI}$  = RESISTENCIA A COMPRESION SIMPLE EN MUESTRAS INALTERADAS

(\*) - PRUEBAS EFECTUADAS UNOS MINUTOS DESPUES DEL REMOLDEO

|  |                   |
|--|-------------------|
| <b>UNAM</b>  |                   |
| <b>ENEP - ACATLAN</b>  |                   |
| <b>TESIS PROFESIONAL</b>   |                   |
| PROCESO DE ADQUISICION DE<br>RESISTENCIA DE ARCILLAS REMOLDEADAS |                   |
| GERMAN A. CARRILLO RUIZ  |                   |
| EDUARDO R.E. HJORT DELGADO                                       |                   |
| MEXICO D.F.  | 1985 FIGURA N° 12 |

do solamente con el soporte de las paredes del tubo de muestreo para evitar la pérdida de forma de las muestras remoldeadas cuando se les anuló su resistencia al esfuerzo cortante.

Cabe señalar que en determinaciones de resistencia al esfuerzo cortante de arcillas, tanto inalteradas como remoldeadas, sujetas a presión de confinamiento y consolidación bajo ella, Referencias N° 2 y 3, se ha podido establecer que en esas condiciones la resistencia al esfuerzo cortante, natural en las arcillas inalteradas y regenerada en las arcillas remoldeadas, es función de la presión actuante sobre la superficie de falla y la relación entre ambos parámetros resulta prácticamente proporcional, habiéndose definido como factor a la tangente de un "Angulo de resistencia adquirida" que resultó de 28° a 30° cuando la falla se provocó entre la arcilla remoldeada y una superficie de mortero de cemento y de 25° a 29° en las arcillas inalteradas. Lo anterior significa que bajo confinamiento, la arcilla remoldeada puede adquirir una resistencia al esfuerzo cortante inclusive mayor a la correspondiente a la arcilla inalterada de la que proviene. Este resultado está confirmado por los ensayos que se describen en la Referencia N° 3.

En resumen, se puede concluir que las arcillas, en su estado natural, alcanzan resistencias al esfuerzo cortante que son proporcionales a las presiones de consolidación a que se

hayan visto sujetas; por lo tanto, las presiones de preconso- lidación que muestran algunas arcillas de la Ciudad de México, han definido la resistencia que presentan en su estado actual inalterado. Las arcillas remoldeadas presentan un comportamien- to similar, adquiriendo mayor resistencia al esfuerzo cortan- te en proporción con la presión de consolidación a que se ven sometidas; las arcillas remoldeadas que no se consolidan bajo presión, regeneran por el fenómeno tixotrópico, una resisten- cia igual al 37% de su resistencia inalterada.

Las resistencias esperadas para las arcillas remoldeadas sujetas a una presión de consolidación, serán las que deban a- plicarse para el cálculo de la capacidad de carga de pilotes de fricción, pues la arcilla que queda adherida a las paredes de los pilotes ha sufrido el remoldeo que causa la introducción propia de estos elementos y su regeneración de resistencia de- pende de la tixotropía y de la presión de consolidación que actúe sobre la superficie de falla, que en este caso será la interfase entre las paredes del pilote y la masa del subsuelo. Cabe hacer notar que para altas presiones de consolidación en la superficie de falla, la resistencia adquirida por la arci- lla remoldeada excederá la propia de la arcilla inalterada y será esta resistencia la asignable para el cálculo de capaci- dad de carga de los pilotes, pues este material, en estado na- tural, se encuentra adyacente a la porción remoldeada junto al pilote.

## C A P I T U L O I V .

## COMPARACION DE CAPACIDADES DE CARGA DEFINIDAS CON LOS METODOS DE CALCULO DISPONIBLES Y LAS OBTENIDAS EN LAS PRUEBAS DE CARGA SOBRE LOS PILOTES.

## IV.1.- Capacidades calculadas y registradas en las pruebas.

Utilizando los valores de la resistencia a compresión simple determinada con la prueba convencional o a través del torcómetro y teniendo en cuenta lo antes expresado con respecto a la resistencia regenerada en las arcillas remoldeadas, se calcularon las capacidades de carga por fricción y la pequeña contribución de la punta, para tres pilotes probados en campo y siguiendo los métodos expresados por Terzaghi, Ref. N° 1, y por Leonardo Zeevaert, Ref. N° 2. Para el análisis de cada pilote se utilizó el sondeo de exploración y los resultados de laboratorio, ubicados más próximos al pilote analizado. La tabla de la figura N° 13 muestra la comparación de resultados obtenidos con los métodos de cálculo antes señalados y los derivados de las pruebas de carga.

Se aclara que en los cálculos realizados se utilizó la relación entre la presión horizontal y vertical correspondiente al estado de falla definida por:



$$K_{\phi} = \frac{1 - \text{sen}^2 \phi}{1 + \text{sen}^2 \phi} ; \quad K_{\phi} = 1 \text{ para } \phi = 0^{\circ}$$

admitiendo que la arcilla remoldeada regenera su resistencia conforme a la expresión:

$$S_{\phi} = P_n \cdot \tan \phi_a = (K_{\phi} \cdot P_v) \cdot \tan \phi_a$$

y el valor de  $S_{\phi}$  es la resistencia al corte por utilizar en la valuación de la capacidad de carga cuando resulta menor que  $S_c = 0.5 q_u$ , siendo  $q_u$  la resistencia a compresión simple obtenida en muestras inalteradas; los valores de  $S_c = 0.30 q_u$ , propuestos en la Ref. N° 2, no parecen tener una justificación total; la expresión utilizada conduce a una mejor coincidencia entre las capacidades calculadas y las registradas en las pruebas. También, se utilizó un área tributaria igual a la de un círculo con diámetro igual a 12 veces la dimensión del pilote, pues en las pruebas el pilote ensayado es aislado, teóricamente su área tributaria es infinita, pero la influencia de este parámetro en la capacidad calculada disminuye notablemente a partir de la magnitud así definida, Fig. N° 14.

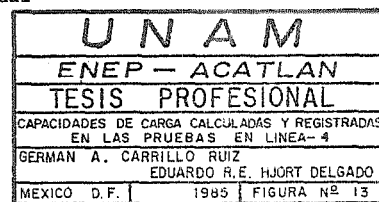
De la tabla de la figura N° 13 puede concluirse de inmediato que las capacidades calculadas utilizando como resistencia al esfuerzo cortante la definida para las arcillas remoldeadas que han regenerado su resistencia por el efecto tixotró-

COMPARACION DE CAPACIDADES DE CARGA CALCULADAS Y REGISTRADAS EN LAS PRUEBAS  
DE PILOTES DE FRICCION

| PILOTE   | CAPACIDAD POR PUNTA (ton) | CAPACIDAD CALCULADA POR FRICCION Y TOTAL (ton) |       |                         |   |          |                | CAPACIDAD OBTENIDA EN LA PRUEBA DE CARGA (ton) | RELACIONES EN %      |                      |                      |
|----------|---------------------------|--|-------|-------------------------|---|----------|----------------|--|----------------------|----------------------|----------------------|
|          |                           | METODO DE TERZAGHI                             |       |                         | METODO DE ZEEVAERT                              |          |                |  | $\frac{Q_{T1}}{Q_R}$ | $\frac{Q_{T2}}{Q_R}$ | $\frac{Q_{T3}}{Q_R}$ |
|          |                           | USANDO $S=C_r=0.37 (1/2 q_u)$                  |       | USANDO $S=C_1=0.50 q_u$ | $S=(K_\phi \cdot P_v) \operatorname{tg} \phi_a$ |          | $S_C=0.50 q_u$ |  |                      |                      |                      |
| $Q_P$    | $Q_F$                     | $Q_{T1}$                                       | $Q_F$ | $Q_{T2}$                | $Q_F$   | $Q_{T3}$ | $Q_R$          |  |                      |                      |                      |
| BC-23    | 7                         | 45   | 52    | 120                     | 127   | 96       | 103            | 94   | 55                   | 135                  | 110                  |
| CC-20-21 | 7                         | 38   | 45    | 104                     | 111   | 92       | 99             | 105  | 43                   | 106                  | 94                   |
| CC-32    | 12                        | 38   | 50    | 103                     | 115   | 99       | 111            | 111  | 45                   | 104                  | 100                  |
| CM-8     | 10                        | 53   | 63    | 144                     | 154   | 122      | 132            | 99.5   | 63                   | 155                  | 133                  |

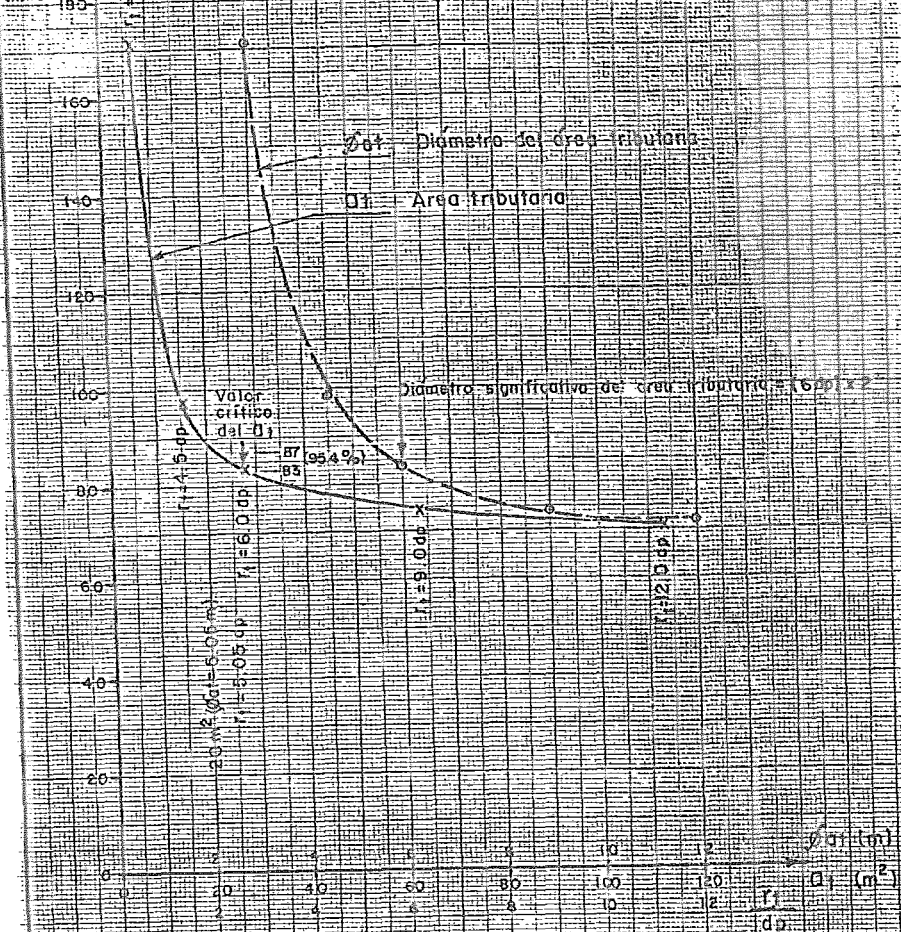
NOTAS :

- 1.- Se utilizó  $K_\phi=1$ ;  $\operatorname{tg} \phi_a = \operatorname{tg} 26^\circ = 0.488$
- 2.- Se utilizó  $S_C = 0.50$  pues la reducción a  $S_C=0.30 q_u$  (Ref. N° 2) no resulta justificable.
- 3.- Para el área tributaria se utilizó un círculo con diámetro igual a 12 veces la dimensión del pilote.
- 4.- En la ubicación de la zapata CM-8, las  $q_u$  determinadas en los estratos próximos a la punta y a la cabeza de los pilotes, son en general mayores a las resultantes en otros sondeos. Este pilote no se consideró confiable para establecer las conclusiones finales.



$Q_{fr}$   
(ton)

NOTA: PRESION INICIAL DISIPADA CON  
EXCAVACION A 2.0m



NOTAS:  
 $r_p$  Radio del área tributaria  
 $d_p$  Diámetro del pilote

**UNAM**  
**ENEP - ACATLAN**  
**TESIS PROFESIONAL**  
 EFECTO DEL AREA TRIBUTARIA EN LA  
 CAPACIDAD DE CARGA POR FRICCION  
 GERMAN A. CARRILLO RUIZ  
 EDUARDO R.E. HJORT DELGADO  
 MEXICO D.F. 1985 FIGURA N° 14

pico sin confinamiento, resultan considerablemente menores que las capacidades de carga registradas en las pruebas, entre el 43% y el 63% para los pilotes analizados; por lo tanto, se puede aseverar que la regeneración de la resistencia al esfuerzo cortante de las arcillas es mayor a la que corresponde a la condición no confinada y debe aceptarse entonces que se produce, siguiendo la relación de proporcionalidad entre la presión de consolidación aplicada en la superficie de falla y la resistencia adquirida, la cual se ha definido como la tangente del "ángulo de resistencia adquirida", que varía de 25° a 29°.

Por otro lado, la capacidad de carga calculada utilizando como resistencia al esfuerzo cortante a la cohesión deducida de los valores de resistencia a compresión simple inalterada, suponiendo que el ángulo de fricción de este material es nulo, presenta una coincidencia aceptable en dos de los casos que se presentan en la tabla de la figura N° 13, pero en el tercero, correspondiente al pilote de la zapata BC - 23, la capacidad calculada es 135% de la registrada en la prueba. El análisis de los otros pilotes sometidos a prueba de carga, en relación con la capacidad deducida aceptando que la resistencia al esfuerzo cortante es igual al 50% de la compresión simple, señala que en la mayoría de los casos la capacidad así calculada excede a la registrada en las pruebas de carga, en proporciones de un 15 hasta un 50% de la capacidad real de los pilotes; de ello se puede concluir que esta forma de valuación

de la capacidad de carga de pilotes de fricción, en general conduce a valores mayores que la real, por lo que puede decirse que en esa forma de cálculo las resistencias al esfuerzo cortante del suelo se sobreestiman. Cabe señalar que para los 17 pilotes analizados, en promedio la capacidad de carga calculada en la forma descrita en este párrafo, excede a la capacidad realmente obtenida en las pruebas de carga de los pilotes, en aproximadamente un 30%.

Finalmente, las capacidades obtenidas con el procedimiento de aceptar el equilibrio plástico de las fuerzas actuantes en el pilote, asignando como resistencia al esfuerzo cortante la regenerada en la arcilla remoldeada por efecto de la presión de consolidación que se ejerce en la interfase pilote-suelo, o bien, el valor de la cohesión igual a 0.50 de la resistencia a la compresión simple, donde la regenerada excede a la resistencia natural, arroja valores de la capacidad calculada que están entre el 94 y el 110% de la registrada en la prueba de carga, para los tres casos analizados. Se considera que esta coincidencia, con ese margen de aproximación, es más revelador del comportamiento real del pilote de fricción, pues aún en el caso en que la capacidad calculada con el procedimiento descrito en el párrafo anterior resulta 135% de la registrada, con este último método resulta ser del 110% de la registrada. Las variaciones en  $\pm 10\%$  de la capacidad calculada, con respecto de la obtenida en las pruebas, se consideran indicativas de un

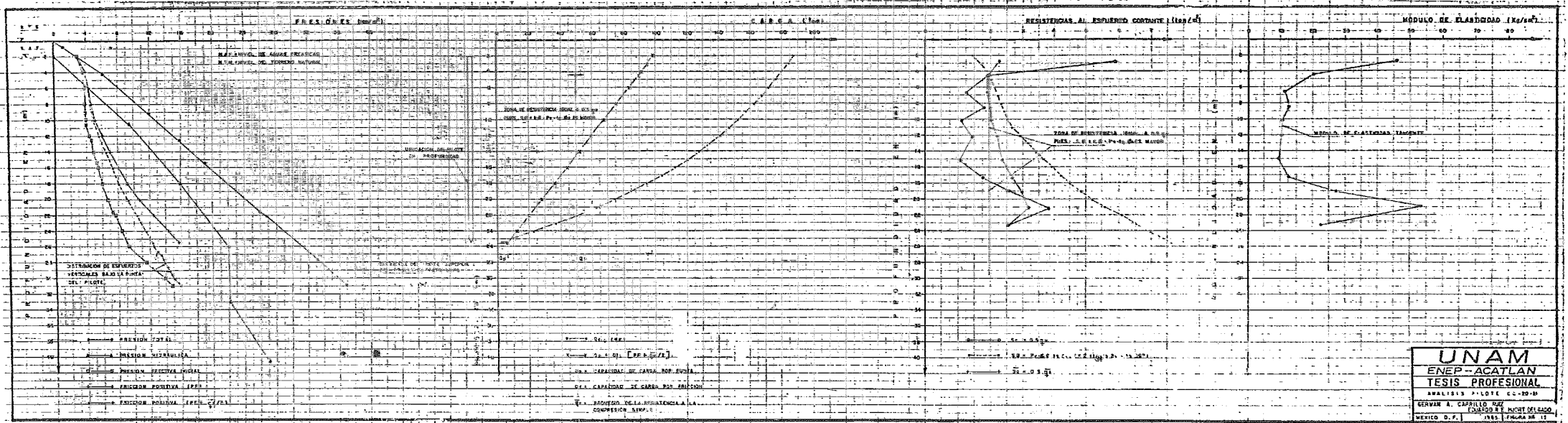
buen grado de aproximación del método para definir la capacidad de carga real. Una certificación de la bondad del método para este propósito está descrita en el capítulo correspondiente a los resultados de la instrumentación, puesto que de aceptar que el método es confiable, deberán serlo también los esfuerzos que puedan anticiparse con base en la redistribución de presiones que también permite establecer el método de equilibrio plástico.

En resumen, se puede concluir que las capacidades de carga de pilotes de fricción, deben calcularse tomando en cuenta la magnitud de la resistencia regenerada en las arcillas remodeladas, en función de la presión de consolidación actuante en la superficie de falla. La simple asignación de resistencia al esfuerzo cortante igual al 50% de la resistencia a compresión simple, que se ha utilizado para valuar esa capacidad, no es justificable, dado que no toma en cuenta el efecto de remodelo que se induce en las arcillas y, por otro lado, está demostrado que en general se sobreestima la capacidad real de los pilotes, en magnitudes que pueden ser hasta del 50%. El cálculo con el equilibrio plástico de fuerzas en el fuste del pilote arroja resultados más confiables, con márgenes de aproximación de  $\pm 10\%$ .

IV.2.- Hundimientos calculados y medidos para las pruebas de carga.

En particular para el pilote de la zapata CC-20-21, en la figura N<sup>o</sup> 15 se muestra la distribución de presiones que anticipa el método de cálculo de la Ref. N<sup>o</sup> 2, ya que el método de Terzaghi permite definir la capacidad de carga pero no la nueva distribución de presiones causada por la aplicación de carga en los pilotes de fricción; la distribución mostrada corresponde a las condiciones en que se efectuó la prueba de carga sobre ese pilote.

