

29
5



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

DIVISION DE INGENIERIA CIVIL, TOPOGRAFICA Y GEODESICA

**CIMENTACION DE UNA ESTRUCTURA MEDIANTE
PILOTES CON MECANISMO DE TRANSMISION DE
CARGA**

TESIS PROFESIONAL

Elaborada para obtener el título de:

INGENIERO CIVIL

Por:

Leonardo Alcántara Nolasco



México, D. F.

Julio 1984



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis 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.

I N D I C E

	Página
I. INTRODUCCION	1
I.1) Pilotes de punta	2
I.2) Pilotes de fricción	3
I.3) Pilotes de control	5
II. METODO CONVENCIONAL PARA EL CALCULO DE PILOTES CON MECANISMO	15
II.1) Método de Meyerhof	15
III. METODO DEL DR. LEONARDO ZEEVAERT PARA EL CALCULO DE CAPACIDAD DE CARGA EN PILOTES	23
III.1) Capacidad por punta	23
III.2) Fricción negativa	29
III.3) Capacidad de carga de pilotes con mecanismo	41
IV. CALCULO DE LA CIMENTACION DE UNA ESTRUCTURA	57
IV.1) Descripción del proyecto	57
IV.2) Método convencional	58
IV.3) Método del Dr. Leonardo Zeevaert	63
V. COMPARACION DE RESULTADOS	84
VI. CONCLUSIONES	88

BIBLIOGRAFIA

I. INTRODUCCION

Las cimentaciones en que se encuentran soportadas -- las estructuras suelen ser de diversas formas, estas dependen de varios factores que entre los más importantes se tienen: El tipo de estructura por cimentar, propiedades mecánicas del suelo y la economía.

Dependiendo de los aspectos anteriores se podrá proponer alguna cimentación que cumpla con los requisitos de seguridad, funcionalidad y economía para la estructura deseada.

De las cimentaciones por las que se puede optar, todas ellas caen dentro de los rangos de superficiales o profundas, casos típicos de las primeras son zapatas corridas, zapatas aisladas y losas de cimentación, las cimentaciones del tipo profundo se realizan cuando el estrato sobre el cual se pretende apoyar a la estructura se encuentra a profundidades grandes, para este tipo de cimentaciones se utilizan pilotes, pilas, cilindros o cajones.

Cuando se opta por una cimentación profunda a base de pilotes, se pueden utilizar cualesquiera de los siguientes tipos: pilotes de punta, pilotes de fricción o pilotes de control.

I.1) PILOTES DE PUNTA

Estos están previstos para atravesar los diferentes estratos de suelo hasta alcanzar mediante su punta alguna capa de suelo resistente en la cual, puedan transmitir las cargas que están soportando debidas al peso de la superestructura.

Este tipo de cimentación presenta algunos inconvenientes cuando existe hundimiento regional por consolidación debido a que el suelo que circunda a los pilotes tiende a adherirse a estos, lo cual provoca que toda la masa de suelo -- proporcione un peso adicional a cada pilote, haciéndolo trabajar más, porque ahora aparte del peso de la estructura, tiene que soportar una carga adicional y parásita, a este tipo de fenómeno se le conoce comunmente con el nombre de -FRICCIÓN NEGATIVA (FN).

Dicha fricción genera una disminución de esfuerzos efectivos verticales con relación a los esfuerzos iniciales que se tenían, tal como se muestra en la figura I.1.1

Como se observa, si la FN no es tomada en cuenta en el diseño de la capacidad de carga última del pilote esta puede llegar a ocasionar su falla o en otro de los casos hacer que la punta del pilote penetre en la capa resistente, debido a que en el nivel de la punta la masa de suelo pierde confinamiento.

Otro inconveniente que presentan los pilotes de punta cuando se hincan en estratos muy compresibles es que dañan a las estructuras vecinas, esto es porque al colgarse el suelo de los pilotes tiende a adherirse a estos evitando que la masa del suelo baje en la zona piloteada, pero no sucede lo mismo en las zonas circunvecinas en donde existen estructuras cuya cimentación no es a base de pilotes, el fenómeno se presenta en la figura I.1.2

I.2) PILOTES DE FRICCIÓN.

Este tipo de pilote es diseñado para trabajar a la falla, es decir para que la cimentación siga los hundimien

tos de la masa de suelo generándose fricción positiva en el fuste del pilote, como su nombre lo indica el pilote -- trabaja por fricción lateral que se desarrolla a lo largo de todo el fuste debido al contacto que existe con el suelo, de esta manera se evita el apoyo sobre algún estrato resistente.

El problema que se presenta en este tipo de pilotes es cuando existen asentamientos diferenciales debido a que el hundimiento de las capas de suelo no es el mismo en todos los puntos de la cimentación lo cual ha obligado a realizar cimentaciones rígidas, sumado a esto se tiene que algunos pilotes durante su etapa de hundimiento llegan a encontrarse con algún lente resistente bajo el cual existe material compresible, esto provocará seguramente que en la zona donde el pilote encontró el obstáculo, los asentamientos sean menores en comparación con las zonas donde no se tiene el problema, lo anteriormente citado puede provocar daños muy serios en las estructuras, debido a que ahora el pilote que se apoya sobre el lente trabaja como un pilote de punta lo que no sucede con los demás.

El problema se ilustra en la figura I.1.3

Cabe señalar que los pilotes atraviezan diversas capas de material y que estas son diferentes en cuanto a sus propiedades mecánicas por lo cual cada estrato tendrá una velocidad de asentamiento diferente y muy particular cuando se lleva a cabo la etapa de consolidación, esto traerá como consecuencia que el pilote en una parte del fuste se encuentre trabajando a fricción positiva y en otra lo haga a fricción negativa.

I.3) PILOTES DE CONTROL.

Quando se realiza una cimentación con pilotes de punta se tiene el problema de que las construcciones no sigan los hundimientos de la masa de suelo y den el aspecto de estar emergiendo, esto ocasiona graves daños en las estructuras colindantes que si presentan los asentamientos provocados por la consolidación regional.

Ante este problema y con la disyuntiva de eliminar la utilización de cimentaciones a base de pilotes de punta en estratos sumamente compresibles, se implementó un método empírico como posible solución denominado Pilotes de Control.

Con esto se pretende que la estructura siga los hundimientos de la masa de suelo, teniendo un control de ellos en cualquier punto de la cimentación.

Mediante este sistema se hace que los pilotes atraviesen libremente la losa de cimentación de tal forma que la estructura queda directamente apoyada sobre la superficie del suelo entre pilotes, esta comenzará a bajar por el peso transmitido y por los procesos diferentes de consolidación que tienen lugar.

Los pilotes llevan un control en la cabeza que permite modificar la velocidad de asentamiento, es decir cuando la masa de suelo tiende a bajar más rápidamente por el peso de la estructura se hace que los pilotes tomen mas carga para aliviar el peso sobre el suelo, por otro lado si la estructura tiende a quedarse emergida, se alivia carga sobre los pilotes y se transmite al suelo para forzar que este se consolide mas rápidamente, mediante el proceso anterior se puede inclusive enderezar cualquier estructura que presente inclinaciones.

En estructuras que no tienen cimentación mediante pilotes de control se les puede realizar una recimentación

para poder tener un control de sus asentamientos, para tal caso se hacen las siguientes recomendaciones, según se muestra en la figura I.1.4

- a) Que los pilotes no se hinquen abajo de las columnas y trabes para que en cualquier momento se puedan convertir en pilotes de control.
- b) Dejar a un costado de las columnas y trabes la preparación para la colocación de un futuro pilote de control.

El control que llevan en la cabeza los pilotes se muestra en la figura I.1.5

Los cubos de madera que se encuentran entre el puente y el pilote sirven para determinar la cantidad de carga que se desea aplicar a los pilotes, dichos cubos son de un material denominado "Caobilla" el cual se caracteriza por presentar un rango plástico muy amplio como se muestra en la figura I.1.6

En el momento que el cubo llega a algún punto en el rango plástico se garantiza que este transmite al pilote -

una carga fija que permanece constante con respecto al tiempo (Referencia 4).

Para determinar el número de cubos que será necesario colocar entre el pilote y el puente y así garantizar que se está transmitiendo la carga requerida se hace lo siguiente:

Conocida la carga que se desea aplicar a la cabeza del pilote, bastará dividir esta entre el valor de la carga que plastifica al cubo para poder obtener el número de cubos requerido.

Los cubos comenzarán a tener deformación en el instante en que reciban carga, pero llegará un momento en que la deformación sea tan grande que será necesario cambiarlos por otros, de lo contrario los cubos se pondrán tan rígidos que pueden dañar el puente colocado en la cabeza del pilote y además se pierde la garantía de transmitir la carga que en principio se había planteado.

Para evitar el que continuamente se estén cambiando los cubos, se pueden colocar varias capas de cubos de madera en lugar de una y de esta manera dar más material deformable.

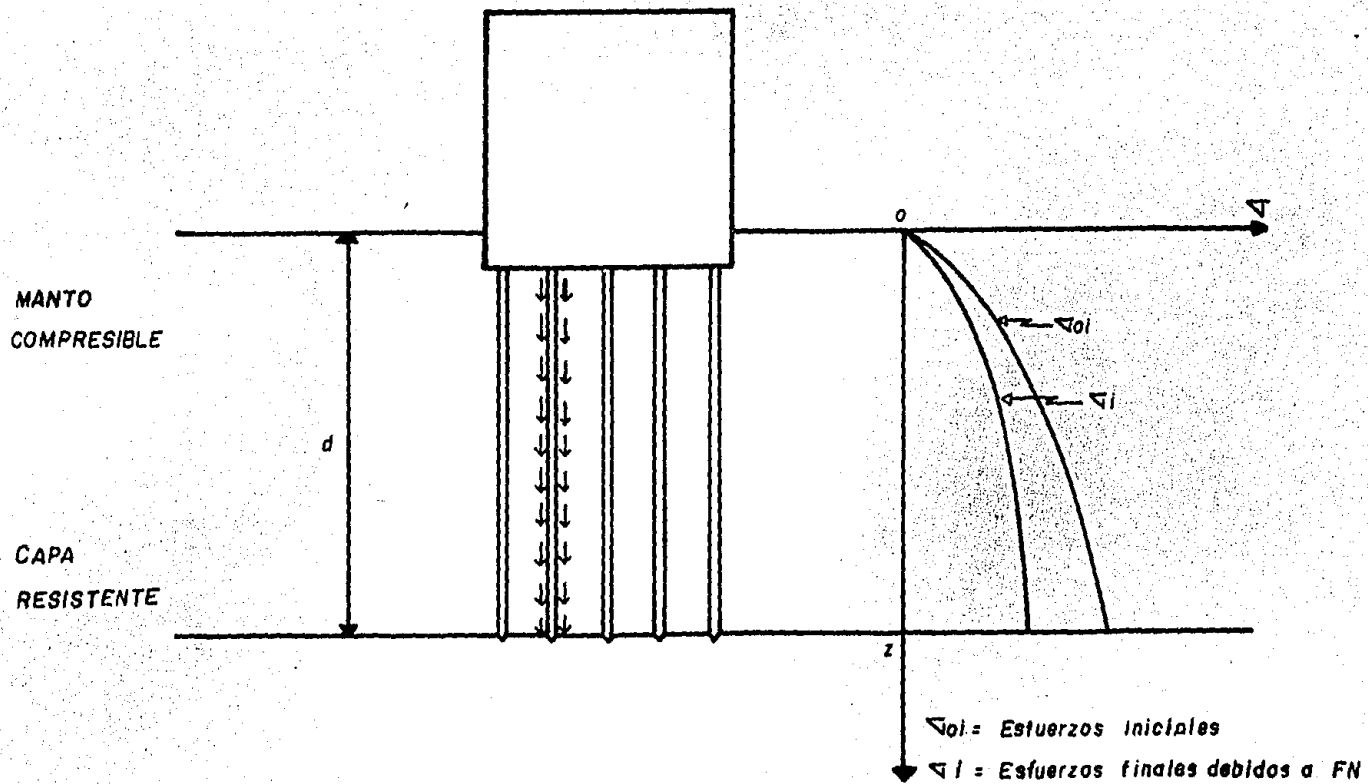


FIG. I.1.1.

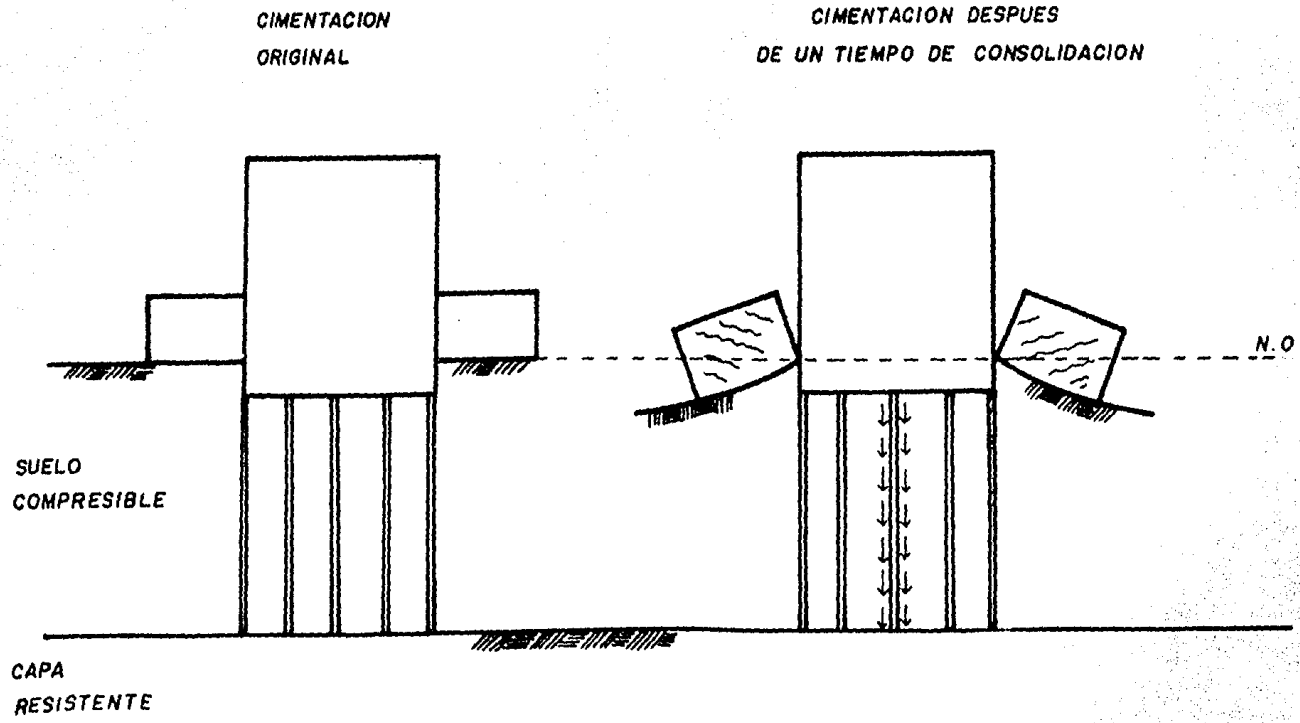


FIG. I. 1. 2.

