

73  
-20j.



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

**FACULTAD DE INGENIERIA**

**"ANALISIS TRIDIMENSIONAL MEDIANTE  
MICROCOMPUTADORA DE UNA PLACA  
DE CIMENTACION PILOTEADA"**

**T E S I S**  
*QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:*  
**INGENIERO CIVIL**  
*P R E S E N T A :*  
**VICTOR MANUEL HERNANDEZ CRUZ**

**MEXICO, D. F. 1 9 8 8 .**



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

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

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

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

## INDICE

### CAPITULO 1 INTRODUCCION

1

### CAPITULO 2 DETERMINACION DE LAS ACCIONES SOBRE LA CIMENTACION

2.1 Tipo de acciones	3
2.2 Transmisión de cargas permanentes y variables	4
2.3 Cuantificación de las acciones accidentales	5
2.3.1 Métodos estáticos	6
2.3.2 Métodos dinámicos	11
2.4 Acciones sobre la cimentación	13
2.4.1 Cimentaciones superficiales	13
2.4.2 Cimentaciones profundas	14

### CAPITULO 3 PLANTEAMIENTO DE LA SOLUCION TEORICA

3.1 Aspectos generales	16
3.2 Criterios de diseño de pilotes de fricción	17
3.2.1 Capacidad de carga por punta en suelos cohesivos	17
3.2.2 Método Alfa en término de esfuerzos totales	18
3.2.3 Método Beta en término de esfuerzos efectivos	20
3.2.4 Método Lambda	25
3.2.5 Solución de Zeevaert	26
3.2.6 Criterio del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, 1987	33
3.2.7 Métodos utilizados a nivel mundial	36
3.3 Mecanismo de transferencia de carga en pilotes de fricción	39
3.3.1 Consideraciones generales	39
3.3.2 Transferencia de carga en arcilla	42
3.4 Método propuesto de cálculo	57
3.4.1 Práctica a nivel mundial	66
3.5 Método de Aschenbrenner para el análisis de grupos de pilotes	68
3.5.1 Hipótesis de trabajo adoptadas	68
3.5.2 Estimación de las fuerzas resultantes	69
3.6 Método de cálculo propuesto	74
3.7 Lineamientos para el cálculo de asentamientos	84

## **CAPITULO 4 DESARROLLO DE LA SOLUCION NUMERICA**

4.1	Resumen	85
4.2	Programa ATRIPILE	87
4.2.1	Algoritmo del método de Aschenbrenner	87
4.2.2	Alcance del programa	88
4.2.3	Variables utilizadas	88
4.2.4	Diagrama de bloques	90
4.2.5	Opciones del programa	90
4.2.6	Datos del programa	93
4.2.7	Impresiones del programa	97
4.2.8	Interpretación de resultados	97
4.2.9	Listado del programa	98
4.3	Programa TRANSCARG	98
4.3.1	Algoritmo para evaluar la carga transferida	112
4.3.2	Alcance del programa	113
4.3.3	Variables utilizadas	114
4.3.4	Diagrama de bloques	115
4.3.5	Opciones del programa	115
4.3.6	Datos del programa	119
4.3.7	Impresiones del programa	122
4.3.8	Listado del programa	122
4.4	Computadora	122

## **CAPITULO 5 APLICACIONES**

5.1	Ejemplo 1 (Edificio de 17 niveles)	131
5.1.1	Descripción del predio y proyecto	131
5.1.2	Estratigrafía y propiedades ingenieriles	131
5.1.3	Análisis de la cimentación	133
5.2	Ejemplo 2 (Aboyo de un puente)	149
5.2.1	Descripción del predio y proyecto	149
5.2.2	Estratigrafía y propiedades ingenieriles	149
5.2.3	Análisis de la cimentación	149

## **CAPITULO 6 CONCLUSIONES**

169

## **REFERENCIAS**

173

# CAPITULO 1

## INTRODUCCION

El análisis de grupos de pilotes es un problema de interacción pilote-suelo muy complejo; rigurosamente, debe considerarse como un todo el sistema pilote-suelo-estructura, pero esto rara vez ocurre, y mientras el análisis de la estructura se lleva a cabo, frecuentemente con un gran refinamiento, los grupos de pilotes son diseñados utilizando un simple criterio estático (por áreas tributarias o utilizando el método del polígono de fuerzas). A pesar de que estos criterios proporcionan estimaciones razonables de las cargas axiales sobre los pilotes bajo cargas verticales y momentos, no predicen correctamente los momentos y cortantes en los pilotes, especialmente bajo carga horizontal. En esta tesis se estudia este problema, planteando inicialmente su solución analítica y después desarrollando un programa para resolverlo mediante microcomputadora personal.

Una de las primeras etapas del análisis y diseño de una cimentación es la determinación de las cargas que actuarán sobre ella, la forma y métodos para estimar esos valores se presentan en el capítulo 2.

Para la evaluación de las cargas que se presentarán sobre cada uno de los pilotes que conforman un grupo, así como para la estimación de los asentamientos que sufrirá, existen diversos enfoques y métodos; estos se pueden dividir (Polo y Clemente, 1988) en los cuatro grupos siguientes:

- a) Métodos empíricos, que simplifican notablemente el problema (Terzaghi y Fekck, 1948; Skempton, 1953; Meyerhof, 1960);
- b) Métodos de transferencia de carga, que describen de que manera el pilote va transfiriendo la carga al suelo con la profundidad (Seed y Reese, 1957; Coyle y Reese, 1966);
- c) Métodos elásticos, que siguen la solución de Mindlin (1933), considerando al suelo como un medio homogéneo, elástico e isótropo, definido con los parámetros  $E_s$  y  $\nu_s$ ; y
- d) Método de los elementos finitos (Ellison et al. 1971; Cooke-Price, 1973; Ottaviani, 1975), que cuantifica los asentamientos del pilote debidos a la deformación axial del mismo, el ocurrido por la carga transferida al suelo a lo largo del fuste y el aportado por la carga transmitida a la punta.

En esta tesis se describe fundamentalmente el método (c) de transferencia de carga, así como la naturaleza del fenómeno de transferencia de carga al suelo en pilotes de fricción; ello se lleva a cabo en el capítulo 3. Se propone un método para evaluar la transferencia de carga, basándose en el procedimiento de Coyle y Reese, pero adecuándolo a las características de la arcilla de la ciudad de México; este método no sólo es aplicable a pilotes de fricción ya que con ciertas consideraciones es válido utilizarlo para pilotes de punta y con presencia de fricción negativa, como se puede ver en el ejemplo 1 del capítulo 5. El capítulo 3 se inicia con la descripción de criterios para el diseño de pilotes de fricción, incluyendo lo estipulado por las Normas Técnicas Complementarias para Cimentaciones (NTCC), del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (RCDF) de 1987.

Para tratar de cubrir, al menos en parte, la diferencia entre el diseño sofisticado de la superestructura y el simple de las cimentaciones piloteadas, es por lo que el presente trabajo se ocupa del desarrollo de un programa de computadora, que efectúa el análisis tridimensional de una placa piloteada, del cual se obtienen las cargas y desplazamientos tanto axial como lateral en la cabeza de los pilotes. Para el efecto, se ha modificado la solución original propuesta por Aschenbrenner, la que no cumplía con la hipótesis que enunciaba de rigidez absoluta de esa placa o losa de cimentación; pero se hace aquella de lo válido para un pilote lo es para el conjunto de ellos. Se ha buscado que el programa sea iterativo, de tal manera que se pueda obtener la mejor localización de los pilotes en el conjunto, y realizar así un diseño más racional y económico de las cimentaciones piloteadas; es posible estudiar los efectos sobre el grupo debidos a la disposición, dimensiones o inclinaciones de los pilotes. Por otra parte, se evalúa el momento de empotramiento de la cabeza de los pilotes, así como la distribución del momento flexionante en la zona cercana a su empotramiento en la losa.

La explicación de la solución numérica se lleva a cabo en el capítulo 4 mediante el diagrama general de bloques del programa, así como la explicación de las constantes y variables utilizadas en el mismo y se anexan los listados correspondientes. Además se desarrolla un manual operativo del programa, con objeto de facilitar su uso.

En el capítulo 5 se realizan 2 ejemplos de aplicación del programa, a casos reales; el primero de ellos trata el caso de una cimentación con pilotes de punta y el segundo se refiere al caso de una cimentación a base de pilotes de fricción.

Finalmente, en el capítulo 6 se exponen las conclusiones obtenidas del presente trabajo.

## CAPITULO 2

### DETERMINACION DE LAS ACCIONES SOBRE LA CIMENTACION

#### 2.1 TIPO DE ACCIONES

Para el diseño de toda estructura, al igual que para la cimentación, es necesario tomar en cuenta todas las acciones que ingenierilmente se considere van a actuar sobre ella, para cierta probabilidad de falla, durante su vida útil. Aparentemente es la etapa más sencilla; sin embargo ofrece el inconveniente de la incertidumbre que tiene su determinación.

Es importante recordar que el diseño de una estructura es un proceso de optimación en que intervienen una serie de variables aleatorias, como son las acciones sobre la estructura.

Las acciones suelen clasificarse según su duración con que actúan sobre la estructura en:

- a) Acciones permanentes
- b) Acciones variables
- c) Acciones accidentales

a continuación se comentan cada una de ellas.

#### a) Acciones permanentes.

Son aquellas que obran en forma continua sobre la estructura. Tanto su localización como magnitud no se modifican con el tiempo. Entre las acciones permanentes se pueden considerar:

- Carga muerta. Incluye el peso propio de la estructura y el de todos aquellos elementos que actúan de manera permanente sobre la misma. Tal es el caso de muros divisorios, fachadas, etc.

- Empuje estático de tierras y líquidos.

- Desplazamientos impuestos a la estructura, tales como los debidos a presfuerzo o a movimientos diferenciales permanentes de los apoyos.

b) Acciones Variables.

- Carga viva. Son aquellas cargas gravitacionales que obran en una construcción y que a diferencia de las cargas muertas, no tienen el carácter de permanentes; se deben, fundamentalmente al peso de personas, mobiliario, mercancía, equipo, etc. y pueden variar en posición y magnitud durante la utilización de la estructura.

- Efectos de cambios de temperatura y contracciones.

- Efectos de operación de maquinaria y equipo. La operación de algunas máquinas o equipo originan acciones dinámicas que merecen considerarse cuando tales máquinas están presentes.

c) Acciones Accidentales.

Son aquellas que no se deben al funcionamiento normal de la construcción y que pueden alcanzar intensidades significativas sólo durante lapsos breves, se caracterizan porque se desconoce la intensidad y el momento en el que van a actuar sobre la estructura.

Entre las principales acciones accidentales se pueden mencionar las siguientes:

- Acciones dinámicas originadas por los sismos.

- Efectos por viento.

Además de las acciones anteriores, dentro de este grupo se pueden considerar las inundaciones, incendios, etc.; sus posibles efectos deberán ser evaluados y de ser necesario tomarlos en cuenta, para evitar el colapso de la estructura, en caso de que se presenten.

## 2.2 TRANSMISION DE CARGAS PERMANENTES Y VARIABLES

El proceso de transmitir cargas, partiendo del elemento más simple, como es la losa hasta llegar a la cimentación, a través de las columnas, se denomina "bajar cargas". Este procedimiento permite obtener las cargas muertas y vivas que actúan sobre un elemento estructural.

El proceso que se sigue, se describe a continuación.

1. Especificación de las cargas.

En esta etapa se evalúan todas aquellas acciones que actuarán en la estructura. Incluye los pesos de los elementos estructurales (losa, traveses y columnas), acabados, sobrecargas y carga viva de acuerdo al uso de la estructura.

Con respecto a la carga viva, el Reglamento de Construcciones del Distrito Federal incluye tres valores de la misma, dependiendo del tipo de análisis que se realice; así se tiene que para diseño por cargas gravitacionales se utiliza el valor de carga viva máxima  $W_m$ ; para diseño sísmico la carga viva instantánea  $W_a$ , y la carga viva media  $\bar{W}$  se debe emplear en el cálculo de asentamientos diferidos en materiales poco permeables (limos y arcillas) saturados.

2. Obtención de áreas tributarias.

El procedimiento en losas apoyadas perimetralmente (si la relación de claro largo a claro corto es menor o igual a 1, en un tablero) consiste en trazar por cada una de las esquinas que forman un tablero, líneas a 45° y cada una de las cargas que actúa en el triángulo o trapecio se aplicará sobre la viga que coincide con el lado correspondiente.

Para el caso de columnas, sobre las cuales se realiza la bajada de cargas hasta la cimentación, se asignan áreas de forma rectangular en cuyo centro se localiza la columna a la cual se le asignará la carga que actúa en la zona antes delimitada.

3. Del paso anterior, se obtienen las cargas que actúan en cada tramo de viga y a partir de estos valores, previo análisis estructural de cada marco considerado, se tendrán los elementos mecánicos en cada miembro (momento flexionante, fuerza cortante y fuerza normal) y reacciones en los apoyos.

Con el procedimiento anterior se obtiene la acción vertical, debida al peso propio de la estructura, sobre la cimentación y también momentos de volteo, producto de excentricidades existentes entre el centroide de la reacción de la cimentación y el centro de cargas.

### 2.3 CUANTIFICACION DE LAS ACCIONES ACCIDENTALES

De las acciones accidentales que se comentarán, será únicamente las debidas a sismo.

Todas las estructuras se analizarán, suponiendo que el sismo actuará según dos direcciones ortogonales, que deben

coincidir con las de los marcos principales. En el caso de estructuras con planta irregular se puede requerir análisis en otra dirección adicional. La estructura se diseñará para resistir las fuerzas por sismo, en cada una de las direcciones señaladas, por separado. En los elementos estructurales, las secciones críticas se diseñarán para resistir la suma vectorial de los efectos gravitacionales, los de una componente del movimiento sísmico y un 30% de los de la otra componente ortogonal.

Los métodos de análisis sísmico utilizados para determinar las fuerzas sísmicas en estructuras, se pueden clasificar en dos grupos: los estáticos y los dinámicos; brevemente se describen a continuación.

### 2.3.1. Métodos Estáticos

Estos métodos son aproximados, y han sido desarrollados debido a la dificultad que se presentaba en la práctica de llevar a cabo el análisis dinámico detallado de la estructura; pero, actualmente esa limitación ha sido salvada debido al acelerado desarrollo de la computación, que ha puesto al alcance del ingeniero las computadoras personales. Todos los códigos de construcción, que permiten la utilización de estos métodos conducen, de forma muy simple, a la obtención de las fuerzas sísmicas, basándose para ello en la Segunda ley de Newton.

El objeto que se persigue al realizar el análisis sísmico, es el de obtener una estructura con determinada resistencia lateral, capaz de resistir un movimiento sísmico sin sufrir daños estructurales importantes.

En el análisis estático se considera que las fuerzas horizontales actúan en los puntos en los que se suponen concentradas las masas de la estructura. Cada una de las fuerzas se obtiene con el producto del peso de la masa correspondiente, por un pseudocoficiente sísmico que considera una variación lineal de la aceleración,  $a$ , desde un valor nulo en la base o nivel a partir del cual las deformaciones de la estructura pueden ser apreciables, hasta un máximo en el extremo superior. A continuación se determina la expresión indicada por el Reglamento de Construcciones del Distrito Federal, para el cálculo de las fuerzas.

Supongamos que a la siguiente estructura (Fig. 2.1) se aplicará el criterio de análisis sísmico estático; de la Segunda ley de Newton resulta que la fuerza aplicada en un piso cualquiera  $i$ , es:

$$F_i = m_i a_i$$

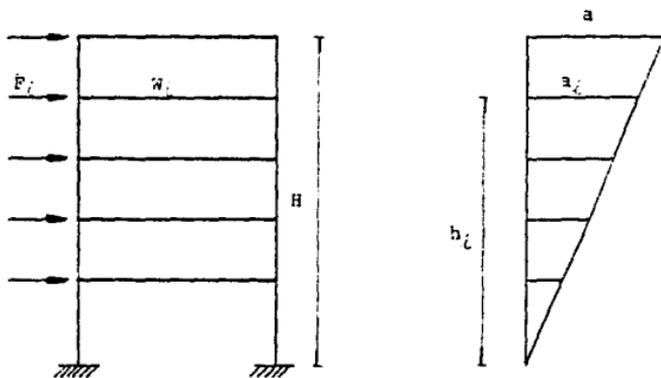


Fig. 2.1 Acciones sísmicas sobre una estructura

$$F_k = \frac{W_k}{g} a_k = \frac{W_k}{g} \frac{h_k}{H} a \quad (2.1)$$

La fuerza cortante en la base es

$$V = \sum F_k = \frac{a}{gH} \sum W_k h_k \quad (2.2)$$

Por otro lado tenemos que

$$V = c W_T = c \sum W_k \quad (2.3)$$

igualando las ecs. 2.2 y 2.3

$$\frac{a}{gH} \sum W_k h_k = c \sum W_k$$

$$\frac{a}{H} = g c \frac{\sum W_k}{\sum W_k h_k}$$

sustituyendo en la ec. 2.1.

$$F_k = W_k h_k \frac{c \sum W_k}{\sum W_k h_k} \quad (2.4)$$

Dentro de este método se tienen las siguientes modalidades:

- i) Estático simplificado,
- ii) Estático común, y
- iii) Estático tomando en cuenta el período del 1er modo de vibrar

#### 1) Estático Simplificado

En esta modalidad del método estático, se revisa que la resistencia al corte de la estructura sea satisfactoria, haciendo caso omiso de los desplazamientos horizontales, torsiones y momentos de volteo.

Será aplicable al análisis de edificios que cumplan simultáneamente los siguientes requisitos establecidos por el RCDF-87 en sus NTC-Sismo.

I. 75% de las cargas verticales serán soportadas por muros y los cuales estarán ligados entre sí mediante losas corridas. En cada nivel existirán por lo menos dos muros perimetrales de carga paralelos entre sí o que formen un

angulo no mayor de 20° y ligados por una losa por lo menos en un 50% de su longitud, medidos a lo largo del muro.

II. La relación entre longitud y ancho de la planta del edificio no excederá de 2, es decir  $L/B < 2$ .

III. La relación entre la altura y la dimensión mínima de la base del edificio no excederá de 1.5 y la altura no será mayor de 13.00 m.

La fuerza aplicada en cada nivel será la indicada en la ecuación 2.4.

Por lo anterior se puede concluir que el método es aplicable a edificaciones estructuradas a base de muros, únicamente.

#### ii) Estático común.

Esta modalidad del método es utilizado en estructuras que no cumplan los requisitos anteriormente indicados, como es el caso de edificios a base de marcos rígidos. Sin embargo en este procedimiento es necesario calcular, además de la resistencia al corte de la estructura, los momentos de volteo, momentos torsionantes y desplazamientos que sufrirá.

Para efectuar el análisis de una estructura se procede:

I. Determinar la ordenada espectral del espectro de diseño a utilizar,

$$S_e = \max(c/Q, a_0)$$

[léase la mayor entre las dos]

donde

c coeficiente de diseño sísmico

Q factor de comportamiento sísmico

a<sub>0</sub> ordenada de los espectros de diseño

II. Calcular la fuerza sísmica que actuará en cada nivel, con la expresión

$$F_i = W_i h_i \frac{S_e \sum W_i}{W_i h_i}$$

III. Determinar el punto donde estará aplicada la fuerza cortante en cada nivel; dicho punto se denomina centro de masa.

IV. Localizar el centro de rigidez de cada nivel, que será el centroide de las rigideces de los elementos resistentes, también llamado centro de torsión.

V. Cálculo del momento torsionante en cada nivel, que será igual al producto de la fuerza cortante por la distancia que existe entre el centro de torsión y la fuerza cortante en dicho nivel. Dicha distancia, para fines de diseño se tomará la más desfavorable de las siguientes:

$$e_{d1a} = 1.5 e_{cent} + 0.1b$$

$$e_{d1a} = e_{cent} - 0.1b$$

VI. Distribuir la fuerza cortante y momentos torsionantes a los distintos elementos resistentes en cada nivel.

$$\text{Efecto directo} \quad V_{LD} = V_T \frac{K_x}{\sum K_x}$$

$$\text{Efecto de torsión} \quad V_{LT} = M_T \frac{K_x d}{J_T}$$

$$\text{donde} \quad J_T = \sum (K_{Lx} \bar{y}^2 + K_{Ly} \bar{x}^2)$$

VII. Cálculo del momento de volteo.

VIII. Combinación de los efectos de dos direcciones ortogonales.

IX. Cálculo de los desplazamientos que sufrirá la estructura.

iii) Estático tomando en cuenta el período del 1er modo de vibrar.

Este procedimiento sigue los mismos pasos del estático común, pero también se calcula el valor aproximado del período fundamental de vibración de la estructura, lo cual permite adoptar fuerzas cortantes usualmente menores que las calculadas; esto último dependiendo del valor de su período fundamental, respecto a los períodos característicos del espectro de diseño de la zona en la que se encuentre la estructura.

El período fundamental de vibración,  $T$ , se tomará igual a;

$$T = 0.3 \left( \sum W_i x_i^2 / g \sum P_i x_i \right)^{1/2}$$

donde

$W_i$  peso de la masa  $i$

- P, fuerza horizontal que actúa sobre la masa i
- x, desplazamiento de la masa i en dirección de la fuerza i
- g aceleración de la gravedad

### **2.3.2. Métodos Dinámicos**

En general los métodos de análisis estático da tan sólo una solución aproximada del problema, por lo que dejan al calculista con cierta duda acerca del posible comportamiento de la estructura, cuando ésta es compleja y/o de grandes dimensiones, por lo cual se recomienda realizar un análisis dinámico de la misma. Muchas autoridades demandan el uso de métodos dinámicos para estructuras de cierto tipo y tamaños, como es el caso del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal, que establece la obligación de analizar estructuras cuya altura sea mayor de 60.00 m mediante un método dinámico.