En la literatura técnica se cuenta también con la propuesta de extensión que realizó Geddes, Ref. N<sup>o</sup> 4, a la solución de Mindlin para estimar la distribución de presiones que en el subsuelo induce la acción de un pilote de fricción. Esta propuesta se apoya en la distribución de esfuerzos a nivel elástico, es decir, cuando las deformaciones son proporcionales a los esfuerzos aplicados, y que fue establecida por Mindlin para el caso de una fuerza aplicada en el interior de un sólido semi-infinito; Geddes la integró para simular la acción de un pilote de fricción como un grupo de fuerzas puntuales actuando en el interior de la masa del subsuelo y considerando, tanto una distribución uniforme como una linealmente creciente, en los esfuerzos cortantes generados en el fuste del pilote. Para el caso que corresponde a la ejecución de una prueba de carga, es un solo pilote el que está cargado y de la solución de Geddes-Mindlin se puede desprender la distribución de presiones causadas al alcanzar la generación de



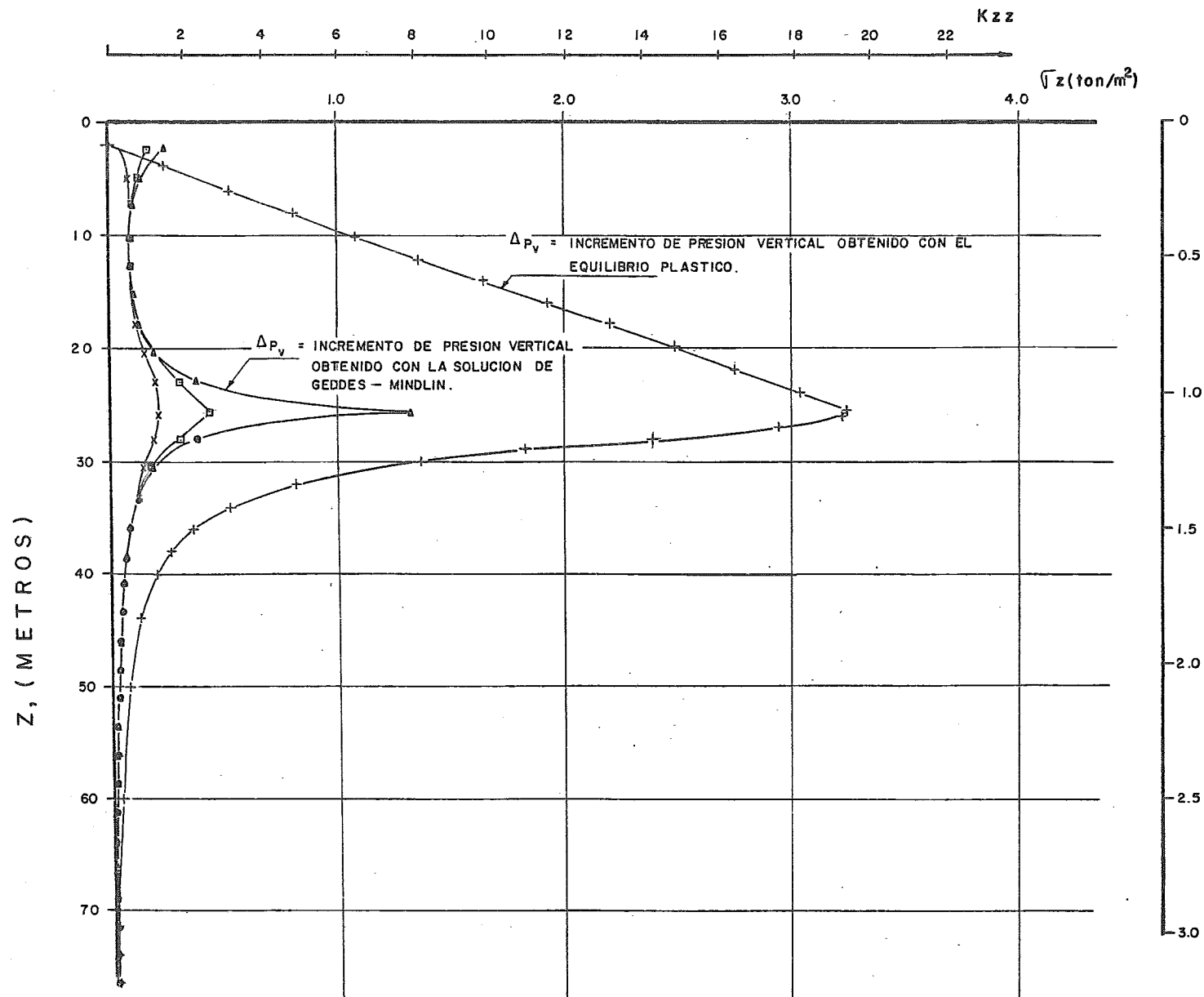


esfuerzos cortantes a todo lo largo del pilote; para propósitos comparativos, en la figura N<sup>o</sup> 16 se muestran las distribuciones de presiones que se pueden anticipar con los procedimientos de equilibrio plástico y con el de Geddes-Mindlin para el caso particular de uno de los pilotes probados; las curvas correspondientes a este último caso representan el incremento de esfuerzo anticipado en líneas verticales ubicadas a distancias de 1, 3 y 6 veces la dimensión del pilote, medida desde el centro geométrico de éste. La figura N<sup>o</sup> 17 muestra la distribución de los incrementos de esfuerzo vertical que predice la solución de Geddes-Mindlin, como actuantes en planos horizontales ubicados a diferentes profundidades; las que se muestran corresponden a múltiplos de la mitad de la longitud del pilote, variando a intervalos iguales, de 0.5 a 3.0 veces dicha longitud.

De las gráficas de las figuras 16 y 17 se pueden desprender las siguientes observaciones:

a.- Puesto que la distribución de Geddes-Mindlin corresponde a esfuerzos causados por cargas puntuales, la magnitud del esfuerzo que se anticipa con esa teoría en la punta del pilote tiende a infinito, por lo cual no es posible utilizar esta distribución tal cual, en la evaluación de deformaciones.

b.- Por otro lado, la distribución de esfuerzos en pla-



**SIMBOLOS**  
(DE ESFUERZOS VERTICALES EN LINEAS PARALELAS AL EJE DEL PILOTE)

| n | r (m) | N |
|---|-------|---|
| o | 0     | 0 |
| Δ | 0.48  | 1 |
| □ | 1.44  | 3 |
| x | 2.88  | 6 |

+.- Solución con equilibrio plástico (Ver. figura N° 15)

r.- Distancia radial desde el centro del pilote

D.- Longitud del pilote

N.- Número de veces la dimensión del pilote, desde su centro

D = 25.50 m

m = Z/D

n = r/D

$\sqrt{z} = Kzz P/D^2$

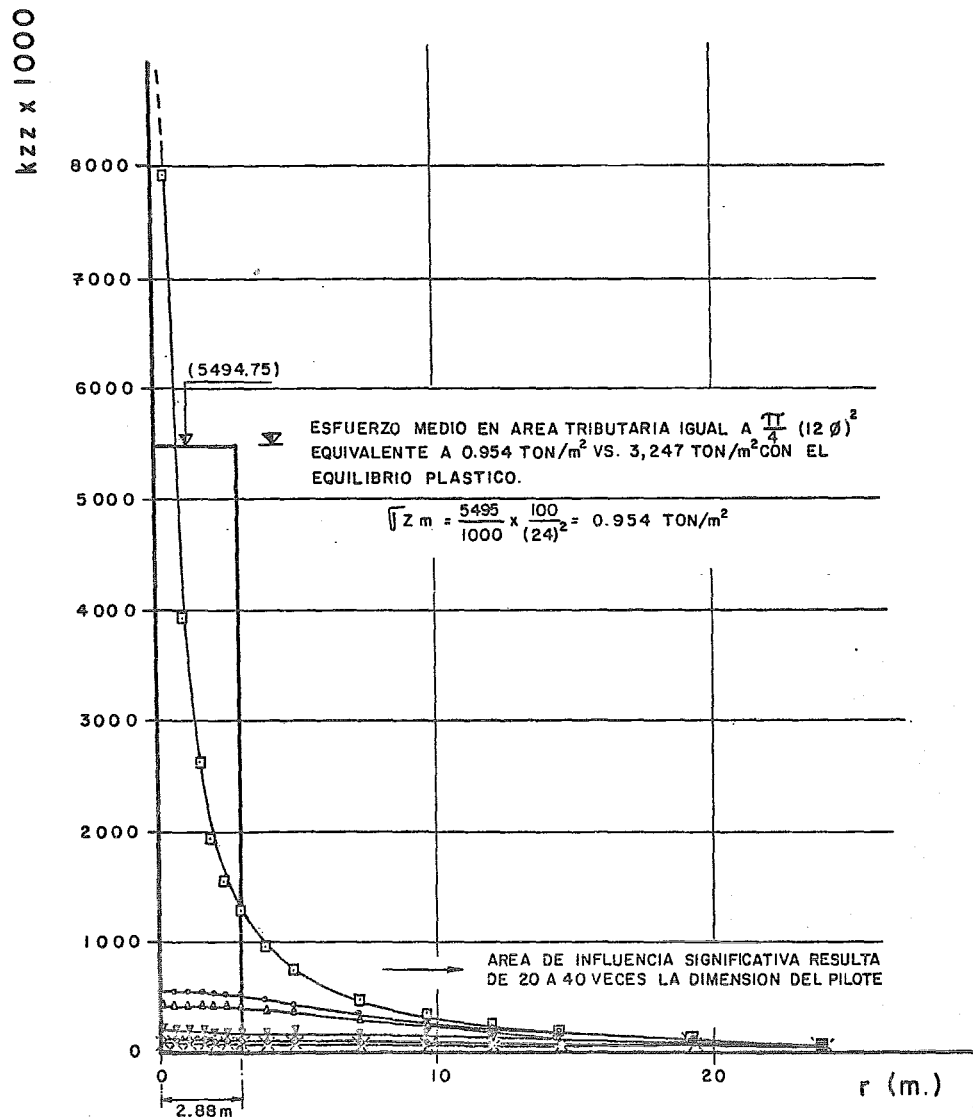
p = Carga total aplicada en el pilote

z = Profundidad

kzz = Coeficiente de esfuerzo

DISTRIBUCION DE ESFUERZOS VERTICALES DE ACUERDO CON LA EXTENSION DE GEDDES PARA LA SOLUCION DE MINDLIN Y CON LA TEORIA DE EQUILIBRIO PLASTICO

|   |      |              |
|---|------|--------------|
| <b>UNAM</b>   |      |              |
| ENEP-ACATLAN  |      |              |
| <b>TESIS PROFESIONAL</b>  |      |              |
| ESFUERZOS VERTICALES SEGUN MINDLIN-GEDDES Y TEORIA DE EQUILIBRIO PLASTICO |      |              |
| GERMAN A. CARRILLO RUIZ<br>EDUARDO R.E. HJORT DELGADO                     |      |              |
| MEXICO D. F.  | 1985 | FIGURA N° 16 |



$$\gamma = 0.5$$

$$k_{zz} = \sqrt{z} \frac{D^2}{P}$$

$$n = \frac{r}{D} \quad m = \frac{z}{D}$$

D.— LONG. DEL PILOTE

P.— CARGA

r.— DISTANCIA RADIAL AL PILOTE.

z.— PROFUNDIDAD.

kzz.— COEFICIENTE DE ESFUERZO.

SIMBOLO m= z/D

- — 0.5
- — 1.0
- △ — 1.5
- ▽ — 2.0
- ◇ — 2.5
- × — 3.0

DISTRIBUCION DE INCREMENTOS DE ESFUERZOS VERTICALES DE ACUERDO CON LA EXTENSION DE GEDDES PARA LA SOLUCION DE MINDLIN

|   |                   |
|---|-------------------|
| <b>UNAM</b>   |                   |
| <b>ENEP-ACATLAN</b>                                   |                   |
| <b>TESIS PROFESIONAL</b>                              |                   |
| ESFUERZOS VERTICALES SEGUN<br>MINDLIN-GEDDES          |                   |
| GERMAN A. CARRILLO RUIZ<br>EDUARDO R.E. HJORT DELGADO |                   |
| MEXICO D. F.  | 1985 FIGURA Nº 17 |

nos horizontales hace ver que en el plano ubicado a la profundidad de la punta del pilote los esfuerzos predichos son considerablemente mayores que en el resto de los planos ubicados en el punto medio del pilote y a profundidades mayores. De hecho, puede verse en la figura 17 que los esfuerzos que predice la solución de que trata son en general inferiores a  $0.1 \text{ ton/m}^2$ .

c.- Las bajas magnitudes de los esfuerzos que se predicen a lo largo del pilote y bajo la punta, excepto en el plano que pasa por ésta, conducen a que para lograr el equilibrio de fuerzas que implica la solución elástica, el área en que actúan tales incrementos de esfuerzos alcance una extensión de más de 40 veces la dimensión del pilote, medida desde el centro de éste. Puede decirse que a distancias horizontales iguales a la longitud del pilote, los incrementos de esfuerzos aún tienen un valor relativamente importante, lo que significaría que el área de influencia es del orden de la longitud del pilote; esta circunstancia parece revelar un excesivo volumen de la masa de suelo influenciado por la aplicación de cargas en el pilote.

d.- Cabe mencionar también que la solución de Geddes -- Mindlin implica que la masa del subsuelo es capaz de aceptar esfuerzos de tensión, pues la aplicación de una carga puntal en el interior de la masa del subsuelo requiere, para el equilibrio, la generación de tales esfuerzos. Esta circunstancia

es la de menor posibilidad de cumplimiento en las condiciones reales.

e.- Finalmente, se puede ver en la figura 16 que el incremento de presión sobre una línea vertical ubicada a una vez la dimensión del pilote, está indicada por el método de Geddes-Mindlin con un valor del orden de  $1.4 \text{ ton/m}^2$ , mientras que la solución con equilibrio plástico señala un incremento de presiones, a nivel de la punta del pilote, del orden de  $3.25 \text{ ton/m}^2$  como promedio y aplicada en el área tributaria definida como un círculo con diámetro igual a 12 veces la dimensión del pilote. Esta es una significativa diferencia entre las magnitudes de esfuerzos verticales anticipados; a mayores distancias del pilote, la solución de Geddes-Mindlin señala esfuerzos aún más reducidos.

Utilizando las distribuciones de los incrementos de presión obtenidos con el procedimiento basado en el equilibrio plástico de fuerzas alrededor del fuste del pilote, se calcularon los desplazamientos verticales que debió sufrir el pilote durante la etapa de aplicación de carga en las pruebas. El cálculo se realizó para los cuatro pilotes que se reportan en la Tabla de la Fig. N° 18.

El cálculo se realizó usando la expresión:

$$S = \sum m_{V_0} \cdot \Delta P_V \cdot \Delta H$$

HUNDIMIENTOS CALCULADOS CON BASE EN LAS PRESIONES ANTICIPADAS CON EL METODO DEL EQUILIBRIO PLASTICO EN COMPARACION CON LOS DESPLAZAMIENTOS VERTICALES MEDIDOS EN LAS PRUEBAS DE CARGA

| ZAPATA   | HUNDIMIENTOS CALCULADOS (cm) |          | HUNDIMIENTOS REGISTRADOS (cm) | $S_F/S_c$ (%) |          |
|----------|------------------------------|----------|-------------------------------|---------------|----------|
|          | $S_{c1}$                     | $S_{c2}$ | $S_F$                         | $S_{c1}$      | $S_{c2}$ |
| BC-23    | 5.46                         | 3.27     | 4.26                          | 78            | 130      |
| CC-20-21 | 4.98                         | 5.58     | 3.50                          | 70            | 63       |
| CC-32    | —                            | 5.78     | 3.54                          | —             | 61       |
| CM-8     | 6.54                         | 5.57     | 3.25                          | 50            | 58       |

NOTAS :

- El cálculo de los hundimientos  $S_{c1}$  se realizó usando la expresión  $S = \sum m_{v0} \cdot \Delta p_v \cdot \Delta H$ ;

$m_{v0}$  - se consideró como el coeficiente de compresibilidad, derivado de las deformaciones registradas a 4 seg. en las pruebas de consolidación, que corresponden a 2 ó 3 días de duración de la prueba de carga en condiciones reales.

$\Delta p_v$  - es el incremento de esfuerzos verticales efectivos definido en el cálculo de capacidad de carga con la teoría del equilibrio plástico, desde la cabeza del pilote hasta la parte superior del primer estrato duro.

$\Delta H$  - representa el espesor de cada uno de los estratos de suelo considerados.

El cálculo se realizó tomando en cuenta las pruebas de consolidación correspondientes a los sondeos próximos a la ubicación del pilote.