PILOTES DE FRICCIÓN

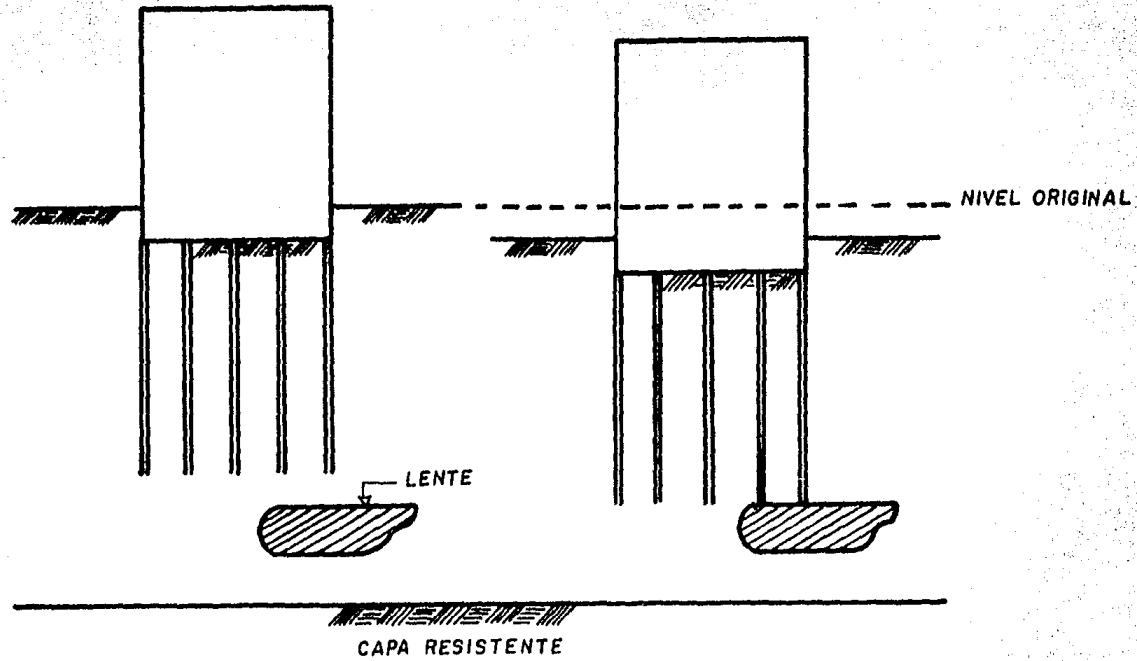


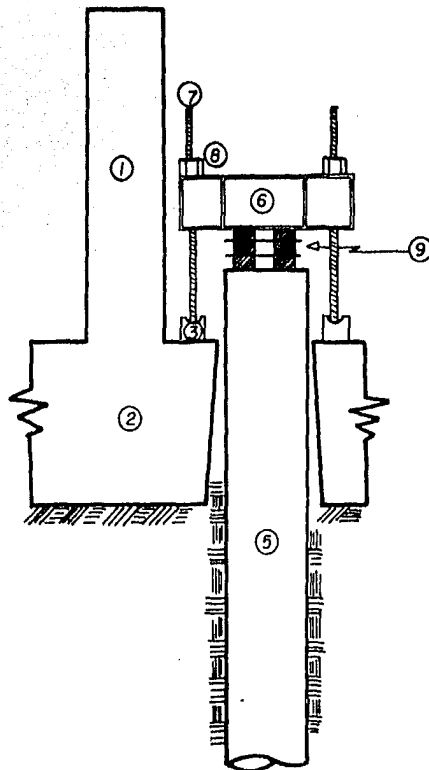
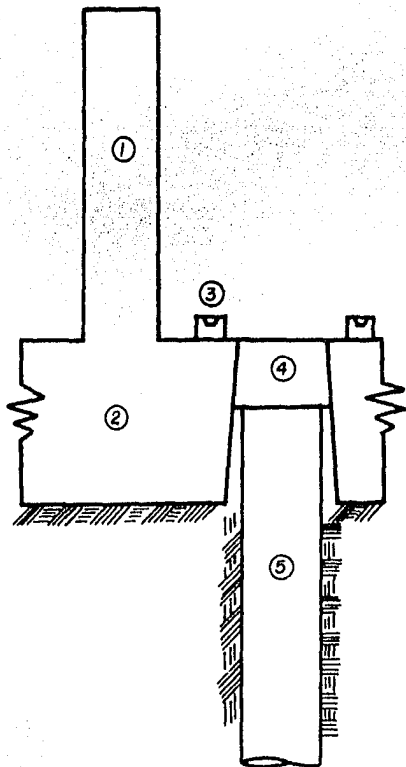
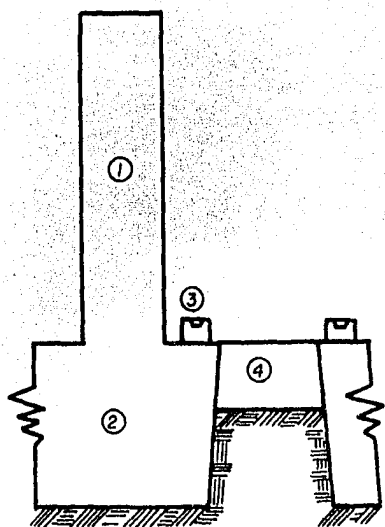
FIG. I.1.3.

PREPARACION PARA COLOCAR
UN FUTURO PILOTE

PILOTE PREPARADO
PARA TRANSFORMARSE

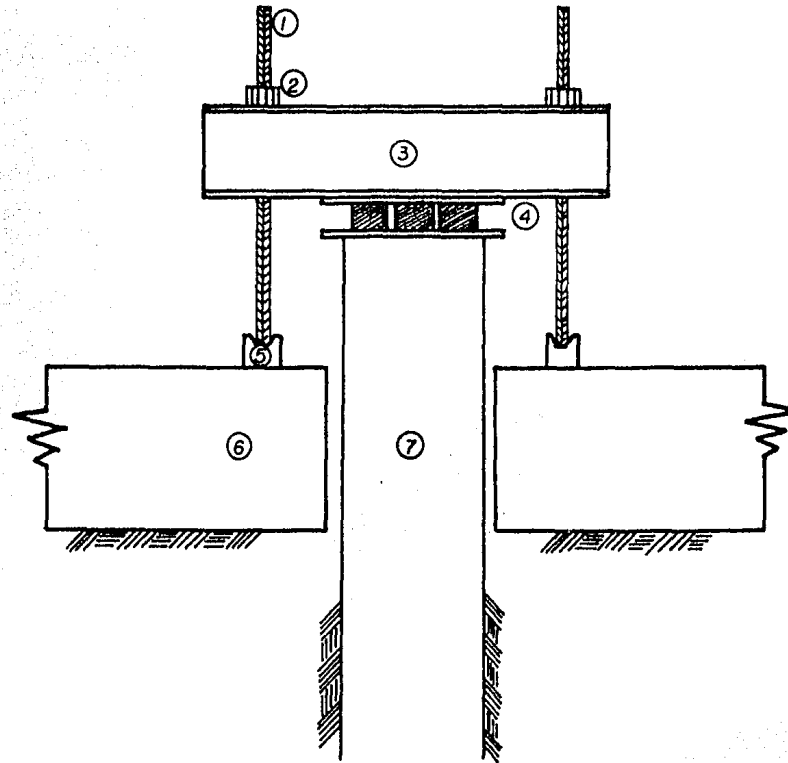
PILOTE DE CONTROL

12



- 1.- COLUMNA
- 2.- TRABE
- 3.- ANCLAS
- 4.- TAPON DE CONCRETO
- 5.- PILOTE
- 6.- PUENTE
- 7.- TORNILLOS
- 8.- TUERCAS
- 9.- CELDAS DE DEFORMACION

FIG. I.1.4



- 1 - TORNILLOS
- 2 - TUERCAS
- 3 - PUENTE DE ACERO
- 4 - CELDAS DE DEFORMACION
- 5 - ANCLAS
- 6 - LOSA DE CIMENTACION
- 7 - PILOTES

FIG. I. 1. 5.

CURVA ESFUERZO-DEFORMACION
DEL MATERIAL CAOBILLA EN PRUEBA
DE COMPRESION SIMPLE

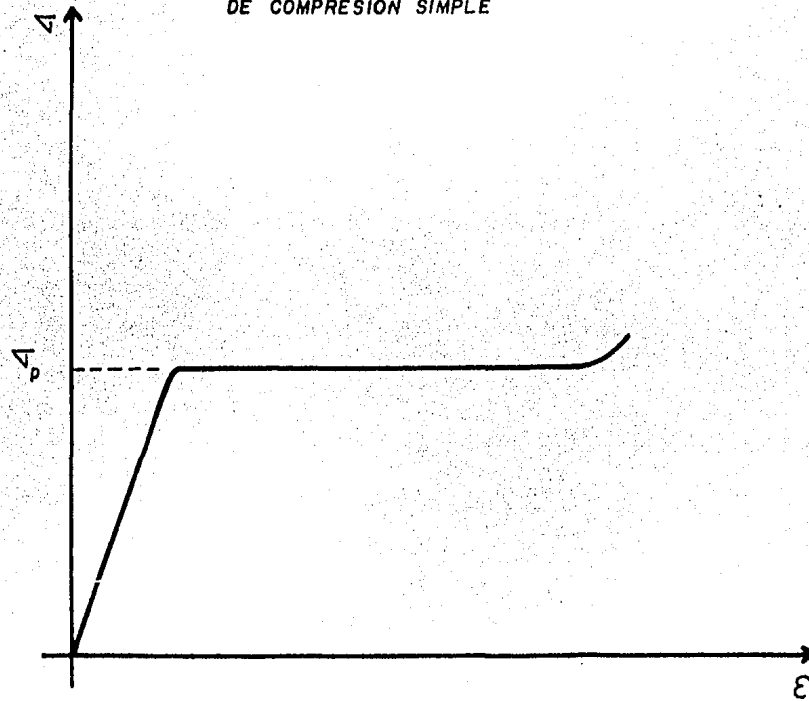


FIG. I.1.6.

II. METODO CONVENCIONAL PARA EL CALCULO DE PILOTES CON MECANISMO.

II.1) METODO DE MEYERHOF.

El método convencional que se analizará será el --
propuesto por la teoría de Meyerhof.

En la teoría de Terzaghi se establece que la super-
ficie de deslizamiento con la que falla un cimiento poco -
profundo tiene la forma que se muestra en la figura II.1

Como podrá observarse dicha superficie de falla --
está limitada por una recta horizontal que pasa por la ba-
se del cimiento y la zona comprendida entre los niveles -
"i" y "d" solo se considera como una sobrecarga con valor
 $q = \gamma D_f$ que actúa en un plano horizontal que pasa -
por la base del cimiento, es decir que en dicha zona no se
considera la posibilidad de que puedan propagarse superfi-
cies de deslizamiento o que pueda desarrollarse resistencia
al esfuerzo cortante.

El trabajo de Meyerhof establece que las hipótesis

anteriores no corresponden a la realidad entre mas profundo sea un cimiento y por lo tanto establece como superficie de deslizamiento con la que falla un cimiento la que se muestra en la figura II.2 en ella se puede observar que las superficies de falla se propagan mas arriba del nivel de desplante del cimiento y por lo tanto se establece la posibilidad de desarrollo al esfuerzo cortante en dichas zonas de la masa de suelo.

El trabajo de Meyerhof establece finalmente que para un cimiento superficial la capacidad de carga última de una cimentación está dada por:

$$q_c = cN_c + \gamma DfN_q + \frac{1}{2}\gamma BN_\gamma \quad \text{II.1}$$

Aunque la ecuación II.1 tiene matemáticamente la misma forma que la propuesta por Terzaghi, en este caso los valores de N_c , N_q y N_γ son diferentes.

Los valores de los parámetros anteriores se pueden consultar en la figura II.3

Para pilotes aislados de sección transversal cuadrada o circular Meyerhof propone para calcular la capacidad

de carga por punta la siguiente ecuación:

$$q_c = cN'_c + \gamma DfN'_q \quad \text{II.2}$$

y

$$Q_u = q_c A_t$$

donde:

N'_c, N'_q = Factores de capacidad de carga que toman en cuenta el efecto de la profundidad.

c, γ = Cohesión y peso volumétrico

Df = Profundidad a la que se encuentra el estrato resistente de apoyo

q_c = Capacidad por punta por unidad de superficie

A_t = Area transversal del cimiento

Q_u = Capacidad de carga última por punta

Los valores de N'_c y N'_q pueden ser consultados en la figura II.3.

Para poder utilizar los valores de $N'c$ y $N'q$ mencionados será necesario que el pilote penetre en el estrato resistente la profundidad D' dada por la expresión siguiente:

$$D' = 4B \tan \left(45^\circ + \frac{\phi}{2} \right) \quad \text{II.3}$$

Si esta cantidad D' es mayor que la que en realidad penetra el pilote, Meyerhof propone que se interpole linealmente entre los $N'c$ y $N'q$ para la profundidad de penetración D' y los correspondientes a una cimentación de tipo superficial (Terzaghi) en el cual la profundidad de penetración $D'=0$.

Conocida la capacidad última por punta del pilote, será necesario definir la carga que se desea soporte nuestro pilote y ver si el factor de seguridad obtenido de:

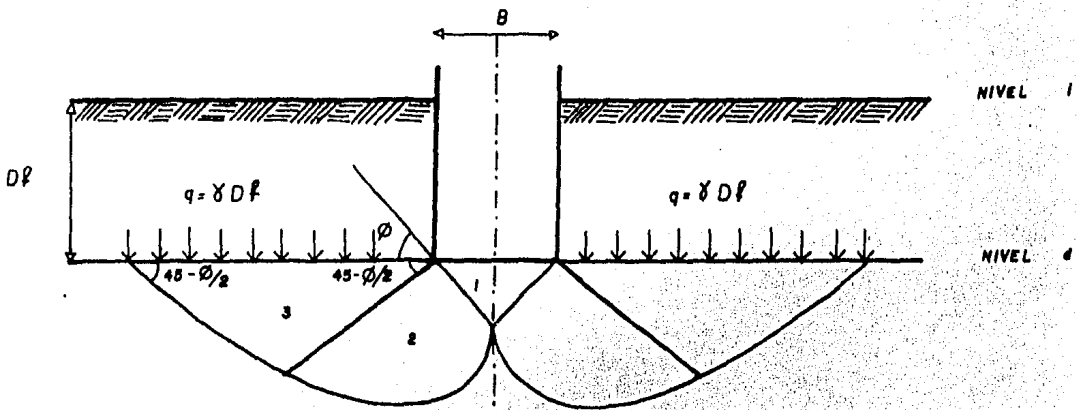
$$F.S. = \frac{Q_u}{Q_{ad}} \quad \text{II.4}$$

Se encuentra entre los rangos de 2 y 3, el valor de Q_{ad} se obtiene de dividir la carga total que se tiene que soportar y el número de pilotes de nuestra cimentación.

Conocido Q_{ad} se puede definir la cantidad de carga

que se transmitirá a la cabeza del pilote mediante el dispositivo de control, el cual deberá mantenerse en buenas condiciones de trabajo para que en cualquier momento se pueda conocer la carga sobre el pilote y con ello poder manipular a nuestro criterio la carga transmitida para poder controlar los asentamientos dentro de algún rango permisible, o bien evitar el que la estructura emerja.