Existen varios métodos de diferente complejidad que han sido desarrollados para el análisis sísmico de estructuras; sin embargo, el Reglamento especifica como métodos de análisis dinámico los siguientes:

- i) Cálculo paso a paso de la respuesta estructural, y
- ii) Análisis modal elástico

#### **i) Análisis paso a paso**

Este método permite realizar el análisis más consistente y complejo de cualquier movimiento sísmico. Estima como responde la estructura conforme llega el sismo, al aplicarle la función excitadora dependiente del tiempo (acelerograma del sismo). A pesar de ser la técnica de análisis dinámico más completa hasta ahora, desafortunadamente es muy costoso su empleo, lo cual ocasiona que en la ingeniería práctica sea poco o nulo su uso.

#### **ii) Análisis modal elástico**

Esta técnica es más limitada que la anterior, ya que se considera una separación artificial de los modos naturales de vibración, para después por superposición combinar fuerzas y desplazamientos asociados a un número elegido de esos modos. Con el análisis modal se puede obtener cualquier

grado de precisión, calculando todos los modos de vibración, sin embargo, con objeto de ahorrar tiempo de cálculo generalmente se toman en cuenta los tres primeros modos naturales de vibrar de una estructura.

Para conocer el modo de vibrar de una estructura se requiere conocer tanto la frecuencia  $\omega$  (o período T) como la configuración modal relativa; si una estructura está vibrando en un modo, todas las masas que la componen tendrán un mismo valor de la frecuencia  $\omega$  del movimiento.

Tomando en cuenta lo anterior, se pueden emplear dos métodos numéricos para el cálculo de las frecuencias y configuraciones modales y que son:

**- Método de Stodola-Vianello-Newmark**

El método consiste en suponer razonablemente una configuración deformada de la estructura para el primer modo, a partir de la cual se estiman las fuerzas de inercia asociadas, además de las fuerzas cortantes en la estructura, con las cuales se obtiene una configuración calculada y a partir de ella se puede estimar el valor de la frecuencia del modo de vibrar de la estructura, el método converge siempre al modo fundamental o primero. Si se quiere calcular el segundo modo de vibrar empleando este método, se tendrá que quitar a la configuración supuesta la participación del primer modo.

**- Método de Holzer**

El método de Stodola-Vianello-Newmark supone una configuración relativa y a partir de la cual se calcula la frecuencia del modo de vibrar. Holzer procede al revés; esto es, supone la frecuencia y a partir de ella se calcula la configuración relativa de abajo hacia arriba de la estructura. Este método sirve para calcular cualquier modo natural de vibración teniendo como datos las masas y las rigideces de entropiso de la estructura.

Finalmente, al utilizar cualesquiera de los dos tipos de análisis sísmico, se obtienen los efectos principales en una estructura productos de un sismo y que son:

- Fuerzas cortantes
- Momentos de volteo del conjunto
- Momentos torsionantes en planta
- Desplazamientos laterales

## 2.4 ACCIONES SOBRE LA CIMENTACION

Todas las obras de Ingeniería Civil, como edificios, puentes, presas, caminos, canales, etc., se desplantan sobre o bajo la superficie del terreno y requieren de una cimentación apropiada que proporcione seguridad y buen comportamiento a costos razonables.

Cuando una estructura responde ante un sismo se producen en su base esfuerzos de interacción con el suelo. Los esfuerzos resultantes sobre la cimentación pueden expresarse en su forma más simple mediante un sistema constituido por dos fuerzas cortantes horizontales ortogonales, una fuerza vertical, dos momentos de volteo con respecto a dos ejes horizontales ortogonales localizados en el plano de la cimentación, y un momento torsionante con respecto a un eje vertical.

El cometido esencial de una cimentación durante un sismo es transmitir adecuadamente al suelo las acciones resultantes de las fuerzas inerciales generadas por el temblor en la superestructura (momentos de volteo y fuerzas cortantes), y soportar apropiadamente los esfuerzos provenientes de las deformaciones del suelo circundante.

Cuanto más esbelto sea un edificio tendrá mayores problemas debidos al momento de volteo en un sismo (Dowrick sugiere que la relación de esbeltez no pase de cuatro), cuando sea este el caso debe ponerse cuidado en que se conserven las presiones de contacto máximas debidas a los momentos de volteo y cargas por gravedad, dentro de valores tales que no excedan la resistencia al corte del subsuelo (Fig. 2.2); así como las deformaciones inducidas no sobrepasen el rango de comportamiento elástico del subsuelo, con objeto de que los asentamientos y desplomes del edificio no sean excesivos y se mantengan dentro de ciertos límites aceptables, como lo establecen las NTCC-87 en la Tabla II.

### 2.4.1. Cimentaciones Superficiales

En este tipo de cimentaciones es usual suponer que la mayoría de la resistencia a la carga lateral la proporciona la fricción entre el suelo y la base de los elementos que resisten la carga lateral. Así, la resistencia total al movimiento de la estructura puede tomarse igual al producto de la carga muerta más la carga viva media de la estructura, multiplicada por el coeficiente de fricción correspondiente.

En suelos relativamente blandos es particularmente difícil evitar los desplazamientos diferenciales horizontales y ver-

tales durante un temblor, por ello es necesario ligar entre sí las zapatas aisladas mediante trabes.

#### 2.4.2. Cimentaciones Profundas

Las cimentaciones profundas normalmente constan de un cajón, cuya resistencia y rigidez naturales son útiles para distribuir las fuerzas sísmicas en el suelo, evitando desplazamientos diferenciales.

Cuando se presenta un sismo, un edificio cimentado sobre pilas o pilotes se ve sujeto a una serie de efectos ocasionados por el movimiento telúrico. Entre las principales acciones, ya indicadas anteriormente, se encuentran el momento de volteo y la fuerza horizontal sobre la subestructura.

Los procedimientos para determinar el momento de volteo y la fuerza horizontal, se explicaron en el inciso 2.3, los que se encuentran actualmente bastante desarrollados.

El momento de volteo ocasiona un incremento de carga en los pilotes o pilas individuales dependiendo de su posición con relación a los demás. En particular las pilas o pilotes colocados en la periferia de la cimentación, y más aún los ubicados en las esquinas, pueden verse sometidos a cargas axiales de tensión o compresión elevadas. Con frecuencia, se valua éste incremento (positivo y negativo) por medio de la fórmula de la escuadría.

Las fuerzas horizontales de arrastre inducidas por movimientos fuertes del terreno, provocan un desplazamiento relativo de los pilotes respecto del edificio y del suelo, Fig. 2.3; dicho desplazamiento ocasiona que se presente sobre éstos una reacción repartida del suelo. Lo anterior genera fuerzas cortantes y momentos flexionantes de consideración, lo que puede causar daños en los pilotes, sobre todo en su mitad superior, cuando no cuentan con el suficiente acero de refuerzo.

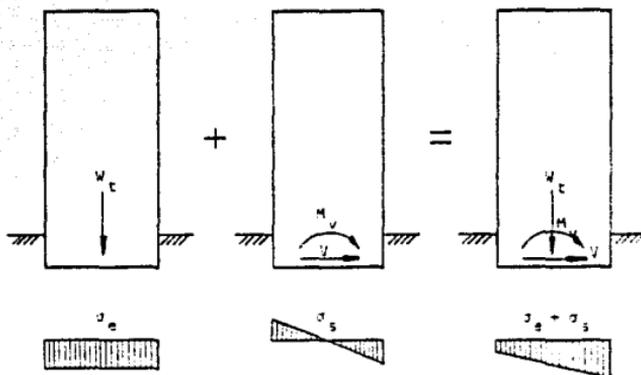


Fig. 2.2 Efectos inducidos por la cimentación al suelo

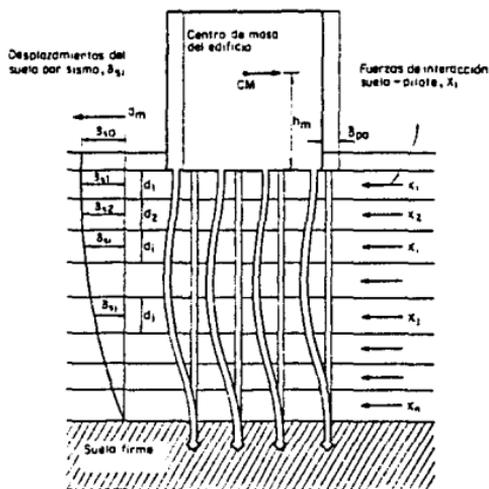


Fig. 2.3 Arrastre sísmico de una cimentación piloteada (Zeevaert, 1984)

## CAPITULO 3

### PLANTEAMIENTO DE LA SOLUCION TEORICA

#### 3.1 ASPECTOS GENERALES

Cuando el terreno de apoyo donde se pretende realizar una obra presenta estratos con características sobres tales como baja capacidad de carga y alta compresibilidad, el ingeniero se ve en la necesidad de buscar estratos más resistentes para apoyarla, conduciendolo a utilizar una cimentación profundajo sean pilotes o pilas. Los pilotes de acuerdo a su forma de transmitir la carga se clasifican en: de punta y de fricción.

Los pilotes de fricción son aquellos que transfieren la carga al suelo principalmente a través de su superficie lateral, y su punta no se apoya en los estratos resistentes subyacentes. Se emplean normalmente cuando el estrato superior blando es de gran espesor, lo que hace antieconómico usar pilotes de punta o cuando el estrato induce fricción negativa en los pilotes de punta ocasionando su aparente emersión. Este último fenómeno es el que se observa en la zona de lago de la ciudad de México, debido al hundimiento regional que se presenta.

Cuando se hinca un pilote, se ocasionan cambios en los esfuerzos iniciales y en las propiedades de resistencia y deformabilidad de la masa de suelo cercana al pilote; por lo tanto, las características del suelo que influyen en el comportamiento de una cimentación pilotada serán diferentes a las originales. Lo anterior queda de manifiesto cuando se hincan pilotes en arcilla saturada, el suelo cerca del pilote es desplazado y remoldeado hasta una distancia de aproximadamente de un diámetro del pilote; Zeevaert (1974) ha encontrado que el remoldeo completo del material tiene lugar a una distancia de 0.4 del radio del pilote a partir de su fuste y las alteraciones continúan con menor grado hasta cerca de un diámetro de distancia. Debido a las alteraciones inducidas por el hincado, la resistencia del suelo cercano al fuste se ve reducida a un 60% de la original (Zeevaert, 1974). Sin embargo, después del hincado la arcilla adyacente sufre una reconsolidación y posteriormente presenta una

resistencia al corte que usualmente es, incluso, mayor que la obtenida en especímenes inalterados muestreados antes del hincado. Seed y Reese (1957) reportaron un incremento del 60%; Peck (1966), un 50% y Cooke (1979), un 60%.

En éste capítulo se mencionará en que forma afectan las alteraciones anteriormente indicadas en el comportamiento de los pilotes de fricción. Es práctica común considerar que la transferencia de carga se lleva a cabo en forma uniforme a lo largo del pilote; sin embargo, es errónea tal suposición como se verá más adelante al tratar este fenómeno. Además se propone un método de cálculo de la carga transferida, basándose en el método iterativo de Coyle y Reese (1966), el cual no sólo es aplicable a pilotes de fricción ya que con ciertas consideraciones, tales como la carga por punta constante en cada iteración que se realice y estimada con alguna teoría. Se dan los lineamientos para el cálculo de asentamientos en cimentaciones con este tipo de pilotes, considerando el fenómeno de transferencia de carga.

Finalmente, se mencionan las hipótesis en las que se basó Aschenbrenner para desarrollar su método de análisis tridimensional de grupos de pilotes. Este método toma en cuenta las características del suelo, al considerar como valores importantes, para el método, la carga axial máxima y lateral que soporta el pilote. A este método se le hicieron ciertas modificaciones para tomar en cuenta adecuadamente la hipótesis indicada de rigidez de la losa, la cual no está implícita en la solución, ya que el original arroja el resultado de cargas iguales en cada pilote vertical de un grupo de ellos sometidos a carga axial vertical, lo que sólo se acepta en el caso de una losa flexible.

## 3.2 CRITERIOS DE DISEÑO DE PILOTES DE FRICCIÓN

### 3.2.1 Capacidad por punta en suelos cohesivos

Como se sabe la capacidad de carga última de un pilote,  $P_u$ , en un suelo homogéneo se puede expresar como la suma de la resistencia por punta  $P_p$  y la resistencia por fricción lateral  $P_f$ ; es decir:

$$P_u = P_p + P_f \quad (3.1)$$

La carga última por punta en un suelo cohesivo homogéneo se puede obtener con suficiente aproximación con la expresión siguiente:

$$P_p = c_u N_c A_b \quad (3.2)$$

donde

$c_u$  resistencia al esfuerzo cortante no drenada

$N_c$  coeficiente de capacidad de carga.

El coeficiente  $N_c$  es función del ángulo de fricción interna del suelo.

Para estimar la carga última por fricción lateral a continuación se describen los métodos utilizados.

### 3.2.2 Método Alfa en término de esfuerzos totales

Es el método convencional para el cálculo de la capacidad de carga de pilotes, en el cual se hace uso de la resistencia al esfuerzo cortante no drenada de la arcilla, tanto para la capacidad por punta como para la capacidad por fricción lateral.

La carga última por fricción lateral se calcula a partir de la adherencia máxima que puede presentarse en el contacto pilote-suelo,

$$P_s = c_a A_L \quad (3.3)$$

Para suelos arcillosos blandos, ésta adherencia se estima como:

$$c_a = \alpha c_u \quad (3.4)$$

donde

$\alpha$  coeficiente empírico que modifica la resistencia al esfuerzo cortante,  $c_u$

$c_a$  adherencia o fricción lateral a lo largo del fuste del pilote

El coeficiente empírico  $\alpha$  relaciona la adherencia promedio que se presenta a lo largo del fuste con la resistencia al esfuerzo cortante,  $c_u$ . Dicho coeficiente depende de las características del suelo y pilote tales como naturaleza y resistencia de la arcilla, dimensiones y método de instalación del pilote, tiempo transcurrido desde el hincado y otros factores. El valor de  $\alpha$  varía dentro de un amplio intervalo, decrece conforme la resistencia de la arcilla se incrementa; en la Fig. 3.1 se puede observar que para arcillas blandas el valor máximo es de 1.25, mientras que en las duras es de 0.3 el mínimo. Como se sabe, en las arcillas

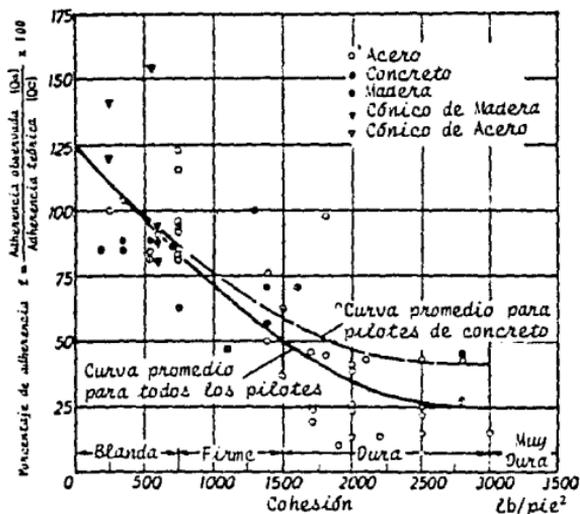


Fig. 3.1 Relación de la adherencia observada con la cohesión de la arcilla, para diferentes pilotes (Tomlinson, 1957)

blandas saturadas la zona remoldeada sufre una reconsolidación, como consecuencia su resistencia al corte se incrementa y la adherencia entre el suelo y pilote también; por lo tanto, el factor en estas condiciones será mayor que uno.

En el caso de arcillas firmes y duras la resistencia al esfuerzo cortante, después del hincado, puede ser incluso menor que la presentada por el suelo en condiciones inalteradas, por lo que el factor  $\alpha$  será menor que uno.

Tomlinson (1957) después de analizar los resultados de un gran número de pruebas de pilotes llegó a proponer valores de la adherencia para ciertos tipos de pilotes y condiciones de suelo, como se indica en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1

Material del pilote	Cohesión (lb/pie <sup>2</sup> )	Adherencia (lb/pie <sup>2</sup> )
Concreto y madera	Blanda 0 - 750	0 - 700
	Firme 750 - 1500	700 - 900
	Dura 1500 - 3000	900 - 1300
Acero	Blanda 0 - 700	0 - 600
	Firme 750 - 1500	600 - 750
	Dura 1500 - 3000	Inconcluso

Pero es importante indicar que dichos valores fueron determinados bajo ciertas condiciones de carga, tipo de suelo y pilote, por lo que se han de tomar con cierta reserva al extrapolar o aplicarlos en casos particulares.

### 3.2.3 Método Beta en término de esfuerzos efectivos

Como ya se mencionó, durante la instalación de un pilote, el suelo adyacente sufre remoldeo, generándose incremento en la presión de poro. Sin embargo, al cargar el pilote la presión en exceso se disipa, presentándose la reconsolidación del suelo y por lo tanto un incremento en su resistencia; dicho incremento ocurre durante el primer mes después del hincado (Terzaghi y Peck, 1967; Fig. 3.2), pero este tiempo puede variar dependiendo de la naturaleza del suelo. Por lo tanto, la resistencia debida a fricción lateral estará en función del valor de los esfuerzos efectivos, ya que estos aumentan conforme el suelo se reconsolidada alrededor del pilote; por lo que es necesario conocer los parámetros de resistencia del suelo en condiciones drenadas.

Burland (1973) considera que la fricción lateral debe estimarse en término de esfuerzos efectivos, la cual está dada por la siguiente expresión:

$$f_e = \sigma_h \tan \delta \quad (3.5)$$

donde

$\sigma_h$  es el esfuerzo horizontal efectivo actuando sobre el pilote

$\delta$  es el ángulo efectivo de fricción entre la arcilla y el fuste del pilote

Sin embargo, es necesario introducir una hipótesis simplificatoria que considera al esfuerzo horizontal efectivo proporcional al esfuerzo vertical efectivo  $\bar{\sigma}$ , tal que

$$\sigma_h = K \bar{\sigma} \quad (3.6)$$

Con lo cual, la fricción lateral queda expresada como:

$$f_e = K \bar{\sigma} \tan \delta \quad (3.7)$$

en la cual

$$\beta = K \tan \delta \quad (3.8)$$

$$f_e = \beta \bar{\sigma} \quad (3.9)$$

Aquí se puede ver que  $\beta$  se define a partir de los parámetros efectivos  $K$  y  $\delta$ .

La magnitud del coeficiente  $K$  depende del tipo de suelo, de la historia de cargas a la que se ha visto sometido y el método utilizado para instalar el pilote, mientras que  $\delta$  depende del tipo de suelo y del tipo de pilote utilizado.

Considerando que la falla se presenta en el suelo remoldeado cerca del fuste (Burland, 1973), ello implica que  $\delta = \phi'_s$ , donde  $\phi'_s$  es el ángulo de fricción interna del suelo en condición drenada y remoldeada. Tanto para pilotes excavados como hincados en una arcilla blanda, el coeficiente  $K$  de presión de tierra sobre el pilote se espera sea igual al coeficiente en reposo  $K_0$ . Como se sabe  $K_0$  relaciona el esfuerzo horizontal con el vertical en condiciones de reposo, es decir, el suelo no está sujeto a perturbación alguna. Sin embargo, cuando se hince un pilote el suelo se desplaza lateralmente, esto inducirá un incremento en los esfuerzos horizontales y consecuentemente

la relación entre esfuerzo horizontal y vertical; por lo tanto, el valor correcto de  $K$  y que ha sido observado es ligeramente mayor que  $K_0$ . Al hacer  $K = K_0$  se está fijando un límite inferior a la fricción lateral. Para arcillas normalmente consolidadas en las que  $K_0 = 1 - \text{sen } \phi_r$ , el factor de fricción lateral,  $\beta$ , puede expresarse como

$$\beta = (1 - \text{sen } \phi_r) \tan \phi_r \quad (3.10)$$

Los valores de  $\phi_r$  se encuentran comprendidos entre  $20^\circ$  y  $30^\circ$ , para arcillas normalmente consolidadas, pero es importante hacer notar que dentro de éste amplio intervalo, el valor de  $\beta$  varía de 0.24 a 0.29 como se puede observar en la Fig. 3.3, lo cual indica que el valor de  $\beta$ , para arcillas blandas, no es muy sensible al valor de  $\phi_r$ .

Zeevaert (1974) considera la fricción lateral, también en función del esfuerzo horizontal efectivo y de los parámetros de resistencia del suelo en condiciones drenadas y remoldeadas; sin embargo, si toma en cuenta que el sistema pilote-suelo se encuentra en estado de falla, por lo que el factor de fricción lateral está definido a partir de éstas condiciones. Expresando la fricción lateral como:

$$s_{\text{m}} = K_p \bar{\sigma}_z \quad (3.11)$$

donde

$$K_p = \frac{1 - \text{sen}^2 \phi_r}{1 + \text{sen}^2 \phi_r} \tan \phi_r = \beta \quad (3.12)$$

y

$\bar{\sigma}_z$  esfuerzo vertical efectivo al nivel :

$\phi_r$  ángulo de fricción interna efectivo de la arcilla remoldeada

$\tan \phi_r$  coeficiente de fricción entre suelo y pilote

$\phi_r$  ángulo de fricción entre la arcilla remoldeada y el fuste del pilote

Burland recomienda que el valor del factor de fricción lateral,  $\beta$ , para pilotes hincados en arcillas blandas y medianas sea tomado como 0.3; Meyerhof (1976), por su parte sugiere dicho valor cuando la longitud de pilote embebida no exceda de 15 m, mientras que para longitudes que excedan los 60 m, el valor de  $\beta$  se reducirá a 0.15 como se observa en la Fig. 3.4.