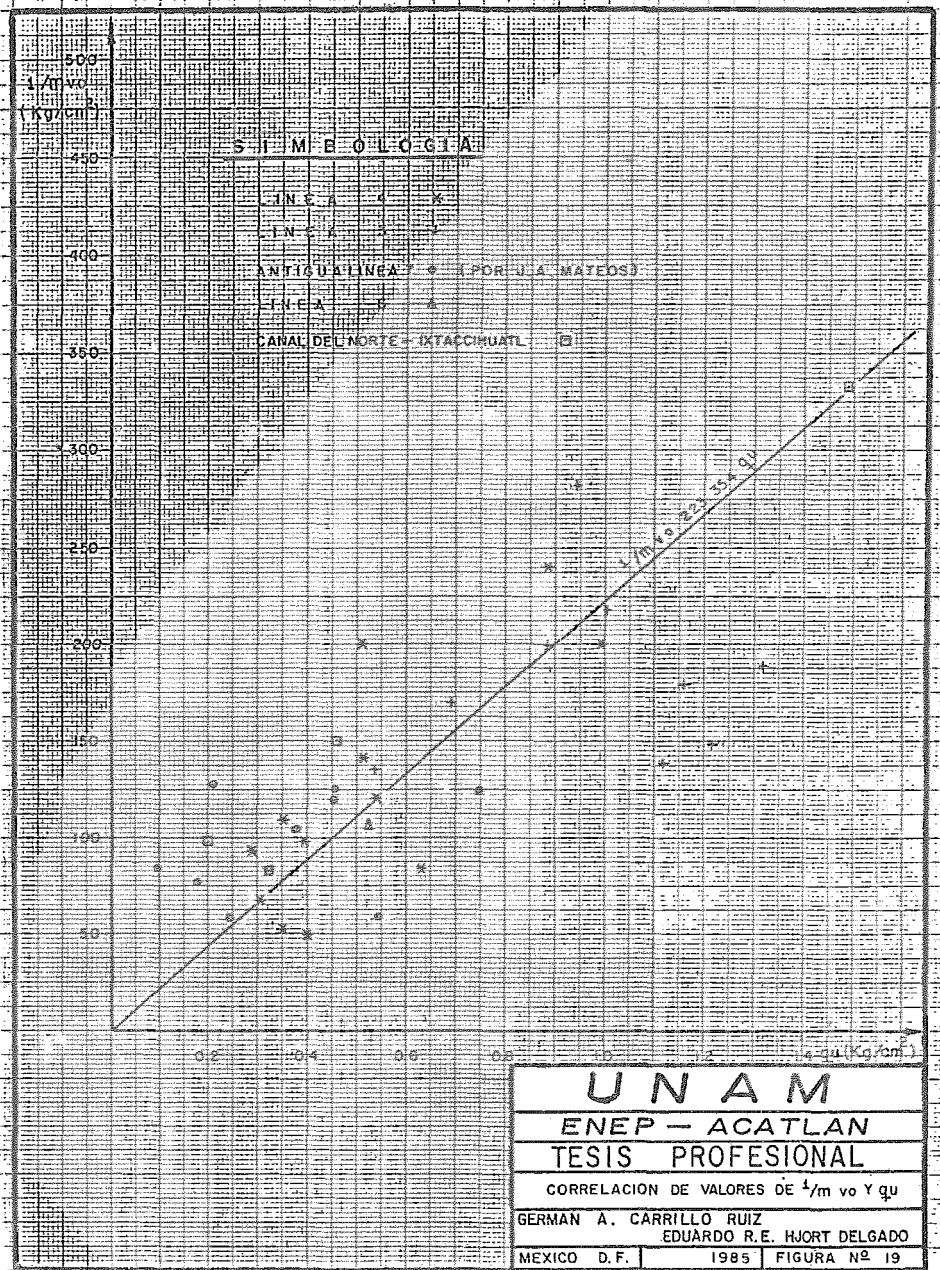
- El cálculo de los hundimientos  $S_{c2}$  se realizó en forma similar al del  $S_{c1}$ , pero utilizando la correlación estadística de  $m_{v0}$  con  $q_u$  mostrada en la figura No. 19.

|   |      |              |
|---|------|--------------|
| <b>UNAM</b>   |      |              |
| <b>ENEP - ACATLAN</b>   |      |              |
| <b>TESIS PROFESIONAL</b>  |      |              |
| HUNDIMIENTOS CALCULADOS Y REGISTRADOS<br>EN LAS PRUEBAS EN LINEA -4 |      |              |
| GERMAN A. CARRILLO RUIZ<br>EDUARDO R.E. HJORT DELGADO               |      |              |
| MEXICO D.F.   | 1985 | FIGURA N° 18 |

y realizando la integración considerando los esfuerzos desde la cabeza del pilote hasta la profundidad del primer estrato duro, puesto que éste se constituye en una capa de uniformización de esfuerzos y deformaciones; la influencia de los movimientos provocados en la propia capa dura y por debajo de ella, son de poca consideración, tanto por la menor deformabilidad de dicha capa, como por la uniformización que induce.

Los valores de  $m_{v_0}$  se obtuvieron de los resultados de las pruebas de consolidación efectuadas en muestras de sondeos disponibles. Se utilizaron datos de sondeos de la Línea 4 y se estableció una correlación para utilizar también los datos disponibles de otros sondeos y ensayos de laboratorio realizados para la obra del METRO, en estos se incluyen algunos sondeos de las líneas 3, 6 y la antigua línea 7 cuyo trazo comprende la calle Juan A. Mateos. Los valores de  $m_{v_0}$  son correspondientes a la deformación inmediatamente registrada en las pruebas de consolidación; traducida a términos de tiempo en campo representan lo sucedido en un lapso de 2 a 3 días transcurridos entre la aplicación de la carga y la generación de deformaciones que es lo registrado durante la ejecución de la prueba de carga.

La gráfica de la figura N° 19 muestra la correlación obtenida entre los valores de  $m_{v_0}$  definidos en las pruebas de consolidación y la resistencia a compresión simple obtenida



**UNAM**  
**ENEP - ACATLAN**  
**TESIS PROFESIONAL**  
 CORRELACION DE VALORES DE  $1/m vo$  Y  $a-qu$   
 GERMAN A. CARRILLO RUIZ  
 EDUARDO R.E. HJORT DELGADO  
 MEXICO D.F. 1985 FIGURA N° 19



para los mismos materiales; esta propiedad es el parámetro más significativo de las arcillas, porque revela la resistencia en el estado actual de estos materiales, incluso para los que han estado sujetos a fenómenos de preconsolidación y endurecimiento que incrementan su valor, tal como se ha descrito y se confirma con los resultados contenidos en la Referencia N° 3. La dispersión de valores de  $m_{v0}$  que se muestra en la grafica de la figura N° 19 es representativa de la que normalmente resulta de los ensayos para medir deformabilidad de las arcillas.

La tabla de la figura N° 18 hace ver que los valores de los desplazamientos verticales calculados con este procedimiento, que es el indicado y recomendado en la Ref. 3, difieren considerablemente de los registrados en las pruebas de carga para el nivel de fuerza aplicada correspondiente a la capacidad del pilote. Esto ocurre tanto en el caso en que se utilizaron las deformabilidades inmediatas deducidas de las muestras colectadas en los sondeos más próximos a cada pilote considerado, como en el segundo caso, en que tales propiedades se obtuvieron de la correlación establecida con la resistencia a compresión simple de los materiales arcillosos. La discrepancia entre valores calculados y registrados puede deberse en parte a la dispersión de valores de la deformabilidad, pero también podría indicar inaplicabilidad del procedimiento.

Lo que se expone enseguida es un procedimiento desarro

llado por el Ing. Arturo A. Bello M. para evaluar la magnitud de los hundimientos inducidos en pilotes de fricción embebidos en las arcillas suaves de la ciudad de México, tratando de fundamentar las hipótesis y comprobar los resultados obtenidos, haciendo uso de las observaciones realizadas al ejecutar pruebas de carga en este tipo de elementos.

Este procedimiento se basa, fundamentalmente, en considerar los esfuerzos cortantes que se generan entre el pilote y el suelo a lo largo del fuste del primero. Para suelos puramente cohesivos, estos esfuerzos cortantes, a la falla, están determinados como:

$$\tau_u = q_u/2 \quad (1)$$

$\tau_u$  = Esfuerzo cortante generado entre el fuste del pilote y el suelo que lo confina;

$q_u$  = Valor de la resistencia a la compresión simple del suelo ubicado a lo largo del fuste del pilote.

La deformación que el esfuerzo cortante induce en el suelo alrededor del pilote, queda definida por las propiedades elásticas del suelo: el módulo de elasticidad transversal está determinado por:

$$G = \frac{E_t}{2(1+\nu)} \quad (2)$$

donde:

$G$  : Módulo de elasticidad transversal;

$E_t$  : Módulo de elasticidad tangente;

$\nu$  : Módulo de Poisson.

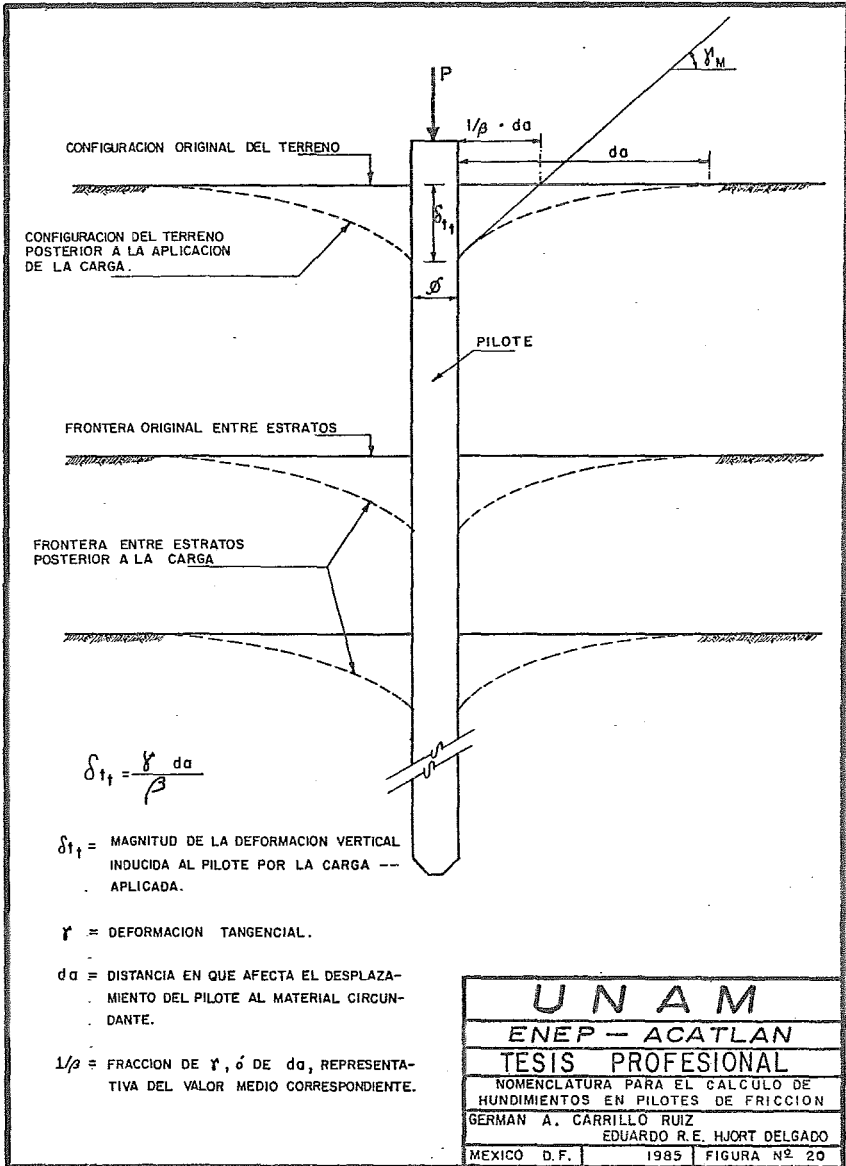
Para arcillas de origen lacustre, tales como las de la ciudad de México, el módulo de Poisson presenta valores próximos a 0.5, por lo tanto, la expresión (2) adquiere la forma:

$$G = \frac{E_t}{2(1+0.5)} = \frac{E_t}{3}. \quad (3)$$

La relación entre el esfuerzo cortante  $\bar{\sigma}$  y el módulo de elasticidad transversal  $G$ , es una medida de la pendiente de la curva de deformación del material próximo al pilote, luego entonces:

$$\gamma = \frac{\bar{\sigma}}{G} \quad \text{y} \quad \gamma_m = \frac{\bar{\sigma}_u}{G}; \quad (4)$$

$\gamma_m$  es la magnitud de la deformación tangencial máxima y se presenta en el suelo adyacente al pilote. Admitiendo que la pendiente de la configuración deformada es una fracción de  $\gamma_m$  y se aplica en la distancia afectada por el desplazamiento del pilote en el material circundante, se puede escribir (figura N° 20):



$$S_{tt} = \frac{\gamma \cdot d_a}{\beta}, \quad (5)$$

donde:

$S_{tt}$  : Magnitud de la deformación vertical inducida al pilote por la carga aplicada.

$\gamma$  : Deformación tangencial, igual a la relación entre el esfuerzo cortante y el módulo de elasticidad transversal;

$d_a$  : Distancia en que afecta el desplazamiento del pilote al material circundante;

$\frac{1}{\beta}$  : Fracción de  $\gamma$ , ó de  $d_a$ , representativa del valor medio correspondiente.

El cálculo de la capacidad de carga con base en la teoría del equilibrio plástico entre suelo y pilote permite anticipar que el radio de área tributaria para un pilote aislado, corresponde a 6 veces el diámetro o la dimensión transversal del pilote; para la cimentación de la estructura elevada del METRO de la ciudad de México, tal dimensión es de 50 cm, o sea, el radio del área tributaria es de 300 cm; si consideramos que el esfuerzo tangencial está actuando en el contacto pilote-suelo, entonces, la distancia de afectación será de

300 cm menos la mitad del lado del pilote, o sea, de 275 cm, por lo que la expresión (5) resulta:

$$\delta_{tt} = \frac{275 \cdot \gamma'}{\beta}; \quad (6)$$

sustituyendo las expresiones (1) Y (3) en la expresión (4), tenemos:

$$\gamma' = \frac{3}{2} \frac{q_u}{E_t}; \quad (7)$$

finalmente, sustituyendo la expresión (7) en la (5) resulta:

$$\delta_{tt} = \frac{3}{2} \frac{q_u d_a}{E_t \beta}; \quad (8)$$

este desplazamiento vertical, está en función de la resistencia a la compresión simple del suelo a lo largo del fuste del pilote y del módulo elástico tangente a la curva esfuerzo-deformación, en su porción lineal.

Cuando se tiene un subsuelo que presenta estratificación y, en consecuencia, las propiedades mecánicas de los materiales a lo largo del fuste del pilote son distintas, debe decidirse qué propiedades considerar para evaluar los hundimientos. Teniendo en cuenta que el pilote es un elemento rígido, la deformación que pueda inducir en el material circundante, puede ser evaluada considerando las propiedades del

estrato más rígido presente en el fuste del pilote, ya que éstas restringen las deformaciones que se puedan causar en los estratos más compresibles. Sin embargo, según puede constatar-se en la figura N° 21, para las arcillas suaves de la ciudad de México, existe una correlación entre la resistencia a compresión simple y el módulo de elasticidad tangente, lo que significaría que la deformación angular por cortante,  $\gamma$ , en todos los estratos arcillosos, es la misma al inducirse un esfuerzo tangencial próximo a la resistencia al esfuerzo cortante. Esto permitiría calcular el desplazamiento vertical del pilote usando las propiedades mecánicas ya sea del estrato más rígido, o bien, los valores medios de tales propiedades a lo largo del fuste del pilote.

En la tabla de la figura N° 22 se muestran los desplazamientos verticales calculados para cuatro pilotes que se sujetaron a prueba de carga, usando tanto los promedios estadísticos de las propiedades de los estratos del sitio particular de cada pilote y también, utilizando la correlación estadística entre las propiedades de los suelos,  $q_u$  y  $E_t$ , de la formación arcillosa superior de la Zona del Lago de la ciudad de México. Los resultados obtenidos del cálculo del hundimiento de cada pilote muestran una aproximación del orden del 95% del desplazamiento registrado a la falla, variando del 83% al 105% para el primer caso y del 81% al 106% para el segundo. En estos cálculos se admitió que  $d_a$  es igual a 5.5 veces la

$E_t$   
Kg/cm<sup>2</sup>

### S I M B O L O G I A

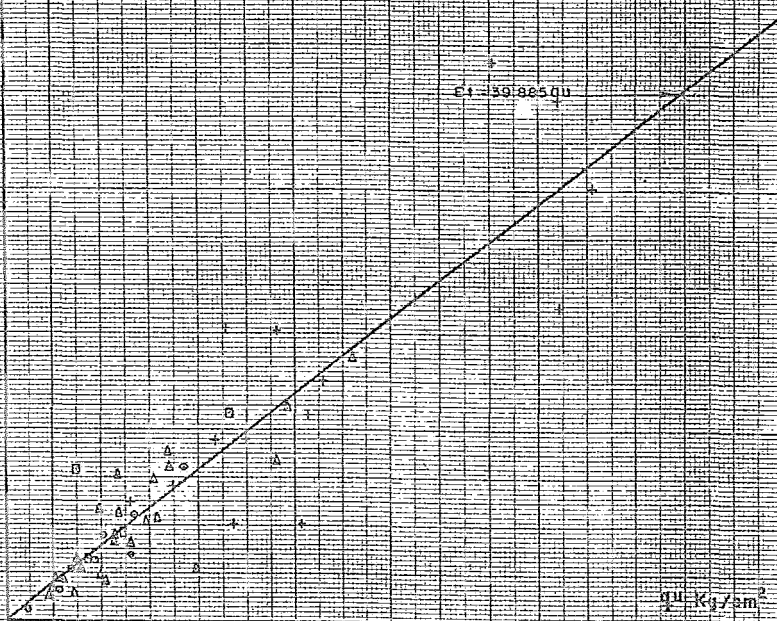
- LINEA 7 ANTIGUA
- ▲ LINEA 6
- LINEA 2
- LINEA 4
- △ LINEA 2 SONDEO SI

150

100

50

0



$q_u$  Kg/cm<sup>2</sup>

10

20

30

# UNAM

## ENEP - ACATLAN

### TESIS PROFESIONAL

CORRELACION DE VALORES DE  $q_u$  Y DE  $E_t$

GERMAN A. CARRILLO RUIZ

EDUARDO R.E. HJORT DELGADO

MEXICO D.F.

1985

FIGURA Nº 21



CALCULO DE HUNDIMIENTOS EN PRUEBAS DE CARGA  
EN LINEA 4

| PILOTE   | $q_{um}$<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) | $E_t^*$<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) | $\delta_{t1}$<br>(cm) | $E_{tm}^{**}$<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) | $\delta_{t2}$<br>(cm) | $S_f$<br>(cm) | $\frac{\delta_{t1}}{S_f}$ (%) | $\frac{\delta_{t2}}{S_f}$ (%) |
|----------|-----------------------------------|----------------------------------|-----------------------|--|-----------------------|---------------|-------------------------------|-------------------------------|
| BC - 23  | 0.538                             | 21.458                           | 3.477                 | 19.246                                 | 3.844                 | 4.26          | 80.926                        | 90.277                        |
| CC-20-21 | 0.455                             | 18.155                           | 3.446                 | 21.533                                 | 2.905                 | 3.50          | 98.458                        | 83.012                        |
| CC - 32  | 0.468                             | 18.671                           | 3.447                 | 17.265                                 | 3.727                 | 3.54          | 97.359                        | 105.288                       |
| CM - 8   | 0.602                             | 24.023                           | 3.446                 | 24.917                                 | 3.332                 | 3.25          | 106.020                       | 102.216                       |
| PROMEDIO |                                   |                                  |                       |  |                       |               | 95.691                        | 95.186                        |

NOTAS:

\* Correlación estadística general:  $E_t = 39.885 q_u$ .

\*\* Promedio de valores. (sondeo particular).

Se consideró  $\beta = 3.0$

- $q_{um}$  = Resistencia a la compresión simple promedio del sitio particular.

- $E_t$  = Módulo de elasticidad tangente obtenido de la correlación estadística general:  $E_t = 39.885 q_u$ .

- $E_{tm}$  = Módulo de elasticidad tangente promedio del sitio particular.

- $\delta_{t1}$  = Deformación calculada con  $E_t$  y  $q_{um}$ .

- $\delta_{t2}$  = Deformación calculada con  $E_{tm}$  y  $q_{um}$ .