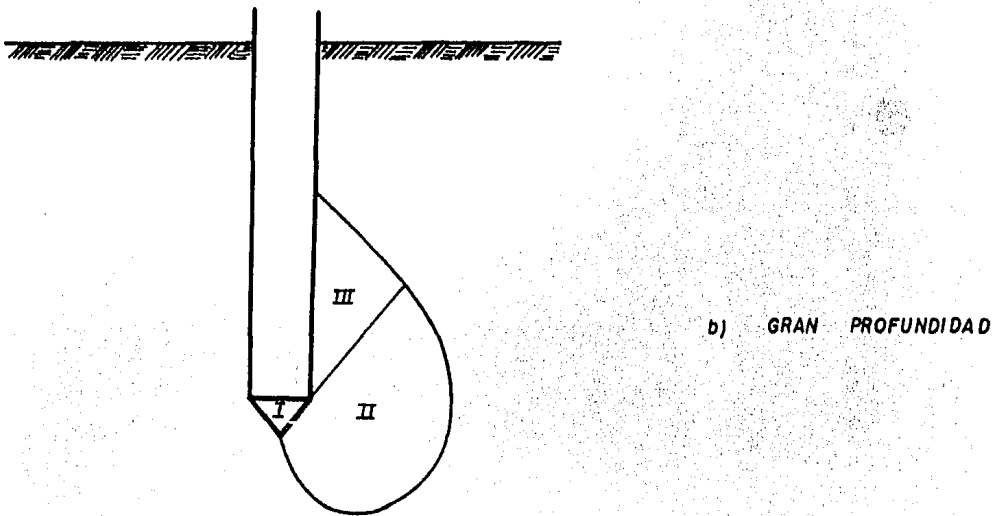
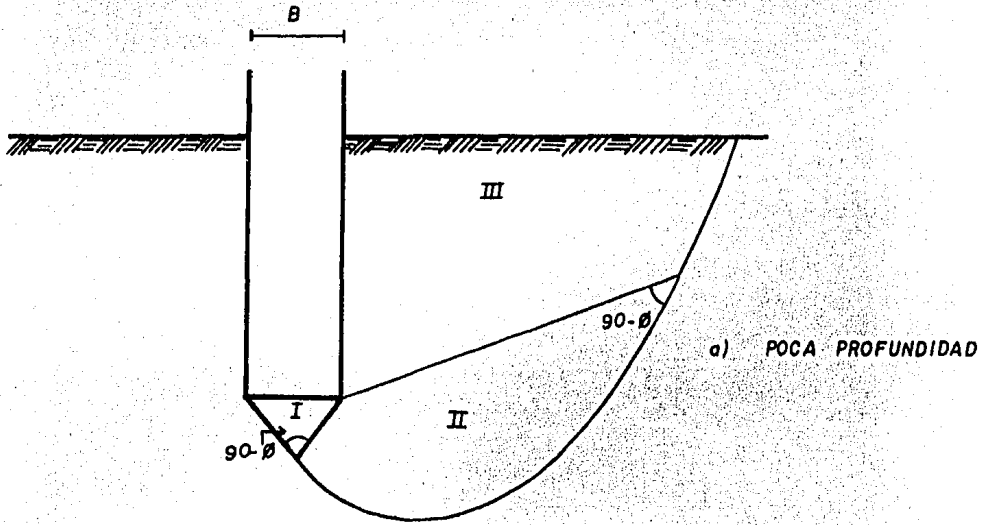
SUPERFICIE DE DESLIZAMIENTO
 SEGUN TERZAGHI PARA UN CIMIENTO
 POCO PROFUNDO.



- ZONA 1 CUÑA RIGIDA
- ZONA 2 DEFORMACION TANGENCIAL RADIAL
- ZONA 3 ESTADO PLASTICO PASIVO DE RANKINE

FIG. II.1

SUPERFICIES DE FALLA SEGUN MEYERHOF



- ZONA I ESFUERZOS UNIFORMES
- ZONA II ESFUERZO CORTANTE RADIAL
- ZONA III TRANSICION DE ESTADO DE CORTE RADIAL
A ESTADO PLASTICO PASIVO

FIG. II.2.

FACTORES DE CAPACIDAD DE CARGA

SEGUN MEYERHOF

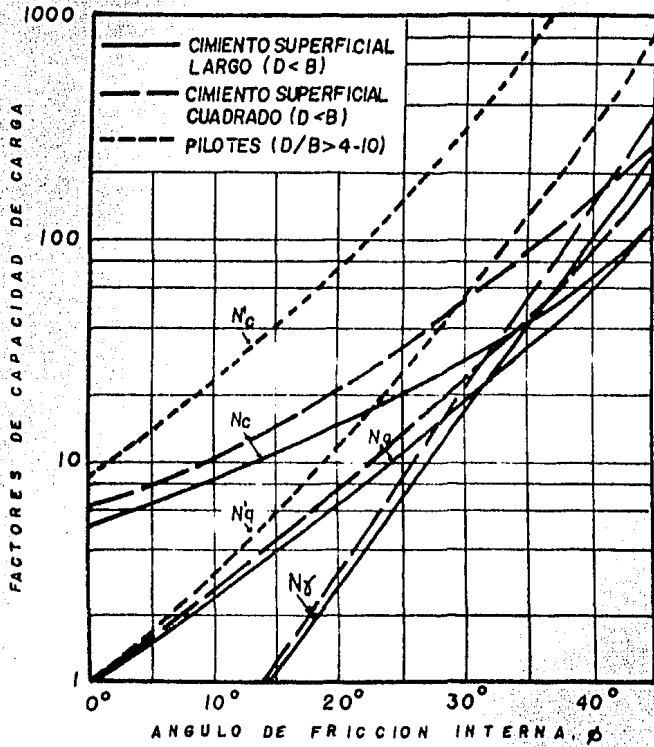


FIG. II. 3

III. METODO DEL DR. LEONARDO ZEEVAERT PARA EL CALCULO DE CAPACIDAD DE CARGA EN PILOTES.

III.1) CAPACIDAD POR PUNTA.

Con base a resultados experimentales la teoría de Terzaghi establece que la capacidad de carga última de un pilote circular está dada por la expresión:

$$Q_{pu} = \pi r_o^2 [1.3cNc + \gamma_1 DfNq + 0.6\gamma_2 r_o N\gamma] \quad \text{III.1.1}$$

donde:

c = Cohesión del material

γ_1 = Peso volumétrico del material arriba de la punta

γ_2 = Peso volumétrico del material abajo de la punta

r_o = Radio de la pila o pilote

Df = Profundidad de desplante

$Nc, Nq, N\gamma$ = Parámetros que dependen del ángulo de fricción interna del material.

Como se mencionó anteriormente los valores de N_c , N_q y N_γ dependen del ángulo de fricción interna del material, pero también varían mucho con la compresibilidad del material, lo que no ha sido investigado suficientemente y por lo tanto es recomendable que sean multiplicados por un factor de corrección que en este caso será " $D_r + 1$ " en donde D_r representa la densidad relativa del suelo.

Finalmente la capacidad de carga última de un pilote esta dada por la expresión:

$$Q_{pu} = \pi r_o^2 \alpha_1 [cN_c + \sigma_{od}N_q] (D_r + 0.1) \quad \text{III.1.2}$$

donde:

D_r = Densidad relativa del material

α_1 = Factor de forma del ancho del canal de falla
(tiene un valor aproximado de 1.2).

σ_{od} = Esfuerzo efectivo confinante vertical al nivel d-d.

En la figura III.1.1 se define como canal de falla a la superficie cilíndrica limitada por el fuste del pilote

y un radio R_o medido a partir del centro del pilote, dicha superficie se ha observado que tiene un ancho aproximado de un 20% mayor que el diámetro del pilote, lo cual está tomado en el valor de " α_1 ".

La fórmula III.1.2 nos da la capacidad última por punta de un pilote considerando que no actúa ninguna fuerza de fricción en el fuste del pilote, debido a que este ha sido hincado de tal forma que no existe contacto entre el suelo y el fuste.

Además se ha despreciado el término " $0.6\gamma_2 r_o N\gamma$ " debido a que tiene poca influencia cuando se trata de una cimentación profunda.

El comportamiento de un pilote dentro de un grupo de pilotes es completamente diferente al de un pilote aislado e inclusive las pruebas que se realizan sobre este para el análisis del comportamiento mecánico no son extrapolables para el diseño del grupo.

Pero se puede aceptar que la ecuación III.1.2 para capacidad de resistencia última por punta es utilizable -- para un pilote dentro de un grupo de pilotes si considera-

mos que existe una separación en la hincada de 3 diámetros - con lo cual se garantiza que no existe la posibilidad de influencia de otros pilotes de punta y por lo tanto será posible la formación del canal de falla.

Sumado a lo anteriormente dicho para capacidad de - carga por punta se puede considerar la posibilidad de que - parte de la punta del pilote penetre en el estrato resistente, esto ocasiona que se produzcan fuerzas de fricción positiva, lo que generará un incremento de los esfuerzos efectivos y por lo tanto se tenga una mayor capacidad de resistencia por punta.

Considerando un pilote como el mostrado en la figura III.1.2 con penetración L_s de la punta en el estrato resistente, si la resistencia al corte está completamente desarrollada en la longitud L_s la ecuación III.1.2 se puede escribir como:

$$Q_{pu} = \pi r_o^2 \alpha_1 [cNc + (\sigma_{od} + \Delta\sigma_{od})Nq] (Dr + 0.1) \quad \text{III.1.3}$$

y

$$\Delta\sigma_{od} = \frac{L_s}{a} \int_0^{L_s} Crdz + \frac{L_s}{a} K\phi \int_0^{L_s} \sigma_{oz} dz + \frac{L_s}{a} K\phi \int_0^{L_s} \Delta\sigma_z dz \quad \text{III.1.4}$$

Considerando la profundidad L_s no muy grande de tal forma que la variación de esfuerzos se aproxime a una recta y de la figura III.1.2 se tiene:

$$\Delta\sigma_{od} = \frac{\bar{\omega}}{\bar{a}} CrL_s + \frac{\bar{\omega}}{\bar{a}} K\phi \frac{1}{2} (\sigma_{oi} + \sigma_{od})L_s + \frac{\bar{\omega}}{\bar{a}} K\phi \frac{1}{2} \Delta\sigma_{od}L_s \quad \text{III.1.5}$$

donde:

$\bar{\omega}$ = Perímetro del pilote

\bar{a} = Area tributaria de cada pilote

Cr = Cohesión del suelo remoldeado

L_s = Longitud de penetración en el estrato resistente

$K\phi = \tan \phi / \bar{N}\phi$

$$\bar{N}\phi = \frac{1 + \text{sen}^2 \phi}{1 - \text{sen}^2 \phi}$$

ϕ = ángulo de fricción interna del material

Además, el incremento promedio de los esfuerzos -- efectivos verticales está dado por:

$$\Delta\sigma_{od} = \frac{Q_{fu}}{\bar{a}} \quad \text{III.1.6}$$

donde:

$$Q_{fu} = \bar{a} \Delta\sigma_{od}$$

Por lo tanto la capacidad total del pilote está dada por la expresión:

$$Q_u = Q_{pu} + Q_{fu} \quad \text{III.1.7}$$

Los valores de N_c y N_q tienen el mismo significado expresado anteriormente pero sus valores difieren con los de Terzaghi por lo cual el Dr. Leonardo Zeevaert propone:

$$N_c = \tan\left(45^\circ + \frac{\phi}{2}\right) + \frac{e^{\left(\frac{3}{2}\pi + \phi\right)\tan\phi} - 1}{n \cdot 2\cos^2\left(45^\circ + \frac{\phi}{2}\right)\tan\phi} \quad \text{III.1.8}$$

$$N_q = \frac{(\cos^2\phi) e^{\left(\frac{3}{2}\pi + \phi\right)\tan\phi}}{2\cos^2\left(45^\circ + \frac{\phi}{2}\right)} \quad \text{III.1.9}$$

Por comodidad dichos valores se pueden consultar en la figura III.1.4

Los valores anteriores resultan de proponer una superficie de deslizamiento tal como se muestra en la figura III.1.3

III.2) FRICCIÓN NEGATIVA.

En una cimentación a base de pilotes de punta soportados sobre un estrato firme en donde el material que atraviesa el pilote es muy compresible, al presentarse el fenómeno de consolidación regional, el suelo que circunda el fuste del pilote tiende a colgarse de este debido a la adherencia que se desarrolla entre ambos, lo anterior provoca un incremento de carga en el pilote que varía con la profundidad, a dicho proceso se le conoce con el nombre de Fricción Negativa.

La Fricción Negativa tiene que ser tomada muy en cuenta en el diseño de la cimentación debido a que al incrementar la carga que soporta el pilote puede provocar penetración en el estrato resistente, haciendo trabajar mas a los pilotes y por lo tanto desperdiciando su capacidad de carga, además existirá disminución en los esfuerzos efectivos verticales.

Para poder realizar un análisis de la Fricción Negativa a lo largo del fuste del pilote es necesario considerar los esfuerzos efectivos horizontales actuantes en la masa de suelo que cubre el fuste del pilote y con ellos determinar la resistencia al corte del material, para tal hecho se hará un análisis en donde el esfuerzo efectivo horizontal se obtenga en función del esfuerzo efectivo vertical.

La resistencia al corte del material después de la hinca de los pilotes se puede obtener por medio de la expresión siguiente:

$$S_{oz} = \sigma_{Hz} \tan \phi_r \quad \text{III.2.1}$$

donde:

S_{oz} = Resistencia al corte del material que cubre el fuste a la profundidad z

σ_{Hz} = Esfuerzo efectivo horizontal del suelo

ϕ_r = Angulo de fricción interna del material después de la hinca del pilote (material remoldeado).

Del estado plano de esfuerzos según la figura - -
 III.2.1 se obtiene que:

$$\sigma_H = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos(180-2\alpha) \quad \text{III.2.2}$$

$$\sigma_Z = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\alpha \quad \text{III.2.3}$$

como $\cos(180-2\alpha) = -\cos 2\alpha$

se tiene que:

$$\frac{\sigma_H}{\sigma_Z} = \frac{(\sigma_1 + \sigma_3) - (\sigma_1 - \sigma_3) \cos 2\alpha}{(\sigma_1 + \sigma_3) + (\sigma_1 - \sigma_3) \cos 2\alpha} \quad \text{III.2.4}$$

de la figura III.2.1

$$2\alpha = \frac{\pi}{2} + \phi$$

y

$$\text{sen } \phi = \cos 2\alpha$$

Por lo tanto:

$$\text{Sen } \phi = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{(\sigma_1 + \sigma_3)}$$

sustituyendo en III.2.4

$$\frac{\sigma_H}{\sigma_Z} = \frac{1 - \text{sen}^2 \phi}{1 + \text{sen}^2 \phi} \quad \text{III.2.5}$$

donde:

$$\phi = \phi_r \text{ (Angulo de fricción interna del material re} \\ \text{moldeado)}$$

sustituyendo III.2.5 en III.2.1

$$S_{\sigma z} = \left(\frac{1 - \text{sen}^2 \phi_r}{1 + \text{sen}^2 \phi_r} \right) \sigma_z \tan \phi_r$$

si

$$\frac{1 - \text{sen}^2 \phi_r}{1 + \text{sen}^2 \phi_r} = \frac{1}{N \phi_r}$$

y

$$K \phi_r z = \left(\frac{\tan \phi_r}{N \phi_r} \right)$$

Finalmente:

$$S_{oz} = K_{\phi z} \cdot \sigma_z \quad \text{III.2.6}$$

La ecuación III.2.6 representa la resistencia al corte del material que cubre el fuste del pilote en función de ϕ_r y σ_z dicha resistencia tiene su valor máximo en la superficie de contacto entre el suelo y el pilote, representando un valor mínimo a una distancia $\bar{r}_o = 1.05r$ medida a partir del centro del pilote en donde r es el radio del pilote.

El valor obtenido por la ecuación III.2.6 deberá de ser comparado con el valor de $S_{oz}=C_z=0.3q_u$ S_{oz} representa la resistencia al corte a lo largo del fuste del pilote, q_u la consistencia natural del suelo (es decir el valor de una prueba a la compresión simple del material) y C_z la cohesión.

Si el valor de $0.3q_u$ es el que rige la resistencia al corte, esta tendrá un valor mínimo a una distancia

$$\bar{r}_o = 1.1r$$

medida a partir del centro del pilote.

En la ecuación III.2.6 se utiliza el término $K\phi$ el cual depende de ϕ_r que representa el ángulo de fricción interna del material remoldeado después de la hincada del pilote.

En base a intentos por disminuir la fricción que se desarrolla entre el fuste del pilote y el suelo se han realizado algunas pruebas con sustancias (pinturas, aceites, bentonita, etc...) que cubran el fuste para tratar de disminuir la adherencia con el suelo, esto ha traído buenos resultados ya que en realidad si se logra en algún porcentaje disminuir la fricción.