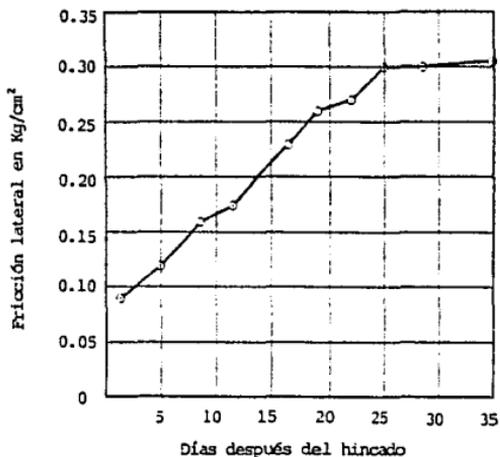


Fig. 3.2 Ganancia de resistencia por fricción lateral de un pilote con el tiempo (Terzaghi y Peck, 1967)

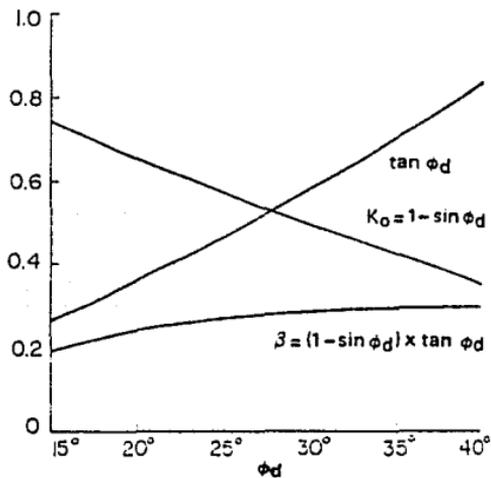


Fig. 3.3 Relación entre  $\phi$  y  $\beta$  para arcillas normalmente consolidadas. (Burland, 1973)

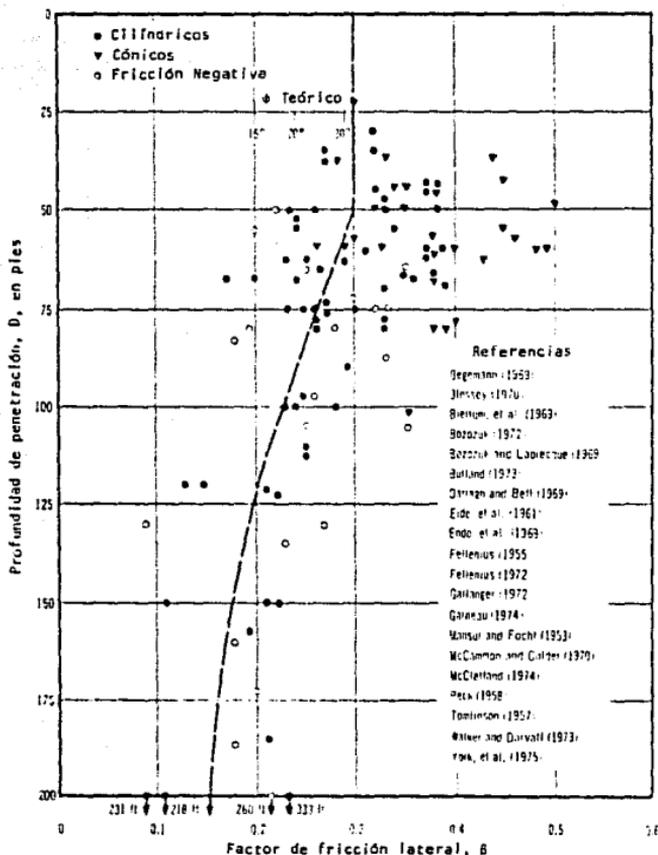


Fig. 3.4 Factor de fricción lateral, positiva y negativa, de pilotes hincados en arcilla blanda y mediana, (Meyerhof, 1976)

Zeevart ha encontrado que para pilotes que no estén cubiertos con algún lubricante (asfalto, mezclas de bentonita, etc) se puede considerar que  $\phi_r = \phi_p$  (lo que implica que la falla se presente en el suelo) y por lo tanto para el intervalo de valores de  $\phi_r$  comprendidos entre 25° y 30°, el valor de  $K_p$  no cambiará mucho, Fig 3.5. Pruebas realizadas con arcilla remoldeada de la ciudad de México han mostrado valores de  $\phi_r$  del orden de los 26°; sin embargo, el valor de  $K_p$  se debe reducir cuando el pilote esté cubierto con algún lubricante (Fig. 3.5).

### 3.2.4 Método Lambda

Un criterio diferente para calcular la capacidad de carga última debida a fricción lateral,  $f_m$ , han adoptado Vijayvergiya y Focht (1972) para pilotes de tubo metálico. A partir del análisis de una serie de pruebas de carga realizadas en tales pilotes, llegaron a la conclusión de que  $f_m$  puede expresarse como sigue:

$$f_m = \lambda (\sigma_m + 2c_m) \quad (3.13)$$

$$P_m = \lambda (\sigma_m + 2c_m) A_L \quad (3.14)$$

donde

$\sigma_m$  esfuerzo vertical efectivo medio entre la superficie y la punta del pilote

$c_m$  resistencia promedio al esfuerzo cortante en condiciones no drenadas a lo largo del pilote

$A_L$  área lateral del pilote

$\lambda$  coeficiente adimensional

$P_m$  carga por fricción lateral

El factor de adherencia pilote-suelo está dado por:

$$c_m / c_m = \lambda (\sigma_m / c_m + 2) \quad (3.15)$$

$\lambda$  se encontró como una función de la penetración del pilote, como se muestra en la Fig. 3.6.

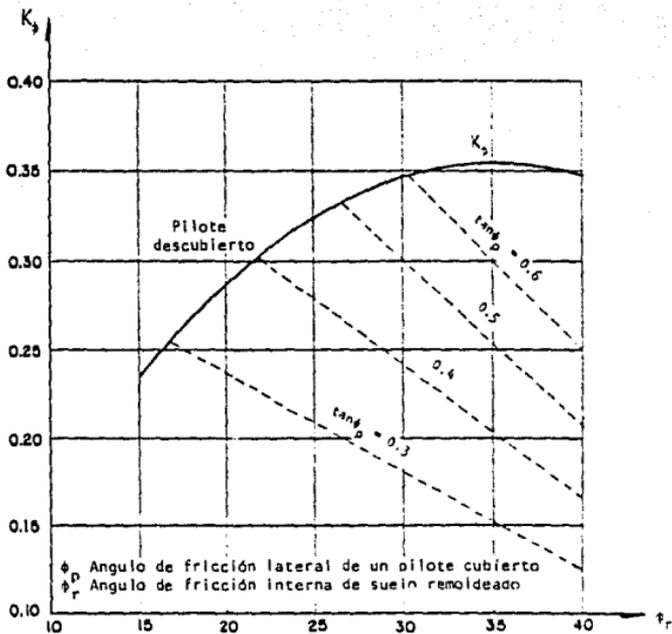


Fig. 3.5 Valores de  $K_p$  para pilotes revestidos y no revestidos. (Zeevaert, 1974)

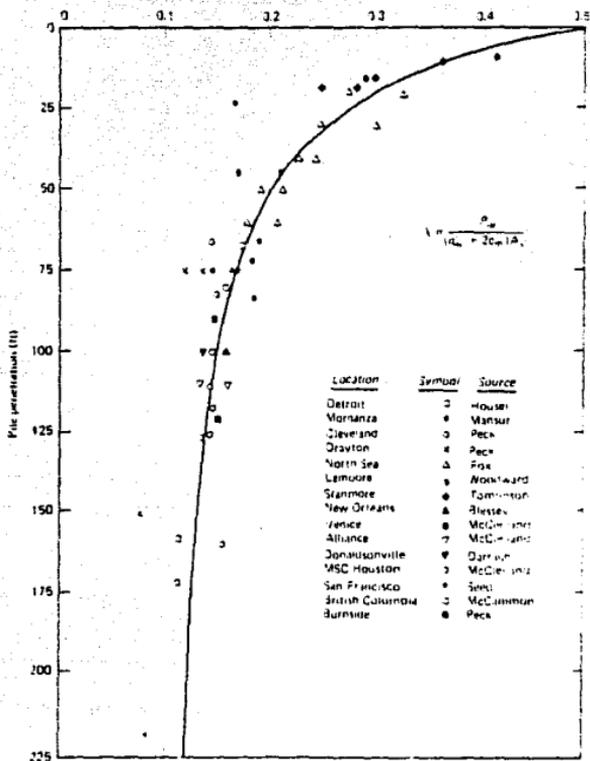


Fig. 3.6 Coeficiente de fricción lateral  $\lambda$  contra la longitud embebida del pilote (Vijayvergiya y Focht, 1972)

### 3.2.5 Solución de Isevaert

Quando a un pilote que trabaja por fricción positiva se le aplica una carga, el suelo soportará ésta acción por medio de la fricción lateral que se genera entre la superficie lateral del pilote y el suelo circundante, pero al mismo tiempo esta fricción desarrollada ocasiona un incremento en los esfuerzos verticales iniciales del suelo. La distribución de esfuerzos se muestran en la Fig 3.7.

En condiciones de carga última del pilote, se pueden establecer las ecuaciones de equilibrio y de resistencia al esfuerzo cortante. La resistencia al esfuerzo cortante promedio en un elemento  $\Delta z$  a la profundidad  $z$  tiene el valor

$$s_{oi} = c_i + K_{\phi i} \frac{\sigma_i + \sigma_{i-1}}{2} \quad (3.16)$$

donde ya se considera que debido a la transferencia de carga que se presenta, la resistencia al esfuerzo cortante se ve incrementada.

El cortante transferido a la masa de suelo es

$$(\sigma_i - \sigma_{oi})a_i - (\sigma_{i-1} - \sigma_{oi-1})a_{i-1} = w s_{oi} \Delta z_i \quad (3.17)$$

donde

$a_i$  área tributaria del pilote al nivel  $i$

$w$  perímetro del pilote

que representa la ecuación de equilibrio del elemento  $\Delta z$ .

Y la interacción que se presenta entre los esfuerzos verticales y la fricción positiva está dada por

$$(PF)_{i-1} = (\sigma_{i-1} - \sigma_{oi-1})a_{i-1} \quad (3.18)$$

$$(PF)_i = (\sigma_i - \sigma_{oi})a_i \quad (3.19)$$

Para resolver  $\sigma_i$ , la integración de la curva de distribución de esfuerzos, se debe comenzar en  $z = 0$ , donde son conocidos los valores:  $(PF)_{i-1} = 0$ ,  $\sigma_{i-1} = \sigma_{oi-1}$  y  $\sigma_{oi-1} = q$

Por lo tanto, sustituyendo las expresiones 16 y 18 en 17 y resolviendo para  $\sigma_i$ , obtenemos la siguiente expresión:

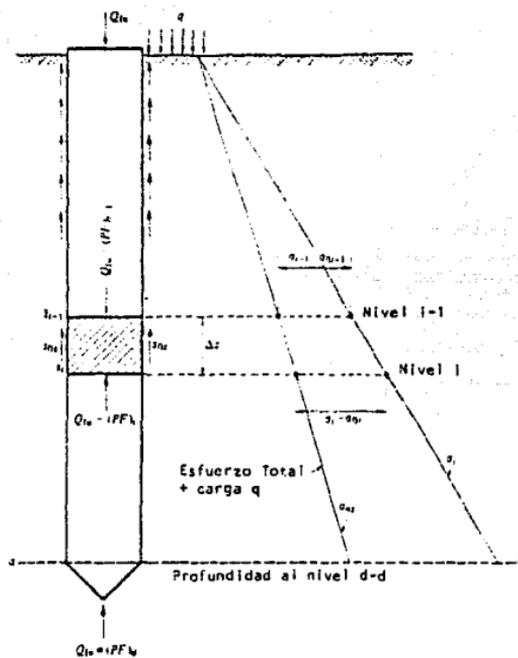


Fig. 3.7 Incremento del esfuerzo vertical debido a la fricción positiva (Zeevaert, 1974)

$$\sigma_1 = \frac{(PF)_{i-1} + \sigma_{os} a_1 + (w \gamma_i + m_i \gamma_{i-1}) \Delta z_i}{a_1 - m_i \Delta z_i} \quad (3.20)$$

Después de conocer el valor de  $\sigma_1$ , se utiliza la expresión 19 para encontrar el valor de la  $(PF)_i$ , cuyo valor es sustituido en la 20, para calcular el siguiente valor de  $\sigma_{i-1}$  y por lo tanto de  $(PF)_{i+1}$ ; este procedimiento se repite hasta alcanzar la profundidad  $d$ , donde  $(PF)_d = Q_{qu}$ .

Zeevaert después de realizar algunas investigaciones (1957) para entender mejor el comportamiento de los pilotes de fricción, encontró algunos resultados que lo condujeron a modificar la expresión para calcular la fricción positiva y que son:

a) La zona remoldeada y reconsolidada del suelo no se extiende más allá de un 5% del radio del pilote, a partir del fuste, por lo que la resistencia al esfuerzo cortante estará dada por la ecuación:

$$s_{os} = K_d \sigma_{os} \quad (3.21)$$

b) El contenido de agua que muestra el suelo a una distancia a partir del centro de 1.05 veces el radio del pilote, puede considerarse prácticamente que no sufre cambios. Los esfuerzos efectivos sufren una disminución debido al incremento de la presión de poro ocasionada por el hincado del pilote, cuando sucede la disipación de la presión en exceso se produce la reconsolidación del suelo y los esfuerzos efectivos tienden a su valor inicial, de igual forma el contenido de agua tiene la tendencia a conservar su valor inicial.

c) La resistencia natural de la arcilla al esfuerzo cortante se ve alterada por el hincado del pilote hasta una distancia de un diámetro a partir del fuste del mismo. Cerca del fuste la resistencia de la arcilla se reduce a un 60% de su valor inicial. Por lo que la resistencia al esfuerzo cortante en esa zona es aproximadamente

$$s_{os} = 0.3 q_{us} \quad (3.22)$$

donde

$q_{us}$  es la resistencia a la compresión no confinada de la arcilla

El valor de  $s_{os} = c_u = 0.3 q_{us}$ , representa la resistencia al esfuerzo cortante de un estrato de arcilla homogénea saturada cerca del fuste, debe usarse en el cálculo de fricción positiva. Por lo tanto, se adopta que  $K_d$  es igual a cero y la ecuación 20 queda de la siguiente forma:

$$\sigma_i = \frac{G_{\text{net}} + (PF)_{i-1} + w c_i \Delta z_i}{a_i} \quad (3.23)$$

con la cual

$$(PF)_i = w c_i \Delta z_i + (PF)_{i-1}$$

y finalmente la fricción positiva al nivel  $i-1$  es

$$(PF)_i = w \sum_0^i c_i \Delta z_i \quad (3.24)$$

expresión que se utiliza para la zona comprendida entre  $z_0$  y  $d$ .

Por lo tanto, la fricción positiva última del pilote a partir de la superficie hasta la profundidad  $d$  es:

$$Q_{\text{pu}} = (PF)_{\text{KPF}} \Big|_0^{z_0} + w \sum_0^d c_i \Delta z_i \quad (3.25)$$

donde  $PF_{\text{KPF}} \Big|_0^{z_0}$  representa la capacidad de carga por fricción debida a la reconsolidación del suelo después del hincado, expresada por la siguiente ecuación:

$$PF_{\text{KPF}} = c_i + K_{\text{PF}} \frac{\sigma_i - \sigma_{i-1}}{2} \bar{w} \quad (3.26)$$

$w \sum_0^d c_i \Delta z_i$  representa la capacidad de carga por fricción debida a la resistencia del suelo parcialmente alterada; donde  $c_i = 0.3 q_{un}$

$z_0$  es la profundidad a la cual la resistencia al esfuerzo cortante ganada por reconsolidación es igual a la resistencia reducida, como se muestra en la Fig. 3.6

Sin embargo, años más tarde el mismo Zeevaert (1984) adopta la siguiente expresión para calcular la fricción positiva:

$$PF = \bar{w} \sum_{i=1}^n 0.3 q_{un} \Delta z_n \quad (3.27)$$

donde

$\bar{w}$  perímetro efectivo del pilote

$q_{un}$  resistencia promedio a la compresión no confinada inalterada para el estrato arcilloso 1

$\Delta z_n$  espesor del estrato  $i$

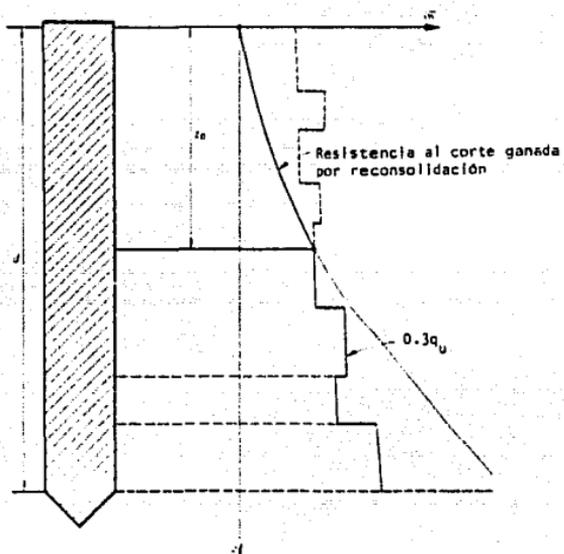


Fig. 3.8 Distribución de la resistencia al esfuerzo cortante en la arcilla a lo largo del pilote (Zeevaert, 1974)

de la cual se puede observar que tiene la misma forma que la expresión propuesta por el Método Alfa, en la que  $\alpha = 0.6$ :

$$PF = \bar{w} \sum_{\lambda=1}^n 0.6 \text{ con } \Delta z_n \quad (3.28)$$

### 3.2.6 Criterio del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, 1987

Después de los sismos de 1985 las condiciones de diseño para cimentaciones sobre pilotes de fricción en el Valle de México se volvieron necesaria y explícitamente más conservadoras. A continuación se menciona lo establecido en las Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Cimentaciones, 1987.

En el artículo 224 del Reglamento se establece que las cimentaciones deben ser diseñadas considerando los siguientes estados límite de falla y servicio, este inciso se referirá al primer estado límite.

Las Normas Técnicas Complementarias (NTC-87) indican que las cimentaciones con pilotes de fricción, podrán usarse como complemento de un sistema de cimentación parcialmente compensado para reducir asentamientos transfiriendo parte de la carga de la cimentación a estratos más profundos. Sin embargo se ha encontrado que dependiendo del número y dimensiones de los pilotes que se seleccionen, puede darse el caso de que por sí solos sean capaces de soportar la carga de la construcción, con un factor de seguridad amplio, tanto para condiciones estáticas como dinámicas (Auvinet y Mendoza, 1987).

#### - Estados Límite de Falla.

Esta condición debe verificarse para la cimentación como conjunto, para cada uno de los diversos grupos de pilotes y para cada pilote individual, satisfaciendo la siguiente desigualdad:

$$\sum Q F_u < R \quad (3.29)$$

El primer miembro de la desigualdad,  $\sum Q F_u$ , representa las acciones sobre la cimentación y que incluirán el peso propio de los pilotes o pilas y el efecto de la fricción negativa que pudiera desarrollarse sobre el fuste de los mismos o sobre la envolvente. Todas estas afectadas por sus correspondientes factores de carga, inciso 3.2 NTC-87.

R representa la capacidad de carga del sistema de cimentación, constituido por los pilotes de fricción, losa o zapatas. Las NTC-77 aceptaban realizar la suma de la capacidad máxima de la losa de cimentación y pilotes de fricción, siempre y cuando las condiciones de trabajo fueran compatibles; sin embargo, esta disposición era una práctica común en el diseño de cimentaciones de este tipo. Por el contrario las NTC-87 establecen que la capacidad de carga del sistema de cimentación será igual al mayor de los dos valores siguientes:

- a) Capacidad de carga de la losa de cimentación, sin considerar el aporte de pilotes. La cual se calculará con las expresiones establecidas en el inciso 3.3 de las NTC-87.
- b) Capacidad de carga de los pilotes, sin considerar el aporte de la losa, que será igual a la suma de la capacidad por punta del pilote más el menor valor de:
  - Suma de las capacidades de adherencia de los pilotes individuales.
  - Capacidad de adherencia de una pila de geometría igual a la envolvente del conjunto de pilotes.
  - Suma de capacidades de adherencia de los diversos subgrupos de pilotes en que pueda subdividirse la cimentación.

En esta nueva disposición se indica claramente la aportación a la capacidad, de los pilotes, tanto por fricción como por punta; ésta última no necesariamente es despreciable y se calcula con la siguiente expresión:

$$C_p = (c_u N_c + p_v) A_p \quad (3.30)$$

donde

- $C_p$  capacidad por punta, en t
- $A_p$  área transversal del pilote, en  $m^2$
- $p_v$  presión vertical total debida al peso del suelo a la profundidad de desplante de los pilotes,  $t/m^2$
- $c_u$  cohesión aparente, en  $t/m^2$ , determinada en ensaye triaxial UU
- $N_c$  coeficiente de capacidad de carga definido en la tabla siguiente:

$\beta_u$	0°	5°	10°
$N_{e^a}$	7	9	13

$\beta_u$  ángulo de fricción aparente, en grados

$F_R$  factor de resistencia igual a 0.7

Mientras que la capacidad de carga por adherencia lateral de un pilote de fricción individual bajo esfuerzos de compresión se calculará como

$$C_v = A_L f F_R \quad (3.31)$$

donde

$F_R = 0.7 (1 - s/2)$ , factor de resistencia

$s$  relación entre los máximos de la sollicitación sísmica y la sollicitación total que actúa sobre el pilote

$C_v$  capacidad por adherencia, t

$A_L$  área lateral del pilote, m<sup>2</sup>

$f$  adherencia lateral media pilote-suelo, t/m<sup>2</sup>

Para los suelos cohesivos blandos de las zonas II y III la adherencia pilote-suelo se considerará igual a la cohesión media del suelo. La cohesión se determinará con pruebas triaxiales no consolidadas-no drenadas.