-  $S_f$  = Deformación registrada a la falla.

|   |                            |
|---|----------------------------|
| <b>UNAM</b>                                     |                            |
| <b>ENEP - ACATLAN</b>                           |                            |
| <b>TESIS PROFESIONAL</b>                        |                            |
| CALCULO DE HUNDIMIENTOS EN PRUEBAS DE CARGA L-4 |                            |
| GERMAN A. CARRILLO RUIZ                         | EDUARDO R.E. HJORT DELGADO |
| MEXICO D.F.                                     | 1985 FIGURA N° 22          |

CALCULO DE HUNDIMIENTOS EN PRUEBAS DE CARGA EN LINEA 4  
 CONSIDERANDO LA DEFOMABILIDAD DEL ESTRATO DE ARCILLA  
 MAS RIGIDO

| PILOTE   | $q_u$<br>kg/cm <sup>2</sup> | $\bar{\sigma} = q_u/2$<br>kg/cm <sup>2</sup> | $E_t$<br>kg/cm <sup>2</sup> | $\delta_{tt}$<br>(cm) | $S_f$<br>(m) | $\frac{\delta_{tt}}{S_f}$ (%) |
|----------|-----------------------------|--|-----------------------------|-----------------------|--------------|-------------------------------|
| BC-23    | 0.650                       | 0.325  | 31.02                       | 4.322                 | 4.26         | 101.5                         |
| CC-20-21 | 0.760                       | 0.380  | 53.42                       | 2.934                 | 3.50         | 83.8                          |
| CC-32    | 0.680                       | 0.340  | 32.28                       | 4.342                 | 3.54         | 122.6                         |
| CM-8     | 0.642                       | 0.321  | 33.93                       | 3.903                 | 3.25         | 120.1                         |
| PROMEDIO |                             |  |                             |                       |              | 107 %                         |

NOTAS :

$q_u$  = Valor de la resistencia a la compresión simple del estrato más rígido del sitio particular.

$E_t$  = Módulo de elasticidad tangente a la curva esfuerzo-deformación de la prueba de compresión simple en su porción lineal, cuyo valor está referido al estrato más rígido.

$\delta_{tt}$  = Deformación calculada con  $q_u$  y  $E_t$ .

$S_f$  = Deformación registrada a la falla.

|   |                   |
|---|-------------------|
| UNAM  |                   |
| ENEP - ACATLAN  |                   |
| TESIS PROFESIONAL                                     |                   |
| CALCULO DE HUNDIMIENTOS EN PRUEBAS<br>DE CARGA L-4    |                   |
| GERMAN A. CARRILLO RUIZ<br>EDUARDO R.E. HJORT DELGADO |                   |
| MEXICO D.F.   | 1985 FIGURA Nº 23 |

dimensión transversal del pilote y que  $\beta = 3$ .

Al considerar las propiedades del estrato más rígido presente a lo largo del pilote, el cálculo del hundimiento utilizando el proceso antes descrito arroja los valores mostrados en la tabla de la figura N° 23 y que en promedio resultan del 107% del desplazamiento vertical registrado en las pruebas de carga, con variaciones entre el 84% y el 123%; estos resultados se obtienen utilizando también un valor de la distancia de afectación del desplazamiento del pilote "da" igual a 5.5 veces la dimensión del pilote, pero una  $\beta = 2$ .

## C A P I T U L O V

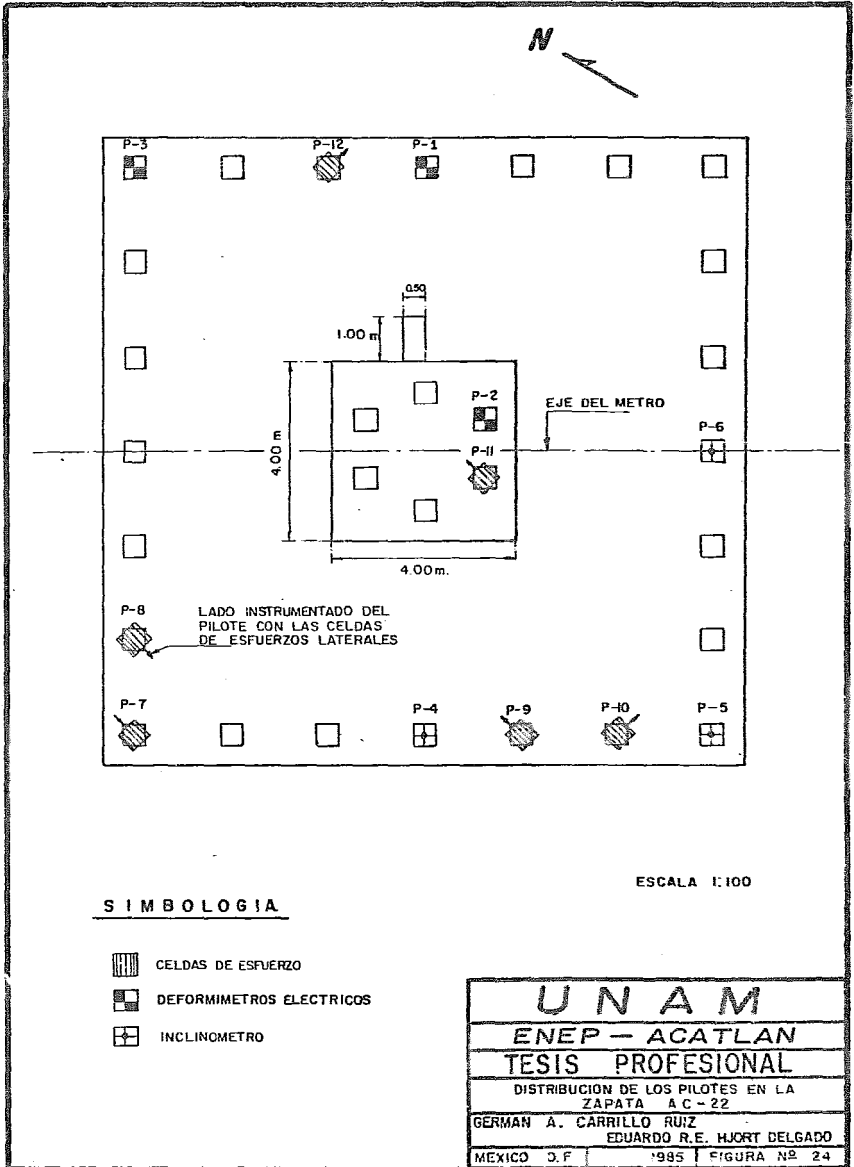
## PRESIONES, CARGAS Y DEFORMACIONES MEDIDAS EN LOS PILOTES.

V.1.- Mediciones en instrumentos embebidos en los pilotes.

Con el propósito de certificar en las condiciones reales de trabajo, el comportamiento predicho por las teorías disponibles para evaluar la capacidad de carga de pilotes de fricción y los efectos que inducen en el subsuelo alrededor de ellos, se programó y realizó la instrumentación de 9 pilotes de la zapata AC-22; la figura N<sup>o</sup> 24 muestra la distribución de los pilotes en esta zapata y la ubicación de aquellos en que fueron colocados instrumentos; la figura N<sup>o</sup> 25 muestra la ubicación típica de los instrumentos colocados a lo largo de los pilotes, en los dos tramos en que éstos fueron hincados.




Puede notarse que se instalaron celdas medidoras de esfuerzos en el concreto, con el propósito de medir la carga actuante en los pilotes; una celda se colocó en el apoyo mismo de la zapata sobre el pilote instrumentado y otra en las proximidades de la punta del mismo pilote, a 0.5 m del extremo físico de éste.

Se colocaron también deformímetros eléctricos embebidos

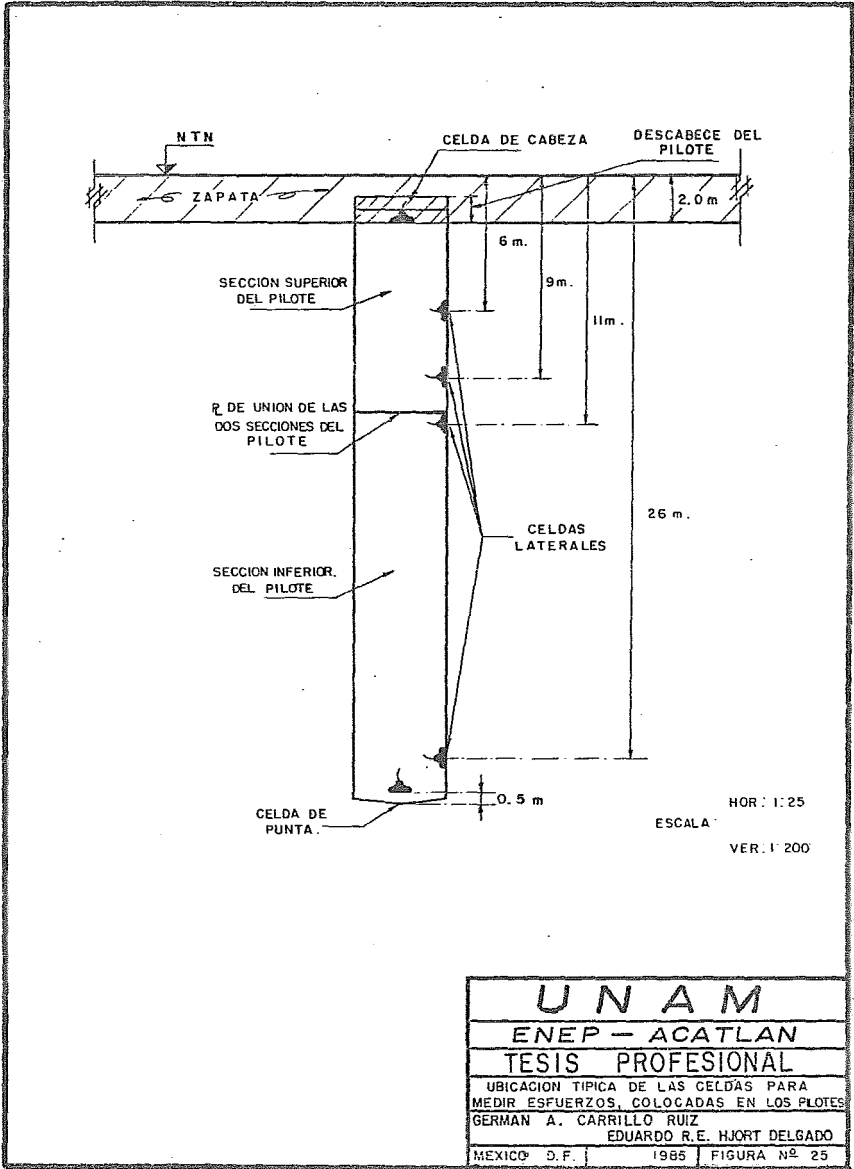


**SIMBOLOGIA**

ESCALA 1:100

-  CELDAS DE ESFUERZO
-  DEFORMIMETROS ELECTRICOS
-  INCLINOMETRO

|   |                            |
|---|----------------------------|
| <b>UNAM</b>                                       |                            |
| <b>ENEP - ACATLAN</b>                             |                            |
| <b>TESIS PROFESIONAL</b>                          |                            |
| DISTRIBUCION DE LOS PILOTES EN LA<br>ZAPATA AC-22 |                            |
| GERMAN A. CARRILLO RUIZ                           | EDUARDO R.E. HJORT DELGADO |
| MEXICO D.F.                                       | '985   FIGURA Nº 24        |

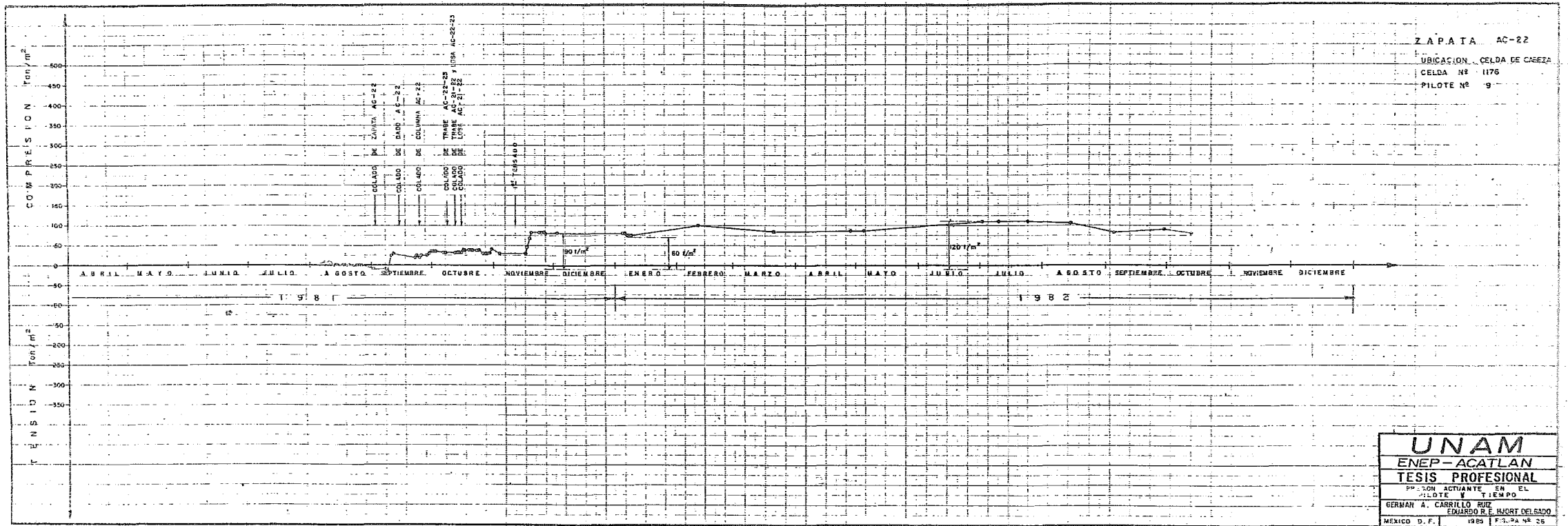


|   |                   |
|---|-------------------|
| <b>UNAM</b>   |                   |
| <b>ENEP - ACATLAN</b>   |                   |
| <b>TESIS PROFESIONAL</b>  |                   |
| UBICACION TIPICA DE LAS CELDAS PARA<br>MEDIR ESFUERZOS, COLOCADAS EN LOS PLOTES |                   |
| GERMAN A. CARRILLO RUIZ   |                   |
| EDUARDO R.E. HJORT DELGADO  |                   |
| MEXICO D.F.   | 1985 FIGURA N° 25 |

en el concreto a lo largo del pilote, lamentablemente, después de hincados los pilotes instrumentados se produjo una inundación en la excavación formada para alojar la zapata, y el agua afectó la resistencia eléctrica de los cables transmisores de la señal de los sensores, causando que las lecturas posteriores resultaran totalmente absurdas.

Se instalaron también celdas para registrar la presión que el subsuelo ejerce sobre las paredes de los pilotes, con el propósito de certificar la distribución de éstas a lo largo de dichos elementos de cimentación.

Las figuras N° 26 y 27 muestran los registros de la presión detectada en las celdas medidoras de esfuerzos en la cabeza del pilote, y así también la registrada en una de las caras laterales de un pilote, a la profundidad de - 26 m a que se instaló este instrumento. De estas figuras puede observarse que las presiones registradas en las celdas presentan variaciones que no permiten ubicar un valor único de la presión registrada en esos instrumentos; sin embargo, teniendo en cuenta los efectos que se observaron en el aparato de registro y las variaciones que son comunes a los instrumentos eléctricos, se pudieron establecer los valores de presión y esfuerzos registrados que finalmente fueron adoptados, inclusive cuando se trata de valores múltiples, para compararlos con los se anticipan con base

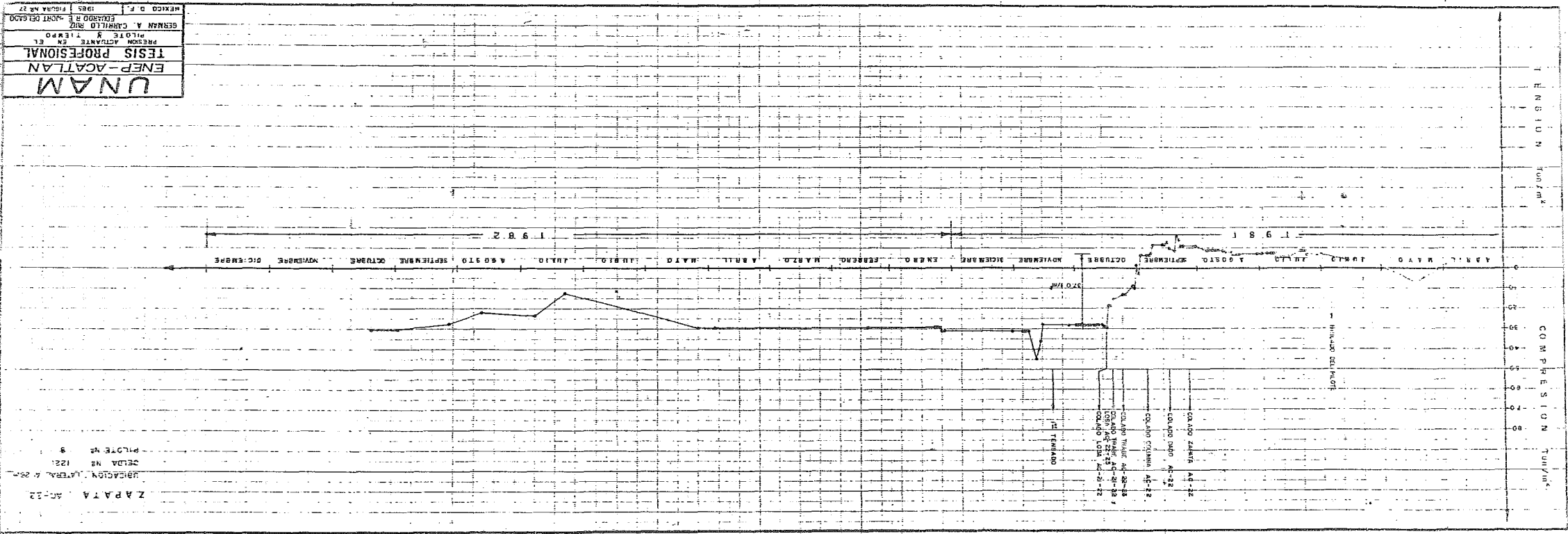


ZAPATA AC-22  
 UBICACION CELDA DE CAEZA  
 CELDA N° 1176  
 PILOTE N° 9

**UNAM**  
 ENEP-ACATLAN  
 TESIS PROFESIONAL  
 PROYECTO ACTUANTE EN EL  
 PILOTE Y TIEMPO  
 GERMAN A. CARRILLO RUIZ  
 EDUARDO R. HUERT DELGADO  
 MEXICO D.F. 1985 | FIG. PA 48 25



UNAM  
 ENEP-ACATLAN  
 TESIS PROFESIONAL  
 PERSON ACUARTE  
 PILOTE 9  
 GERMAN A. CARRILLO RUIZ  
 EDUARDO E. MARTI DELGADO  
 Mexico D.F. 1982  
 FOLIO 12



ZAPATA 20022  
 REGIONAL AERIAL 7 25M  
 CELDA N° 128  
 PILOTE 9

en la aplicación de los teorías disponibles. Las tablas de las figuras N<sup>o</sup> 28 y 29 muestran un resumen de los valores registrados para las presiones, esfuerzos y cargas en las celdas y su comparación con los esperados de acuerdo con las teorías.