Cuando se realiza esto se aconseja tomar el valor de

$$K\phi = K\phi_p = (1 - \text{sen } \phi_r) \tan \phi_p$$

En arcillas del valle de México se ha observado -- que el valor de ϕ_r es aproximadamente 26° y según la figura III.2.4 para un pilote que no ha sido cubierto con algún tipo de producto, para el rango de 25° a 30° el valor de --

$K\phi$ no varía mucho por lo que es recomendable utilizar un valor promedio igual a 0.33

Cuando se ha optado por colocar algún recubrimiento al fuste del pilote se puede consultar el valor de $K\phi$ que le corresponda.

En base a la figura III.2.2 para el cálculo de la fricción negativa que actúa a lo largo del fuste del pilote se puede establecer del equilibrio de las fuerzas verticales.

$$FN + 2\pi r_o \sigma z dz = FN + \frac{\partial FN}{\partial z} dz \quad \text{III.2.7}$$

y considerando que:

$$\sigma z = K\phi (\sigma \phi z - \Delta \sigma z)$$

sustituyendo en la ecuación III.2.7 e integrando dicha ecuación se obtiene:

$$(FN) d = \bar{\omega} K\phi \int_0^d \sigma \phi z dz - \bar{\omega} k\phi \int_0^d \Delta \sigma z dz \quad \text{III.2.8}$$

donde:

$$\bar{\omega} = 2\pi r_0$$

de la figura III.2.2 se observa que:

$$\int_0^d \sigma z dz = \text{Area de la curva abec}$$

$$\int_0^d \Delta \sigma z dz = \frac{1}{3} \Delta \sigma d \cdot d \quad (\text{Aproximadamente, \u00e1rea de -- una par\u00e1bola})$$

Adem\u00e1s

$$\Delta \sigma d = \frac{(FN) d}{\bar{a}} \quad \text{III.2.9}$$

Finalmente y considerando las expresiones anteriores en la ecuaci\u00f3n III.2.9 se llega a:

$$(FN) d = \frac{\bar{\omega} K \phi}{1 + \frac{\bar{\omega} K \phi}{3} \frac{d}{\bar{a}}} \int_0^d \sigma z dz \quad \text{III.2.10}$$

$$\bar{\omega} = 2\pi r_0$$

$$K\phi = \tan\phi / \bar{N}\phi$$

$$\bar{N}\phi = \frac{1 + \sin^2\phi}{1 - \sin^2\phi}$$

d = profundidad al nivel d-d

\bar{a} = Area tributaria (En caso de pilotes aislados
 $\bar{a} = 144\pi r_0^2$)

σ_{oz} = Esfuerzo efectivo vertical inicial a la profundidad z

(FN)d = Fricción negativa al nivel d-d

La ecuación III.2.10 nos proporciona un valor aproximado de la FN. Si se desea conocer con mayor precisión el valor de esta a cualquier profundidad z, será necesario realizar una integración paso por paso hasta alcanzar la profundidad requerida.

Para la integración se establece de las condiciones de equilibrio según la fig. III.2.3 lo siguiente:

$$(\sigma_{oi} - \sigma_i) \bar{A}_i - (\sigma_{oi-1} - \sigma_{i-1}) \bar{A}_{i-1} = \bar{\omega} S_{oi} \Delta Z_i \quad \text{III.2.11}$$

Considerando una resistencia al corte promedio

$$S_{oi} = \frac{1}{2} K \phi_i (\sigma_i + \sigma_{i-1}) \quad \text{III.2.12}$$

y que

$$(FN)_i = (\sigma_{oi} - \sigma_i) \bar{A}_i \quad \text{III.2.13}$$

$$(FN)_{i-1} = (\sigma_{oi-1} - \sigma_{i-1}) \bar{A}_{i-1} \quad \text{III.2.14}$$

Sustituyendo III.1.12, III.2.13 y III.2.14 en - - III.2.11 se obtiene

$$\sigma_i = \frac{\sigma_{oi} \bar{A}_i - [(FN)_{i-1} + m_i \sigma_{i-1} \Delta Z_i]}{\bar{A}_i + m_i \Delta Z_i} \quad \text{III.2.15}$$

$$m_i = \pi \bar{r}_o K \phi$$

Con la ecuación III.2.13 se puede encontrar el valor de la fricción negativa a cualquier profundidad conociendo el valor de σ_i , calculado con la ecuación III.2.15.

El proceso es el siguiente:

1. Considerando condiciones de frontera en la superficie del suelo, se establece de la fig. III.2.2 que $(FN)_{i-1} = 0$ y $\sigma_{i-1} = \sigma_{oi-1} = q$

Por lo tanto para iniciar el cálculo, se sustituyen las condiciones de frontera en III.2.15 la cual queda

$$\sigma_i = \frac{\sigma_{oi} \bar{A}_i}{\bar{A}_i + m_i \Delta z_i} \quad \text{para } q = 0$$

donde todos los valores son conocidos, el valor de σ_i encontrado es sustituido en la ecuación - III.2.13 y el valor de $(FN)_i$ encontrado.

2. Para proseguir el cálculo con un incremento Δz los valores de $(FN)_{i-1}$ y σ_{i-1} tomarán los de $(FN)_i$ y σ_i encontrados en el punto anterior y así nuevos valores de $(FN)_i$ y σ_i son encontrados.
3. El proceso se repite hasta alcanzar el valor de $(FN)_i$ a la profundidad deseada.

En las expresiones III.2.13 y III.2.15 se ha utilizado el término \bar{A}_1 que corresponde al área tributaria de cada pilote en un grupo a un determinado nivel.

El área tributaria es un artificio mediante el cual se hacen intervenir factores que afectan la distribución de esfuerzos a lo largo del fuste del pilote, entre dichos factores se pueden mencionar a: la profundidad, separación entre pilotes, ubicación de éstos en la cimentación (al centro, en la orilla o en la esquina) y a la ley de resistencia al corte (puede ser variable, constante o una combinación de ambas con respecto a la profundidad).

Cuando la resistencia al corte es variable, donde $S_{oz}=KZ$ el valor del área tributaria se obtiene por medio de

$$\bar{A}_{ez} = \frac{\pi z^2}{\bar{I}zk} \quad \text{III.2.16}$$

Si la resistencia al corte es constante, donde $S_{oz}=S_e$ el valor del área tributaria se obtiene por medio de:

$$\bar{A}_{ez} = \frac{2\pi z^2}{\sqrt{2} \bar{I}zc} \quad \text{III.2.17}$$

Si la resistencia al corte es constante y variable
 $S_{oz}=Kz+Se$ el valor del área tributaria se obtiene por medio
de

$$\bar{A}_{ez} = \frac{(2he + z)\pi z^2}{z\bar{I}zk + he\bar{I}zc \sqrt{2}} \quad \text{III.2.18}$$

Los valores de $\bar{I}zk, \bar{I}zc$ pueden ser consultados en --
función de $\frac{z}{r}$ en la figura 11.VIII.3 de la referencia 2.

III.3 CAPACIDAD DE CARGA DE PILOTES CON MECANISMO.

El utilizar mecanismos en los pilotes es con el fin
de conocer la carga que se aplica en la cabeza de éstos y
poderla modificar de acuerdo a las necesidades de nuestra -
cimentación.

Por otro lado al permitir que los pilotes atravie-
zen libremente la losa de cimentación y con ello hacer que
la estructura se apoye directamente sobre el suelo entre -
pilotes se transmite una carga al suelo que será tomada por
los pilotes por fricción negativa.

De lo anteriormente descrito se observa que los pilotes soportan carga que será transmitida al estrato resistente en donde son soportados, los tipos de carga son:

- 1) Carga aplicada en la cabeza Q_{ah} por medio del mecanismo de control, fig. III.3.1
- 2) Carga por fricción con un valor de $Q_{fu} = q_a \bar{A}$
 donde: \bar{A} = es el área tributaria nominal de cada pilote q_a = carga unitaria aplicada sobre el suelo fig. III.3.1

Por lo tanto la carga admisible que tomará cada pilote será

$$Q_{pa} = Q_{fu} + Q_{ah} \quad \text{III.3.1}$$

Los valores de $(\bar{\sigma}_{oi})_q$ se calculan mediante la teoría de la elasticidad.

Los valores de σ_i se calculan mediante la expresión

$$\sigma_i = \frac{(\bar{\sigma}_{oi})_q \bar{A}_i - [(FN)_{i-1} + m_i \sigma_{i-1} \Delta z_i]}{\bar{A}_i + m_i \Delta z_i} \quad \text{III.3.2}$$

El valor de la fricción negativa es:

$$(FN)_1 = [(\bar{\sigma}_{oi})_q - \sigma_i] \bar{A}_1 \quad \text{III.3.3}$$

Como podrá observarse las expresiones anteriores -- son análogas a las encontradas en el punto III.2 y sus términos tienen el significado expuesto anteriormente.

El procedimiento de cálculo para encontrar el valor de q_a parte de establecer como condiciones de frontera al nivel de la losa de cimentación lo siguiente:

$$Q_{fu} = (FN)_{1-1} = 0 \quad \text{III.3.4}$$

y

$$(\bar{\sigma}_{oi-1})_q = q_a \quad \text{III.3.5}$$

Partiendo de las condiciones anteriores se realiza una integración con el incremento ΔZ deseado hasta alcanzar la profundidad del nivel "d" correspondiente al estrato resistente, en donde se obtiene que:

$$\sigma_i = \sigma_{oi} \quad (\text{al nivel } d)$$

Partiendo de las condiciones anteriores se propone un valor de q_a (preferentemente mayor al $\Delta\sigma_{exc}$) y con este se procede a realizar una integración con el incremento ΔZ deseado hasta alcanzar la profundidad al nivel "d" correspondiente al estrato resistente en donde se deberá llegar al valor de

$$\sigma_i = \sigma_{oi} \quad (\text{Se unen las dos curvas})$$

punto E fig. III.3.1

Si esto no sucede y se tiene que $\sigma_i < \sigma_{oi}$ habrá que aumentar el valor de q_a lo suficientemente hasta que $\sigma_i > \sigma_{oi}$ y posteriormente encontrar un valor intermedio de q_a que cumpla con la condición arriba señalada.

Con los valores de σ_i encontrados será necesario encontrar la ley de variación de resistencia al corte por medio de la expresión:

$$S_{oi} = K\phi \sigma_i \quad \text{III.3.6}$$

Y comparar dichos valores con los de la cohesión -- $C_{oi} = 0.3q_{ui}$ encontrados de pruebas a la compresión no confinada.

Si sucede que $S_{oi} < C_{oi}$ los valores de Q_{fu} y q_a encontrados mediante el proceso anterior son correctos.

De suceder lo contrario es decir si se tiene que

$$C_{oi} < S_{oi}$$

La fuerza de fricción Q_{fu} (Fricción Negativa) será calculada tomando en consideración la ley de resistencia - de

$$C_{oi} = 0.3q_{ui}$$

por lo tanto dicha carga tendrá un valor de:

$$\Delta Q_{fu} = \bar{\omega} \sum_0^d (0.3q_{ui}) \Delta Z_i \quad \text{III.3.7}$$

Para determinar el valor de q_a se requiere que se cumpla al nivel del estrato resistente a la profundidad "d"

$$\sigma_d = \sigma_{od}$$

Por lo tanto para satisfacer dicha condición cuya -

finalidad es aprovechar al máximo la fricción negativa a lo largo del fuste del pilote debido a la aplicación de la carga q_a de la fig. III.3.1 se establece lo siguiente:

$$(FN)d = [(\bar{\sigma}_{od})q_a - \sigma_{od}] \bar{A}d \quad \text{III.3.8}$$

$$(\bar{\sigma}_{od})q_a = \frac{(FN)d}{\bar{A}d} + \sigma_{od} \quad \text{III.3.9}$$

Además

$$(\bar{\sigma}_{od})q_a = \sigma_{od} + I_{x^2} q_a \quad \text{III.3.10}$$

donde:

I_x = Coeficiente de influencia de Fröhlich

entonces el valor de q_a que deberá ser aplicado al suelo es:

$$q_a = \frac{(\bar{\sigma}_{od})q_a - \sigma_{od}}{I_{x^2}} \quad \text{III.3.11}$$

y los valores de σ_i para cualquier profundidad están dados por:

$$\sigma_i = (\bar{\sigma}_{oi}) q_a - \frac{(\text{FN})_{i-1} + \bar{\omega} C_i \Delta Z_i}{\bar{A}_i}$$

III.3.12

CAPACIDAD DE CARGA POR PUNTA UNICAMENTE

48

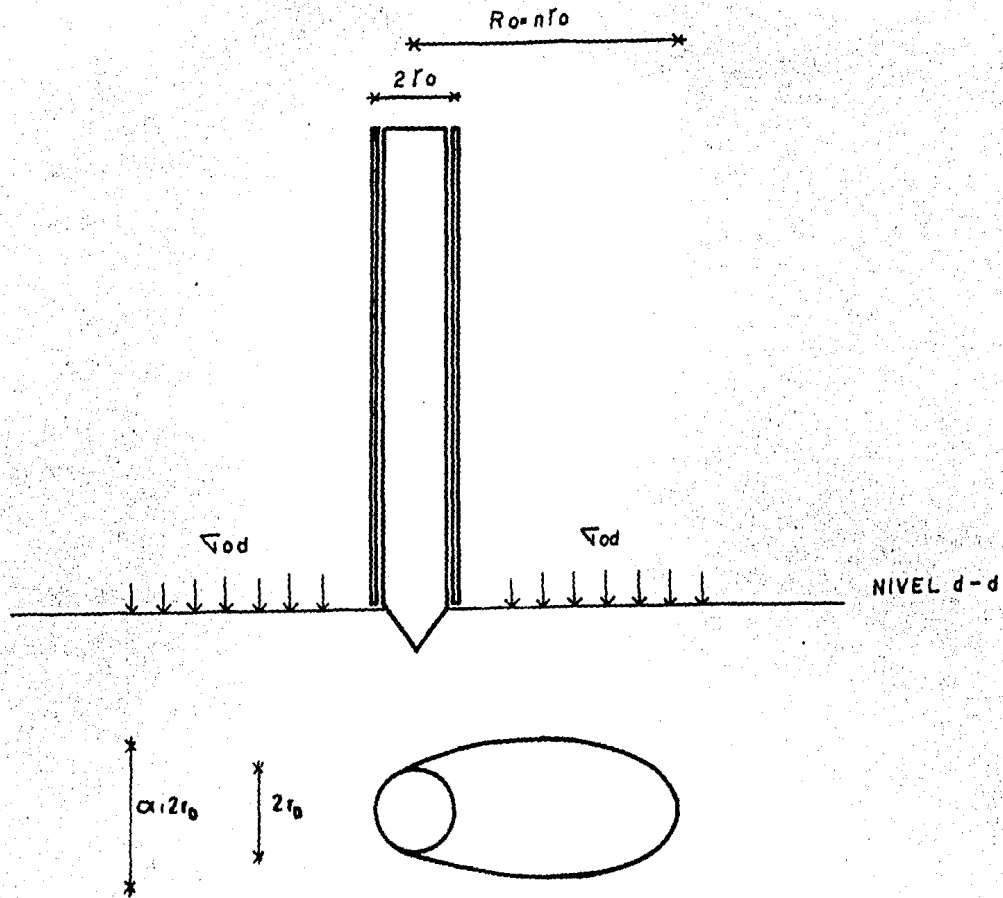


FIG. III. 1. 1.