La expresión 3.31 indicada para el cálculo de la capacidad por adherencia es semejante a la que propone el Método Alfa (ec. 3.3).

En pilotes de fricción el factor de resistencia ( $F_R$ ) se modifica para la combinación de acciones que incluyan las sollicitaciones sísmicas, con objeto de tomar en cuenta la posible degradación de la adherencia pilote-suelo bajo cargas repetidas.

Para el caso de cargas excéntricas (principalmente debidas a acciones sísmicas), las nuevas normas indican que debe despreciarse la capacidad de carga de los pilotes sometidos a tensión, salvo que se hayan diseñado y construido para tal fin. Esta disposición se toma en cuenta al considerar dimensiones reducidas, en una cantidad de 2e, del área en planta tanto en la dirección longitudinal, como en la transversal, atendiendo a la excentricidad  $e$  en ambas

direcciones; así, los pilotes que no se tomarán en cuenta serán aquellos que queden fuera del área reducida.

Para calcular la capacidad de adherencia del grupo de pilotes, o de los subgrupos de pilotes en los que se pueda subdividir la cimentación, también será aplicable la ec. 3.31 considerando el grupo o los subgrupos como pilas de diámetro igual al de la envolvente del grupo o subgrupo.

### 3.2.7 Métodos utilizados a nivel mundial

A continuación se comentará qué métodos son utilizados a nivel mundial.

J.A. Focht y M.W. O'Neill, de McClelland Engineers Inc. y de la Universidad de Houston E.U.A., respectivamente, realizaron una encuesta en 1983 para conocer el estado actual de la práctica en cimentaciones profundas. Dicha encuesta consistió de 36 preguntas concernientes a: análisis, diseño y construcción de pilotes hincados y perforados. Las preguntas fueron hechas de tal forma que el encuestado se ubicara dentro de las siguientes cinco categorías generales: a) diseño; b) construcción; c) precisión y confiabilidad; d) códigos y reglamentos; y e) investigación; cada encuestado, de los que había de los cinco continentes se les dividió en las siguientes categorías: consultores, constructores, supervisores y propietarios, investigadores.

Con lo que respecta a la categoría de diseño, se obtuvieron los siguientes datos para suelos cohesivos. A la pregunta hecha de cómo se estima la capacidad de carga axial en pilotes hincados, más del 30% de los ingenieros prácticos prefieren las pruebas de carga estática, experiencias locales y correlaciones empíricas simples a otros métodos tales como: correlaciones directas con pruebas *in situ*, análisis de esfuerzos efectivos o asignar la capacidad de carga en base a mediciones dinámicas hechas durante el hincado, Fig. 3.9.

De las correlaciones empíricas empleadas por los no europeos están aquellas del tipo "alfa" (Tomlinson, 1957), del tipo "beta" (Burland, 1973; Meyernhof, 1976) y del tipo "lambda" (Vijayvergiya y Focht, 1972); mientras que los europeos prefieren utilizar las correlaciones con pruebas *in situ* para obtener los parámetros de resistencia, el método más utilizado es el alfa. Sin embargo no existe un fuerte consenso de cómo obtener los parámetros que éstas correlaciones empíricas requieren; unos indican que a partir de pruebas de laboratorio realizadas sobre muestras obtenidas con tubo de pared delgada y otros por medio de pruebas *in situ*. No obstante, todos coincidieron en que el principal parámetro para definir un suelo cohesivo es la resistencia

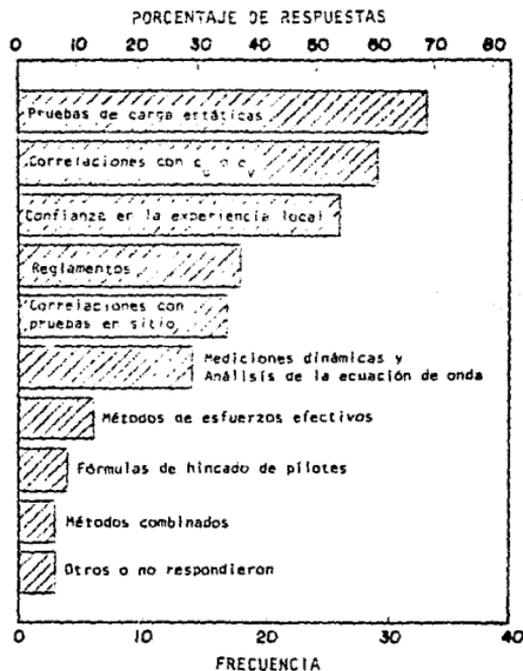


Fig. 3.9 Evaluación de la capacidad de carga axial de pilotes hincados en suelos cohesivos. (Focht y O'Neill, 1985)

al esfuerzo cortante inalterada en condiciones no drenadas. medida principalmente con microvelata. compresión no confinada o pruebas de compresión triaxial: JU. De las pruebas en sitio se menciona al cono; también la veleta, pero es utilizada muy pocas veces para evaluar la resistencia al corte no drenada de los suelos cohesivos, excepto en Europa donde tiene una gran aplicación.

Los procedimientos teóricos basados en métodos de esfuerzos efectivos, que fueron muy populares entre los investigadores a finales de la década de 1970 y principios de la década de 1980 han caído en desuso; muchos investigadores indicaron que tales métodos introducen una serie de suposiciones y factores empíricos por lo cual no son completamente teóricos, y no predicen la capacidad de los pilotes, particularmente en arcillas preconsolidadas, tal como ocurre con algunos métodos empíricos.

Con respecto a la práctica en el diseño de pilotes, por regiones geográficas también existen grandes diferencias; mientras que en E.U.A. y Canadá, las pruebas en sitio no son muy utilizadas, en cambio el diseño en base al análisis de la ecuación de onda es más frecuente que en otros lugares. En Europa se tiene mayor confianza en las pruebas en sitio principalmente en el CPT; el CPT o penetrómetro estático tipo eléctrico (cono holandés), es un cono tipo eléctrico que tiene 3.6 cm de diámetro y 60° de ángulo de ataque, con el que se obtiene la variación continua de la resistencia por punta y de fricción que se genera durante su hincado, el cual se realiza a presión (estática). En Australia y Africa se prefiere la experiencia local y las pruebas in situ sobre las pruebas de carga. Mientras que en Asia las pruebas de carga y los códigos son preferidos, con una reducida confianza sobre la experiencia local y las pruebas in situ.

Con lo que respecta al tipo del área de práctica; existe un gran consenso entre consultores e investigadores, en los procedimientos utilizados para estimar la capacidad de carga de los pilotes, consideran conveniente basar sus diseños en pruebas de carga o en la experiencia local. Mientras que los constructores prefieren las recomendaciones hechas por códigos o reglamentos, y con poco uso de las pruebas de carga.

En México, el criterio más utilizado para estimar la capacidad de carga de un pilote (NTC-87) se basa en el Método Alfa. Zeevaert propone una combinación de los métodos Alfa y Beta para estimar la capacidad de carga, inciso 3.2.5. Y también se coincide en que el principal parámetro para definir un suelo cohesivo es a partir de su resistencia al esfuerzo cortante, y las NTC-87 recomiendan determinarla por medio de pruebas triaxiales no consolidadas-no drenadas.

### 3.3 MECANISMO DE TRANSFERENCIA DE CARGA EN PILOTES DE FRICCIÓN

#### 3.3.1 Consideraciones Generales

Una forma sencilla de visualizar la transferencia de carga a lo largo del fuste de un pilote es instalando celdas de carga a diferentes profundidades a lo largo del eje del mismo. Cuando se realiza la prueba de carga del pilote, se obtendrán cargas axiales a diferentes profundidades; si esos valores se grafican contra la profundidad, se obtiene una curva  $P(z)$  que proporcionará la carga axial que está actuando sobre el pilote a diferentes profundidades, Fig. 3.10. A la profundidad  $z=D$  la curva nos indica la carga por punta,  $P_p$ , mientras que la carga transferida al subsuelo a la profundidad  $z$  será:

$$CT = P_o - P(z) \quad (3.32)$$

que representa la carga por fricción lateral.

La pendiente de la curva  $P(z)$ , en cualquier punto, dividida entre el perímetro del pilote proporciona una medida de la carga transferida (por fricción lateral) del pilote al suelo en dicho punto.

$$f_o = - \frac{1}{p} \frac{dP}{dz} \quad (3.33)$$

En la Fig. 3.11 se pueden observar ejemplos proporcionados por Vesic (1970) de algunas formas que pueden tomar las curvas  $P(z)$  y  $f_o(z)$  de acuerdo a las condiciones de trabajo; así tenemos que la curva (E) representa el caso cuando el pilote está sometido a fricción negativa.

La curva  $P(z)$  (Fig. 3.10) permite dividir la deformación total  $\delta_o$  en deformación del pilote  $\delta_p$  y deformación del suelo  $\delta_s$ , así como también calcular la deformación del pilote a cualquier profundidad; es decir:

$$\delta_s = \frac{1}{AE} \int_0^z P(z) dz \quad (3.34)$$

donde

$\delta_s$  deformación elástica del pilote a la profundidad  $z$

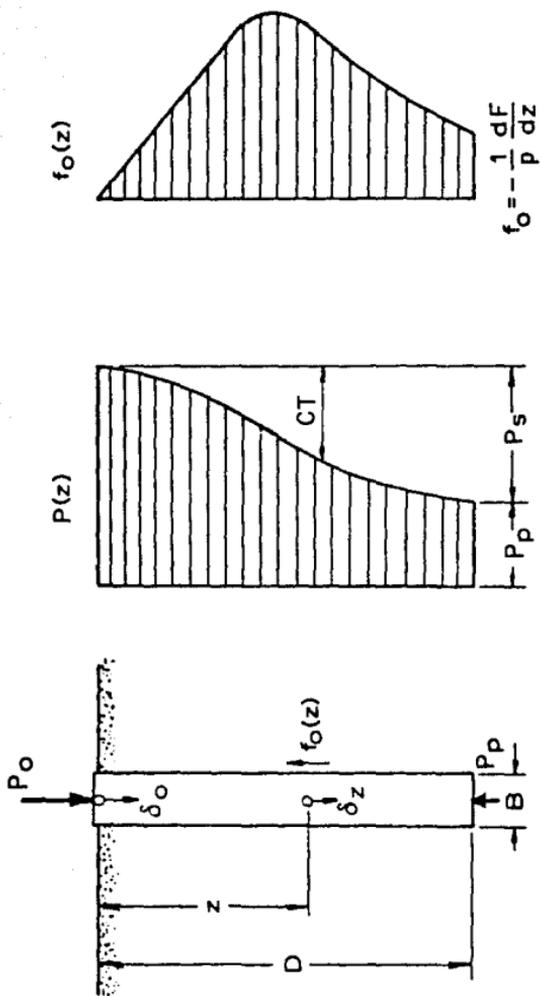


Fig. 3.10 Transfencia de carga de un pilote (Vesic, 1970)

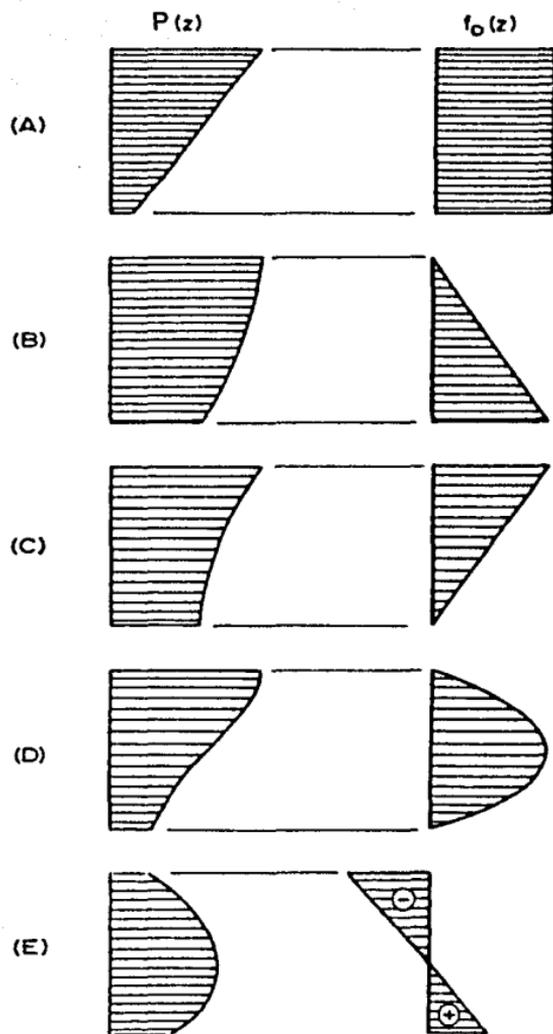


Fig. 3.11 Distribuciones típicas de resistencia por fricción lateral (Vesić, 1970)

- A área transversal de la sección recta
- E módulo de elasticidad del pilote
- P(z) carga que actúa sobre el pilote a la profundidad z

La deformación del suelo abajo de la punta del pilote es simplemente

$$\delta_m = \delta_o - \delta_p \quad (3.35)$$

### 3.3.2 Transferencia de carga en arcilla

La transferencia de carga en este tipo de suelo se explica a través de dos pruebas de carga; una de ellas realizada en la Bahía de San Francisco, E.U.A., por Seed y Reese (1957) y la otra llevada a cabo en la Ciudad de México por Reséndiz (1964).

#### Prueba de Seed y Reese (1957)

Se llevó a cabo al Este de la Bahía de San Francisco. La estratigrafía del lugar (Fig. 3.12), consiste de 4 pies de relleno, 5 pies de arcilla arenosa y un estrato de arcilla limosa orgánica con conchas el cual se extiende hasta 30 pies de profundidad. El nivel de agua freática se encuentra a la profundidad de 4 pies de la superficie.

La prueba se realizó sobre un pilote metálico circular hueco, de 6 pulgadas de diámetro hincado 14 pies en el estrato blando y con objeto de eliminar el efecto del relleno heterogéneo se realizó un pozo de 9 pies de profundidad y a partir del fondo se hincó el pilote. A lo largo del pilote se colocaron 14 celdas de carga instrumentadas con extensómetros eléctricos (strain-gages).

La primera carga se realizó a las 3 hrs de hincado el pilote; el primer incremento a las 21 hrs y los siguientes se realizaron aproximadamente a 3, 7, 14, 23 y 33 días. Los incrementos de carga fueron desde 500 a 1000 libras para los primeros cargas y menores cuando se aproximaba a la carga última, midiendo los asentamientos para cada incremento.

Las curvas obtenidas se muestran en la Fig. 3.13. La falla se presentó con una carga total igual a 6200 libras y un desplazamiento final en la cabeza de 0.12 pulgadas (3.05 mm); la carga registrada cerca de la punta fue de 800 libras, que representa el 13% de la carga última.

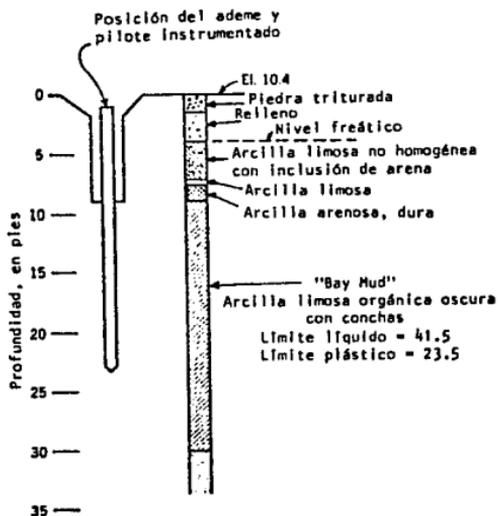


Fig. 3.12 Perfil del suelo  
(Seed y Reese, 1957)

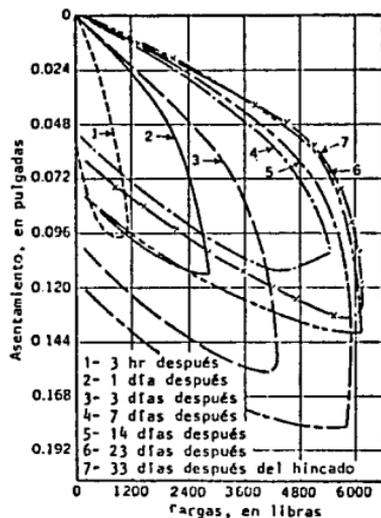


Fig. 3.13 Curvas carga-asentamiento  
(Seed y Reese, 1957)

Las curvas típicas de distribución de carga sobre el pilote realizadas en base a mediciones hechas durante la prueba, se muestran en la Fig. 3.14(a). A partir de estas curvas, según el inciso anterior, se obtienen los valores de la carga transferida; graficando esos resultados contra los desplazamientos se obtiene la Fig. 3.15(a).

La Fig. 3.15(a) se obtuvo de la siguiente manera:

1. Se dividió el pilote en 7 segmentos.
2. De la Fig. 3.14(a), para cada uno de los segmentos se obtuvieron las correspondientes cargas axiales en su extremo superior e inferior y la diferencia entre ellas es la carga transferida por el segmento.
3. Se calculó la deformación elástica sufrida por el pilote, como la suma de la deformación debida a una carga axial igual a la transmitida por la punta del pilote más la acumulada de cada uno de los segmentos provocada por la carga transferida. La deformación sufrida por el suelo se calculó según la ec. 3.35, donde  $\delta_0$  se midió para cada uno de los incrementos de carga.
4. Los valores graficados en la Fig. 3.15(a) corresponden al desplazamiento sufrido por el segmento, el cual es igual a la deformación elástica del tramo inferior al segmento analizado, incluso la sufrida por él. A este segmento le corresponde cierta carga transferida, que se determinó en el punto 2. Con lo que se tienen los elementos necesarios para localizar este punto.
5. La Fig. 3.15(b) se realizó obteniendo los valores del cociente carga transferida/resistencia al corte, para cada uno de los segmentos; la resistencia corresponde a un promedio, en la longitud del segmento analizado, y el desplazamiento al obtenido en el punto 4.

Como complemento, varios sondeos se realizaron en el área de prueba, en un radio de 15 pies, obteniéndose muestras de suelo inalteradas, a las cuales se les realizaron pruebas en el laboratorio con el fin de establecer la relación entre la resistencia y el contenido de agua para: a) condiciones antes del hincado, b) la arcilla cerca del pilote después de un día del hincado y c) la arcilla 30 días después. En la Fig. 3.16 se muestran los resultados de las pruebas realizadas.