De la figura 29 puede verse que en la generalidad de los casos, las celdas laterales arrojan valores de presión que son próximas a la presión horizontal total que se obtiene al considerarla igual a la presión vertical obtenida con la aplicación del proceso del cálculo para pilotes de fricción propuesta por Zeevaert y adicionando el valor de la presión hidráulica que fué registrada en piezómetros instalados para obtener su distribución en toda la profundidad, desde la superficie, hasta la ubicación de la primera capa dura. Se enfatiza que las condiciones en que se obtiene la coincidencia antes señalada, con un grado de aproximación de 10% en promedio, entre las presiones registradas en las celdas laterales y las presiones horizontales totales anticipadas con el análisis de equilibrio plástico de las fuerzas inducidas por los pilotes a la masa del subsuelo, son las siguientes:

a.- El valor nominal del área tributaria de cada pilote fue definida teniendo en cuenta la ubicación de los pilotes adyacentes que se encuentran a una distancia no mayor a 6 dimensiones del pilote, o bien, limitando la extensión de tal

ESFUERZOS Y CARGAS REGISTRADAS Y ESPERADAS EN LAS CELDAS DE CABEZA Y PUNTA INSTALADAS EN LOS PILOTES DE FRICCIÓN DE LA ZAPATA AC-22.

Celdas de Cabeza

| PILOTE No. | ESFUERZO REGISTRADO (ton/m <sup>2</sup> ) | CARGA EQUIVALENTE (ton) | CARGA MEDIA ESPERADA          |       | % REGISTRADO DE LA CARGA MEDIA C. EQUIV./C. MEDIA | UBICACION DEL PILOTE   |
|------------|---|-------------------------|-------------------------------|-------|---|------------------------|
|            |   |                         | TOTAL POR PESO DE TRABE (ton) | (ton) |   |                        |
| 7          | 145                                       | 46.6                    | 50                            |       | 93  | Esquina                |
| 8          | 43-55                                     | 12.5-16.0               |                               | 24    | 52-67   | Adyacente a Esquina    |
| 9          | 120<br>90                                 | 38.5<br>28.9            | 50                            | 24    | 77<br>120   | Adyacente a Perimetral |
| 10         | —   | —                       | —                             | —     | —   | Adyacente a Esquina    |
| 11         | -200(*)<br>62                             | 64.2<br>19.9            | 50                            | 24    | 128<br>83   | Central                |
| 12         | —   | —                       | —                             | —     | —   | Adyacente a Perimetral |

Celdas de Punta

| PILOTE No. | ESFUERZO REGISTRADO (ton/m <sup>2</sup> ) | CARGA EQUIVALENTE (ton) | CAPACIDAD DE PUNTA DE ARCILLA (ton) | CARGAS MAXIMAS POSIBLES                 |  | CARGA / CARGAS EQUIV./MAX. POSIBLES (%) |
|------------|---|-------------------------|-------------------------------------|---|--|---|
|            |   |                         |                                     | CARGA TOTAL MAS FRICCIÓN NEGATIVA (ton) |  |   |
| 7          | -310(*)                                   | 89.9                    | 4.5                                 | 50+80=130                               |  | 69.2                                    |
| 8          | -340(*)<br>100-160                        | 98.6<br>31.9-46.4       | 4.8                                 | 50+54=104                               |  | 94.8                                    |
| 9          | -180(*)                                   | 52.2                    | 4.7                                 | 50+57=107                               |  | 48.8                                    |
| 10         | 30-55                                     | 8.7-16.0                | 4.8                                 | 50+54=104                               |  | —                                       |
| 11         | 290<br>360<br>405                         | 84.1<br>104.4<br>117.5  | 5.48                                | 50+36= 86                               |  | 97.8                                    |
| 12         | 285<br>390<br>405                         | 82.6<br>113.1<br>117.5  | 4.7                                 | 50+57=107                               |  | 77.2<br>105.7<br>109.8                  |

(\*) Requiere cambio de signo en el registro de la celda.

|   |                   |
|---|-------------------|
| <b>UNAM</b>                                 |                   |
| ENEP - ACATLAN                              |                   |
| TESIS PROFESIONAL                           |                   |
| ESFUERZOS Y CARGAS ACTUANTES EN LOS PILOTES |                   |
| GERMAN A. CARRILLO RUIZ                     |                   |
| EDUARDO R.E. HORT DELGADO                   |                   |
| MEXICO D.F.                                 | '985 FIGURA Nº 28 |

RESUMEN DE PRESIONES REGISTRADAS Y ESPERADAS EN LAS CELDAS LATE  
RALES COLOCADAS EN LOS PILOTES DE FRICCIÓN DE LA ZAPATA. AC-22.

| PILOTE<br>No. | CELDA<br>No. | PROF.<br>(m) | PRESION<br>HIDRAULICA<br>(ton/m <sup>2</sup> ) | P <sub>ve</sub><br>(=P <sub>h</sub> (Kφ=1))<br>(ton/m <sup>2</sup> ) | P <sub>vt</sub><br>(=P <sub>ht</sub> (Kφ=1))<br>(ton/m <sup>2</sup> ) | P <sub>R</sub><br>(ton/m <sup>2</sup> ) | P <sub>ht</sub> /P <sub>R</sub> |
|---------------|--------------|--------------|--|--|---|---|---------------------------------|
| 7             | 1219         | 6.0          | 3.90   | 3.30   | 7.20  | 7.0 - 9.5                               | 1.03                            |
|               | 1205         | 9.0          | 6.95   | 3.10   | 10.05   | 11.0 - 13.5                             | 0.91                            |
|               | 1214         | 11.0         | 9.00   | 2.90   | 11.90   | 11.0                                    | 1.08                            |
|               | 1224         | 26.0         | 24.30  | 9.60   | 33.90   | -37 (*)                                 | 0.92                            |
| 8             | 1220         | 6.0          | 3.90   | 2.30   | 6.20  | 10.0 - 27.0                             | 0.62                            |
|               | 1212         | 9.0          | 6.95   | 2.10   | 9.05  | 8.5 - 12.5                              | 1.06                            |
|               | 1234         | 11.0         | 9.00   | 1.90   | 10.90   | 10.0 - 18.0                             | 1.09                            |
|               | 1221         | 26.0         | 24.30  | 9.40   | 33.70   | 37.0                                    | 0.91                            |
| 9             | 1206         | 6.0          |  |  |   | ---                                     | ---                             |
|               | 1217         | 9.0          | 6.95   | 2.10   | 9.05  | 8.0 - 13.0                              | 1.14                            |
|               | 1207         | 11.0         | 9.00   | 2.00   | 11.00   | 12.5 - 15.0                             | 0.88                            |
|               | 1216         | 26.0         | 24.30  | 9.20   | 33.50   | 26.0 - 29.0                             | 1.16                            |
| 10            | 1208         | 6.0          |  |  |   | ---                                     | ---                             |
|               | 1213         | 9.0          | 6.95   | 2.10   | 9.05  | 12.0 - 14.0                             | 0.75                            |
|               | 1222         | 11.0         | 9.00   | 1.90   | 10.90   | 11.0 - 14.0                             | 0.99                            |
|               | 1225         | 26.0         | 24.30  | 9.40   | 33.70   | 13.0 - 16.0                             | ---                             |
| 11            | 1211         | 6.0          | 3.90   | 1.30   | 5.20  | 8.5 - 13.5                              | 0.61                            |
|               | 1215         | 9.0          | 6.95   | 1.25   | 8.20  | 11.5 - 13.5                             | 0.71                            |
|               | 1229         | 11.0         | 9.00   | 1.20   | 10.20   | ---                                     | ---                             |
|               | 1235         | 26.0         | 24.30  | 8.50   | 32.80   | 10.5 - 16.0<br>(-31, -36) (*)           | (1.06, 0.91)                    |
| 12            | 1216         | 6.0          | 3.90   | 2.30   | 6.20  | 8.0 - 9.0                               | 0.78                            |
|               | 1218         | 9.0          | 6.95   | 2.10   | 9.05  | 14.0                                    | 0.65                            |
|               | 1230         | 11.0         | 9.00   | 2.00   | 11.00   | 14.0                                    | 0.79                            |
|               | 1228         | 26.0         | 24.30  | 9.20   | 33.50   | -35.0 (*)                               | 0.96                            |
|               |              |              |  |  |   | Promedio:                               | 0.905                           |

(\*) Requiere cambio de signo en el registro de la celda.

P<sub>ve</sub> - Presión vertical efectiva  
P<sub>h</sub> - Presión horizontal  
P<sub>he</sub> - Presión horizontal efectiva  
P<sub>vt</sub> - Presión vertical total  
P<sub>ht</sub> - Presión horizontal total  
P<sub>R</sub> - Presión registrada  
Kφ - Relación entre presión horizontal y vertical

|  |                   |
|--|-------------------|
| <b>UNAM</b>  |                   |
| ENEP - ACATLAN                                       |                   |
| TESIS PROFESIONAL                                    |                   |
| PRESIONES ACTUANTES EN LOS PILOTES                   |                   |
| GERMAN A. CARRILLO RUIZ<br>EDUARDO R.E. HORT DELGADO |                   |
| MEXICO D.F.  | 1985 FIGURA N° 29 |

área tributaria con un círculo de radio igual a 6 veces la dimensión del pilote.

b.- La carga aplicada sobre los pilotes, debida a cargas muertas de la estructura, es del orden de 50 ton para el caso de la zapata analizada, mientras que su capacidad de carga es del orden de 90 a 100 tons, determinada con las pruebas en los pilotes y coincidente con la máxima capacidad por fricción positiva calculada usando las propiedades mecánicas del subsuelo determinadas en la ubicación de la zapata AC-22; lo anterior exige, para el equilibrio de las fuerzas actuantes en el pilote, que se genere una pequeña carga de fricción negativa en la parte superior del pilote, ocasionada por el efecto que induce el hundimiento regional de la ciudad, que en el sitio que interesa es del orden de 8 cm por año, y que por lo tanto genera el fenómeno de fricción negativa en cualquier elemento rígido embebido en él. Al generarse fricción negativa en una parte del pilote, la capacidad por fricción positiva se ve disminuida, pues los esfuerzos cortantes positivos en el fuste del pilote, ya no actuarán en toda la longitud del mismo, sino solamente en la parte requerida para generar una fuerza resistente igual a la carga aplicada sumada con la fuerza de fricción negativa. En estas circunstancias la carga de 50 ton inducida por el peso de la zapata, la columna y el peso muerto de las trabes con sus cargas adicionales, más la fuerza de fricción negativa que se genera,

se equilibran con la fricción positiva desarrollada en la parte inferior del pilote de fricción y la escasa capacidad que por punta adquieren estos elementos cuando están embebidos en el subsuelo con la punta alojada en estratos arcillosos.

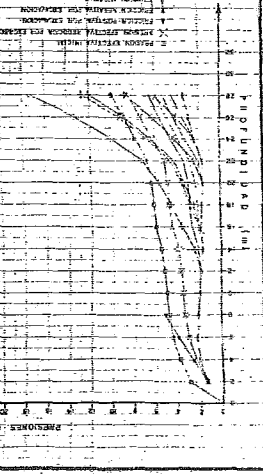
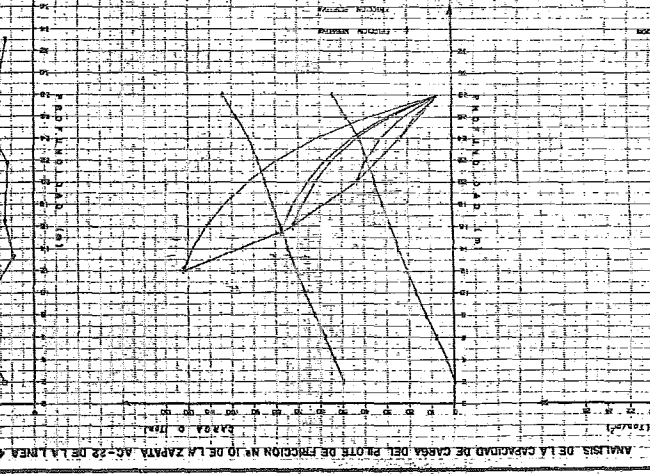
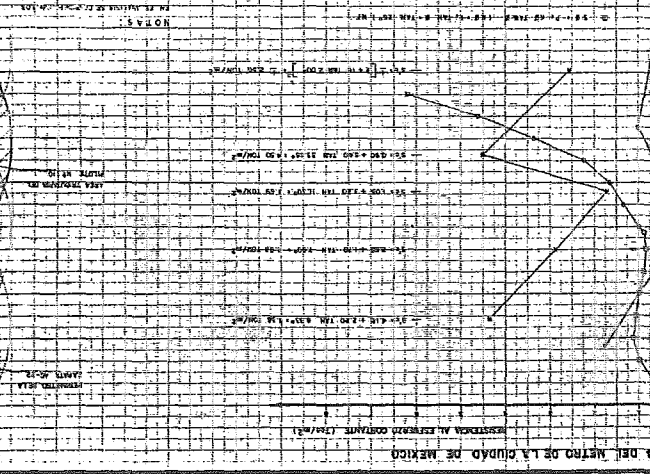
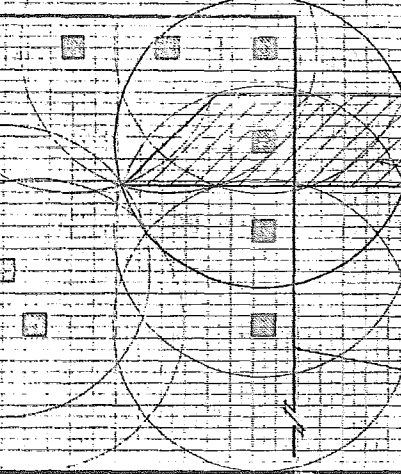
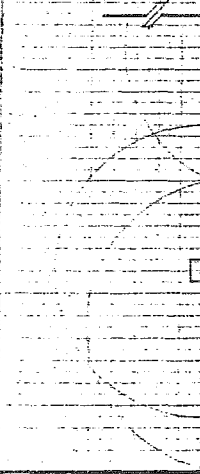
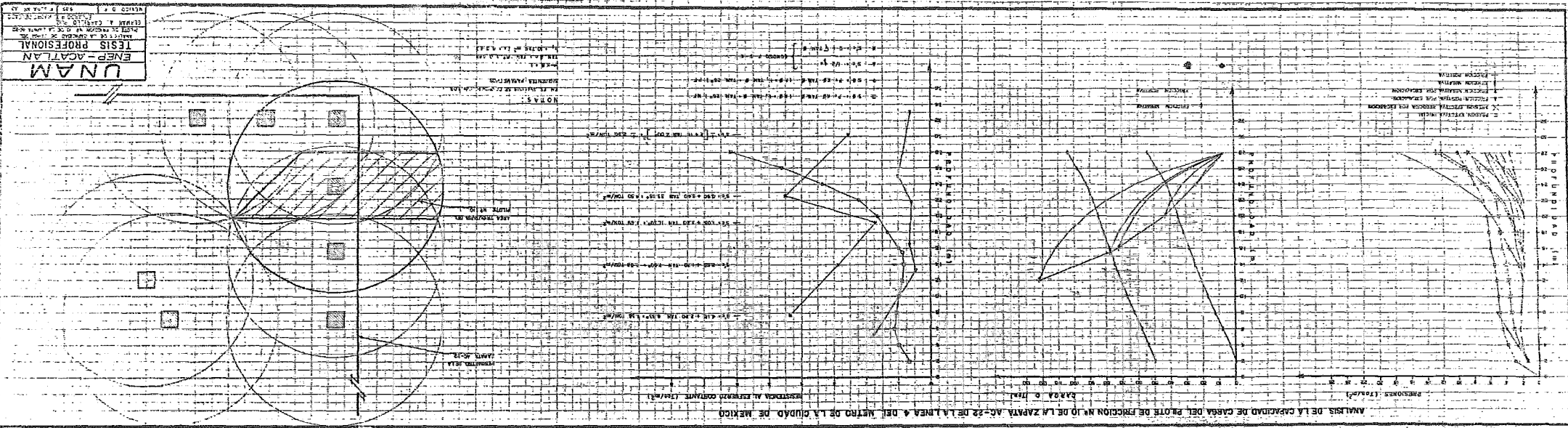
La figura 30 muestra gráficamente las presiones y fuerzas aplicadas en el pilote y en el suelo, bajo la condición de equilibrio plástico.

Es en estas condiciones en que se obtiene la coincidencia entre las presiones horizontales totales anticipadas y las presiones registradas en las celdas instaladas en las caras de los pilotes. La circunstancia anterior se ve confirmada por las mediciones realizadas en los gatos planos instalados en la interfase entre el apoyo de la zapata y el subsuelo a la profundidad de desplante. Esto se detalla en el inciso V.2.

Por lo que se refiere a las celdas medidoras de esfuerzos colocados en las proximidades de la punta del pilote y en la superficie de contacto entre la zapata y el pilote, se puede deducir de los valores registrados y resumidos en la tabla de la figura N<sup>o</sup> 28, lo siguiente:

a.- De las cinco celdas colocadas en la cabeza del pilote para recibir directamente la carga transmitida por la zapata, tres de ellas indicaron valores de esfuerzos que considera

UNAM  
ENP-AOATLAN  
TESIS PROFESIONAL  
ANÁLISIS DE LA CAPACIDAD DE CARGA DEL PUNTO DE FRICCION N.º 10 DE LA LINEA 4 DEL METRO DE LA CIUDAD DE MEXICO



dos actuando en el área transversal de los pilotes, significan entre el 77 y el 128% de la carga muerta total esperada en cada uno de dichos pilotes. Las otras dos celdas registraron solamente un esfuerzo que parece corresponder al incremento de carga muerta producida por el colado de las trabes; tales celdas registraron esfuerzos que corresponden a cargas comprendidas entre el 67 y el 120% de la carga correspondiente al peso de las trabes.

b.- En cuanto a las celdas instaladas próximas a la punta de los pilotes, los registros señalan niveles de esfuerzos altos, de hecho sólo comparables con la carga que podría estimarse actuando en la punta de los pilotes, si en ellos estuvieran obrando las cargas muertas totales arrojadas por la estructura y además el total de la carga que por fricción negativa puede estimarse para estos pilotes y que varía de 36 a 80 ton. Lo anterior significaría que los pilotes estuvieran trabajando de punta y que en ellos se hubiera desarrollado el fenómeno de fricción negativa; sólo así las cargas derivadas del esfuerzo medido en las celdas corresponden a proporciones entre el 70 y el 110% de la fuerza que puede estimarse actuaría sobre el pilote en las circunstancias antes descritas.