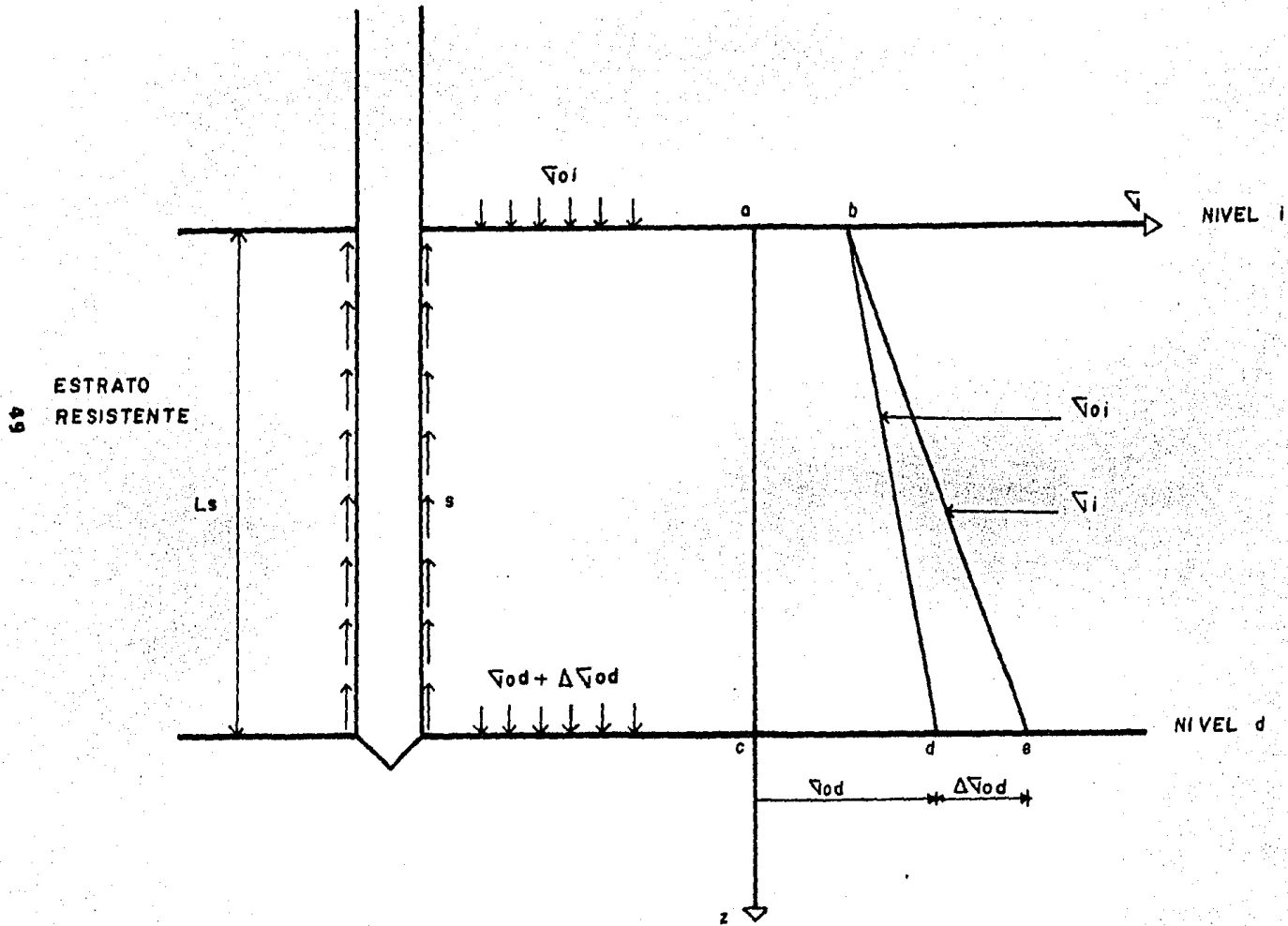
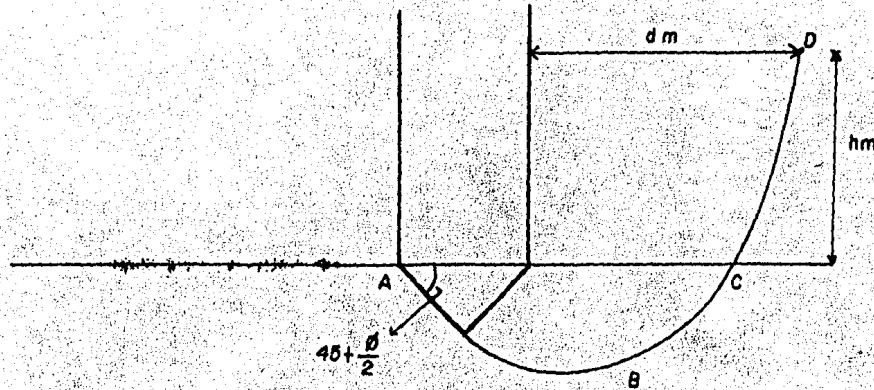


FIG. III. 1.2

SUPERFICIE DE DESLIZAMIENTO



05

\widehat{ABC} = ARCO DE ESPIRAL LOGARITMICA

\widehat{CD} = ARCO CON PUNTO DE TANGENCIA CON LA VERTICAL

hm = ALTURA NECESARIA PARA QUE SE FORME LA
SUPERFICIE POTENCIAL DE DESLIZAMIENTO

dm = DISTANCIA A LA QUE EL ARCO \widehat{CD} ES TANGENTE
CON LA VERTICAL

LOS VALORES DE hm, dm SE PUEDEN ENCONTRAR SEGUN LA FIGURA. 6.III.4 DE LA REF 2

FIG. III. 1. 3

VALORES DE N_q y N_c SEGUN ZEEVAERT

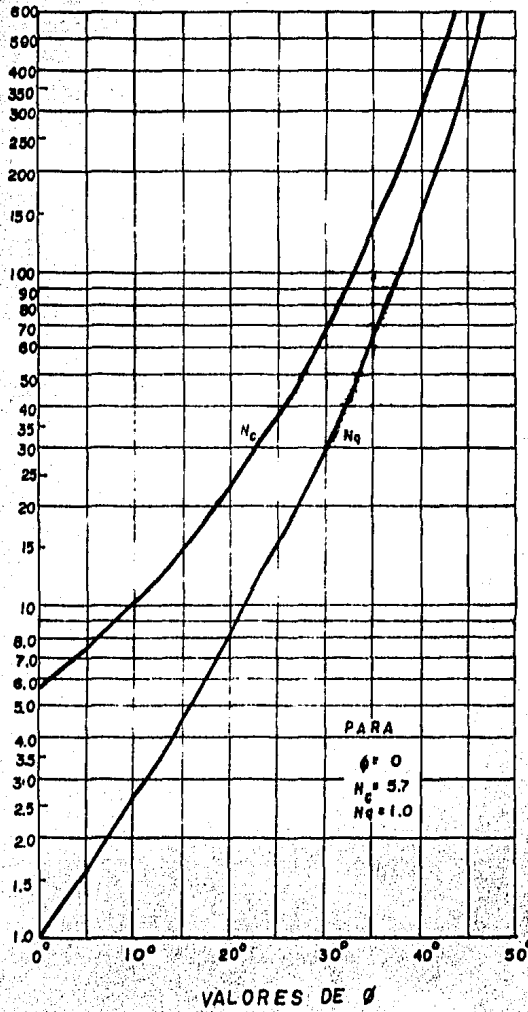


FIG. III. 1.4

ESTADO PLANO DE ESFUERZOS

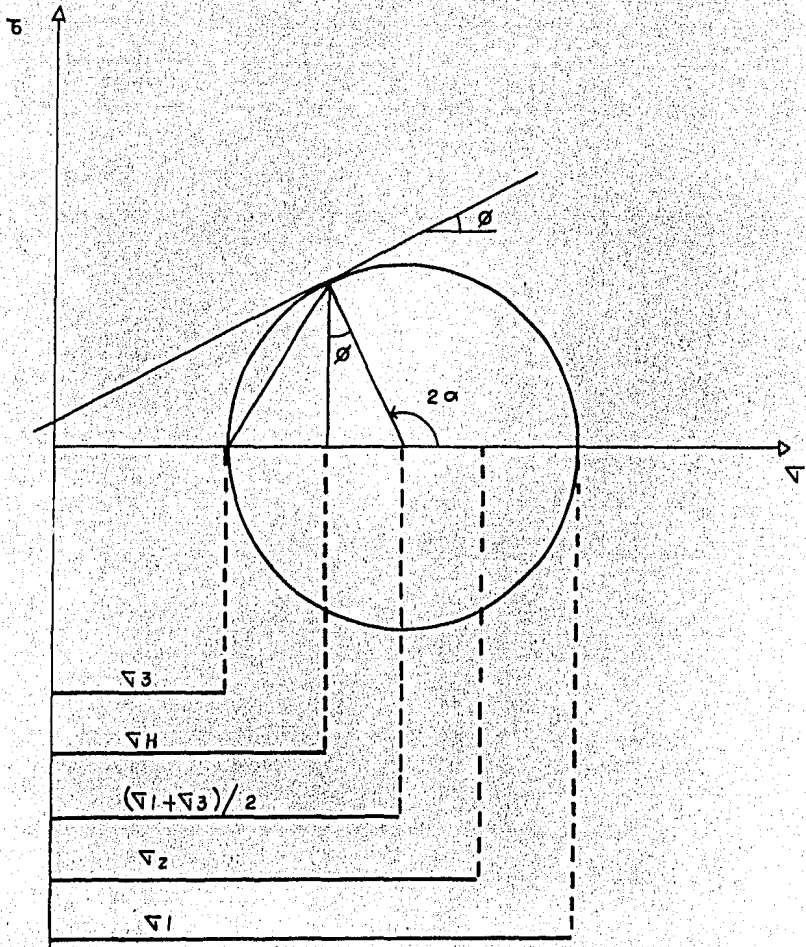


FIG. III. 2. 1

VARIACION DE ESFUERZOS CON LA PROFUNDIDAD

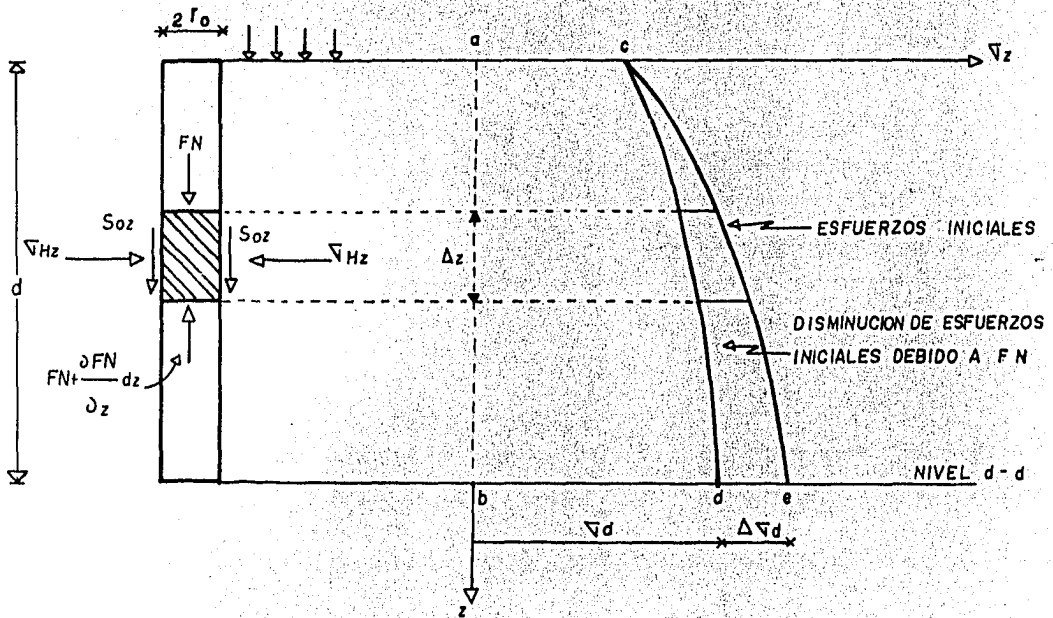


FIG. III. 2. 2

FRICCION NEGATIVA

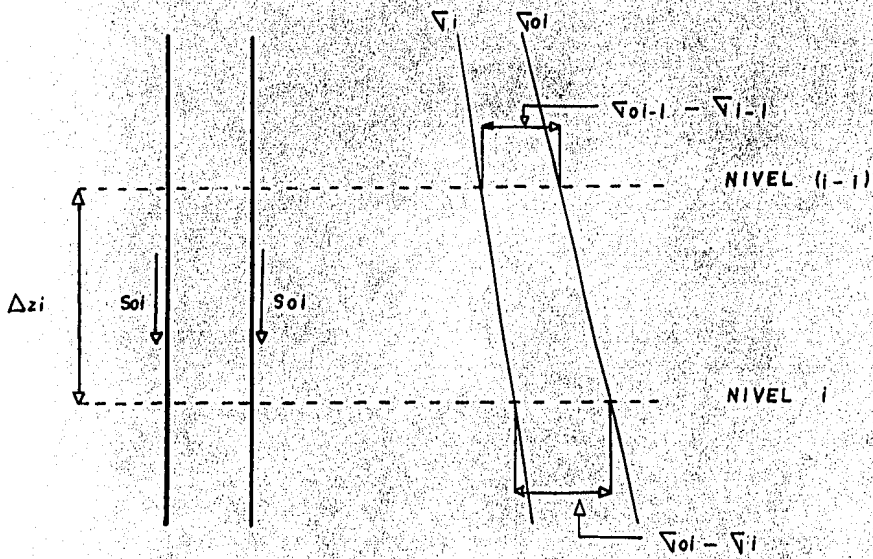


FIG. III. 2. 3

VALORES DE K_p PARA PILOTES RECUBIERTOS
Y NO RECUBIERTOS

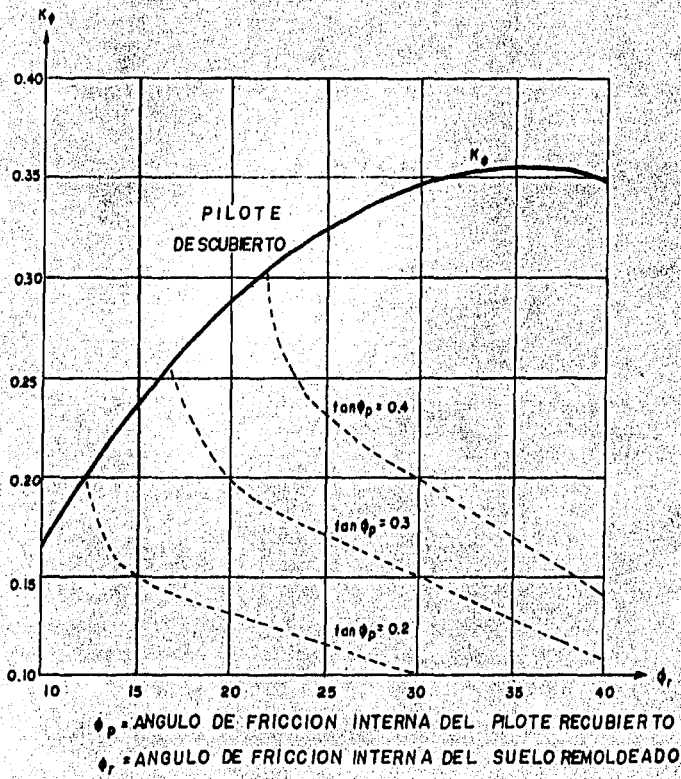
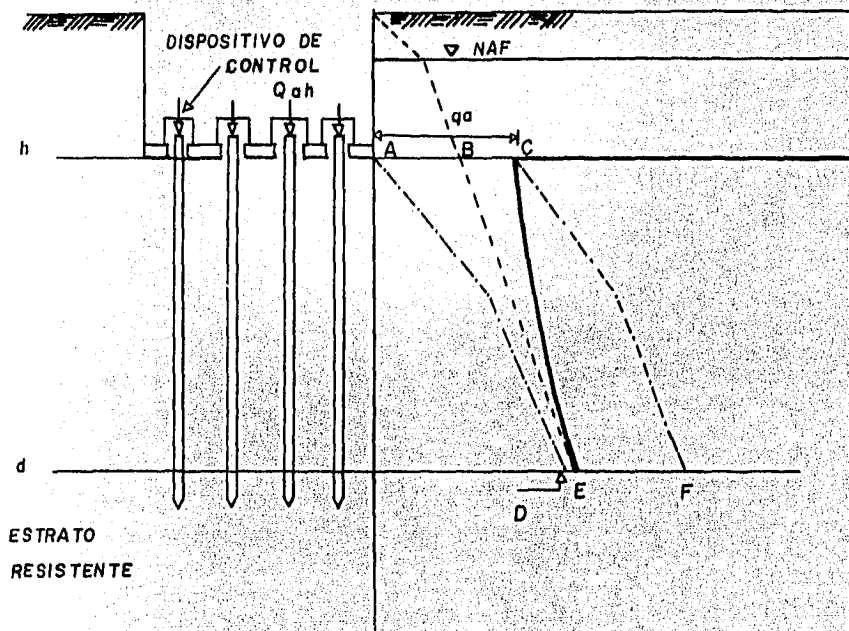