Los resultados obtenidos en dichas pruebas ponen de manifiesto el incremento de la resistencia del suelo circundante al pilote conforme el tiempo transcurre, después del hincado. Seed y Reese encontraron que la resistencia a la compresión del suelo adyacente al pilote varió, en promedio,

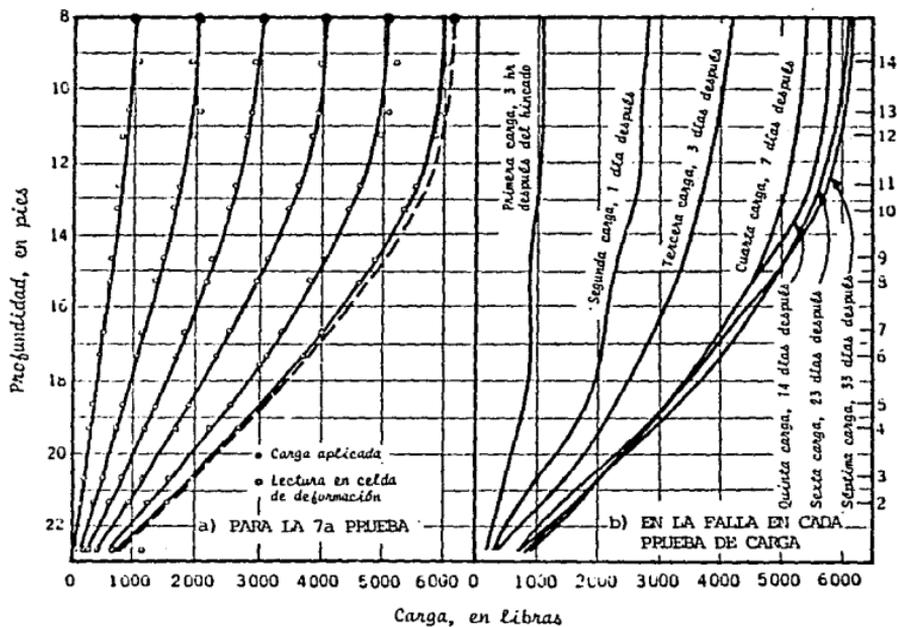


Fig. 3.14 Distribución de carga en el pilote (Seed y Reese, 1957)

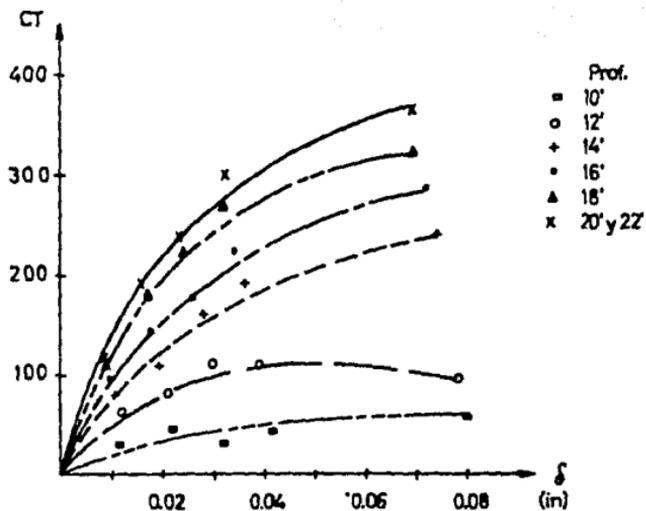


Fig. 3.15a Curva desplazamiento del pilote contra carga transferida

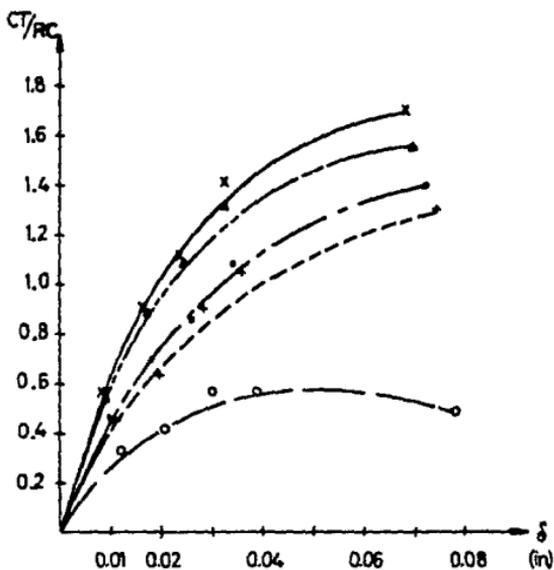


Fig. 3.15b Curva desplazamiento del pilote contra relación carga transferida-resistencia al corte

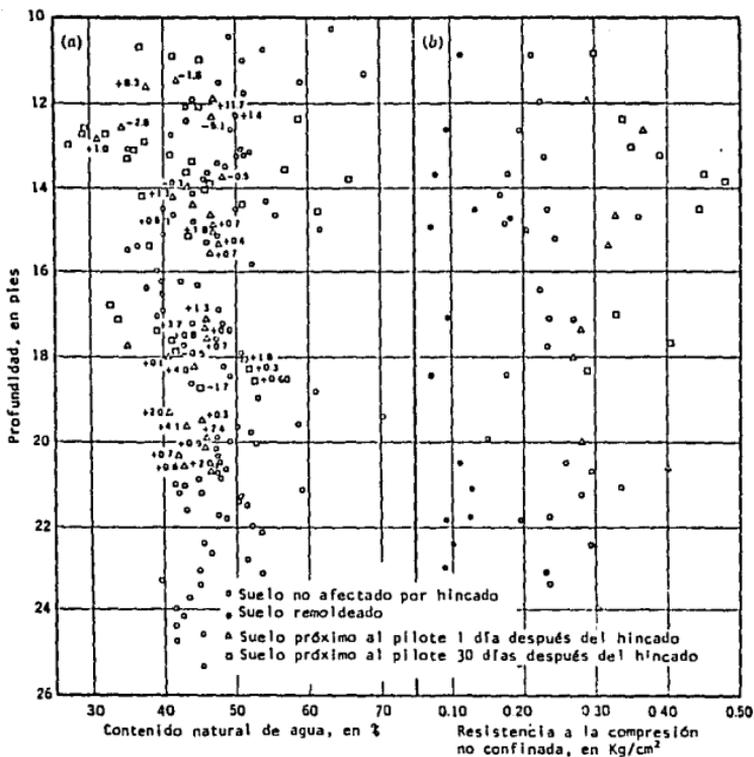


Fig. 3.16 Resultados de las pruebas de laboratorio (Seed y Reese, 1957)

de un valor inicial de 0.24 kg/cm<sup>2</sup> antes del hincado a 0.32 kg/cm<sup>2</sup> un día después y finalmente a 0.36 kg/cm<sup>2</sup>, 30 días después del hincado; este incremento en la resistencia es acompañado por un decremento en el contenido de agua desde un 48.1% a un 43.6%, un día después y a 41.1% a los 30 días.

### Prueba de Reséndiz (1964)

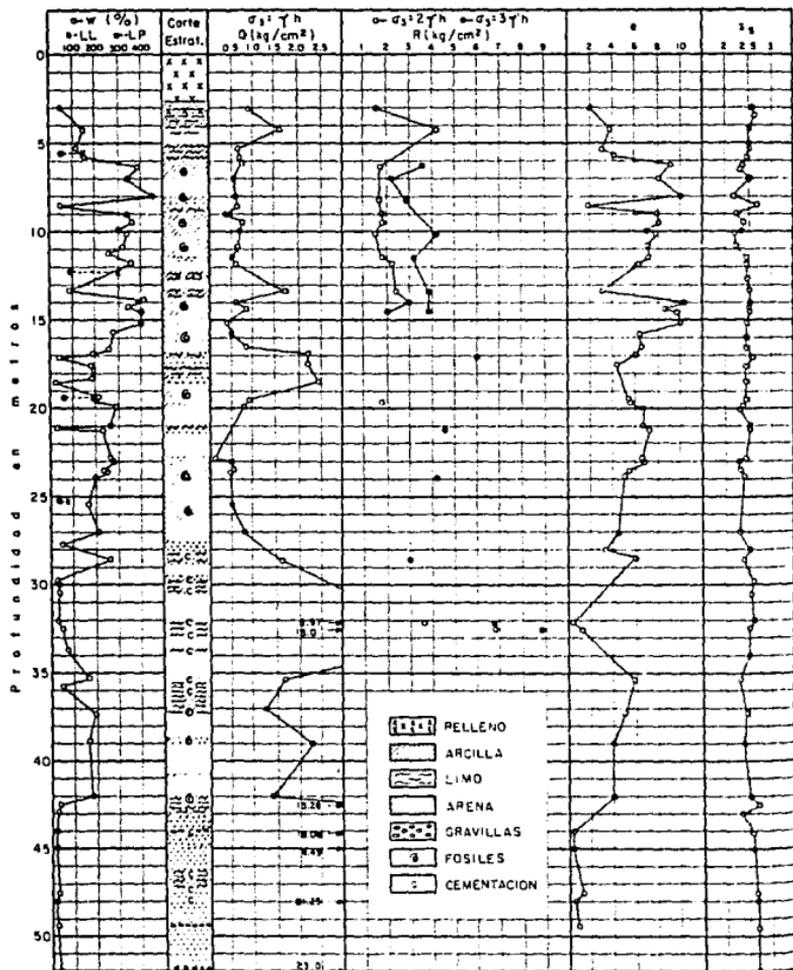
La prueba se efectuó en la ciudad de México, específicamente en terrenos del Centro Urbano Nonalco-Tlatelolco.

Las muestras del suelo se obtuvieron por medio de un sondeado de 52 m de profundidad, utilizando tubo de pared delgada (Shelby) hasta una profundidad de 20 m, y muestreador de barril doble tipo Denison hasta los 52 m.

En la Fig 3.17 se muestra el perfil del suelo. A grandes rasgos la estratigrafía es como sigue: hasta 3.5 m de profundidad se tiene relleno heterogéneo; de 3.5 m a 6.0 m material limo arcilloso de compresibilidad y resistencia medias. Desde 6.0 m a 17.0 m aproximadamente se encuentran suelos arcillosos (con intercalaciones de estratos arenos limosos muy delgados) de alta compresibilidad y resistencia de media a baja en estado inalterado y prácticamente nula en estado remoldeado, con contenido natural de agua muy cercano al límite líquido. De 17.0 a 18.5 m se encuentra un estrato limo arenoso compacto, cuya resistencia es relativamente alta; hasta los 27.0 m se tienen, en forma alternada, estratos arcillosos de resistencia baja y arenolimosos de alta resistencia. De 27.0 a 35.0 m se presenta una sucesión de estratos limoarenosos parcialmente cementados de alta resistencia; de 35.0 a 42.0 m nuevamente materiales arcillosos y limoarenosos alternados. De 42.0 m en adelante la resistencia aumenta notablemente, siendo los materiales arenosos compactos y parcialmente cementados.

Cabe señalar que la prueba se realizó sobre tres tipos de pilotes; convencionales cuyo diámetro fue de 0.35 m, 25.0 m de longitud y sección constante circular; mixtos con una longitud de 43.0 m, siendo la porción inferior delgada de 16.0 m de longitud y 12.5 cm de diámetro unida a una porción gruesa de 35 cm de diámetro (parte superior) y los pilotes delgados de 30m de longitud con un diámetro constante de 12.5 cm. Se colocaron en los pilotes convencionales y mixtos dos gatos hidráulicos planos del tipo Freyssinet; en el pilote convencional llamado C1 se colocaron a 17.1 y 24.3 m de profundidad. Por el momento nos ocuparemos de los pilotes convencionales, debido a que presentan las características de un pilote de fricción comúnmente utilizado en la práctica.

Con objeto de eliminar el efecto del relleno heterogéneo que de 0 a 3.5 m se encuentra en el sitio de pruebas, los



Q resistencia a la compresión en prueba rápida  
 R resistencia a la compresión en prueba consolidada-rápida  
 (material remoldado con 20 días de reposo)

Fig. 3.17 Perfil y propiedades del terreno  
 (Reséndiz, 1964)

pilotes se hincaron en una zanja de 2.0 m de profundidad, desde cuyo piso se hicieron perforaciones con pala de postear hasta alcanzar los 3.5 m de profundidad en el sitio de hinca de cada pilote.

En la Fig. 3.18 se muestra la curva de deformación total-carga en el pilote. Es de notarse que la capacidad de carga por punta del pilote C1 resultó alta, 28 t (Fig 3.19), lo que representa el 21% de la carga última, quizá debido a condiciones locales del terreno en la punta del mismo. Presentó una capacidad de carga por adherencia de 101 t, siendo la total de 129 t con un desplazamiento en la cabeza de 29.8 mm.

De los datos de presión en los gatos Freyssinet obtenidos durante distintas etapas de la prueba, se construyeron las curvas de la Fig. 3.19, a partir de las cuales se pudieron graficar las curvas de la Fig. 3.20, siguiendo el mismo procedimiento indicado para la Fig. 3.15(a).

Revisando las gráficas de las Figs. 3.15, 3.20 y 3.21, en cada caso se puede ver que la carga transferida en un punto del pilote es función directa de la presión lateral sobre el pilote; es decir de la profundidad, y del movimiento del pilote. Como se puede observar, las zonas cercanas a la punta sufren desplazamientos pequeños y la carga transferida es mayor que en las partes superiores, que sufren grandes desplazamientos.

El mecanismo de la resistencia que opone el suelo al movimiento descendente de un pilote de fricción se muestra en la Fig. 3.22. Si el pilote fuera completamente rígido, todos los puntos del mismo se moverían distancias iguales; sin embargo, debido a que esto no sucede, el asentamiento que se observa en la cabeza es mayor al que se presenta en la punta, en una cantidad igual a la compresión elástica del pilote. Este movimiento induce deformaciones, que ocasionan el desarrollo de esfuerzos cortantes en la masa de suelo circundante al pilote. Estos esfuerzos varían con la profundidad ya que la deformación del pilote disminuye con la misma. La resistencia que opone el suelo a la presencia de estos esfuerzos cortantes ocasiona que la carga en el pilote decrezca con la profundidad.

De las Figs. 3.15(b) y 3.21, es importante hacer notar que se presentan relaciones carga transferida / resistencia al corte, (CT/KC), mayores que 1.0 y que corresponden a zonas cercanas a la punta del pilote; lo que indica que la carga transferida sobrepasa la resistencia al esfuerzo cortante del suelo, determinada antes del hincado. Así tenemos que en la prueba realizada por Reséndiz, este efecto se presenta entre las profundidades 21.0 a 26.0 m; esto es, en una longitud del pilote de 5.0 m, que representa el 22% de

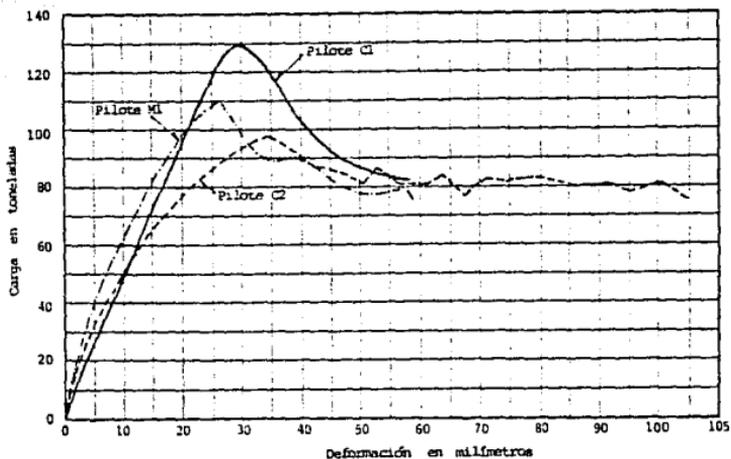


Fig. 3.18 Curva carga-deformación total  
(Reséndiz, 1964)

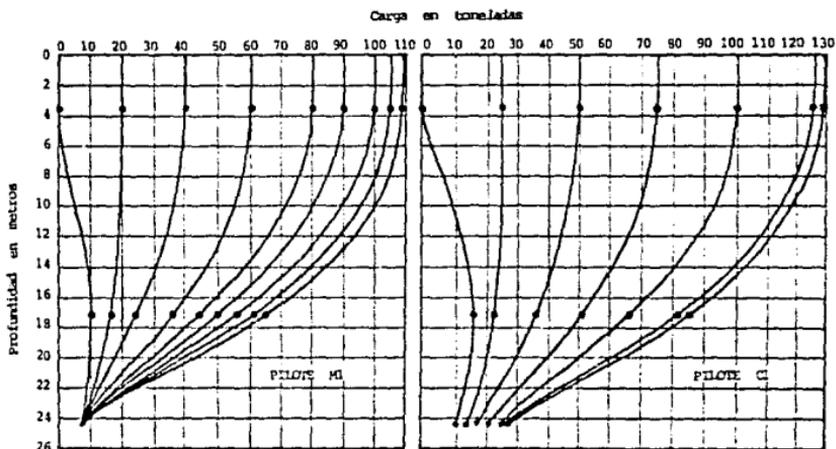


Fig. 3.19 Distribución de carga en el pilote  
(Reséndiz, 1964)

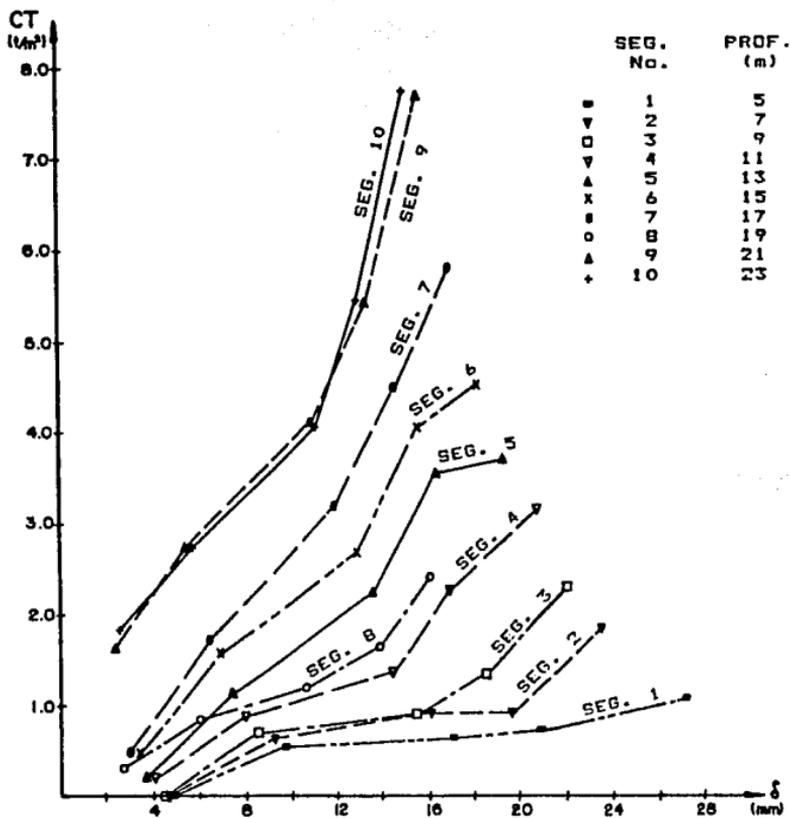


Fig. 3.20 Curvas desplazamiento del pilote contra carga transferida

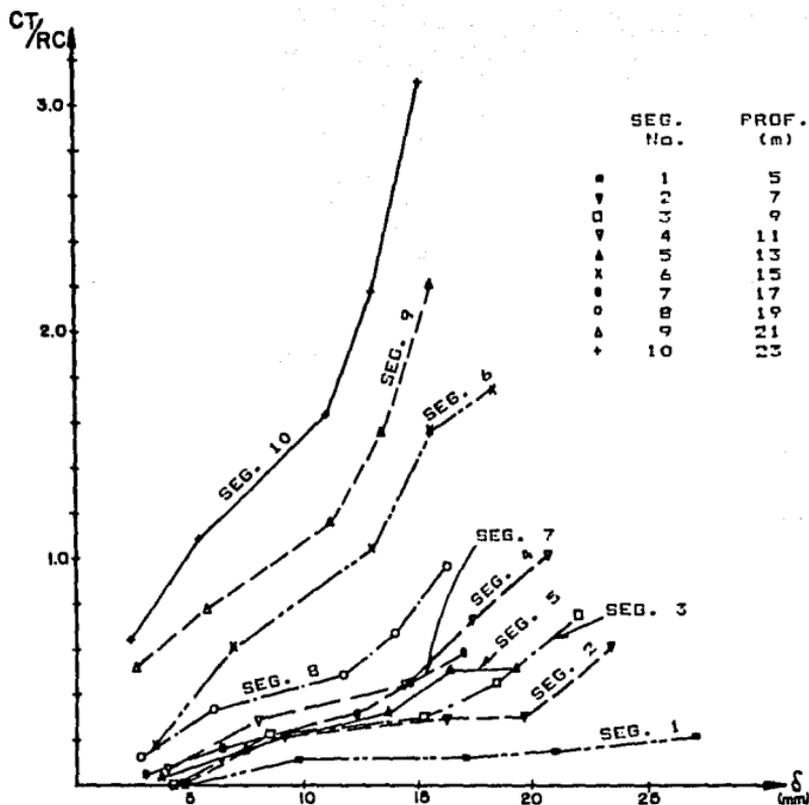


Fig. 3.21 Curva desplazamiento del pilote contra relación carga transferida-resistencia al corte

la longitud total efectiva del mismo. Por otra parte en la llevada a cabo por Seed y Reese se observa semejante situación, en un 21% de la longitud efectiva (Fig. 3.23); cabe señalar que se trata prácticamente del mismo porcentaje pero en un pilote más corto,  $L_{ef} = 14 \text{ ft}$  (4.3 m), que el ensayado por Reséndiz.

Con lo que respecta a las zonas superiores, la magnitud de la carga transferida no llega a igualar la resistencia del suelo, aunque es donde la deformación del pilote es mayor, mientras que cerca de la punta los movimientos son pequeños.

Es importante indicar que la resistencia del suelo usada en el cálculo de las relaciones fueron determinadas a partir de muestras inalteradas tomadas antes del hincado. Los coeficientes mayores que la unidad pueden indicar dos cosas: que la resistencia al esfuerzo cortante previa fue subestimada o bien que se ve incrementada por los efectos posteriores debidos al hincado. Esto último lo comprobaron Seed y Reese (1957), al encontrar que la resistencia del suelo cerca del pilote a los 30 días de su colocación se incrementó, siendo aproximadamente 1.5 veces mayor que la determinada antes del hincado. Por lo tanto, si la carga transferida es comparada con los valores finales de la resistencia, la relación (CT/RC) no sería mayor que 1.0 (Coyle y Reese, 1966).

Se comprenderá mejor la forma en que el pilote transfiere la carga al suelo circundante, a partir de la Fig. 3.24. La carga aplicada  $P_e$  es equilibrada con la resistencia en la punta  $P_b$  y la fuerza de fricción a lo largo del fuste,  $R$ . Se ha visto que con pequeños movimientos descendentes se desarrolla la resistencia del suelo. Para entender la interacción que se presenta entre el suelo y el pilote, éste último se sustituye por un resorte y el suelo se representa por un mecanismo formado de un resorte de hoja y un bloque de fricción.