La estratigrafía derivada de los sondeos cercanos a la zapata con los pilotes instrumentados revela que es poco probable que estos pilotes hayan estado trabajando de punta y por

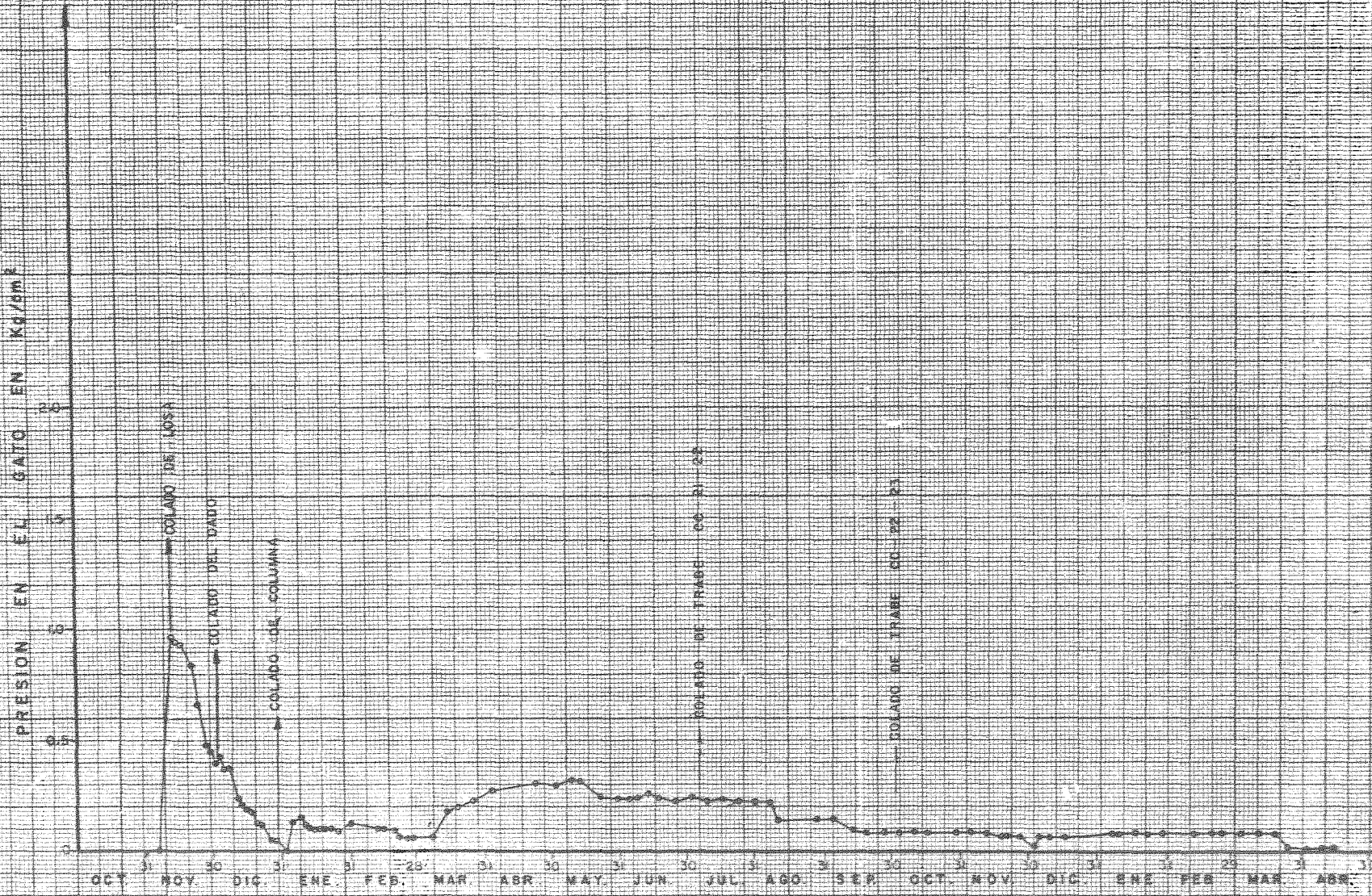


otro lado, las presiones registradas en las celdas laterales corresponden más bien a las condiciones que podrían anticiparse si los pilotes estuvieran trabajando por fricción, con la pequeña contribución de la capacidad por punta e incluso generando una pequeña porción de fricción negativa en su parte superior.

Se debe concluir, por lo tanto, que los registros de esfuerzos en las celdas colocadas, tanto en la punta como en la cabeza de los pilotes, no muestran un grado de aproximación satisfactorio, o bien, los valores registrados no son congruentes con los anticipables.

#### V.2.- Presiones registradas en los gatos hidráulicos planos instalados en la superficie de desplante de las zapatas.

Con objeto de conocer la magnitud y variación con el tiempo, de la presión que pudiera transmitir la zapata directamente al subsuelo en que se apoyó al construirla, se instalaron gatos hidráulicos planos en esta superficie de contacto. Estos instrumentos se instalaron antes de proceder al colado de la zapata y los registros de presión se iniciaron desde ese momento. La figura N° 31 muestra la variación típica de la presión obtenida en estos instrumentos; puede observarse que el gato hidráulico registra, al terminar el colado de la



FECHA DE INSTALACION 7-XI-78

COLUMNA CC-22: NORTE

|                                   |                            |
|-----------------------------------|----------------------------|
| <b>UNAM</b>                       |                            |
| <b>ENEP - ACATLAN</b>             |                            |
| <b>TESIS PROFESIONAL</b>          |                            |
| --- PRESION ENTRE LOSA Y SUBSUELO |                            |
| GERMAN A. CARRILLO RUIZ           | EDUARDO R.E. HJORT DELGADO |
| MEXICO D.F.   1985                | FIGURA No 31               |

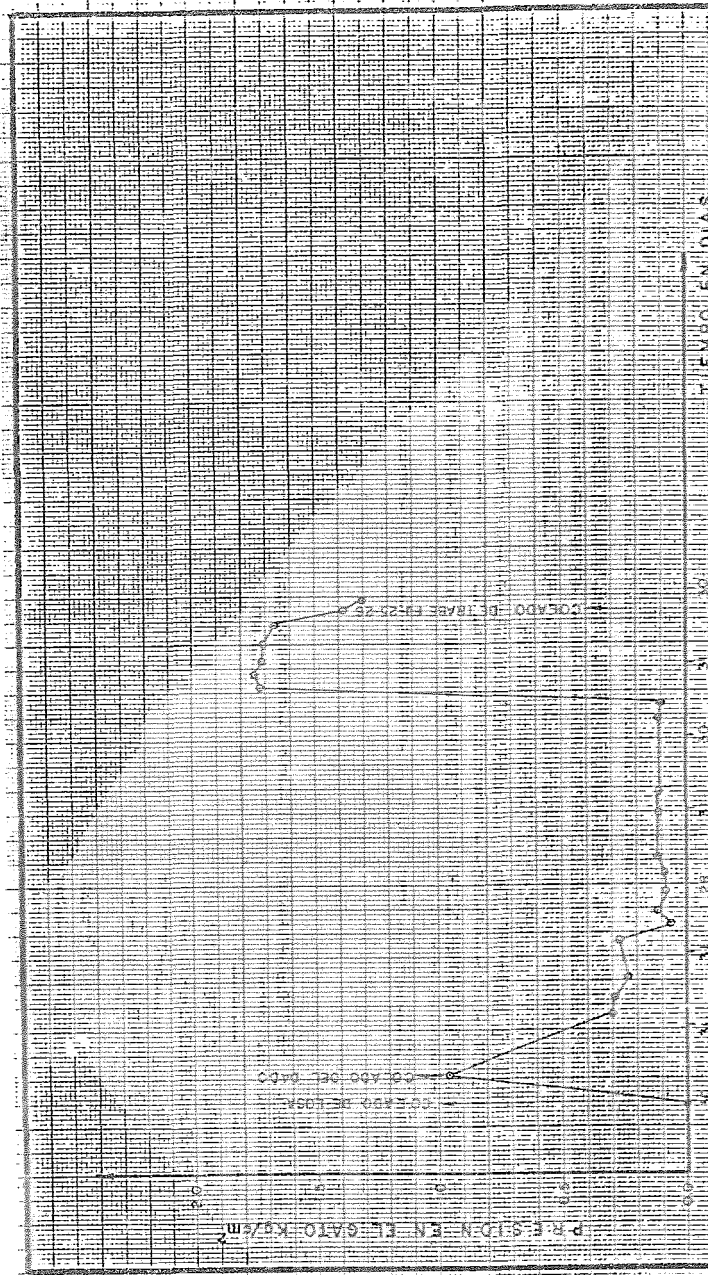
zapata, una presión que corresponde al peso del concreto fresco en el espesor de la losa de la zapata y esta presión disminuye gradualmente con el tiempo, hasta que, en lapsos que van de 30 a 290 días, el valor de la presión registrada se anula. La Tabla de la figura N<sup>o</sup> 32 muestra un resumen de los máximos valores de presión registrada en todos los gatos planos instalados en las condiciones antes descritas y los tiempos en que la presión inicialmente registrada se anuló. Particularmente, las figuras 33 a 35 muestran las variaciones de presión registradas en los únicos tres gatos hidráulicos planos que en algún tiempo después de su instalación mostraron algún incremento en la presión leída en ellos; puede notarse que en ninguno de los tres casos el incremento de presión corresponde a una variación de las cargas de la estructura durante su proceso de construcción.

El comportamiento observado en todos los demás gatos hidráulicos planos es totalmente congruente con las mediciones en las celdas medidoras de presión lateral instaladas en los pilotes y que se describen en el inciso anterior, pues como la carga que transmite estructuralmente la zapata a los pilotes es de 50 a 60 ton y la capacidad de carga de este elemento es de 90 a 100 ton, el equilibrio plástico requiere que además de las 50 ó 60 ton de carga estructural aplicada, parte de las 90 a 100 ton de capacidad por fricción y punta se transformen en fricción negativa, y el resto se utilicen para sopor

DATOS GENERALES OBTENIDOS DE LOS GATOS HIDRAULICOS PLANOS INSTALADOS ENTRE EL SUBSUELO Y LA ZAPATA DE LA ESTRUCTURA ELEVADA DE LA LINEA 4 DEL METRO - DE LA CIUDAD DE MEXICO.

| ZAPATA No. | ORIENTACION DE LA UBICACION | PRESION MAXIMA INICIAL ELEMENTO COLADO |        | TIEMPO ENTRE $P_{m\acute{a}x}$ Y $P_{m\acute{a}x} \rightarrow 0$ $\Delta t_0$ (DIAS) | TIEMPO DESDE $P_{m\acute{a}x}$ HASTA INICIO $\Delta P$ $\Delta t_1$ (DIAS) | INCREMENTO DE LA PRESION AL TIEMPO $\Delta t_1$ $\Delta P$ (k/c <sup>2</sup> ) |
|------------|-----------------------------|--|--------|--|--|--|
|            |                             | $P_{m\acute{a}x}$ (k/c <sup>2</sup> )  | COLADO |  |  |  |
| GT - 16    | W                           | 0.72                                   | (DADO) | 281  |  |  |
| GT - 16    | E                           | 0.80                                   | (DADO) | 33   |  |  |
| TB - 1     | S                           | 0.76                                   | (LOSA) | 35   | 35   | 2.43   |
| TB - 17    | N                           | 0.31                                   | (LOSA) | 16   |  |  |
| TB - 17    | S                           | 0.32                                   | (LOSA) | 22   |  |  |
| TB - 18    | N                           | 0.32                                   | (LOSA) | 7  |  |  |
| TB - 29    | S                           | 0.23                                   | (LOSA) | 786  |  |  |
| TB - 29    | N                           | 0.30                                   | (LOSA) | 167  |  |  |
| TB - 32    | E                           | 0.94                                   | (LOSA) | 90   |  |  |
| TB - 32    | W                           | 0.92                                   | (LOSA) | 488  |  |  |
| BC - 4     | S                           | 0.78                                   | (DADO) | 77   |  |  |
| BC - 4     | N                           | 0.28                                   | (LOSA) | 4  |  |  |
| BC - 26    | E                           | 0.79                                   | (LOSA) | 40   |  |  |
| BC - 26    | W                           | 1.19                                   | (LOSA) | 36   |  |  |
| CC - 22    | N                           | 0.96                                   | (LOSA) | 503  |  |  |
| CC - 23    | N                           | 1.30                                   | (LOSA) | 55   |  |  |
| CC - 32    | S                           | 0.64                                   | (LOSA) | 24   |  |  |
| CC - 32    | N                           | 0.64                                   | (LOSA) | 31   |  |  |
| MC - 1     | E                           | 0.20                                   | (DADO) | 7  |  |  |
| MC - 1     | W                           | 0.72                                   | (DADO) | 73   |  |  |
| MC - 2     | W                           | 0.54                                   | (LOSA) | 5  |  |  |
| MC - 2     | E                           | 0.90                                   | (DADO) | 63   |  |  |
| CM - 16    | N                           | 0.40                                   | (LOSA) | 39   |  |  |
| CM - 16    | S                           | 0.47                                   | (LOSA) | 24   |  |  |
| CM - 17    | S                           | 0.70                                   | (LOSA) | 21   |  |  |
| CM - 17    | N                           | 0.88                                   | (LOSA) | 49   |  |  |
| CF - 17    | W                           | 1.70                                   | (DADO) | 36   |  |  |
| CF - 18    | E                           | 1.12                                   | (LOSA) | 66   |  |  |
| CF - 27    | E                           | 0.94                                   | (LOSA) | 211  |  |  |
| FJ - 26    | E                           | 0.96                                   | (LOSA) | 75   |  |  |
| FJ - 26    | W                           | 0.96                                   | (LOSA) | 153  | 153  | 1.65   |
| FJ - 27    | E                           | 0.50                                   | (LOSA) | 289  |  |  |
| FJ - 27    | W                           | 0.49                                   | (LOSA) | 128  | 128  | 0.50   |

|  |                   |
|--|-------------------|
| <b>UNAM</b>  |                   |
| <b>ENEP - ACATLAN</b>                                |                   |
| <b>TESIS PROFESIONAL</b>                             |                   |
| PRESION ENTRE LOSA Y SUBSUELO.                       |                   |
| GERMAN A. CARRILLO RUIZ<br>EDUARDO R.E. HORT DELGADO |                   |
| MEXICO D.F.  | 1985 FIGURA N° 32 |



UNAM

ENEP - ACATLAN  
TESIS PROFESIONAL

PRESION ENTRE LOSA Y SUBSUELO

GERMAN A. CARRILLO RUIZ  
EDUARDO R. E. HUERT DELGADO

MEXICO D.F. 1985 FIGURA Nº 33.