FIG. III.2.4



- CURVA DE ESFUERZOS INICIALES $\bar{\sigma}_{oi}$
- - - - - CURVA DE ESFUERZOS DESPUES DE HINCADOS
LOS PIOTES Y REALIZADA LA EXCAVACION $\bar{\sigma}_{oi}$
- CURVA DE ESFUERZOS AL SER APLICADA
UNA CARGA q_a EN LA SUP. DEL SUELO $(\bar{\sigma}_{oi})_{q_a}$
- CURVA DE ESFUERZOS FINALES PRODUCTO
DE LA FRICCIÓN NEGATIVA $\bar{\sigma}_i$

FIG. III. 3. 1

IV. CALCULO DE LA CIMENTACION DE UNA ESTRUCTURA

IV.1) Descripción del proyecto

Se cimentará una estructura de 8 entrepisos con las características siguientes:

- Descarga a nivel de piso 8 T/m^2
- Descarga por excavación de 3 m 1.5 T/m^2
- Profundidad del estrato resistente (z) 11 m
- Area de cimentación (A) $30 \times 25 = 750 \text{ m}^2$
- Peso de la estructura por m^2 9.5 T/m^2
- Peso total de la estructura (w) 7125 T
- Angulo de fricción interna del material resistente (ϕ) 45°
- Peso volumétrico de la masa de suelo (γ_m) del estrato resistente 2.2 T/m^3
- Profundidad del NAF 1.55 m
- La estratigrafía se muestra en la fig. IV.1.2

IV.2) METODO CONVENCIONAL

Se utilizará el método propuesto por Meyerhof

$$W \text{ total} = 7125 \text{ ton}$$

$$\text{Area de cimentación} = 750 \text{ m}^2$$

Se propone una distribución de pilotes de 5 x 5 con diámetro $D = 50 \text{ cms.}$

$$\text{Carga por pilote} = \frac{Wt}{\text{No. de pilotes}} = \frac{7125}{25} = 285 \text{ ton}$$

- Capacidad de carga última

Considerando que no existe penetración en el estrato resistente de la ecuación II.1 se tiene

$$q_c = \gamma_1 D f N q + \frac{1}{2} \gamma_2 B N \gamma$$

$$\gamma_2 = \gamma_m - \gamma_o = 2.2 - 1 = 1.2 \text{ T/m}^3$$

Para $\phi=45^\circ$ de la fig. II.3 para cimiento superficial (B=1).

$$Nq = 190$$

$$Ny = 280$$

Además $\gamma_1 Df = 5.95T/m^2$ (Esfuerzo efectivo a 11 mts)

$$B = 0.5 \text{ m}$$

Sustituyendo valores en la ecuación II.1

$$q_c = 5.95 \times 190 + 0.5 \times 1.2 \times 0.5 \times 280 =$$

$$q_c = 1214.5 \text{ T/m}^2$$

$$Qu = q_c \cdot Ap$$

$$Ap = \frac{\pi \times 0.5^2}{4} = 0.196 \text{ m}^2$$

$$Qu = 1214.5 \times 0.196 =$$

$$Qu = 238.04 \text{ ton}$$

Penetrando en el estrato resistente 3.5 m la ecuación II.2 se reduce a:

$$q_c = \gamma_1 DfN'q$$

De la fig. II.3 para pilotes se obtiene con $\phi=45$ el valor de

$$N'q = 840$$

y

$$\gamma_1 Df = 5.95 \text{ T/m}^2$$

Sustituyendo los valores anteriores en la ecuación

II.2

$$q_c = 5.95 \times 840 =$$

$$q_c = 4998 \text{ T/m}^2$$

Como $A_p = 0.196 \text{ m}^2$

$$Q_u = 4998 \times 0.196 =$$

$$Q_u = 979.61 \text{ ton}$$

Para que el valor de $N'q = 840$ sea correcto se debe cumplir que

$$3.5 = D'$$

donde el valor de D' esta dado por:

$$D' = 4B \sqrt{N\phi} = 4B \tan(45 + \phi/2)$$

$$N\phi = \frac{1+\text{sen}\phi}{1-\text{sen}\phi} = \frac{1+\text{sen}45}{1-\text{sen}45}$$

$$N\phi = 5.827 \quad \sqrt{N\phi} = 2.414$$

$$D' = 4 \times 0.5 \times 2.414 = 4.83 \text{ m}$$

Como se observa

$$D' = 4.83 > 3.5$$

Por lo que para encontrar el valor correcto de $N'q$ y así el de Q_u es necesario interpolar

Qu (ton)	D' m
238	0
x	3.5
979.61	4.83

el valor de Qu = 775.4

Revisando el factor de seguridad

$$F.S. = \frac{Qu}{\text{Carga por pilote}} =$$

$$F.S. = \frac{775.4}{285} = 2.7 \text{ Se considera admisible}$$

Si requerimos transmitir a la cabeza del pilote -
100 ton de las 285 T/pilote se transmite al suelo una carga
de 185 Ton/pilote cargado.

Considerando cubos de caobilla de las característi-
cas mostradas en la fig. IV.1.1.A

Carga de falla del cubo de madera = 3 ton.

$$\text{No. de cubos} = \frac{\text{carga en la cabeza}}{\text{carga de falla del cubo}} = \frac{100}{3} = 33.3$$

La distribución de cubos se muestra en la fig. - -

IV.1.1.B

Transmitiendo una carga real de 99 ton.

IV.3) METODO DEL DR. LEONARDO ZEEVAERT.

Se propone una distribución de pilotes de 7 x 6 con un diámetro D = 50 cms.

La distribución se representa en la fig. IV.2.1

Para el análisis de este problema la ley de variación de resistencia al corte está dado por la figura IV.2.2 La cual muestra que la resistencia al esfuerzo cortante que rige está dado por:

$$S_{oz} = 0.3q_{ui}$$

Por lo tanto aplicando la ecuación III.3.7 se tiene que el valor de la fricción negativa (ΔQ_{fu}) a la profundidad de 11 m es:

$$\Delta Q_{fu} = \bar{\omega} \sum_0^d (0.3q_{ui}) \Delta Z_i$$

$$\bar{\omega} = 1.1 \times \pi \times D = 1.1 \times \pi \times 0.5 =$$

$$\bar{\omega} = 1.728 \text{ m}$$

$$\Delta Q_{fu} = \bar{\omega} \sum_3^{14} 0.3q_{ui} \Delta Z_i = 1.728 (1.17 \times 1 + 1.56 \times 5.6 + 1.9 \times 4.4) =$$

$$\Delta Q_{fu} = 31.56 \text{ ton}$$

La variación de esfuerzos iniciales con respecto a la profundidad se presenta en la siguiente tabla.

Z (m)	Z' (m)	σ_{oi} (T/m ²)	I_{x^2}
4	1	4.15	0.99
5	2	4.65	0.988
6	3	4.75	0.985
7	4	5.00	0.946
8	5	5.15	0.899
9	6	5.35	0.849
10	7	5.80	0.797
11	8	5.95	0.745
12	9	6.05	0.694
13	10	6.30	0.645
14	11	6.50	0.599
15.5	12.5	6.75	
17.5	14.5	7.0	

I_{x^2} = Factor de influencia de Fröhlich para determinar el incremento de esfuerzos debido a la aplicación de la carga q_a , y $x = 2$

El valor de la carga q_a que se transmitirá al suelo está calculado por la expresión III.3.11

$$q_a = \frac{(\bar{\sigma}_{od}) q_a - \sigma_{od}}{I_{x^2}}$$

$$(\bar{\sigma}_0 d) q_a = \frac{(FN) d}{\bar{A} d} + \sigma_0 d$$

Ad = Area tributaria a la profundidad d = 11 m -
fig. IV.2.3

$$(\bar{\sigma}_0 d) q_a = \frac{31.56}{14.06} + 6.5 =$$

$$(\bar{\sigma}_0 d) q_a = 8.74 \text{ T/m}^2$$

$$q_a = \frac{8.74 - 6.5}{0.599} =$$

$$q_a = 3.75 \text{ T/m}^2$$

Conocida q_a se obtienen los valores de $(\bar{\sigma}_0 i) q_a$ mostrados en la tabla siguiente:

Z (m)	Z' (m)	$(\bar{\sigma}_i)_a$ (T/m ²)
4	1	7.86
5	2	8.36
6	3	8.44
7	4	8.55
8	5	8.52
9	6	8.53
10	7	8.79
11	8	8.74
12	9	8.65
13	10	8.72
14	11	8.74

Los valores de σ_i para cualquier profundidad están dados por la expresión III.3.12.

$$\sigma_i = (\bar{\sigma}_i)_a - \frac{(FN)_{i-1} + \bar{\omega} C_i \Delta Z_i}{\bar{A}_i}$$

En la tabla siguiente se muestran los valores σ_i obtenidos.

Z (m)	σ_1 (T/m ²)	NF (ton)
3-4	6.92	2.02
4-5	7.01	4.72
5-6.8	6.78	9.57
6.8-8	6.82	12.86
8-9.6	6.91	17.12
9.6-11	6.77	21.72
11-12	6.87	25.00
12-13	6.56	28.28
13-14	6.50	31.56

En la fig. IV.2.4 se muestra la variación de esfuerzos (σ_{oi}), $(\bar{\sigma}_{oi})_q$ y σ_i .

Cálculo de la capacidad última por punta.

Para $\phi=45^\circ$ de la expresión III.1.9

$$Nq = \frac{\cos^2 \phi e_n^{(\frac{3}{2}\pi + \phi) \tan \phi}}{2 \cos^2 (45 + \phi/2)}$$

$$Nq = \frac{\cos^2 45 e_n^{(\frac{3}{2}\pi + \frac{4.5 \times \pi}{180}) \tan 45}}{2 \cos^2 (45 + 45/2)} = 416.79$$

La penetración en el estrato resistente será de 3.5

m.

$$\bar{\omega} = 1.728$$

$$\bar{A}_i = 14.06 \text{ m}^2$$

$$m = \left(\frac{L_s}{2}\right) \left(\frac{\bar{\omega}}{\bar{A}_i}\right) K\phi = \left(\frac{3.5}{2}\right) \left(\frac{1.728}{14.06}\right) 0.353 = 0.076$$

$$\Delta\sigma_{od} = \frac{m}{1-m} (\sigma_{oi} + \sigma_{od}) = \frac{0.076}{1-0.076} (6.5+7.0) = 1.11 \text{ T/m}^2$$

$$Q_{fu} = 1.11 \times 14.06 = 15.61 \text{ ton.}$$

NOTA: Dada la profundidad de penetración de la punta se recomienda hacer perforación previa --
ademada con lodo bentonítico.

$$Q_{pu} = \pi r_o^2 \alpha (\sigma_{od} + \Delta\sigma_{od}) N_q (D_r + 0.1)$$

$$Q_{pu} = \pi \left(\frac{0.5}{2}\right)^2 \times 1.2 (7+1.11) 416.79 (0.7+0.1) =$$

$$Q_{pu} = 637.15 \text{ ton}$$

$$Q_u = Q_{pu} + Q_{fu} = 637.15 + 15.61$$

$$Q_u = 652.76 \text{ ton}$$

Para que sea correcta la utilización de $N_q = 416.79$ será necesario que se cumpla la condición de:

$$hm/_{2B} = 14.5 \text{ (Fig. 6.III.4 ref. 2)}$$

para 45°

$$hm = 14.5 \times 0.5 = 7.25 > 3.5$$

Será necesario interpolar de Terzaghi para $hm=0$

$$N_{q_T} = 170$$

$$N_{q_z} = 170 + \frac{416.79-170}{7.25} 3.5 = 289.14$$

por lo tanto

$$Q_{p_u} = \pi (0.5/2)^2 1.2 \times 8.11 \times 289.14 \times 0.8 = 442.01 \text{ ton}$$

$$Q_u = 457.62 \text{ ton}$$

- Cálculo del Factor de Seguridad

Peso total de la estructura

$$W_t = 7125 \text{ ton}$$

$$\text{Carga por pilote} = \frac{7125}{42} = 169.64 \text{ ton/p}$$

$$\text{F.S.} = \frac{457.62}{169.64} = 2.7$$

Se considera admisible el factor de seguridad.

- Cálculo del número de cubos para transmisión de carga.

Si la carga por pilote es

$$c/p = 169.64 \text{ ton}$$

y la carga que por fricción negativa se transmitirá al sue
lo es:

$$\Delta Q_{fu} = 31.56 \text{ ton}$$

La carga que se aplicará en la cabeza de cada pilote será

$$Q_{ah} = 169.64 - 31.56 = 138.08 \text{ ton}$$

Si un cubo de 5 x 5 x 5 transmite una carga de 3 -- ton el número de cubos necesarios será:

$$\text{No. cubos} = \frac{138.08}{3} = 46$$

Se colocarán 3 capas de cubos para prolongar el tiempo en que será necesario reponerlos debido a que estos han alcanzado una deformación de 2.5 cms.

La distribución de cubos se muestra en la fig. IV.2.5

- Cálculo de asentamientos

Estrato A

$$\text{De } z = 4.1 \text{ a } z = 9.3$$

$$\text{Espesor del estrato} = 5.2 \text{ m} = 520 \text{ cms.}$$

m_{vi} = Coeficiente de compresibilidad volumé--
trico

$$m_{vi} = 0.047 \text{ cm}^2/\text{kg}$$

Los asentamientos están dados por la expresión:

$$\delta_A = m_{vi} \Delta\sigma d_A$$

$$\Delta\sigma_p = \Delta\sigma_i \frac{\bar{A}_i}{\bar{A}_o}$$

$$A_o = \lambda\beta = 4.8 \times 4.8 = 23.04 \text{ m}^2 = 230400 \text{ cm}^2$$

Para A_i y $\Delta\sigma_i$ se tomarán a una profundidad promedio

$$z_p = \frac{9.3 + 4.1}{2} = 6.7 \text{ m}$$

$$z'_p = 3.7 \text{ m}$$

Para $z'_p = 3.7$

$$A_i = 5.9 \text{ m}^2 = 59000 \text{ cm}^2 \text{ (fig. IV.2.3)}$$

$$\Delta\sigma_i = 1.75 \text{ T/m}^2 = 0.175 \text{ Kg/cm}^2 \text{ (fig. IV.2.4)}$$

$$\Delta\sigma_p = 0.175 \frac{59000}{230400} = 0.04481 \text{ Kg/cm}^2$$

$$\Delta\sigma = 0.36 - 0.04481 = 0.3152 \text{ Kg/cm}^2$$

$$\delta_A = 0.047 \times 0.3152 \times 520 = 7.7 \text{ cms}$$

Estrato B

$$\text{De } z = 10.1 \text{ a } z = 13.7$$

$$\text{Espesor del estrato} = 3.6 \text{ m} = 360 \text{ cms}$$

$$m_{vi} = 0.035 \text{ cm}^2/\text{kg}$$

Los asentamientos están dados por la expresión:

$$\delta_B = m_{vi} \Delta\sigma d_B$$

$$\Delta\sigma_p = \Delta\sigma_i \frac{A_i}{A_o}$$

$$A_o = 230400 \text{ cm}^2$$

$$z_p = \frac{13.7 + 10.1}{2} = 11.9 \text{ m}$$

Para $z'_p = 8.9$

$$\Delta\sigma_i = 1.8 \text{ T/m}^2 = 0.18 \text{ Kg/cm}^2$$

$$A_i = 120000 \text{ cm}^2$$

$$\Delta\sigma_p = 0.18 \frac{120000}{230400} = 0.09375 \text{ kg/cm}^2$$

$$\Delta\sigma = 0.315 - 0.09375 = 0.2212 \text{ Kg/cm}^2$$

$$\delta_B = 0.035 \times 0.2212 \times 360 = 2.79 \text{ cm}$$

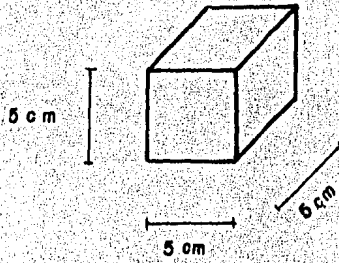
$$\delta_T = \delta_A + \delta_B = 7.70 + 2.79 = 10.49 \text{ cms.}$$

Los asentamientos esperados para este tipo de cimentación son del orden de 10 cms y estos se consideran tolerables.