De las Figs. 3.15(a) y 3.20 se observa que no existe una variación lineal entre el desplazamiento que sufre el pilote y la carga transferida. Cuando se aplica la carga  $P_e$  sobre el pilote, se presenta un desplazamiento hacia abajo del mismo, siendo mayor éste en la parte superior que en la zona inferior, debido a su compresión elástica. La magnitud de la carga transferida, que como se sabe depende del movimiento del pilote y de la profundidad, será igual al esfuerzo cortante que se desarrolle en el suelo como producto de la deformación que se presente entre pilote y suelo. En la Fig. 3.24(c) se observa que el valor del esfuerzo cortante ( $s_u$ ) se incrementa conforme la profundidad y por lo tanto la carga transferida, mientras que el desplazamiento disminuye. Así tenemos que la carga transferida en la parte superior es mínima, de tal manera que no se iguale la resistencia máxima del suelo; mientras que en la zona cercana a la punta del

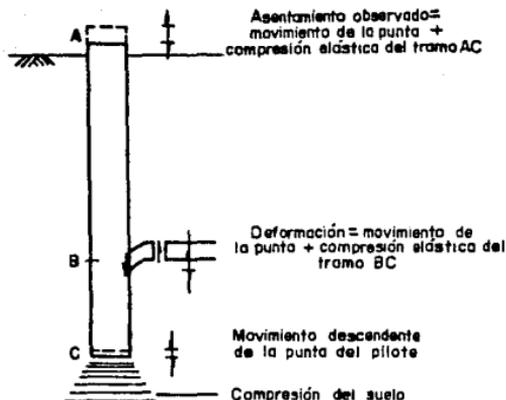


Fig. 3.22 Resistencia del suelo al movimiento hacia abajo de un pilote de fricción (Seed y Reese, 1957)

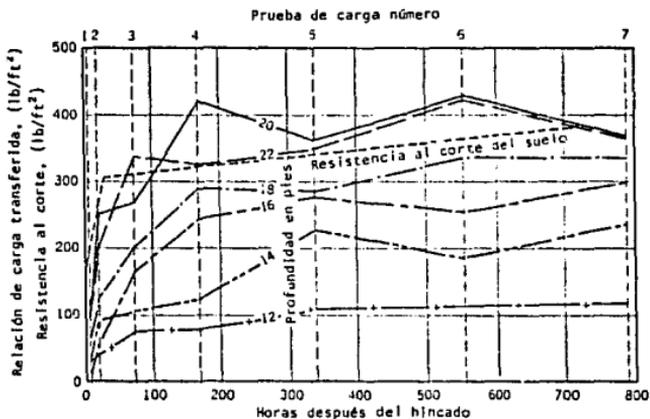


Fig. 3.23 Carga transferida del pilote al suelo comparada con el incremento de la resistencia al esfuerzo cortante del suelo cercano al pilote, (Seed y Reese, 1957)

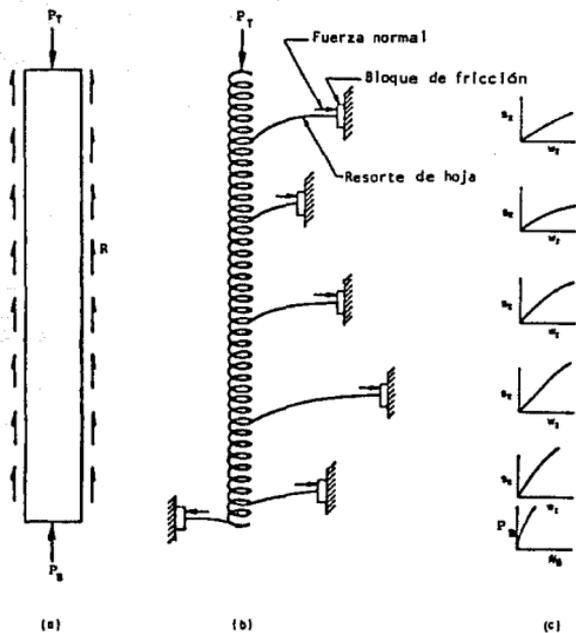


Fig. 3.24 Modelo mecánico de un pilote sometido a carga axial, (Reese, 1976)

pilote, se presenta la mayor transferencia de carga al suelo, las cuales no sería capaz de soportar sino es porque sufre ganancia de resistencia, como ya se indicó.

La carga máxima que el pilote puede transferir al suelo no será mayor a la resistencia al esfuerzo cortante del mismo.

Además en el modelo mecánico propuesto por Reese (1976), queda de manifiesto que el fenómeno es de naturaleza friccionante; lo cual se indica con el bloque friccionante que representa el suelo. Como ya se indicó, la carga transferida en un punto depende del desplazamiento y la profundidad a la que se encuentre; ello conduce a concluir que también influye el esfuerzo confinante sobre el fuste, el cual está íntimamente ligado con el esfuerzo normal efectivo, que es una medida de la resistencia al corte del suelo. Esto corrobora que el fenómeno de transferencia de carga que se presenta es debido al fenómeno de fricción entre dos superficies de naturaleza diferente, (Vesić, 1970).

Por todo lo anterior, se ve que la transferencia de carga es un fenómeno muy complejo debido a la interacción que se presenta entre el pilote y el suelo; el estimar su valor resulta difícil, debido a los problemas que se presentan al obtener los parámetros de resistencia del suelo, los cuales se ven alterados por el hincado del pilote y tales variaciones son difíciles de predecir. Sin embargo, en el inciso siguiente se propone un método para estimar la carga transferida en un pilote de fricción. Se trata de una modificación al originalmente propuesto por Coyle y Reese (1966).

### 3.4 METODO PROPUESTO DE CALCULO

El método de Coyle y Reese se desarrolló a partir de los datos de las pruebas de pilotes instrumentados en campo (Seed y Reese, 1957) y que fueron comentadas en el inciso 3.3; además en resultados de pruebas en laboratorio (Coyle y Reese, 1966). Consideran cierta distribución de la transferencia de carga del pilote al suelo mediante una curva que relaciona el cociente carga transferida/resistencia al corte, (CT/RC), con el desplazamiento del pilote (Fig. 3.26).

El método se sintetiza a continuación:

1. Dividir el pilote en cierto número de segmentos, Fig. 3.25.
2. Establecer un pequeño movimiento de la punta,  $y_{ei}$ .

3. Calcular la resistencia por punta causada por el movimiento inicial  $y_{e1}$ . Se puede realizar aproximadamente, considerando la punta de sección circular y rígida, suponiendo deformación elástica del suelo; por lo tanto

$$P_t = \frac{\pi d E_s y_{e1}}{4(1-\nu^2)} \quad (3.36)$$

$E_s$  y  $\nu$  parámetros elásticos del suelo.

4. Asignar un movimiento  $y_1$  al punto medio del segmento analizado; para el primer intento hacer

$$y_1 = y_{e1}$$

5. Con el valor  $y_1$  encontrar la relación  $(CT/RC)_1$  en la Fig. 3.26.

6. Determinar la resistencia al corte a la profundidad analizada, Fig. 3.27.

7. Calcular la carga transferida por adherencia como:

$$(CT)_1 = (CT/RC)_1 \cdot \text{RESISTENCIA AL CORTE EN EL SEGMENTO 1} \quad (3.37)$$

La carga  $P_i$  en la parte superior del segmento 1 se calcula como sigue:

$$P_i = P_{e1} + CT_1 l_1 p_1 \quad (3.38)$$

donde

$l_1$  longitud del segmento 1

$p_1$  perímetro del segmento 1

$P_{e1}$  carga en la parte inferior del segmento 1

8. Calcular la deformación elástica del punto medio del segmento, considerando deformación bajo carga axial:

$$\Delta d_1' = \frac{P_m + P_{e1}}{2} \frac{l_1}{2A_1 E_m} \quad (3.39)$$

$$P_m = \frac{P_i + P_{e1}}{2} \quad (3.40)$$

donde

$A_1$  área transversal del segmento 1

$E_m$  módulo de elasticidad del pilote

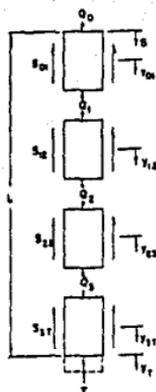


Fig. 3.25 Pilote cargado axialmente mostrando las fuerzas que actúan en cada segmento (Seed y Reese, 1957)

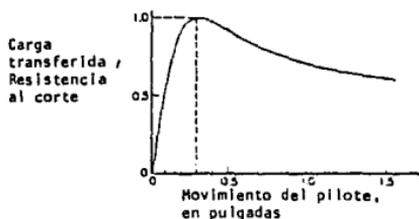


Fig. 3.26 Movimiento del pilote contra la relación carga transferida/resistencia al corte (Seed y Reese, 1957)

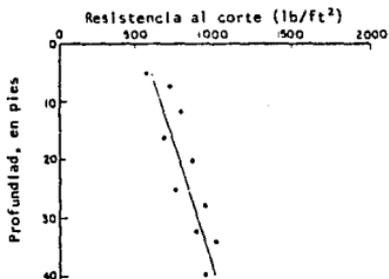


Fig. 3.27 Resistencia al corte contra profundidad (Seed y Reese, 1957)

9. Obtener el nuevo desplazamiento del punto medio del segmento, que es la suma del desplazamiento de la punta (asentamiento del suelo) más la deformación elástica que sufre el pilote al verse sometido a una carga axial.

$$y_1' = y_{e1} + \Delta d_1' \quad (3.41)$$

10. Comparar  $y_1'$  con el valor estimado de  $y_1$  (paso 4).

11. Si  $y_1'$  y  $y_1$  no se encuentran dentro de la tolerancia especificada, repetir los pasos del 2 al 10 para determinar un nuevo desplazamiento del punto medio.

12. Cuando la convergencia es alcanzada, se pasa al segmento inmediato superior y así sucesivamente, hasta obtener el valor de  $P_0$  y el desplazamiento  $y_0$  de la parte superior del pilote.

El método de cálculo propuesto aquí, sigue un algoritmo semejante al establecido por Coyle y Reese. En lugar de utilizar dos gráficas (CT/RC vs deformación y RC vs prof.) se proponen dos más, que se basan en resultados de pruebas de carga de pilotes, realizadas en la zona de lago de la ciudad de México (Marsal y Mazari, 1959; Reséndiz, 1964; Línea 9 Oriente del STC, 1986), y en las pruebas de Seed y Reese (1957). Los resultados de estas últimas, son por cierto consistentes con los obtenidos por Reséndiz, Figs. 3.28 y 3.29.

Las Figs. 3.28 y 3.29 muestran la consistencia de los resultados obtenidos por Seed-Reese y Reséndiz, relacionando el porcentaje de longitud efectiva de fricción positiva con el porcentaje de carga transferida, que en ambos casos son semejantes y casi coinciden (Fig. 3.28). Estas gráficas muestran que el fenómeno de transferencia de carga se presenta de la misma manera, independientemente del tipo de arcilla en que se encuentre el pilote y de la longitud del mismo; cabe recordar que el pilote probado por Seed y Reese fue más corto (4.35 m) que el utilizado por Reséndiz (22 m) y de material diferente, acero y concreto reforzado respectivamente.

#### - Curva CT/RC vs deformación

Esta curva es semejante a la sugerida por Coyle y Reese (Fig. 3.26). En la Fig. 3.30 se muestra la gráfica propuesta para la ciudad de México, la cual se determinó en base a los resultados de las pruebas anteriormente señaladas. Como se sabe el desplazamiento necesario para mobilizar la fricción lateral es en general pequeño (del orden de 10 a 20 mm)

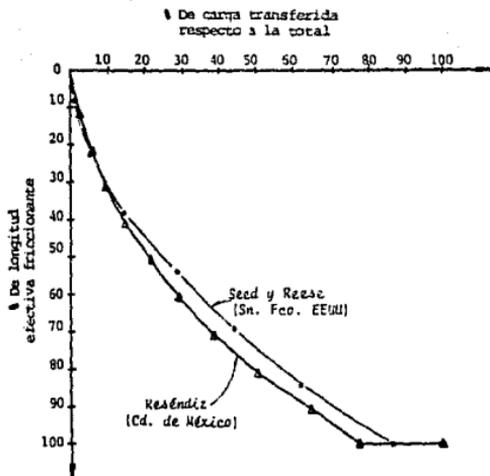


Fig. 3.28 Consistencia de los resultados obtenidos de las pruebas de carga

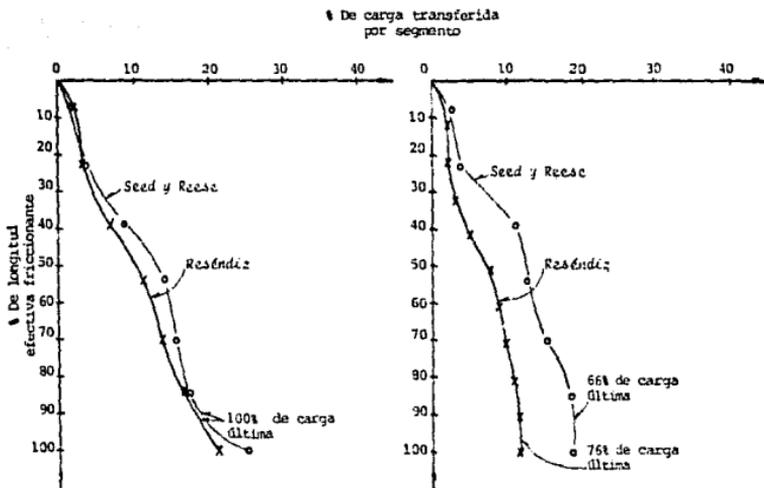


Fig. 3.29 Consistencia de los resultados obtenidos de las pruebas de carga

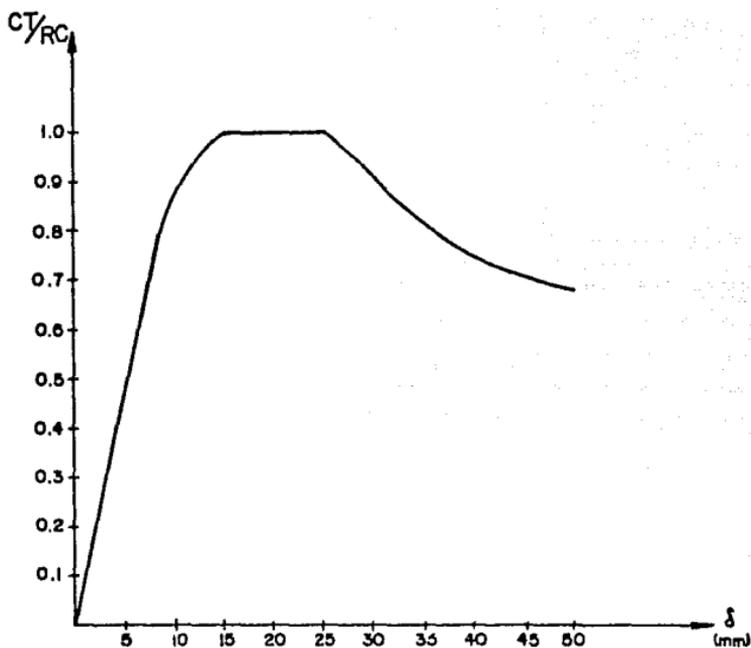


Fig. 3.30 Curva nominal relación carga transferida /resistencia al corte contra desplazamiento del pilote para la arcilla de la ciudad de México

independiente del tipo de suelo y de las dimensiones del pilote (A. Kézdi, 1976); en la arcilla del Valle de México varía de 15 mm (Reséndiz, 1964) a 25 mm (Marsal y Mazari, 1959). Los resultados de ciertas pruebas en la Línea 9 del STC arrojan valores intermedios. Como se sabe el pilote no es capaz de transferir una carga mayor que la resistencia al corte del suelo; por lo tanto, para el intervalo de deformación del suelo, 15 a 25 mm, en que se presentó la carga máxima en las pruebas de pilotes, el cociente (CT/RC) no tendrá un valor mayor a 1.0. Conforme continúa el desplazamiento del pilote, más de 25 mm, la carga sobre él bajará hasta alcanzar el valor de 0.7 de la máxima, que corresponde a la zona de fluencia.

#### - Curva Resistencia al corte vs profundidad

Esta curva se define a partir de pruebas de laboratorio efectuadas sobre especímenes inalterados obtenidos antes del hincado de los pilotes, que se obtienen del sitio por medio de sondeos.

Las curvas que se proponen, tienen por objeto considerar los efectos posteriores, ya indicados, al hincado del pilote y son las siguientes:

#### - Curva (CT/RC) vs $Z$ Efectiva

De las Figs. 3.15(b) y 3.21, se observa que el cociente (CT/RC) varía conforme a la profundidad; sin embargo, el valor máximo que debe adquirir es 1.0, ya que en el extremo inferior la carga transferida cuando más puede ser igual a la resistencia al cortante del suelo. Por otra parte dicho cociente es menor que 1.0 en el extremo superior, lo que indica que la carga transferida al suelo es menor que su resistencia. De acuerdo a los resultados de Seed-Reese y Reséndiz la zona en la que el cociente debe ser igual a 1.0, comprende del 0 al 20% de la longitud efectiva cerca de la punta del pilote. La gráfica propuesta se muestra en la Fig. 3.31.

#### - Curva Factor de ganancia de resistencia ( $\gamma$ ) vs $Z$ Efectiva

Por lo establecido por Coyle y Reese (1966), si la carga transferida por el pilote se compara con la resistencia del suelo en su condición inalterada antes del hincado, llevará a obtener valores del cociente (CT/RC) mayores que 1.0, Fig. 3.15(b), lo cual no es lógico; sin embargo, debe recordarse que el suelo alrededor del pilote después del remoldeo y la

reconsolidación, gana resistencia al esfuerzo corte en una proporción del 50 a 60%, con respecto a la del estado inalterado, Fig. 3.16.

Por lo anterior, se define una tercera curva que considera el incremento de la resistencia del suelo por remoldeo y reconsolidación del mismo. Se puede contar con el valor de la resistencia al corte antes del hincado del pilote, a partir de sondeos realizados en el lugar. Como se ha dicho, el suelo se ve más solicitado en la zona cercana a la punta, mientras que en la cabeza la carga transferida no alcanza el valor de la resistencia del suelo y para que esto suceda, el incremento de resistencia debe ser más significativo a profundidad, por lo que la gráfica propuesta toma la forma indicada en la Fig. 3.32. El factor de ganancia ( $X$ ) puede ser fijado de acuerdo a la experiencia local que se tenga, sobre el incremento de la resistencia del suelo al esfuerzo cortante.

Así pues el método propuesto conserva las mismas ideas expuestas por Coyle y Reese en su artículo, por lo que los primeros cuatro pasos son idénticos a los del original, continuando de la siguiente manera:

5. Con el valor  $y_1$  y utilizando la curva de la Fig. 3.30 encontramos el valor del cociente  $(CT/RC)_1$ .

6. Se determina a qué porcentaje de la longitud efectiva de fricción se localiza el punto medio del segmento analizado y utilizando la curva de la Fig. 3.31 se obtiene el valor del factor  $\psi$  que se utiliza para determinar el valor corregido del cociente  $(CT/RC)_1$ ; es decir:

$$(CT/RC)_{1c} = \psi (CT/RC)_1 \quad (3.42)$$

7. Se determina la resistencia al corte del suelo a la profundidad analizada.

8. Con el valor del porcentaje de longitud efectiva se obtiene el valor del factor de ganancia de resistencia ( $X$ ) de la Fig. 3.32; se afecta a la resistencia al esfuerzo cortante obtenida en el paso anterior, siendo el valor final:

$$RC_{1c} = X * RC_1 \quad (3.43)$$

donde

$RC_{1c}$  resistencia al corte final, en el segmento  $i$

$RC_1$  resistencia al corte en el estado inalterado previo en el segmento  $i$

9. Se calcula la carga transferida o adherencia como:

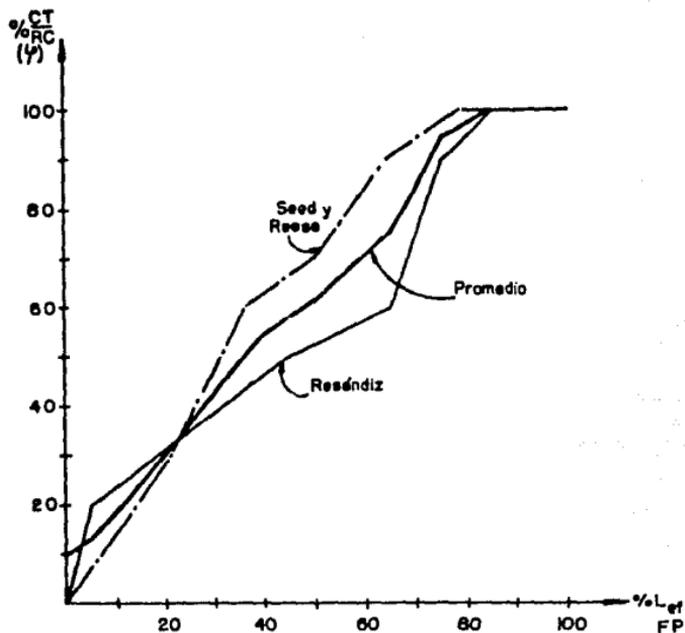


Fig. 3.31 Curva porcentaje de longitud efectiva de fricción contra porcentaje de relación carga transferida resistencia al corte

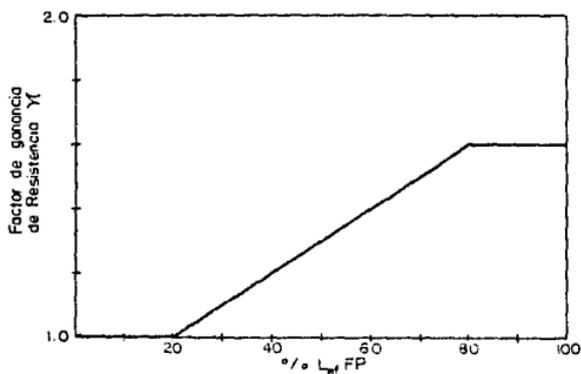


Fig. 3.32 Curva porcentaje de longitud efectiva de fricción contra factor de ganancia de resistencia al corte del suelo (γ)

$$(CT)_1 = (CT/RC)_{P_1} * RC_P \quad (3.44)$$

La carga  $P_1$  en la parte superior del segmento se calcula con la ec. 3.38.

10. Se calcula la deformación elástica del punto medio del segmento, considerando deformación bajo carga axial, utilizando la ec. 3.39.