TIEMPO EN DIAS

NOV. 79 DIC. 79 ENE. 80 FEB. 80 MAR. 80 ABR. 80 MAY. 80 JUN. 80

3.0 1.5 0

FECHA DE INSTALACION 1-28-IX-80

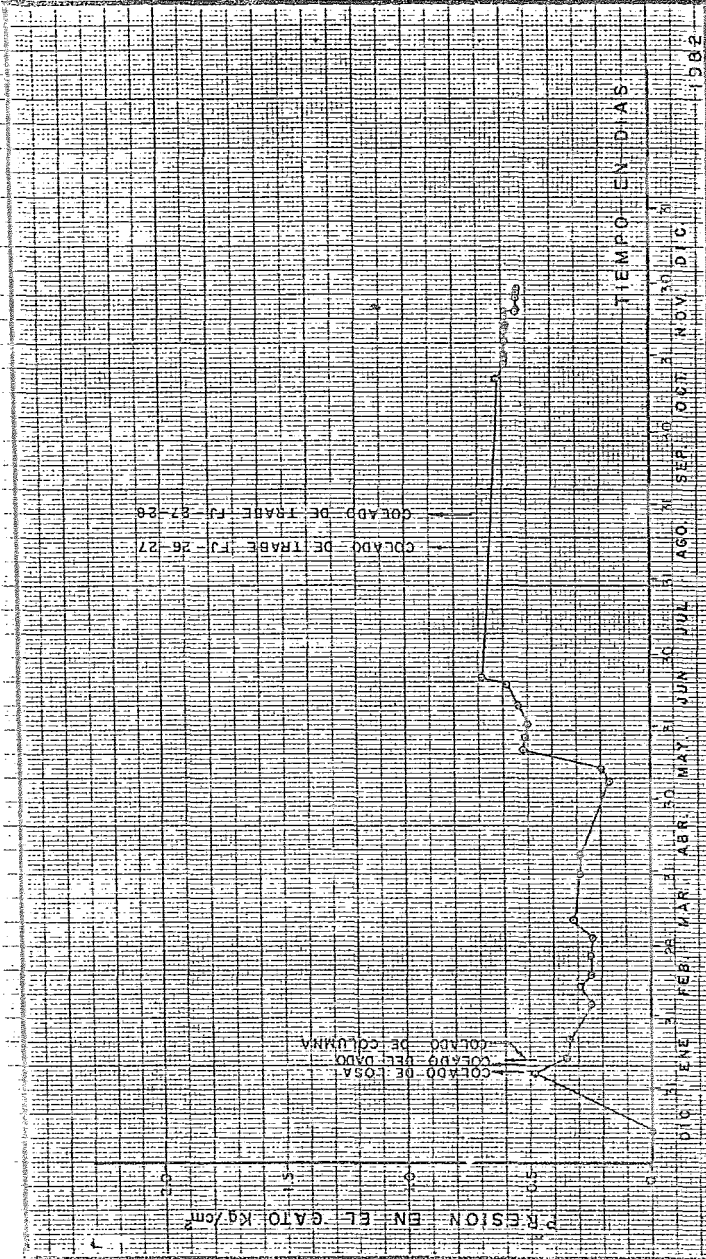
COLUMNA FIC-23 DESTE

P.R.E.S.I.D.N. EN EL GATO. Kg/m²

CORREO DE LOSA

CORREO DE PISO

CORREO DE TABIQUE EN-25-25



**UNAM**

**ENEP - ACATLAN**

**TESIS PROFESIONAL**

PRESION ENTRE LOSA Y SUBSUELO

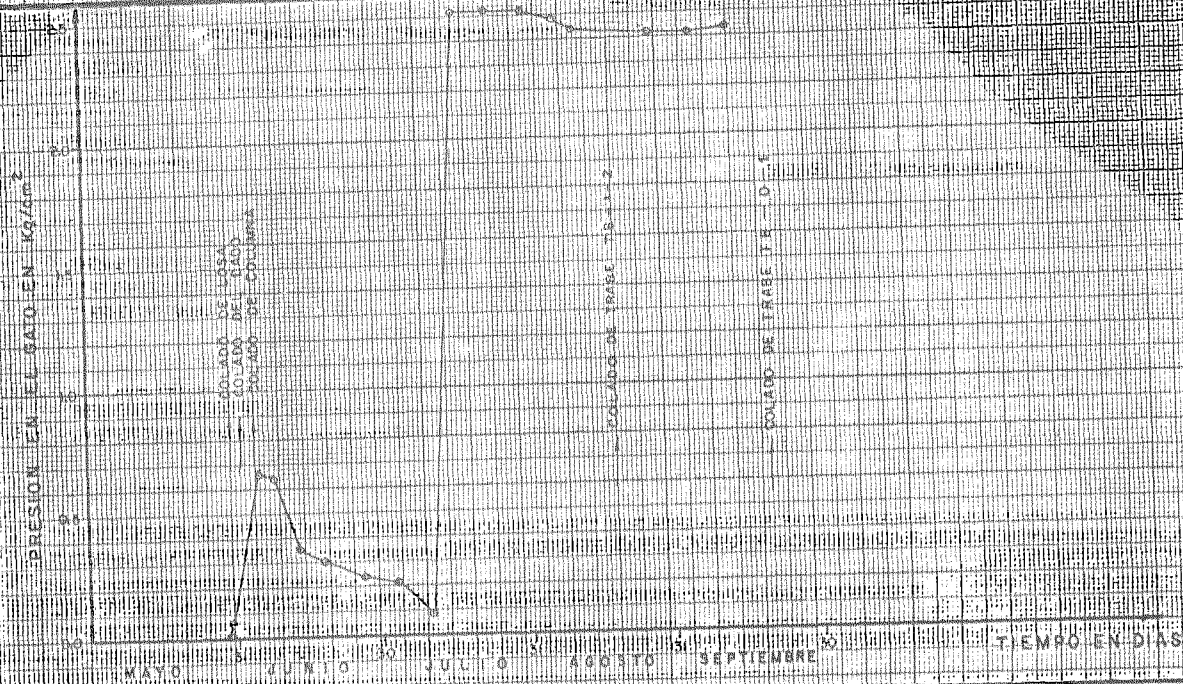
GERMAN A. CARRILLO RUIZ

EDUARDO R.E. HUERT DELGADO

MEXICO D.F. 1985 FIGURA N° 34

FECHA DE INSTALACION 2-XII-80

COLUMNA EU-27 OESTE



COLADA DE LOSA  
 COLADA DEL TABO  
 POSADO DE COLUMNA

COLADO DE TRASE 19.1-2

COLADO DE TRASE 19.0-5

FECHA DE INSTALACION: 30-X-1973

COLUMNA: 19.1-2

|   |      |              |
|---|------|--------------|
| <b>UNAM</b>   |      |              |
| <b>ENEP - ACATLAN</b>                                 |      |              |
| <b>TESIS PROFESIONAL</b>                              |      |              |
| PRESION ENTRE LOSA Y SUBSUELO                         |      |              |
| GERMAN A. CARRILLO RUIZ<br>EDUARDO R.E. HUORT DELGADO |      |              |
| MEXICO D.F.   | 1985 | FIGURA N° 35 |

tar la carga útil y la pequeña fuerza de fricción negativa generada en la parte superior. De acuerdo con los análisis realizados, los valores representativos de las cargas antes citadas son los siguientes:

|  | CARGAS<br>(Ton) | RESISTENCIAS<br>(Ton) |
|--|-----------------|-----------------------|
| Carga útil promedio aplicada en el pilote:                             | 50              |                       |
| Fuerza de Fricción negativa generada en los primeros 13 m. del pilote: | 28              |                       |
| Fricción positiva generada para equilibrar las cargas:                 |                 | 72                    |
| Capacidad de punta desarrollada:                                       |                 | 6                     |
|  |                 | <hr/>                 |
| S U M A S  | -78             | +78                   |

El comportamiento antes descrito supone un desplazamiento relativo entre la parte superficial del subsuelo y la cabeza del pilote, siendo mayor el movimiento descendente de la superficie del subsuelo que el de la zapata, pues los pilotes de fricción en que se apoya seguirán el movimiento del punto de equilibrio entre las cargas aplicadas, el cual corresponde al punto en que los esfuerzos de fricción generados en el pilote se invierten; este punto se encuentra ubicado aproximada



mente a 15 m debajo de la superficie de desplante de la zapata y en él se anticipa un movimiento descendente, causado por el hundimiento regional, del orden de 5 cm por año, lo que significa que el desplazamiento relativo entre la superficie de desplante del subsuelo que desciende 8 cm por año y la zapata, es del orden de 3 cm por año, tendiendo el suelo a despegarse de la zapata y ocasionando entonces que el gato hidráulico plano, antes sujeto a la presión correspondiente al peso del concreto que forma la losa de la zapata, se disipe hasta anularse, pues en la ubicación del gato plano habrá una holgura entre el subsuelo y la superficie inferior de la zapata. Es importante resaltar que en 17 de las zapatas instrumentadas con gatos planos se observó el mismo comportamiento: el gato registra el peso del concreto de la losa de la zapata y con el tiempo, en períodos que van de 30 a 290 días, esta presión se anula, revelando que en efecto ocurre una separación virtual entre la superficie del subsuelo y la parte inferior de la zapata. Es importante señalar también que en nueve de los gatos planos instalados, posteriormente al registro de presión nula, se obligó la regeneración de presión en el fluido hidráulico que los activa, con objeto de certificar que en estos instrumentos no se habían presentado fugas que pudieran ser la causa de la anulación de la presión; en todos los casos los gatos hidráulicos se revelaron en buen estado y por lo tanto, las aseveraciones antes expresadas son válidas: el subsuelo tiende a despegarse de la parte inferior de la za

pata por la diferencia de hundimientos que ocurre entre la superficie del subsuelo, que sigue al hundimiento regional, y el movimiento de los pilotes, que siguen el correspondiente a un punto situado a 15 m abajo de la superficie y que es menor al regional superficial.

## C A P I T U L O VI

## PRUEBAS DINAMICAS EN PILOTES DE FRICCION.

## VI.1.- Descripción de las pruebas dinámicas.

Con el propósito de comparar y enjuiciar los procedimientos de predicción de la capacidad de carga de pilotes de fricción embebidos en las arcillas suaves de la Ciudad de México a base de pruebas de carga del tipo dinámico, se llevó a cabo la ejecución de este tipo de pruebas en 16 pilotes ubicados en las zapatas CC-30, C-33 y CM-17 de la estructura de la línea 4 del METRO.

Las pruebas dinámicas consisten fundamentalmente en la medición de la fuerza y la velocidad inducidas al pilote durante la etapa de hincado del mismo y el procesamiento de tales datos en un dispositivo analizador electrónico; se han desarrollado dos métodos básicos de evaluación de la capacidad de carga en pilotes con base en la prueba dinámica, estos son el método Case y el método Capwap, ambos apoyados en la forma de transmisión de las ondas de esfuerzos inducidos al pilote durante el golpeo de hincado:

La fuerza aplicada al pilote es calculada por el análisis

zador a partir de la deformación medida con sensores eléctricos montados en un bloque de aluminio, lo cual constituye un transductor medidor de fuerza, figura N° 36. La velocidad es determinada con la integración de la aceleración medida con acelerómetros. Los transductores de deformación y de aceleración son fijados en la cabeza del pilote, atornillándolos a agujeros perforados con taladro.

Junto con el analizador son usados un osciloscopio y una grabadora de cinta magnética, con el objeto de realizar un estudio visual más detallado, posteriormente al hincado.

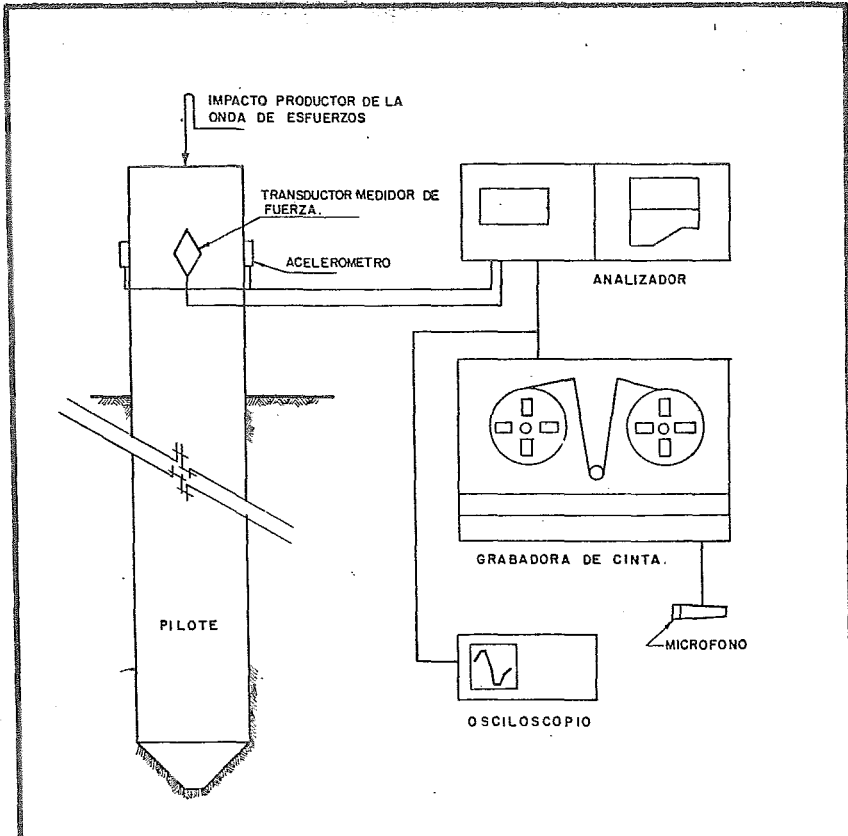
Todo el equipo de medición está montado en una unidad móvil, con objeto de facilitar el traslado al sitio de la prueba.

## VI.2.- Teoría de la prueba dinámica.

Existen dos versiones teóricas de determinación de la capacidad de carga:

- Método del tiempo de retraso.
- Método del amortiguamiento.

Se describirá brevemente el método de amortiguamiento, que fué el utilizado en las pruebas dinámicas efectuadas en



ESQUEMA DE LA PRUEBA DINAMICA

|                               |      |              |
|-------------------------------|------|--------------|
| <b>UNAM</b>                   |      |              |
| ENEP - ACATLAN                |      |              |
| TESIS PROFESIONAL             |      |              |
| ESQUEMA DE LA PRUEBA DINAMICA |      |              |
| GERMAN A. CARRILLO RUIZ       |      |              |
| EDUARDO R.E. HJORT DELGADO    |      |              |
| MEXICO D.F.                   | 1985 | FIGURA N° 36 |

línea 4.

La ecuación para obtener la resistencia a la penetración dinámica es:

$$R = \frac{F(t_{\text{máx}}) + F(t_{\text{máx}} + \frac{2L}{C})}{2} + \frac{MC}{2L} [v(t_{\text{máx}}) + v(t_{\text{máx}} + \frac{2L}{C})]$$

donde:

R : Resistencia al hincado del pilote;

F (t): Fuerza en la cabeza del pilote en un tiempo t;

V (t): Velocidad en la cabeza del pilote en un tiempo t;

tmáx. : Tiempo en el que se alcanza el valor máximo relativo de la velocidad (tiempo de impacto).

M : Masa del pilote;

L : Longitud del pilote, desde la punta hasta los transductores;

C : Velocidad de la onda de esfuerzos en el pilote, calculada con la expresión:

$$C = \sqrt{\frac{E}{\rho}} ;$$

donde:

E : Módulo de elasticidad del material constitutivo del pilote;

$\rho$  : Densidad del material del pilote.

La resistencia R está compuesta de una porción estáti-

ca  $R_s$  y de una porción dinámica  $R_d$ ; esta última de importancia sólo durante el hincado.

La resistencia dinámica es proporcional a la velocidad en la punta del pilote y puede expresarse de la forma siguiente:

$$R_{d\text{máx}} = J_c \cdot \frac{EA}{C} \cdot v_{b\text{máx}}$$

Siendo  $v_{b\text{máx}}$  la máxima velocidad en la punta del pilote, que considerando el efecto de reflexión de las ondas de esfuerzo, resulta ser:

$$v_{b\text{máx}} \left( t_{\text{máx}} + \frac{L}{C} \right) = 2v(t_{\text{máx}}) - \frac{C}{EA} \sum_{i=1}^n R_i$$

A es el área de la sección transversal del pilote.

$J_c$  es el coeficiente de amortiguamiento, adimensional, que depende del tipo del suelo bajo la punta del pilote; la práctica norteamericana recomienda adoptar valores de 0 - 0.15 para arenas, 0.15 - 0.25 para limos arenosos, 0.15 - 0.70 para arcillas limosas y de 0.90 - 1.20 para arcillas.

La resistencia estática puede ser derivada de:

$$R_s = R_{\text{máx}} - J_c \cdot [2F(t_{\text{máx}}) - R_{\text{máx}}];$$

o más detalladamente:

$$R_s = R_{\text{máx}} - J_c \cdot \left[ F(t_{\text{máx}}) + \frac{EA}{C} v(t_{\text{máx}}) - R_{\text{máx}} \right].$$

Como se puede notar, para el coeficiente de amortiguamiento

existe la posibilidad de adoptar un amplio rango de valores al aplicar el procedimiento al subsuelo de la Ciudad de México.

De la primera serie de pruebas dinámicas, en los pilotes de la zapata CC-33, el ejecutor definió un valor  $J_c$  igual a 0.4 y recomendó la utilización de un multiplicador igual a 1.17 para afectar a la capacidad dinámica y obtener así la capacidad estática, cuyo valor le fué proporcionado de la prueba de carga estática previamente realizada en la zapata BC-23.

La Tabla de la figura N° 37 muestra los valores de la capacidad de carga obtenidos mediante el empleo de los métodos estático y dinámico; se hace notar que el coeficiente de amortiguamiento se varió de 0.4 a 0.5 en las pruebas realizadas en la zapata CM-17; por otra parte, el factor multiplicador utilizado para afectar la capacidad dinámica, con objeto de obtener la capacidad estática, tiene valores distintos en las tres zapatas probadas, variando de 1.17, a 1.44, es decir, que con tal variación del orden del 23% no es posible obtener, con suficiente confiabilidad, los valores de la capacidad estática a partir de los valores calculados de la capacidad dinámica; lo anterior condujo a considerar que no es conveniente seguir aplicando el método de ensaye dinámico a pilotes que trabajen por fricción.

VI.3.- Conclusiones sobre el uso de las pruebas de car-



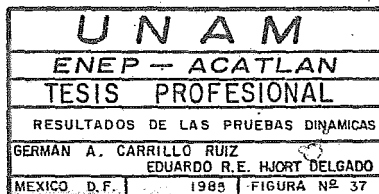
RESUMEN DE RESULTADOS DE PRUEBAS DINAMICAS Y ESTATICAS EN PILO-  
TES DE LA LINEA 4 DEL METRO DE MEXICO.

| ZAPATA O<br>TRAMO DE<br>PRUEBA | RESULTADO DE LAS PRUEBAS DE CARGA EN LOS PILOTES |                         |                                   |                                  |      |                    |
|--------------------------------|--|-------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|------|--------------------|
|                                | DINAMICAS (Promedio), TONS.                      |                         |                                   | Relaciones<br>(3) (3)<br>(1) (2) |      | ESTATICA<br>(Ton). |
|                                | Método<br>Case<br>(1)                            | Método<br>CAPWAP<br>(2) | Predicción<br>de Capacidad<br>(3) |                                  |      |                    |
| BC-23<br>CC-27/28              |  |                         |                                   |                                  |      | 94.0<br>99.0       |
| CC-30                          | 78.2   | 80.0                    | 100.                              | 1.28                             | 1.25 |                    |
| CC-32                          |  |                         |                                   |                                  |      | 111.0              |
| CC-33                          | 83.3(*)  | 81.3                    | 97.3                              | 1.17(o)                          | 1.20 |                    |
| CM-8                           |  |                         |                                   |                                  |      | 99.0               |
| CM-17                          | 68.9(+)  | 70.6                    | 99.1                              | 1.44                             | 1.40 | 99.0               |

NOTAS: (\*) Se usó  $J = 0.4$

(+) Se usó  $J = 0.5$

(o) Se indicó inicialmente este valor del multiplicador para obtener la capacidad última del pilote; no se usó en el resto de las pruebas.



ga del tipo dinámico.

De los resultados de las pruebas dinámicas y estáticas efectuadas en la línea 4, se concluye:

a.- El parámetro básico,  $J_c$ , que requiere el procedimiento de cálculo de la capacidad de carga por medio de la prueba dinámica, a partir de la medición de las fuerzas y velocidades inducidas al pilote durante el hincado, no se estableció con precisión para pilotes de fricción, como los usados en la cimentación de la línea 4 del METRO, habiéndose empleado en los reportes de ejecutor valores de 0.4 y 0.5.

b.- Con los valores antes citados de  $J_c$ , se tiene variaciones del factor multiplicador de la carga dinámica para obtener la estática, del orden del 23%.

c.- Se considera que no fue posible establecer una correlación fidedigna entre los valores obtenidos de las pruebas dinámicas y los de las pruebas de carga estática, que justifique el uso de las pruebas dinámicas como un medio de evaluación de la capacidad de carga real de los pilotes de fricción embebidos en las arcillas suaves de la Ciudad de México.

## C A P I T U L O V I I

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

En los capítulos anteriores de esta tesis, se han descrito los resultados obtenidos en los trabajos y estudios realizados con el propósito de mejorar el conocimiento general sobre el comportamiento de pilotes de fricción embebidos en las arcillas suaves de la ciudad de México, como los que forman parte de las cimentaciones de las columnas de la estructura elevada de la línea 4 del METRO. Tales estudios comprenden desde la investigación del proceso de regeneración de resistencia en las arcillas remoldeadas, tanto en el laboratorio, ensayando muestras de tales arcillas en estado natural y después del remoldeo, como en el campo, mediante la ejecución de pruebas de carga en pilotes hincados para formar parte de las cimentaciones de la línea 4 y ejecutando estas pruebas a diferentes lapsos después de haber perturbado en su totalidad la estructura de la arcilla adyacente al fuste de los pilotes; se realizaron también mediciones de esfuerzos en los pilotes, de presiones laterales del subsuelo sobre los pilotes e incluso de las presiones de las zapatas sobre el suelo en que descansaron al ser construídas. Todos estos datos se han comparado con los resultados que pueden anticiparse con respecto a los parámetros medidos utilizando las teorías y procedimientos de cálculo de que se dispone en la actualidad,

con objeto de establecer cual de ellos predice con mejor grado de aproximación los valores de los parámetros básicos para el análisis y diseño de cimentaciones con base en pilotes de fricción en la ciudad de México.

A continuación se expresan en forma resumida las principales conclusiones que pueden desprenderse de los trabajos, estudios y mediciones realizadas y finalmente se establecen una serie de recomendaciones que se considera serán ventajosas en su aplicación a futuros proyectos en los que esté involucrado el tipo de cimentaciones de que se trata.