Si de alguna manera no lo fueran debido a que pudieran ocasionar daños en estructuras circunvecinas, será necesario disminuir la carga q_a aplicada al suelo, transmitien-

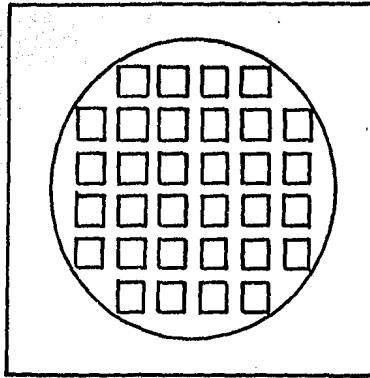
do mayor carga a la cabeza del pilote mediante el -
dispositivo de control, es decir habría que aumentar el n \acute{u} me
ro de cubos de madera, por lo anterior ser \acute{a} necesario encontr
tar los nuevos valores de σ provocados por la fricci \acute{o} n neg
ativa.

CUBO DE CAOBILLA



A)

DISTRIBUCION DE CUBOS



B)

FIG. IV. 1.1.

PERFIL ESTRATIGRAFICO Y ESFUERZOS INICIALES

CURVA DE σ_{oi}

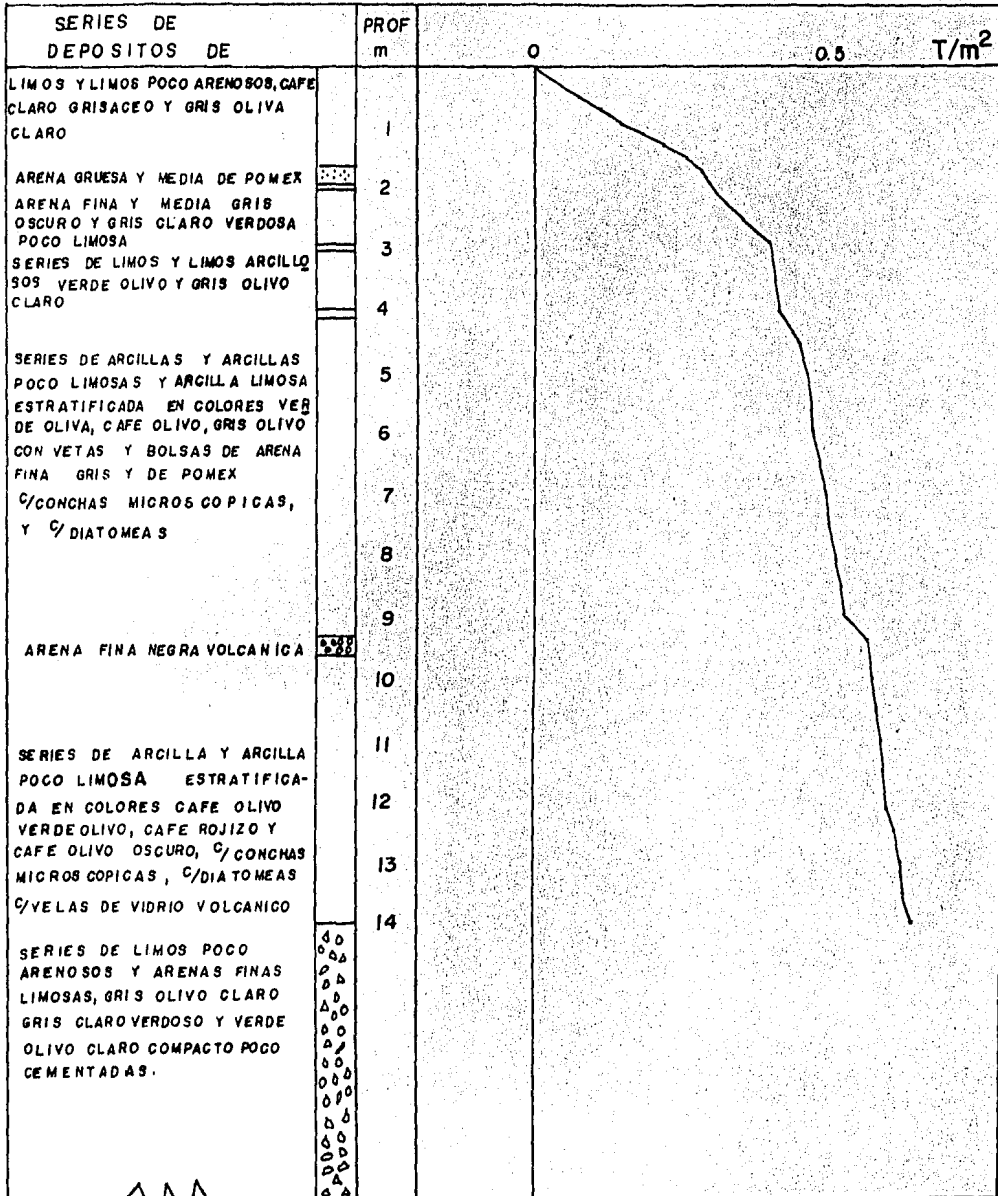
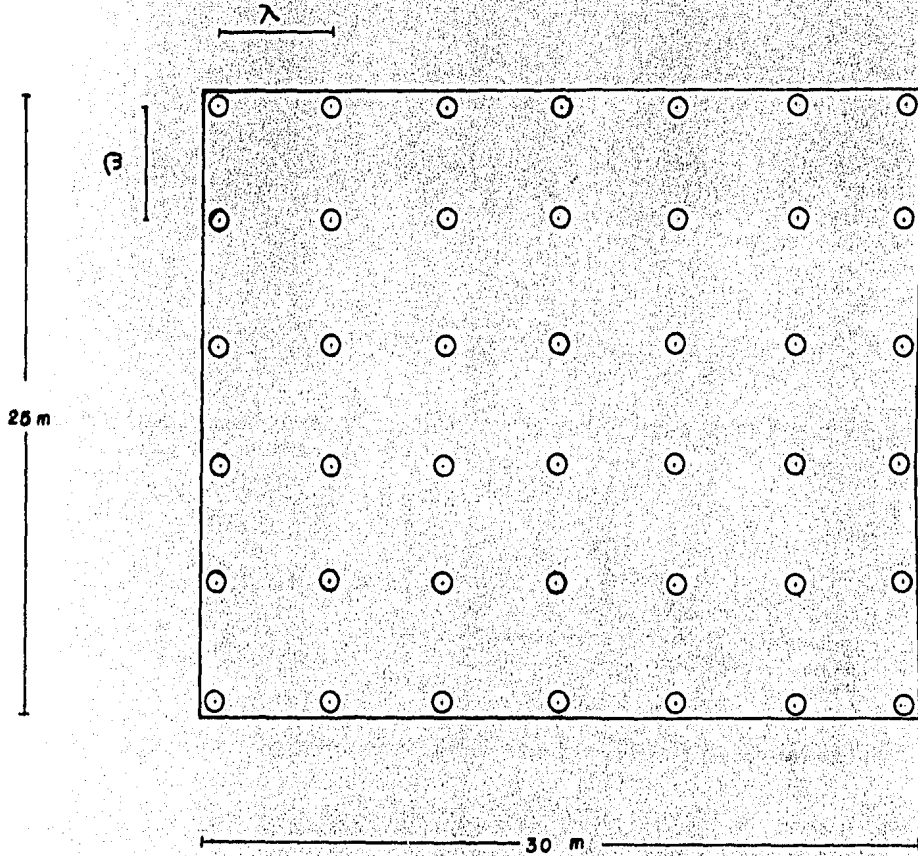


FIG. IV. 1.2

DISTRIBUCION 7x6



$\lambda = \varrho = 4.8 \text{ m}$

FIG. IV. 2. 1

LEY DE VARIACION DE RESISTENCIA
AL CORTE

$$S_{0z} = 0.3 q_{ui}$$

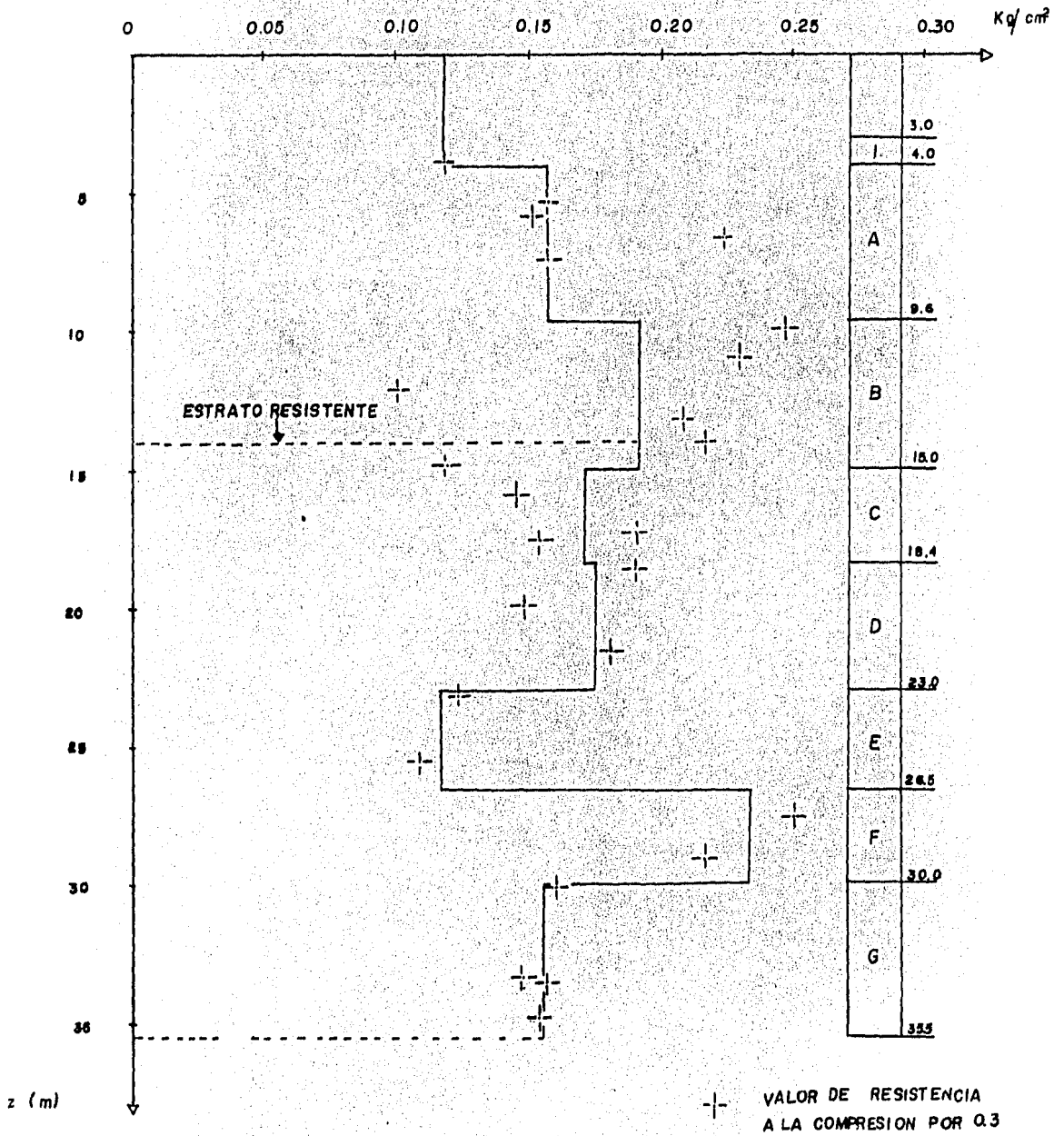


FIG. IV. 2. 2

AREAS TRIBUTARIAS

DISTRIBUCION DE 7x6 (PILOTE INTERIOR)

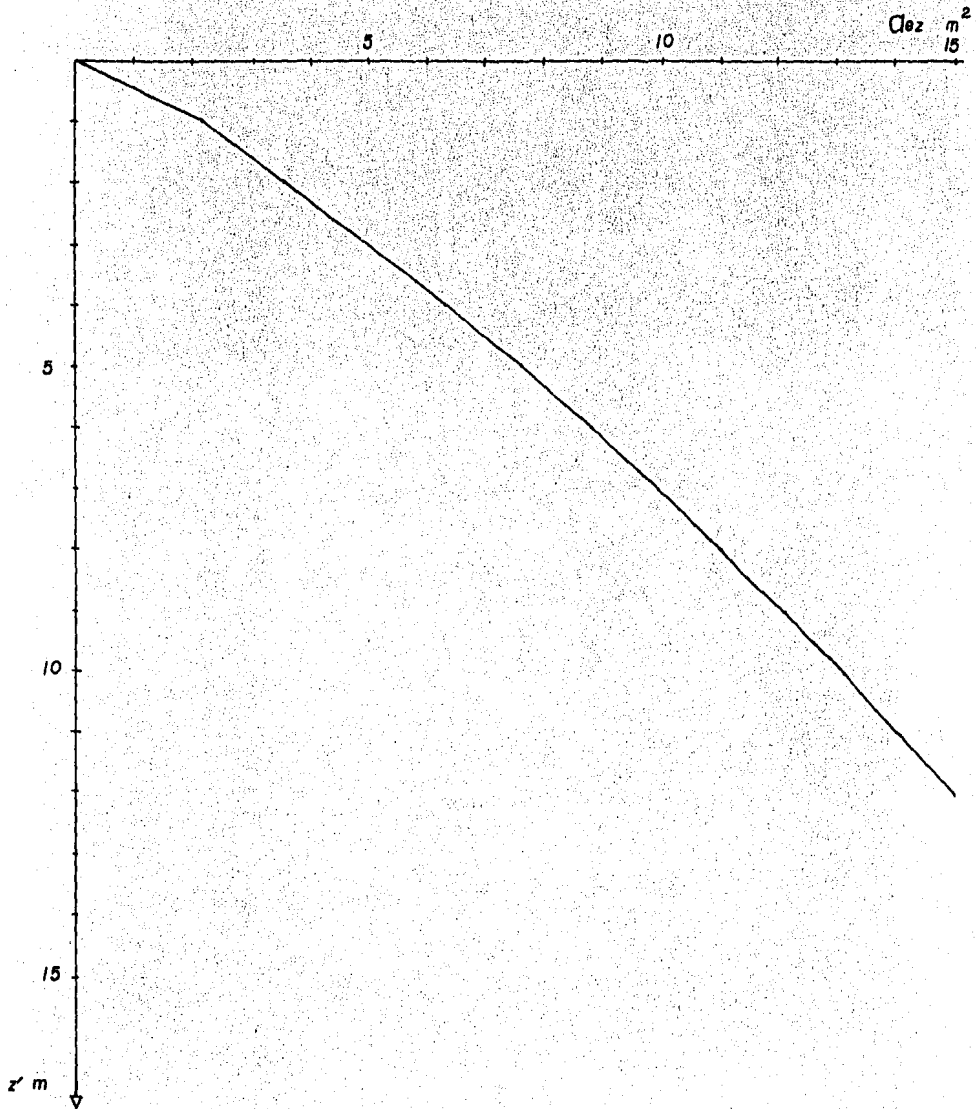


FIG. IV.2.3

$$\begin{aligned}\lambda &= \beta = 4.8 \text{ m} \\ \sigma_p &= 0.196 \text{ m}^2 \\ \sigma_o &= 22.84 \text{ m}^2 \\ D &= 0.50 \text{ m}\end{aligned}$$