11. El nuevo desplazamiento del punto medio del segmento es la suma del desplazamiento de la punta (asentamiento del suelo) más la deformación elástica que sufre el pilote al verse sometido a una carga axial.

$$y_1' = y_{e1} + \Delta d_1'$$

12.  $y_1'$  se compara con el valor estimado de  $y_1$  (paso 4).

13. Si  $y_1'$  y  $y_1$  no se encuentran dentro de la tolerancia especificada, se repiten los pasos del 2 al 12 para determinar un nuevo desplazamiento del punto medio.

14. Cuando se alcanza la convergencia, se pasa al segmento inmediato superior y así sucesivamente, hasta obtener el valor de  $P_n$  y el desplazamiento  $y_n$  de la parte superior del pilote.

Debido a la característica del método de ser iterativo, se presta para programarlo en una microcomputadora personal; el programa al respecto se comenta en el siguiente capítulo bajo el nombre de TRANSCARG.

### 3.4.1 Práctica a nivel mundial

Varios códigos de construcción establecen la necesidad de realizar un análisis del pilote bajo las cargas de sollicitación, para conocer los máximos esfuerzos que se pueden esperar. Volviendo a los resultados de J.A. Focht y M. W. O'neill (1985), encontraron que la mayor parte de las personas encuestadas, realizan algún tipo de análisis de esfuerzos sobre el pilote; cerca del 80% calculan o especifican los esfuerzos permisibles. El 70% que trata con pilotes hincados calculan los esfuerzos debidos a tal acción por medio de algún método que puede ser a partir del análisis de la ecuación de onda; un 54% estiman los esfuerzos debidos al manejo de los pilotes precolados. Algunos que utilizan pilotes precolados, no realizan ningún análisis de esfuerzos debidos a manejo e hincado ya que según ellos utilizan las precauciones indicadas por las normas.

Otras de las preguntas realizadas consistió en ¿Qué métodos se utilizan para estimar la deformación del pilote?. El método utilizado con más frecuencia (52%) es el "t-z" o método de la función de transferencia (Coyle y Reese, 1966; Kraft et al, 1982) ya sea con funciones lineales o no lineales. Algunos encuestados indicaron que dicho método lo complementan con un análisis de esfuerzos residuales, debidos al hincado. Un 36% utilizan soluciones elásticas que incluyen modificaciones para considerar el desplazamiento entre pilote y suelo. El porcentaje de utilización de otros métodos se puede ver en la siguiente tabla.

**TABLA 3.2**  
**MÉTODOS PARA EL CALCULO**  
**DE LA DEFORMACION DE LA CABEZA DEL PILOTE**

Método	Frecuencia	Porcentaje
Curvas de transferencia de carga (t - z)	29	52
Soluciones elásticas	20	36
Movimiento elástico de la punta más acortamiento	6	11
Modelos de elemento finito	5	9
Modelos numéricos basados en la solución de Mindlin	4	7
Asentamiento por consolidación únicamente	1	2
Otros, ninguno o no respondieron	16	29

Por lo tanto, de los dos enfoques más utilizados, el más frecuente es el del análisis de la transferencia de carga.

Se seleccionó el método desarrollado por Coyle y Reese (1966), debido a que cae dentro de los enfoques más empleados a nivel mundial. Describe de qué manera se transfiere la carga al suelo y al mismo tiempo la carga que se tiene a diferentes profundidades, lo que permite calcular los esfuerzos en esos puntos. Es un método que puede usarse para predecir la carga axial máxima de un pilote y su curva carga - asentamiento; además, relaciona las características de resistencia del suelo con la carga transferida y el movimiento que sufre un pilote de fricción en arcillas.

### 3.5 METODO DE ASCHENBRENNER PARA EL ANALISIS DE GRUPOS DE PILOTES

Con frecuencia la superestructura de una edificación se analiza con los métodos más sofisticados, mientras que la subestructura, es decir la cimentación, con métodos más sencillos, como por ejemplo el método del polígono de fuerzas.

Para tratar de subsanar esta situación, al menos en parte, se seleccionó el método desarrollado por Aschenbrenner (1967), para el análisis de un grupo de pilotes, que considera simultáneamente los siguientes aspectos:

- a) la capacidad de carga axial del pilote.
- b) la resistencia a cargas laterales del pilote,
- c) la condición tridimensional, tanto del sistema estructural como del sistema de cargas aplicado.

#### 3.5.1 Hipótesis de trabajo adoptadas

1. La geometría de la cimentación es tridimensional. Los pilotes pueden ser verticales y/o inclinados en cualquier posición. El sistema de fuerzas y momentos externos están formados por sus tres componentes, en dirección de los ejes  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . El plano  $xy$  coincide con el de la placa de cimentación. La dirección positiva del eje  $z$  es tomada hacia abajo. El origen del sistema coordenado puede ser localizado en cualquier punto conveniente; es importante señalar que las líneas de acción de las fuerzas coinciden con los ejes coordenados del sistema.

2. La losa de cimentación es completamente rígida y sus movimientos son pequeños.

3. Los pilotes se consideran articulados a la losa, suposición que está lejos de la realidad, ya que los pilotes se encuentran embebidos en ella y por lo tanto sería más razonable considerarlos empotrados; sin embargo, análisis realizados por Hrennikoff (1949), demostraron que las cargas resultantes son similares en ambos casos. Como se verá más adelante, los momentos de empotramiento de los pilotes se estiman a partir de la magnitud de los giros en dicha conexión y de la rigidez lateral del conjunto pilote-subsuelo.

4. Las cargas admisibles sobre un pilote en las direcciones axial y transversal son  $P_a$  y  $Q_a$ , respectivamente; éstas tienen que establecerse mediante análisis teórico, pruebas de carga, algún reglamento o utilizando el método expuesto en el inciso 3.4, para estimar la carga axial máxima. Estas cargas están ligadas por la relación

$$r = \frac{Q_a}{P_a} \quad (3.45)$$

5. Se debe especificar el desplazamiento axial de la cabeza, que es el resultado de la deformación del suelo bajo la punta y el acortamiento elástico del pilote. Los límites superior e inferior pueden ser:

$d_{min}$  de acuerdo al criterio del diseñador

$d_{min}$  será la compresión elástica del pilote cuando está apoyado en la punta

$$d_{min} = \frac{P_a L}{AE} \quad (3.46)$$

o bien, en el caso de pilotes de fricción:

$$d_{min} = \frac{P_a L}{2AE} \quad (3.47)$$

6. El desplazamiento lateral de la cabeza del pilote,  $d_e$ , no excederá el desplazamiento axial,  $d_n$ , producido por la carga axial permisible; es decir:

$$(d_e)_a \leq (d_n)_a \quad (3.48)$$

7. La carga axial,  $P$ , y la carga transversal,  $Q$ , soportadas por un pilote, se suponen directamente proporcionales al desplazamiento axial,  $d_n$ , y al desplazamiento transversal  $d_e$ , de la cabeza del pilote, respectivamente; ésto es:

$$P = n d_n \quad (3.49)$$

$$Q = t d_e \quad (3.50)$$

donde  $n$  y  $t$  son constantes del pilote. Estas constantes se definen como las fuerzas que actúan sobre el pilote y que le producen un desplazamiento unitario; es decir,  $d_n=1$  y  $d_e=1$ .

### 3.5.2 Estimación de las fuerzas resultantes

Para obtener los valores de las cargas sobre los pilotes producidas por las fuerzas y momentos externos, se dan a la cimentación desplazamientos unitarios  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$  y

rotaciones unitarias  $\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$ . En general, cada movimiento lleva en consideración las fuerzas resistentes en los pilotes ( $n d_k$ ) en la dirección axial, y ( $t d_k$ ) en la transversal; estos pueden evaluarse mediante geometría analítica. En la Tabla 3.3 se proporcionan las fuerzas resultantes de pilotes para los seis movimientos unitarios, y los cosenos directores de las direcciones transversales de los pilotes.

TABLA 3.3

$m$	$P = n d_k$	$Q = t d_k$	$\cos \alpha_{kt}$	$\cos \beta_{kt}$	$\cos \gamma_{kt}$
$\Delta x = 1$	$-n \cos \alpha_k$	$t \operatorname{sen} \alpha_k$	$-\operatorname{sen} \alpha_k$	$\cot \alpha_k \cos \beta_k$	$\cot \alpha_k \cos \gamma_k$
$\Delta y = 1$	$-n \cos \beta_k$	$t \operatorname{sen} \beta_k$	$\cos \alpha_k \cot \beta_k$	$-\operatorname{sen} \beta_k$	$\cot \beta_k \cos \gamma_k$
$\Delta z = 1$	$-n \cos \gamma_k$	$-t \operatorname{sen} \gamma_k$	$-\cos \alpha_k \cot \gamma_k$	$-\cos \beta_k \cot \gamma_k$	$\operatorname{sen} \gamma_k$
$\alpha_x = 1$	$-n \cos \gamma_k \gamma_{Ak}$	$-t \operatorname{sen} \gamma_k \gamma_{Ak}$	$-\cos \alpha_k \cot \gamma_k$	$-\cos \beta_k \cot \gamma_k$	$\operatorname{sen} \gamma_k$
$\alpha_y = 1$	$-n \cos \gamma_k \gamma_{Ak}$	$t \operatorname{sen} \gamma_k \gamma_{Ak}$	$-\cos \alpha_k \cot \gamma_k$	$-\cos \beta_k \cot \gamma_k$	$\operatorname{sen} \gamma_k$
$\alpha_z = 1$	$-n \cos c_k \rho_{Ak}$	$t \operatorname{sen} c_k \rho_{Ak}$	$(\operatorname{sen} \alpha_{Ak} + \cos \alpha_k \cos c_k) / \operatorname{sen} c_k$	$(-\cos \alpha_{Ak} + \cos \beta_k \cos c_k) / \operatorname{sen} c_k$	$\frac{\cos \gamma_k \cos c_k}{\operatorname{sen} c_k}$
$\cos c_k = -\operatorname{sen} \alpha_{Ak} \cos \alpha_k + \cos \alpha_{Ak} \cos \beta_k$					

La resultante de las fuerzas resistentes está formada por los componentes en las direcciones de los ejes x, y, z y sus momentos alrededor de los ejes; todas estas se definen como constantes de cimentación. Así, un desplazamiento unitario  $\Delta x = 1$ , dará lugar a las constantes  $X_{xx}, Y_{xx}, Z_{xx}, M_{yx}, M_{yz}, M_{zx}$ ; mientras que un giro unitario  $\alpha_x = 1$  produce  $X_{xx}, Y_{xx}, Z_{xx}, M_{yx}, M_{yz}, M_{zx}$  y  $M_{yxx}$  y  $M_{zxx}$ .

Las componentes de una fuerza resultante producidas por el desplazamiento  $\Delta x$  son por ejemplo:  $(X_{xx} \Delta x)$ ,  $(Y_{xx} \Delta x)$  y  $(Z_{xx} \Delta x)$  y los momentos reales  $(M_{yx} \Delta x)$ ,  $(M_{yz} \Delta x)$  y  $(M_{zx} \Delta x)$ . Aschenbrenner prefirió usar, por sencillez, las constantes del pilote; la forma usada es:

$$X_{xx} \Delta x = (X_{xx}/n) (\Delta x n) = X'_{xx} \Delta'_{xx}$$

donde

$X'_{xx}$  constante reducida de cimentación

### $\Delta'_{xx}$ movimiento reducido de cimentación

Los componentes del sistema externo de fuerzas son  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$  y  $M_x$ ,  $M_y$ ,  $M_z$ . La cimentación se encuentra bajo la acción del sistema de fuerzas indicado, que provocan un desplazamiento de la cimentación induciendo fuerzas sobre los pilotes. Los movimientos reducidos  $\Delta'x$ ,  $\Delta'y$ ,  $\Delta'z$ ,  $\alpha'_x$ ,  $\alpha'_y$  y  $\alpha'_z$ , se obtienen de un sistema de seis ecuaciones lineales simultáneas que expresan el equilibrio de fuerzas en la cimentación:

$$\begin{aligned}
 a_{11} \Delta'x + a_{12} \Delta'y + a_{13} \Delta'z + a_{14} \alpha'_x + a_{15} \alpha'_y + a_{16} \alpha'_z + F_x &= 0 \\
 a_{21} \Delta'x + a_{22} \Delta'y + a_{23} \Delta'z + a_{24} \alpha'_x + a_{25} \alpha'_y + a_{26} \alpha'_z + F_y &= 0 \\
 a_{31} \Delta'x + a_{32} \Delta'y + a_{33} \Delta'z + a_{34} \alpha'_x + a_{35} \alpha'_y + a_{36} \alpha'_z + F_z &= 0 \\
 a_{41} \Delta'x + a_{42} \Delta'y + a_{43} \Delta'z + a_{44} \alpha'_x + a_{45} \alpha'_y + a_{46} \alpha'_z + M_x &= 0 \\
 a_{51} \Delta'x + a_{52} \Delta'y + a_{53} \Delta'z + a_{54} \alpha'_x + a_{55} \alpha'_y + a_{56} \alpha'_z + M_y &= 0 \\
 a_{61} \Delta'x + a_{62} \Delta'y + a_{63} \Delta'z + a_{64} \alpha'_x + a_{65} \alpha'_y + a_{66} \alpha'_z + M_z &= 0
 \end{aligned} \quad (3.51)$$

Las constantes reducidas de cimentación  $a_{ij}$ , se obtienen al sumar las componentes de todas las fuerzas de pilote inducidas, en las direcciones de los ejes coordenados. En la Tabla 3.4 se resumen los 21 coeficientes diferentes  $a_{ij}$ ; se cumple que  $a_{i,j} = a_{j,i}$ . La Fig. 3.33 muestra el significado de las variables utilizadas en la Tabla 3.4.

Como se estableció en la ecuación 3.45, la constante del pilote vale

$$r = \frac{Q_a}{P_a} = \frac{t(d_c)_a}{n(d_n)_a}$$

considerando para cargas admisibles que  $(d_n)_a = (d_c)_a$  queda:

$$r = \frac{t}{n} \quad (3.52)$$

es en ésta constante donde se introduce la característica de la resistencia del pilote, tanto a carga axial como a carga lateral.

Aschenbrenner sugiere que el valor de la constante  $t$  se puede estimar según el criterio de Hetenyi (1946), ya que el pilote está soportado lateralmente por el suelo en toda su longitud, se considera como una viga sobre una cimentación elástica de longitud infinita cargada en su extremo libre;

TABLA 3.4

COEFICIENTE DE MATRIZ	PILOTES INCLINADOS	PILOTES VERTICALES
$a_{11} = X'_X$	$-\sum_{k=1}^{k=b} (\cos^2 \alpha_k + r \sin^2 \alpha_k)$	$-\sum_{k=1-b}^{k=1} r$
$a_{12} = X'_Y = Y'_X$	$\sum_1^b [(r-1) \cos \alpha_k \cos \beta_k]$	0
$a_{13} = X'_Z = Z'_X$	$\sum_1^b [(r-1) \cos \alpha_k \cos \gamma_k]$	0
$a_{14} = X'_X = M'_{X,X}$	$\sum_1^b [(r-1) \cos \alpha_k \cos \gamma_k \psi_{Ak}]$	0
$a_{15} = X'_X = M'_{Y,X}$	$\sum_1^b [(1-r) \cos \alpha_k \cos \gamma_k \alpha_{Ak}]$	0
$a_{16} = X'_Z = M'_{Z,X}$	$\sum_1^b \{ [-\cos \alpha_k \cos \gamma_k + r(\sin \alpha_{Ak} + \cos \alpha_k \cos \gamma_k)] \rho_{Ak} \}$	$+\sum_{1-b}^1 (r \psi_{Ak})$
$a_{22} = Y'_Y$	$-\sum_1^b (\cos^2 \beta_k + r \sin^2 \beta_k)$	$-\sum_{1-b}^b r$
$a_{23} = Y'_Z = Z'_Y$	$\sum_1^b [(r-1) \cos \beta_k \cos \gamma_k]$	0
$a_{24} = Y'_X = M'_{X,Y}$	$\sum_1^b [(r-1) \cos \beta_k \cos \gamma_k \psi_{Ak}]$	0
$a_{25} = Y'_X = M'_{Y,Y}$	$\sum_1^b [(1-r) \cos \beta_k \cos \gamma_k \alpha_{Ak}]$	0
$a_{26} = Y'_Z = M'_{Z,Y}$	$-\sum_1^b \{ [\cos \beta_k \cos \gamma_k + r(\cos \alpha_{Ak} - \cos \beta_k \cos \gamma_k)] \rho_{Ak} \}$	$-\sum_{1-b}^1 (r \alpha_{Ak})$
$a_{33} = Z'_Z$	$-\sum_1^b (\cos^2 \gamma_k + r \sin^2 \gamma_k)$	$-\sum_{1-b}^1 1$
$a_{34} = Z'_X = M'_{X,Z}$	$-\sum_1^b [(\cos^2 \gamma_k + r \sin^2 \gamma_k) \psi_{Ak}]$	$-\sum_{1-b}^1 \psi_{Ak}$

COEFICIENTE DE MATRIZ	PILOTES INCLINADOS	PILOTES VERTICALES
$a_{35} = Z'_Y = M'_{Y,Z}$	$\sum_1^b [(\cos^2 \gamma_k + r \operatorname{sen}^2 \gamma_k) \alpha_{Ak}]$	$\sum_{1-b}^1 \alpha_{Ak}$
$a_{36} = Z'_Z = M'_{Z,Z}$	$\sum_1^b [(r-1) \cos \gamma_k \operatorname{cosec}_k \rho_{Ak}]$	0
$a_{44} = M'_{X,X}$	$-\sum_1^b [(\cos^2 \gamma_k + r \operatorname{sen}^2 \gamma_k) \psi_{Ak}^2]$	$-\sum_{1-b}^1 \psi_{Ak}^2$
$a_{45} = M'_{X,Y} = M'_{Y,X}$	$\sum_1^b [(\cos^2 \gamma_k + r \operatorname{sen}^2 \gamma_k) \alpha_{Ak} \psi_{Ak}]$	$\sum_{1-b}^1 (\alpha_{Ak} \psi_{Ak})$
$a_{46} = M'_{X,Z} = M'_{Z,X}$	$\sum_1^b [(r-1) \cos \gamma_k \operatorname{cosec}_k \rho_{Ak} \psi_{Ak}]$	0
$a_{55} = M'_{Y,Y}$	$-\sum_1^b [(\cos^2 \gamma_k + r \operatorname{sen}^2 \gamma_k) \alpha_{Ak}^2]$	$-\sum_{1-b}^1 \alpha_{Ak}^2$
$a_{56} = M'_{Y,Z} = M'_{Z,Y}$	$\sum_1^b [(1-r) \cos \gamma_k \operatorname{cosec}_k \rho_{Ak} \alpha_{Ak}]$	0
$a_{66} = M'_{Z,Z}$	$\sum_1^b \{ [\cos \alpha_k \operatorname{cosec}_k - r(\operatorname{sen} \alpha_k + \cos \alpha_k \operatorname{cosec}_k)] \rho_{Ak} \psi_{Ak} - [\cos \beta_k \operatorname{cosec}_k + r(\cos \alpha_k - \cos \beta_k \operatorname{cosec}_k)] \rho_{Ak} \alpha_{Ak} \}$	$-\sum_{1-b}^1 (r^2 \rho_{Ak})$

l = NUMERO TOTAL DE PILOTES  
 k = PILOTES ARBITRARIO EN CUALQUIER POSICION  
 b = NUMERO DE PILOTES INCLINADOS

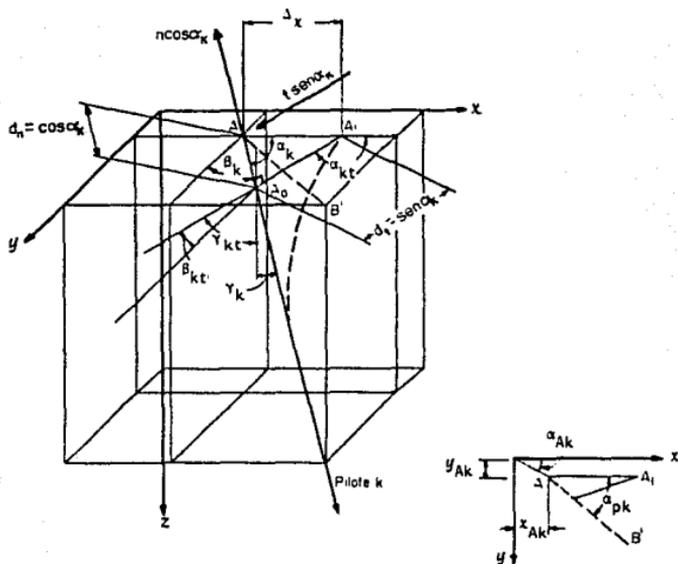


Fig. 3.33 Geometría de un pilote cuando sufre un desplazamiento  $\Delta x = 1$

- $x, y, z$  ejes del sistema coordenado.
- $x_{Ak}, y_{Ak}$  coordenadas de la cabeza del pilote  $k$ .
- $\alpha_{pk}$  ángulo entre el eje  $x$  positivo y la proyección del eje del pilote sobre el plano  $xy$ .
- $\alpha_{Ak}, \rho_{Ak}$  coordenadas polares de la cabeza del pilote  $k$ .
- $\alpha_k, \beta_k, \gamma_k$  ángulos entre los ejes positivos  $x, y$  y  $z$  y el eje del pilote  $k$ .
- $\alpha_{kt}, \beta_{kt}, \gamma_{kt}$  ángulos entre los ejes positivos  $x, y$  y  $z$  y la dirección del desplazamiento lateral del pilote  $k$ .
- $\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$  rotaciones unitarias de la cimentación con respecto a los ejes coordenados  $x, y$  y  $z$ .
- $\alpha_x^r, \alpha_y^r, \alpha_z^r$  giros reducidos de la cimentación.
- $\Delta_x, \Delta_y, \Delta_z$  desplazamiento unitario de la cimentación en la dirección de los ejes coordenados.
- $\Delta_x^r, \Delta_y^r, \Delta_z^r$  movimientos reducidos de la cimentación.