#### VII.1.- Conclusiones.

C.1.- De los resultados de 17 pruebas de carga efectuadas en pilotes de fricción embebidos en las arcillas suaves de la ciudad de México, con longitudes entre 19 y 26 m y cuyas puntas quedaron ubicadas a distancias de 5 a 11 m de la parte superior del primer estrato duro y con sus cabezas situadas a 2 metros de profundidad desde la superficie del terreno y que por lo tanto quedan alojados en las arcillas I a IV de la formación Tacubaya, se puede concluir que los pilotes de fricción adquieren su capacidad de carga en periodos muy breves; de hecho, a 24 horas alcanzan entre el 89 y 99% de su capacidad última y a 7 días han alcanzado del 95 al 100%; en toda forma, a los 14 días los pilotes han adquirido el 100%

de su capacidad en todos los casos.

C.2.- Las arcillas remoldeadas de la ciudad de México regeneran su resistencia por tixotropía muy rápidamente; en 24 horas han regenerado prácticamente la resistencia que serán capaces de alcanzar a mayor edad. Tal resistencia, en condiciones de confinamiento nulo, es aproximadamente igual al 35% de la resistencia a compresión simple inalterada; es decir, la sensibilidad de estas arcillas es de aproximadamente 2.86.

C.3.- Las valuaciones de capacidad de carga con los procedimientos propuestos por Terzaghi y por Zeevaert, Referencias N° 1 y 2, indican que al respecto de la resistencia de las arcillas adyacentes a los pilotes de fricción se puede concluir lo siguiente:

C.3.1.- La resistencia de las arcillas remoldeadas sujetas a presión de confinamiento se regenera con valor mayor al que se logra cuando no existe confinamiento después del remoldeo y la relación entre resistencia adquirida y la presión de confinamiento es prácticamente lineal siendo el factor de proporcionalidad la tangente del "ángulo de resistencia adquirida" y se confirma que tal ángulo es de  $27.5^\circ \pm 2.5^\circ$ .

C.3.2.- Cuando la resistencia regenerada bajo confina-

miento es mayor que la resistencia al esfuerzo cortante de la arcilla en condiciones naturales, es esta última la que define la presencia de la falla por esfuerzo cortante, que entonces se presenta en una superficie ubicada paralelamente y a unos cuantos centímetros del fuste del pilote; su valor, para fines prácticos, es igual al 50% de la resistencia a compresión simple.

C.4.- De la comparación de las capacidades de carga de los pilotes, la calculada utilizando el procedimiento propuesto por Terzaghi y la registrada en las pruebas ejecutadas sobre 17 pilotes de fricción de la línea 4, se puede concluir que la capacidad calculada utilizando como resistencia al esfuerzo cortante el 50% de la resistencia a compresión simple de las arcillas ubicadas a lo largo del pilote, excede a la capacidad registrada en las pruebas en proporciones que van del 15 al 50%, con un promedio de aproximadamente 30%. Se puede justificar que este exceso es debido a que en la parte superior del pilote la resistencia regenerada en las arcillas remoldeadas es menor a la resistencia en estado natural que se admite igual a  $\frac{1}{2} q_u$ .

C.5.- De la comparación entre la capacidad de carga calculada con el procedimiento propuesto por L. Zeevaert y la capacidad registrada en las pruebas de carga, se puede concluir que se obtiene una coincidencia con un grado de aproxima-

mación de  $\pm 10\%$ , siempre que en el procedimiento mencionado se adopten los siguientes valores de los parámetros involucrados:

C.5.1.- La relación entre presión horizontal y vertical en la superficie de falla ubicada en el fuste del pilote es igual a 1 ( $K\phi = \frac{P_h}{P_v} = 1$ ).

C.5.2.- La resistencia al esfuerzo cortante regenerada en las arcillas remoldeadas es igual al menor de los valores obtenidos como el 50% de la resistencia a compresión simple en estado natural ó el valor obtenido multiplicando la presión normal a la superficie de falla por la tangente del "ángulo de resistencia adquirida" adoptando para éste un valor de  $26^\circ \pm 1^\circ$ .

$$S = \min(S_c, S\phi); S_c = \frac{1}{2} q_u \text{ y } S\phi = P_n \cdot \text{tg } \phi_a = P_n \cdot \text{tg } 26^\circ.$$

C.5.3.- Para los pilotes aislados representativos de los que se sometieron a pruebas de carga, el área tributaria es un círculo con radio igual a seis veces la dimensión transversal del pilote.

C.6.- La relación entre presión horizontal y presión vertical, en el estado incipiente de falla plástica presente en la superficie que corresponde al perímetro del pilote y definida con valor igual a uno, se considera verificada con los re--

sultados de las mediciones de la presión actuante sobre las paredes del pilote que se realizaron mediante celdas de presión, en las que se obtuvo una aproximación de -10% en promedio, entre los valores calculados y los valores registrados. Se hace notar que los valores registrados en las celdas incluyen la presión hidráulica.

C.7.- Con respecto a la predicción del hundimiento, ó desplazamiento vertical, inducido en los pilotes de fricción bajo la acción de la carga aplicada en las pruebas, se pueden establecer las siguientes conclusiones:

C.7.1.-El procedimiento de cálculo propuesto por Zeevaert, tomando como base los incrementos de presión transmitida al subsuelo por los pilotes, que pueden valorizarse con el procedimiento de equilibrio plástico, y utilizando la compresibilidad inmediata deducida de las pruebas de consolidación efectuadas en las arcillas presentes a lo largo de la línea 4, conduce a valores que presentan una alta dispersión con respecto a los valores registrados en las pruebas de carga.

C.7.2.- Los valores de desplazamientos verticales calculados utilizando los incrementos de presión que pueden obtenerse empleando la extensión de Geddes a la solución de Mindlin para la distribución de esfuerzos generada por una fuerza puntual aplicada en el interior de una masa del subsuelo, resul-



tan en extremo pequeños comparados con los hundimientos del pilote registrados en las pruebas de carga.

C.7.3.- El procedimiento propuesto en este trabajo para el cálculo de los desplazamientos verticales inducidos en los pilotes por la acción de una fuerza aplicada sobre ellos, a base de la determinación de las deformaciones angulares generadas por los esfuerzos cortantes que actúan entre el fuste del pilote y la masa del suelo adyacente a éste, conduce a valores del hundimiento calculado que se aproximan a los registrados en las pruebas con un margen de  $\pm 20\%$ , si se utilizan las deformabilidades inmediatas deducidas de las gráficas esfuerzo-deformación en las pruebas de compresión simple, para obtener el módulo de elasticidad tangente y de ahí derivar el módulo de rigidez utilizando una relación de Poisson igual a 0.50 y considerando el área tributaria afectada por la deformación como un círculo con radio igual a 6 veces la dimensión transversal del pilote, así como la deformabilidad media de todos los estratos presentes a lo largo del fuste. Si se utiliza la deformabilidad del estrato más rígido presente en la profundidad abarcada por el pilote, entonces el área afectada por la deformación angular generada por esfuerzo cortante, resulta un círculo con radio igual a 4 veces la dimensión transversal del pilote.

c.8.- El comportamiento de las cimentaciones con pilo--

tes de fricción que se puede anticipar utilizando el método del equilibrio plástico de fuerzas actuantes en el pilote y en el subsuelo adyacente, tomando en cuenta los efectos del hundimiento regional que tiene lugar en la Ciudad, se ven confirmados con los resultados obtenidos en las mediciones de las presiones actuantes en la interfase entre la parte inferior de las zapatas y el subsuelo en que se apoyaron al construirlas. Se concluye que efectivamente, cuando la carga aplicada en el pilote es menor que su capacidad última de carga, se genera una virtual separación entre la zapata y el suelo en que se apoyó al construirla y los pilotes seguirán el movimiento descendente del hundimiento regional que corresponde a un punto situado a una profundidad que resulta de 15 m para el caso de los pilotes de la línea 4 y que está ubicado a la altura de la sección transversal del pilote en la cual los esfuerzos cortantes cambian de signo, actuando como generadores de fricción positiva por abajo de ese punto y como receptores de la fricción negativa inducida por el hundimiento regional, por arriba de ese punto.

C.9.- Con relación a las pruebas dinámicas ejecutadas en pilotes de fricción embebidos en las arcillas de la Ciudad de México, se puede concluir que por el momento no se cuenta con calibraciones satisfactorias de los parámetros que intervienen en las deducciones teóricas de los efectos medidos en los pilotes, de modo que no se puede establecer una relación con-

fiable de la capacidad de carga real de los pilotes, que justifique adoptar el ensaye dinámico como una manera cotidiana de predecir la capacidad de carga en pilotes de fricción en la Ciudad de México.

#### VII.2.- Recomendaciones.

Con base en los resultados que se describen en el cuerpo de esta tesis y en el contenido de las conclusiones antes expresadas, se considera que para el análisis y diseño de cimentaciones a base de pilotes de fricción resultará conveniente adoptar las siguientes recomendaciones:

R.1.- Para valorizar la capacidad de carga de los pilotes de fricción embebidos en las arcillas de la Ciudad de México, se recomienda utilizar el método del equilibrio plástico de fuerzas inducidas por el pilote a la masa del subsuelo adyacente, Ref. N<sup>o</sup> 2, adoptando los siguientes criterios sobre los parámetros que intervienen en este procedimiento:

R.1.1.- La resistencia al esfuerzo cortante en el perimetro del pilote deberá adoptarse como el menor valor obtenido al considerar el 50% de la resistencia a compresión simple en estado natural de las arcillas, ó bien, el que se obtiene al multiplicar la presión normal a la superficie del fuste del pilote por la tangente del ángulo de resistencia adquiri-

da considerado igual a  $26^\circ \pm 2.5^\circ$ . Se hace notar que para poder valorizar esta presión normal al fuste del pilote, es necesario anticipar su valor y por ello resulta necesaria la utilización del método del equilibrio plástico. En resumen:

$$S = \min (S_C, S_{\phi_a}); S_C = 0.50 q_u; S_{\phi_a} = Ph \cdot \operatorname{tg} \phi_a = P_h \cdot \operatorname{tg} 26^\circ$$

R.1.2.- La relación entre la presión horizontal y la presión vertical, esto es, la presión normal al fuste del pilote cuando es vertical y la presión vertical propiamente dicha, debe corresponder al estado incipiente de falla por cortante en el perímetro del pilote y en tal caso esta relación es igual a 1, ya que el ángulo de fricción interna de las arcillas es próximo a cero, ya sea en su estado natural o después de haber regenerado su resistencia al esfuerzo cortante por tixotropía, después del remoldeo. Así:

$$K_\phi = 1.00$$

R.1.3.- Para el caso de pilotes en grupos, el área tributaria de cada pilote deberá ser la definida por las líneas que unen los puntos medios entre pilotes; sin embargo, para el caso de pilotes aislados o pilotes alejados de otros, el área tributaria deberá tomarse como un círculo de diámetro igual a 12 veces la dimensión transversal del pilote. Para pilotes del perímetro del grupo, como los de orilla o los de esquina, el área interior al grupo será la limitada entre pilotes y la exterior estará limitada por el círculo antes definido.

R.2.- Para valorizar los hundimientos, o desplazamientos verticales, de los pilotes de fricción, inducidos por la aplicación de una carga sobre ellos, se recomienda utilizar el procedimiento desarrollado por el Ing. Arturo A. Bello M., expuesto en el Capítulo IV de esta tesis, mediante la determinación de las deformaciones angulares generadas por los esfuerzos cortantes, utilizando para ello los valores del módulo de elasticidad tangente, derivado de los ensayos de resistencia a compresión simple y adoptando para la relación de Poisson de las arcillas de la Ciudad de México, un valor igual a 0.50. Si se utilizan los valores medios de las propiedades de deformabilidad transversal de los estratos presentes a lo largo del pilote, se recomienda tomar como extensión afectada por la deformación al área tributaria definida por el círculo con diámetro igual a 12 veces la dimensión transversal del pilote. De acuerdo con los resultados obtenidos en las comparaciones efectuadas, se recomienda valorizar también la deformación transversal correspondiente al estrato más rígido y considerar como área afectada por la deformación aquella correspondiente a un círculo con diámetro igual a 8 veces la dimensión transversal del pilote.

Se enfatiza que para el caso de la Ciudad de México, donde está presente el fenómeno de hundimiento regional causado por variación en las presiones efectivas actuantes en los estratos arcillosos, el hundimiento a largo plazo depende

fundamentalmente de la magnitud relativa entre la carga aplicada en los pilotes y su capacidad última, puesto que en el caso general, en que la carga útil sobre los pilotes es menor a su capacidad, el movimiento vertical de la cimentación con pilotes de fricción será, a largo plazo, el que corresponda al plano ubicado a la profundidad en que los esfuerzos cortantes actuantes en el fuste del pilote se invierten, siendo generadores de fricción positiva en la parte inferior del pilote y receptores de la fricción negativa, inducida por el hundimiento regional, los que actúan sobre el pilote arriba del plano antes citado.

R.3.- Se recomienda dar todo el énfasis que merece a la ventaja de realizar pruebas de carga en los pilotes de fricción diseñados, antes de proceder al hincado masivo de los que formarán parte de una cimentación, con objeto de aprovechar las ventajas que con respecto a precisar la capacidad de carga y la magnitud de los desplazamientos verticales de los pilotes, se pueden derivar de la realización de dichas pruebas de carga previas al hincado masivo.

R.4.- Se recomienda que para pilotes embebidos en las arcillas de la Ciudad de México se considere que la capacidad de carga por fricción se regenera en no menos del 95% de dicha capacidad a los 7 días; el 100% de la capacidad de los pilotes se alcanzará, en todos los casos, a los 14 días después

del hincado.

R.5.- Se recomienda que al diseñar cimentaciones con pilotes de fricción en otros sitios diferentes a los de la Ciudad de México, se lleven a cabo los ensayos de laboratorio necesarios para definir el valor del "ángulo de resistencia adquirida"  $\phi_a$ , que para el caso de la Ciudad de México resulta de  $26^\circ \pm 2.5^\circ$ , pero que en otras localidades puede tener valores distintos; así también, se recomienda establecer la relación entre la resistencia a compresión simple y el módulo de elasticidad tangente deducido del mismo ensaye y que para las arcillas de la Ciudad de México presenta una correlación aceptable. Es también recomendable certificar que la relación de Poisson para otras arcillas diferentes a las de la Ciudad de México es próximo a 0.5; es de esperarse que lo sea, pero la realización en paralelo de ensayos de consolidación unidireccional y de ensayos de compresión triaxial en muestras sujetas a pruebas consolidadas- lentas permitirá certificar el valor de este parámetro, que es necesario para valorizar los hundimientos con el procedimiento que se recomienda utilizar.

## LISTA DE REFERENCIAS

- 1.- SOIL MECHANICS IN ENGINEERING PRACTICE.  
Karl Terzaghi y Ralph B. Peck. Segunda Edición. John Wiley and Sons, Inc. 1967.
- 2.- FOUNDATION ENGINEERING FOR DIFFICULT SUBSOIL CONDITIONS.  
Leonardo Zeevaert. Van Nostrand Reinhold Company. 1972.
- 3.- RESISTENCIA A LARGO PLAZO DE LAS ARCILLAS DE LA CIUDAD DE MEXICO.  
Jesús Alberro y Guillermo Hiriart. Publicación N° 317 del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México. 1973.
- 4.- STRESSES IN FOUNDATION SOILS DUE TO VERTICAL SUBSURFACE LOADING.  
J. D. Geddes.
- 5.- DISEÑO Y CONSTRUCCION DE CIMENTACIONES. NORMAS TECNICAS COMPLEMENTARIAS DEL REGLAMENTO DE CONSTRUCCIONES PARA EL DISTRITO FEDERAL. Publicación N° 405 del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, 1977.
- 6.- BOLETIN N° 8, MECANICA DE SUELOS, 1974-1977; Comisión de Aguas del Valle de México; Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Publicación N° 2, 1981.



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

- 1.- MANUAL DE DISEÑO DE OBRAS CIVILES  
EXPLORACION Y MUESTREO DE SUELOS  
Comisión Federal de Electricidad
- 2.- MANUAL DE DISEÑO DE OBRAS CIVILES  
PROPIEDADES FISICAS Y MECANICAS DE LOS SUELOS  
Comisión Federal de Electricidad
- 3.- MANUAL DE DISEÑO DE OBRAS CIVILES  
CIMENTACIONES  
Comisión Federal de Electricidad
- 4.- MECANICA DE SUELOS EN LA INGENIERIA PRACTICA  
Karl Z. Terzaghi - Ralph B. Peck  
Segunda edición, 1973
- 5.- MECANICA DE SUELOS. Tomo I  
Eulalio Juárez Badillo - Alfonso Rico Rodríguez  
Tercera edición, 1975
- 6.- MECANICA DE SUELOS. Tomo II  
Eulalio Juárez Badillo - Alfonso Rico Rodríguez  
Tercera edición, 1975
- 7.- MANUAL DE DISEÑO Y CONSTRUCCION DE PILAS Y PILOTES  
Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos  
Primera edición, 1983
- 8.- FOUNDATION ENGINEERING  
Ralph B. Peck - Walter E. Hanson - Thomas H. Thornburn  
Second edition, 1974
- 9.- FOUNDATION ENGINEERING FOR DIFFICULT SUBSOIL CONDITIONS  
Leonardo Zeevaert  
1972

- 10.- FOUNDATION DESIGN AND CONSTRUCTION  
M. J. TOMLINSON  
Third edition, 1975
- 11.- MECANICA DEL SUELO Y SUS APLICACIONES A LA INGENIERIA  
José A. Jiménez Salas.
- 12.- CIMENTACIONES PROFUNDAS  
Robert D. Chellis  
Segunda edición
- 13.- RESISTENCIA A LARGO PLAZO DE LAS ARCILLAS DE LA CIUDAD  
DE MEXICO  
Jesús Alberto y Guillermo Hiriart  
Instituto de Ingenieria, UNAM
- 14.- STRESSES IN FOUNDATION SOIL DUE TO VERTICAL SUBSURFACE  
LOADING  
J. D. Geddes
- 15.- BOLETIN N° 8, MECANICA DE SUELOS, 1974 - 1977  
Comisión de Aguas del Valle de México, SARH  
Publicación N° 2, 1981
- 16.- DISEÑO Y CONSTRUCCION DE CIMENTACIONES  
NORMAS TECNICAS COMPLEMENTARIAS DEL REGLAMENTO DE CONS-  
TRUCCIONES PARA EL DISTRITO FEDERAL  
Instituto de Ingenieria, UNAM
- 17.- MECANICA DE SUELOS  
T. William Lambe - Robert V. Whitman
- 18.- THEORY OF ELASTICITY AND PLASTICITY  
Harold M. Westergaard
- 19.- V REUNION NACIONAL DE MECANICA DE SUELOS  
CIMENTACIONES EN AREAS URBANAS DE MEXICO  
México 1970