AREAS TRIBUTARIAS

DISTRIBUCION DE 7x6 (PILOTE INTERIOR)

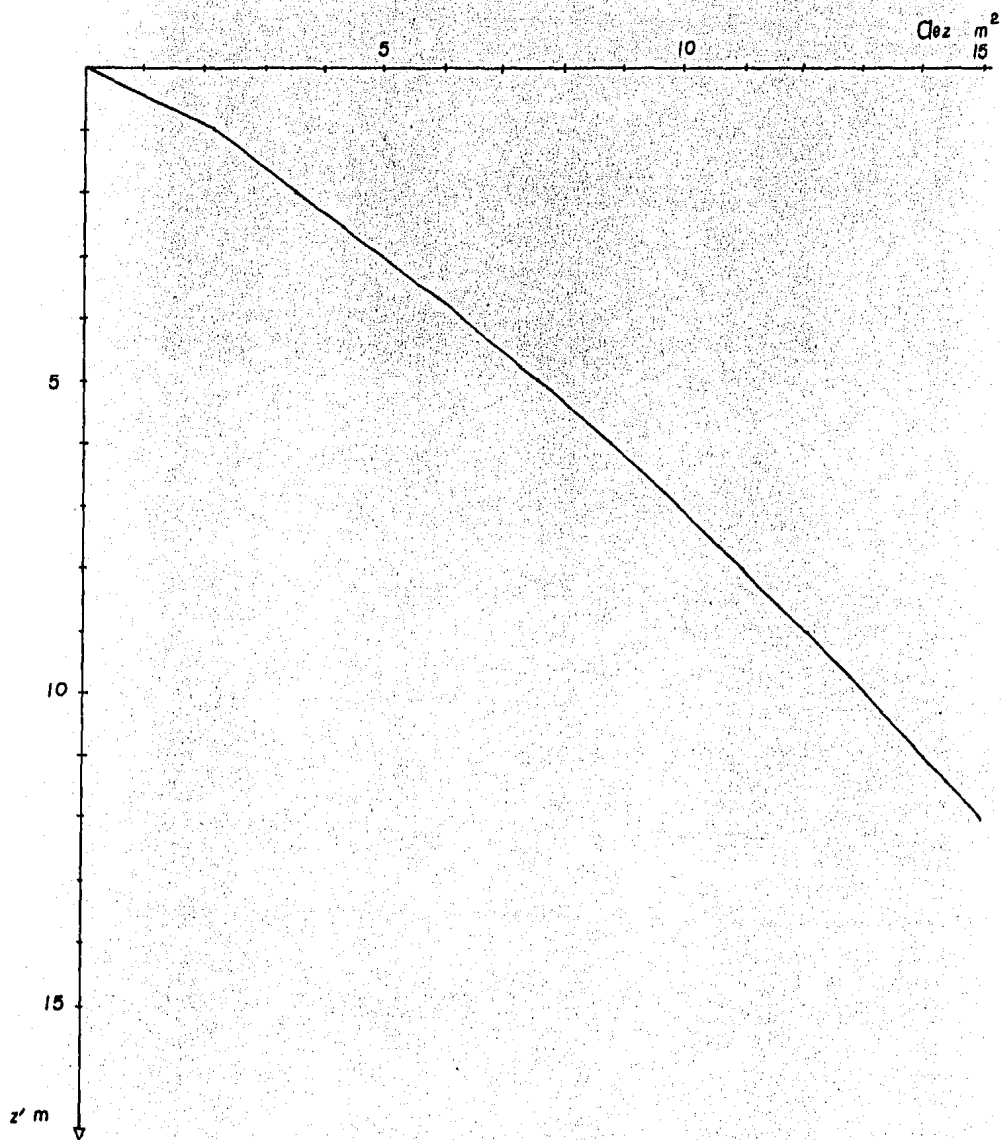


FIG. IV.2.3

$$\begin{aligned} \lambda &= 3 = 4.8 \text{ m} \\ Q_p &= 0.196 \text{ m}^2 \\ Q_o &= 22.84 \text{ m}^2 \\ D &= 0.50 \text{ m} \end{aligned}$$

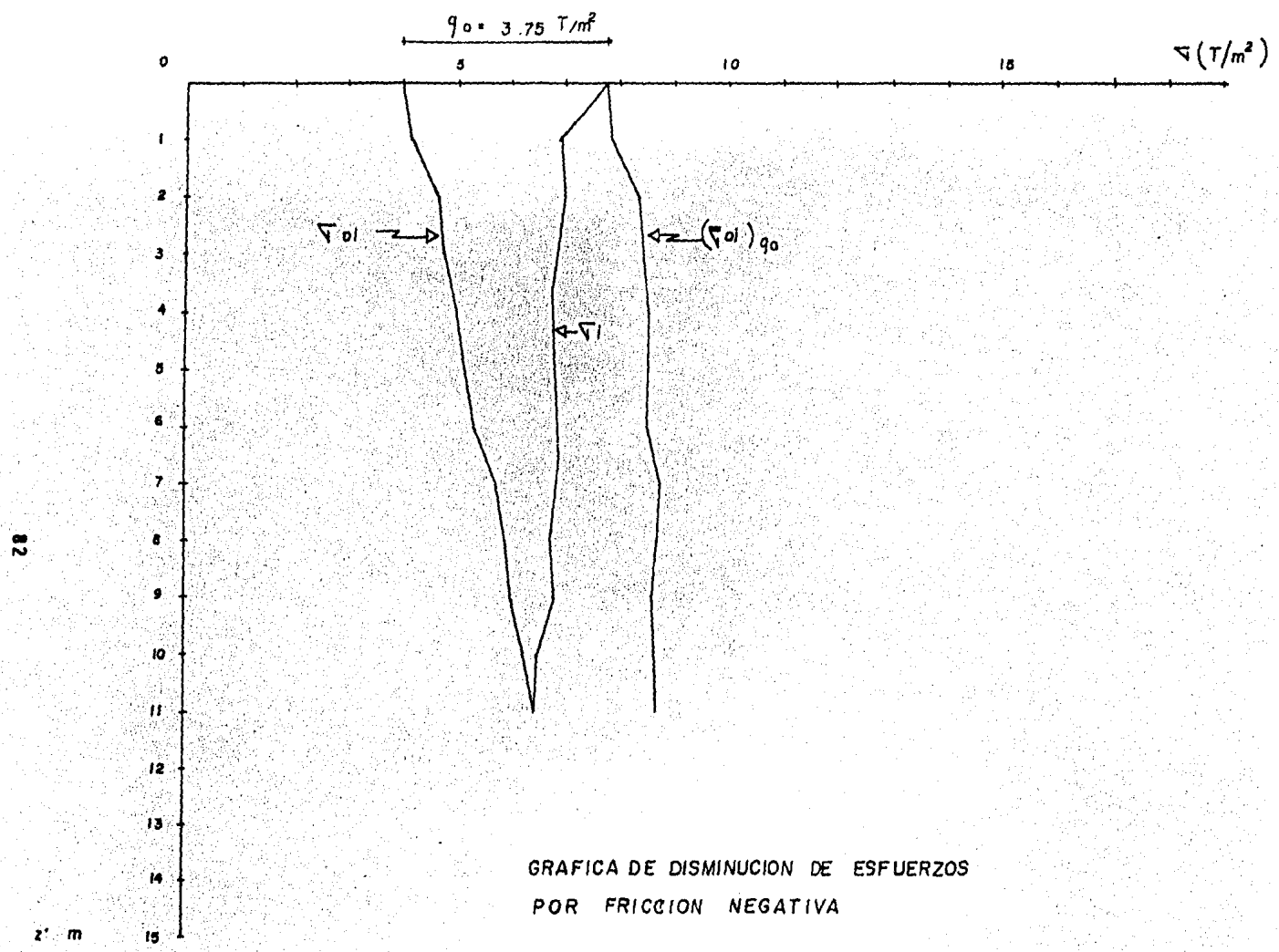


FIG. IV. 2.4

DISTRIBUCION DE CUBOS

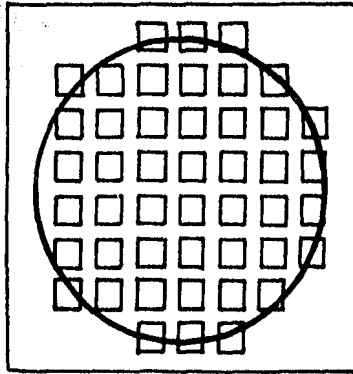


FIG. IV. 25

V. COMPARACION DE LOS RESULTADOS

Como se puede apreciar la diferencia entre el número de pilotes es bastante notoria, de 25 que da el método de Meyerhof por 42 necesarios mediante el método de Leonardo Zeevaert, si se hace un análisis en términos económicos la diferencia es bastante grande, pero es necesario tomar en cuenta otros aspectos para considerar si el método de Meyerhof es mejor tanto en el comportamiento de la cimentación como en el aspecto económico.

Una de las principales razones que hacen que se disminuya bastante el número de pilotes con el método de Meyerhof es que la capacidad de carga última por punta es muy grande debido al valor que propone de $N'q$ en comparación con los del Dr. Zeevaert que son mucho más conservadores, esto es fácil apreciarlo al comparar las gráficas de las referencias citadas con anterioridad en donde aparecen los valores de los factores de capacidad de carga, inclusive se nota que para valores del ángulo de fricción interna (ϕ) entre 0° y 20° los valores no difieren en mucho pero a partir de 20° a 45° la diferencia es muy notoria sobre todo en valores próximos a los 45° , que en este caso es el ángulo ϕ que se ha utilizado.

El tener una gran capacidad de carga última por punta en el método de Meyerhof haciendo por lo tanto disminuir el número de pilotes hace que la carga que tome cada pilote se incremente bastante en comparación con la que toman los 42 pilotes encontrados mediante el método de Zeevaert, lo cual hará que nuestros pilotes con un mismo diámetro estén diseñados para poder soportar la carga de trabajo.

Un aspecto muy importante debido a los resultados - obtenidos es el referente a la carga que deberá de ser transmitida al suelo puesto que con el método de Leonard Zeevaert se establece la carga que será tomada por la fricción negativa, partiendo de las propiedades físicas del suelo al considerar su resistencia al esfuerzo cortante.

Con este método se encontró que dicha carga será de

$$\Delta Q_{fu} = 31.56 \text{ ton}$$

y la carga aplicada en la cabeza del pilote

$$Q_{ah} = 138.08 \text{ ton}$$

Con lo cual teóricamente, la estructura seguirá los hundimientos de la masa de suelo y no habrá necesidad de estar incrementando o disminuyendo la carga aplicada en la cabeza del pilote, únicamente será necesario renovar las celdas de deformación (cubos de madera) cuando entre cada capa se tenga una deformación de 2.5 cms.

Con el método de Meyerhof no se establece la carga que será transmitida al suelo considerando sus propiedades de resistencia al corte, únicamente se define cierta carga y el resto se aplica a la cabeza del pilote, esto traerá -- como consecuencia que continuamente se esté variando la carga aplicada en la cabeza del pilote para poder controlar los asentamientos o en caso contrario para evitar que el edificio emerja.

En este método la carga que se transmite al suelo se propuso de 100 ton.

$$y \quad Q_{ah} = 185 \text{ ton}$$

Como podrá verse existe una diferencia muy notoria la razón es muy lógica puesto que con este método no se -- hace un análisis de fricción negativa para determinar la -

carga que deberá transmitirse al suelo, inclusive no se con
sidera algún valor, simplemente se asume que no actúa fric
ción negativa a lo largo del fuste del pilote.

VI. CONCLUSIONES

Mediante el método del Dr. Leonardo Zeevaert se plantean mayor número de parámetros con los cuales se puede obtener la capacidad de carga última de un pilote, dichos parámetros son obtenidos de planteamientos matemáticos físicos que hacen tener una confiabilidad mayor, que un desarrollo absolutamente empírico como se plantea en el método convencional tratado.

Cuestión muy importante es el considerar la fricción negativa que actúa a lo largo del fuste del pilote puesto que se garantiza que mediante este tipo de cimentación en suelos blandos siempre se presentará dicha acción, es decir que el suelo tienda a adherirse y colgarse de los pilotes.

Lo anterior reviste la gran importancia que tiene el poder valuar la FN y de ella determinar la carga q_u que deberá transmitirse al suelo, siempre tomando en consideración las propiedades físicas de este.

Puesto que el método convencional no toma en cuenta ningún valor de FN para el diseño de esta cimentación

con mecanismos de transmisión de carga, se corre el riesgo de provocar asentamientos o demasiado grandes o muy pequeñas en relación con la superficie de suelo de zonas colindantes, debido a esta situación se tendrá que estar continuamente - variando la carga en la cabeza de cada pilote.

Es muy posible y de hecho es lo que se hace en la - práctica el controlar los asentamientos mediante lo anterior mente descrito, pero precisamente lo que plantea el método del Dr. Leonardo Zeevaert es evitar al máximo el estar reali zando variaciones en cuanto a la carga que se transmitirá a la cabeza del pilote, es decir definir de principio la carga a transmitir.

Una forma sencilla de aplicación del método del -- Dr. Leonardo Zeevaert para evitar al máximo hacer demasiados cálculos se detalla a continuación:

- 1) Proponer una distribución de pilotes
- 2) Encontrar las áreas tributarias considerando -
 $\lambda = \beta$
- 3) Proponer un valor de q_a y encontrar los valores de $\sigma_i = \sigma_{oi}$ al nivel d con la expresión III.3.2

- 4) Calcular S_{oi} con los σ_i del punto 3
- 5) Encontrar S_{oi} con $C_{oi} = 0.3q_{ui}$
- 6) Graficar los S_{oi} de los puntos 4 y 5 y comparar que ley de resistencia rige.
- 7) Si rige S_{oi} del punto 4 la q_a es correcta
- 8) Si rige S_{oi} del punto 5 calcular q_a como se describe en las ecuaciones III.3.8 a III.3.11
- 9) Encontrar Q_u con N_q de Zeevaert
- 10) Encontrar la carga por pilote
- 11) Revisar si el factor de seguridad está entre 2 y 3.

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

1. MECANICA DE SUELOS, tomo II - Juárez Badillo y Rico Rodríguez. Ed. Limusa. México D.F., 1982
2. FOUNDATION ENGINEERING FOR DIFFICULT SUBSOIL CONDITIONS. Leonardo Zeevaert. Ed. Van Nostrand Reinhold Company Inc. U.S.A., 1983
3. PRIMER CONGRESO PANAMERICANO DE MECANICA DE SUELOS, Vol. III-Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos. Copyright México, 1960.
4. CONTROL DE LAS CARGAS EN LA CIMENTACION Y DE LOS ASENTAMIENTOS DE EDIFICIOS, MEDIANTE MECANISMOS EN LOS PILOTES.- Javier Salazar Resines, México 1978.
5. PICOSA Propaganda.