lo cual permite calcular aproximadamente el valor de la constante  $t$  con:

$$t = 0,5 K_m D \lambda^{-1} \quad (3.53)$$

$$\lambda = (K_m D / 4E_p I)^{1/4} \quad (3.54)$$

donde

$K_m$  coeficiente de reacción lateral del suelo,  $t/m^3$

$D$  diámetro del pilote,  $m$

$I$  momento de inercia de la sección transversal del pilote,  $m^4$

$E_p$  módulo de elasticidad del material del pilote,  $t/m^2$

La solución del sistema de ecuaciones (3.51) proporcionan los desplazamientos reducidos de la cimentación ( $\Delta'x$ ,  $\Delta'y$ ,  $\Delta'z$ ), y los ángulos de rotación ( $\alpha'_x$ ,  $\alpha'_y$ ,  $\alpha'_z$ ); a partir de estos se calculan las fuerzas inducidas a los pilotes aplicando las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} \text{res}(d'_n) &= \sum (n d'_n) = -\Delta'x \cos \alpha_k - \Delta'y \cos \beta_k - \Delta'z \cos \gamma_k \\ &\quad - \alpha'_y \psi_{Ak} \cos \gamma_k + \alpha'_x \alpha_{Ak} \cos \gamma_k - \alpha'_z \rho_{Ak} \cos c_k \end{aligned} \quad (3.55)$$

$$\begin{aligned} \text{res}(d'_{lx}) &= \sum (n d'_{lx} \cos \alpha_{kt}) = -\Delta'x \text{sen}^2 \alpha_k + \Delta'y \cos \alpha_k \cos \beta_k \\ &\quad + \Delta'z \cos \alpha_k \cos \gamma_k + \alpha'_x \cos \alpha_k \cos \gamma_k \psi_{Ak} \\ &\quad - \alpha'_y \cos \alpha_k \cos \gamma_k \alpha_{Ak} + \alpha'_z (\text{sen} \alpha_{Ak} + \cos \alpha_k \cos c_k) \rho_{Ak} \end{aligned} \quad (a)$$

$$\begin{aligned} \text{res}(d'_{ly}) &= \sum (n d'_{ly} \cos \beta_{kt}) = \Delta'x \cos \alpha_k \cos \beta_k - \Delta'y \text{sen}^2 \beta_k \\ &\quad + \Delta'z \cos \beta_k \cos \gamma_k + \alpha'_x \cos \beta_k \cos \gamma_k \psi_{Ak} \\ &\quad - (\alpha'_y \cos \beta_k \cos \gamma_k \alpha_{Ak}) + \alpha'_z (-\cos \alpha_{Ak} + \cos \beta_k \cos c_k) \rho_{Ak} \end{aligned} \quad (b)$$

$$\begin{aligned} \text{res}(d'_{lz}) &= \sum (n d'_{lz} \cos \gamma_{kt}) = \Delta'x \cos \alpha_k \cos \gamma_k + \Delta'y \cos \beta_k \cos \gamma_k \\ &\quad - \Delta'z \text{sen}^2 \gamma_k - \alpha'_x \text{sen}^2 \gamma_k \psi_{Ak} + \alpha'_y \text{sen}^2 \gamma_k \alpha_{Ak} \\ &\quad + \alpha'_z \cos \gamma_k \cos c_k \rho_{Ak} \end{aligned} \quad (c)$$

Las ecs. 3.55 consideran la resultante de los desplazamientos reducidos en cada uno de los ejes del sistema global; en el caso de la fuerza axial corresponde al desplazamiento axial sobre el eje del pilote.

La fuerza axial sobre el pilote será igual a:

$$P = n d_n = d'_n$$

Y la resultante de las fuerzas transversales, se calcula con:

$$Q = r [\text{res } (d'_{1X})^2 + \text{res } (d'_{1Y})^2 + \text{res } (d'_{1Z})^2]^{1/2} \quad (3.56)$$

Esta fuerza resultante es perpendicular al eje del pilote, y en el caso de pilotes verticales se encuentra alojada en el plano XY.

El método expuesto nos proporciona la carga axial, carga transversal, giro y desplazamiento de la cabeza para cada uno de los pilotes.

### 3.6 METODO DE CALCULO PROPUESTO

Una de las hipótesis en las que se basa el método de Aschenbrenner es la rigidez de la losa; sin embargo como resultado de este estudio, pudo comprobarse que aunque enunciada, dicha hipótesis no está implícita en la solución; ejemplo de ello es que las cargas estimadas sobre cada pilote son iguales en un grupo de pilotes verticales sometidos a carga axial vertical, lo cual sólo es aceptable en el caso de una losa flexible. Debe tenerse presente que en una losa rígida bajo carga vertical, los asentamientos deben ser iguales, y consecuentemente con cargas diferentes sobre cada uno de los pilotes. Por lo tanto, se propone el siguiente método de cálculo basado en el de Aschenbrenner.

#### - Carga vertical

Debido a la falta de mediciones reales, con respecto a la distribución de la carga entre losa-pilotes-suelo, se hacen las siguientes consideraciones.

En el caso de una losa rígida, la distribución de presiones es parabólica, siendo mínima en el centro y máxima en los extremos. Para resolver la distribución de carga sobre los pilotes se hace la hipótesis de que dicha distribución

es semejante a la que se presenta bajo una cimentación rígida circular, según lo establecido por Zeevaert (1974), Fig. 3.34. El método consiste en obtener una carga puntual, que corresponde al sitio donde se localiza cada pilote, al multiplicar el área tributaria correspondiente a cada punto por la presión estimada en esa zona. Cuando se presenten dos o más áreas transversales diferentes de pilotes, se estima la carga sobre cada uno de acuerdo a la siguiente expresión, que considera la compatibilidad de deformaciones entre dos o más columnas cortas; se desarrolla para el caso de 2 secciones.

$$\delta_1 = \delta_2$$

$$\frac{P_1}{n_1} = \frac{P_2}{n_2}$$

de donde  $P_1 = P_2 n_1/n_2$  (3.57)

por otro lado

$$F_z = sP_1 + wP_2$$

$$F_z = P_2 (sn_1/n_2 + w)$$

$$P_2 = F_z / (sn_1/n_2 + w) \quad (3.58)$$

donde

- $\delta$  deformación axial del pilote
- s número de pilotes de la sección 1
- w número de pilotes de la sección 2
- s + w es el número total de los pilotes del conjunto

Las fórmulas 3.57 y 3.58 proporcionan la carga axial sobre los pilotes de acuerdo a su sección transversal.

Con estos valores se determina en que cantidad excede o son menores que la distribución uniforme, considerando una sección transversal única, dicha cantidad se sumará o restará a la distribución ajustada para obtener la carga final sobre cada pilote.

El método se sintetiza a continuación:

1. Cálculo del radio equivalente para un área circular igual a la de la cimentación en estudio.
2. Estimación del valor de  $q_{ed}$ , que es el esfuerzo límite que se alcanza en los bordes de una cimentación rígida por efectos viscosos y relajación de esfuerzos en el suelo.

$$q_{ed} = 3/2 s + \sigma_{ed} \quad (3.59)$$

donde

- s es la resistencia al esfuerzo cortante del suelo

$\sigma_{ed}$  es el esfuerzo efectivo a nivel de la cimentación

3. Se toma un porcentaje de la carga total, para llevar a cabo la distribución de cargas sobre los pilotes (Zeevaert, 1974).

$$Q_L = Q_T / (1+Rq) \quad (3.60)$$

$$1 < Rq < 4$$

donde

$Q_L$  Porcentaje de carga a distribuir entre los pilotes

$Q_T$  Carga total sobre la cimentación

$Rq$  Relación de carga pilote-suelo

4. Se obtiene el valor de la variable  $a$ , a partir de la Fig. 3.35, donde  $q_u$  es el valor de la presión total uniforme sobre los pilotes.

5. Se obtiene la distribución de presiones con la siguiente expresión:

$$q_r = C_0 q_u / \sqrt{(1 - (r/R)^2)} \quad (3.61)$$

$$\text{donde } C_0 = 1 / [2 - (1-a^2)^{1/2}] \quad (3.62)$$

válida para  $0 < r < R_u$ ;  $r$  es la distancia del centro de la cimentación a cada pilote.

Para  $R_u < r < R$ , el valor que adquiere  $q_r = q_{rp}$ ; el significado de las literales está de acuerdo a la Fig. 3.34.

6. Se determina el porcentaje de diferencia que existe entre la distribución uniforme y la que se calculó, ajustando según sea el caso:

$$\% \text{ Dif} = (C_{un} - C_{di}) / C_{di} \quad (3.63)$$

$$\text{si } \% \text{ Dif} < 1 \quad \text{Cargai} = C_{un} - C_{un} * \% \text{ Dif}$$

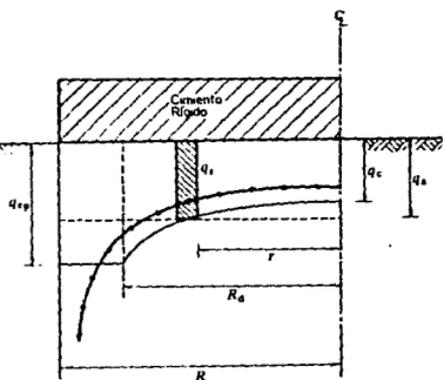
$$\text{si } \% \text{ Dif} > 1 \quad \text{Cargai} = C_{un} + C_{un} * (\% \text{ Dif} - 1)$$

donde

$C_{un}$  presión debida a la distribución uniforme en un punto a la distancia  $r$

$C_{di}$  presión debida a la distribución parabólica en un punto a la distancia  $r$

$\text{Cargai}$  presión final ajustada entre losa-suelo a la distancia  $r$



3.34 Distribución de presiones bajo una cimentación circular rígida (Zeevaert, 1974)

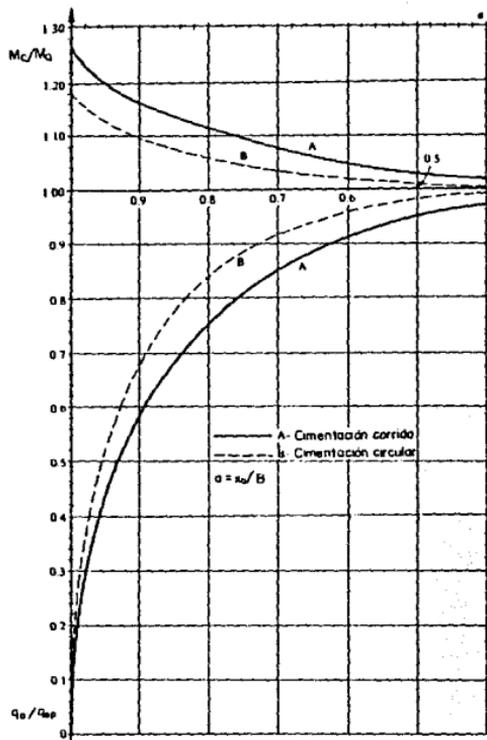


Fig. 3.35 Curva  $q_a/q_{sp}$  vs.  $a$  para calcular los radios de contacto en una cimentación circular rígida (Zeevaert, 1974)

Esta presión final ajustada se multiplica por el área tributaria de cada pilote, para obtener la carga sobre cada uno de ellos.

7. Es necesario realizar un nuevo ajuste de acuerdo a la posición que guarde cada uno de los pilotes en el conjunto y con referencia al centro de carga, para lo cual se interpola la Fig. 3.36, obtenida en base a los resultados experimentales de Whitaker (1957).

8. Se estima el asentamiento elástico que producirán las cargas en cada uno de los pilotes, con la siguiente ecuación:

$$\delta_v = \sum \delta_i a_i / \sum a_i \quad (3.64)$$

donde

$a_i$  área tributaria para el pilote  $i$

$\delta_i$  asentamiento individual del pilote  $i$

$$\delta_i = P_i / n_{i \max}$$

- Cargas horizontales (sentido  $x$  o  $y$ )

Dado que la losa de cimentación se considera rígida, el desplazamiento lateral en cada uno de los pilotes será el mismo y por lo tanto:

$$\delta_{T1} = \delta_{T2}$$

$$\frac{H_1}{t_1} = \frac{H_2}{t_2}$$

$$H_1 = H_2 t_1 / t_2 \quad (3.65)$$

además

$$F_n = sH_1 + wH_2$$

$$F_n = H_2 (st_1/t_2 + w)$$

$$H_2 = F_n / (st_1/t_2 + w) \quad (3.66)$$

Las ecuaciones 3.65 y 3.66 proporcionan las cargas laterales respectivas sobre los pilotes.

- Momentos (alrededor de los eje  $x$  o  $y$ )

El momento  $M_x$  produce un giro  $\alpha_x$  de la losa, por lo tanto, el desplazamiento axial es  $d_n = \alpha_x y$ , para el pilote  $i$ , y la carga axial será:

$$P = nd_n = n \alpha_x y \quad (3.67)$$

ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA

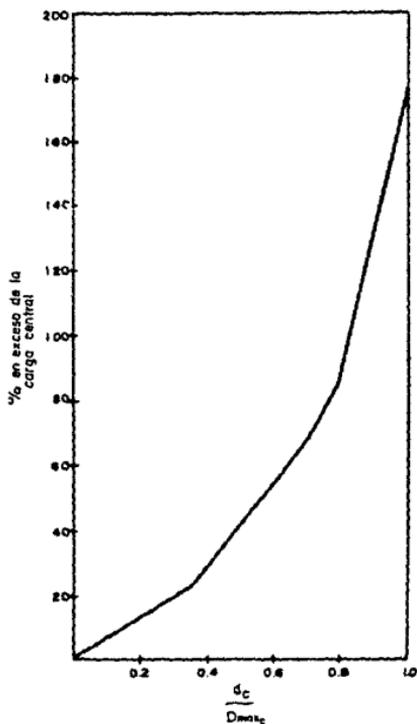


Fig. 3.36 Curva  $d_{c_{50\%}}/D_{max}$  contra % de carga mayor respecto a la central

el momento resistente que proporciona el pilote i será:

$$M_{r_i} = -Py = -n \alpha_n y^2$$

como  $n \cdot \alpha_n = \alpha'_n$ ,  $M_{r_i} = -\alpha'_n y^2$  y para los n pilotes uniformes del sistema

$$M_n = -\sum \alpha'_n y_i^2 = M_n$$

De la ec. 3.67 se observa que la fuerza P es función directa del coeficiente n, el cual a su vez es del área transversal del pilote; por lo tanto, en el caso de tener pilotes de 2 diferentes secciones, el coeficiente  $a_{44}$  (Tabla 3.4) se definirá como:

$$a_{44} = -n_1 \sum y_1^2 - n_2 \sum y_2^2$$

con este valor se obtiene el giro real de la losa, el cual es constante para toda la cimentación; con ello se cumple con la condición de compatibilidad de deformaciones.

Finalmente, para pilotes verticales y con 2 secciones diferentes

$$\alpha_n = M_n / a_{44}$$

y la carga axial sobre cada uno de los pilotes será:

$$P_{i1} = n_1 \alpha_n y_{i1}$$

$$P_{i2} = n_2 \alpha_n y_{i2}$$

de igual manera, para el momento alrededor del eje y

$$\alpha_y = M_y / a_{55}$$

$$a_{55} = -n_1 \sum x_1^2 - n_2 \sum x_2^2$$

Una de las hipótesis hechas por Aschenbrenner está relacionada con la conexión de la cabeza del pilote a la losa, la cual se supuso articulada; pero en realidad dada la rigidez de la losa, los pilotes se encuentran prácticamente empotrados en ella, por lo que es necesario calcular los momentos de empotramiento. Dichos momentos son de gran utilidad para conocer la distribución del acero de refuerzo en la zona cercana a la conexión losa-pilote, zona que se ve muy solicitada a momentos flexionantes y cortantes durante las acciones sísmicas en una longitud de 10 veces el diámetro del pilote (Randolph, 1981).

El momento de empotramiento se calculará con la expresión propuesta por Hetenyi (1946), que considera la magnitud del giro de la cabeza y la reacción lateral del suelo, cuyo valor se estima en el método propuesto, la expresión es:

$$\theta = \frac{H(l_c)}{K(l_c/4)}^{-2} + \sqrt{2} \frac{M(l_c)}{K(l_c/4)}^{-2} \quad (3.68)$$

donde

$l_c$  longitud crítica y que se calcula con:

$$l_c = 4 \left( \frac{EI}{K} \right)^{1/4}$$

$H$  fuerza horizontal, aplicada en la cabeza del pilote,  $t$

$\theta$  giro de la cabeza del pilote

$M$  momento aplicado en la cabeza del pilote

$K$  coeficiente de reacción lateral ( $t/m^3$ ), estimado con la expresión de Vesic (1961) y que es:

$$K = 1.3 \frac{\sqrt{D^4}}{EI} \frac{(Es)^{1/2}}{1-\nu^2}$$

$E$  módulo de elasticidad del pilote,  $t/m^2$

$I$  momento de inercia de la sección transversal,  $m^4$

Randolph (1981), realizó un estudio paramétrico de la respuesta de pilotes cargados lateralmente, embebidos en un medio elástico y continuo. Su estudio lo realizó utilizando el método del elemento finito y los resultados los ajustó, para el caso de momento, a una expresión semejante a la 3.68 que es:

$$\theta = \frac{(E_p/G_c)^{1/2}}{r_c G_c} \left[ 0.3H \left( \frac{l_c}{2} \right)^{-2} + 0.8(r_c)^{1/2} M \left( \frac{l_c}{2} \right)^{-2} \right] \quad (3.69)$$

donde

$l_c$  longitud crítica la que se calcula con:

$$l_c = 2 (E_p/G_c)^{1/2} r_o$$

$E_p = (EI)/(r_o^4/4)$

$r_o$  radio del pilote

$G_c = G(1 + 3\nu/4)$ , para suelo homogéneo

$\rho_c = 1$ , para suelo homogéneo

G módulo al cortante del suelo, t/m<sup>2</sup>

Además, este criterio permite conocer la distribución del momento flexionante a lo largo de la longitud crítica, a partir de las Figs. 3.37 y 3.38

Dado que el método de Aschenbrenner maneja una matriz, que se puede llamar de equilibrio, es relativamente sencillo realizar un programa para microcomputadora el cual se describe en el capítulo 5 bajo el nombre de ATRIFILE.

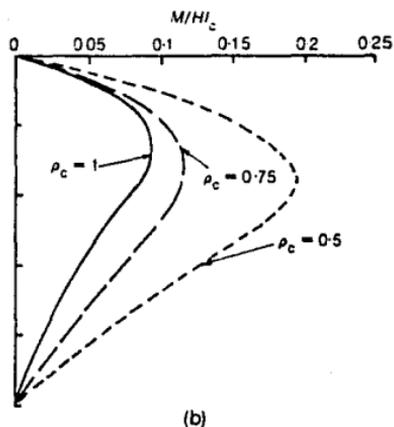


Fig. 3.37 Curva general que muestra la distribución del momento flexionante debido a fuerza lateral (Randolph, 1981)

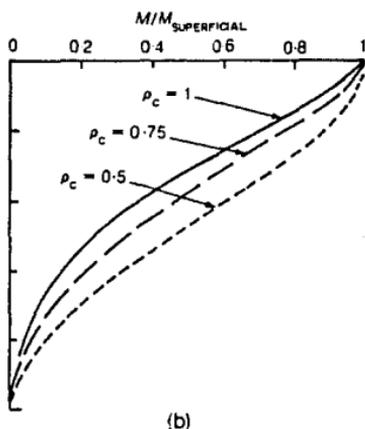


Fig. 3.38 Curva general que muestra la distribución del momento flexionante debido al momento en la cabeza del pilote (Randolph, 1981)

### 3.7 LINEAMIENTOS PARA EL CALCULO DE ASENTAMIENTOS

En las NTC-87 se indica realizar el análisis de estados límite de servicio. Cuando se realice el análisis de asentamientos, es necesario hacer a un lado los métodos empíricos.

Todos los métodos empíricos suponen que el grupo de pilotes trabaja como una gran pila que transmite la carga neta a través de un plano paralelo a la base del conjunto. La principal diferencia entre los diferentes métodos está en la profundidad de dicho plano y el criterio para el cálculo de la distribución de esfuerzos en el subsuelo. Asimismo, hay diferencia en la elección del estrato compresible.

El criterio de Peck supone que la carga está aplicada en el tercio inferior de la longitud de los pilotes y una distribución lineal con pendiente 1:2. El estrato compresible se extiende a partir del mismo plano de aplicación de la carga. En otros métodos la distribución de esfuerzos se calcula con Boussinesq, a partir del mismo plano, o bien del que corresponda a la punta de los pilotes; otros consideran la carga aplicada en la cabeza de los pilotes y distribución lineal con pendiente 1:2 ó 1:4.

Como se puede ver la forma de solucionar el problema depende del criterio del ingeniero, así como del método seleccionado. Sin embargo, dichos métodos han sido establecidos a partir de ciertas condiciones de suelo, distribución y número de pilotes, etc; por lo que se verá reducida su confiabilidad. Por lo tanto, en la medida en que se conozca mejor la manera en que los pilotes transfieren la carga al subsuelo, será posible realizar una mejor estimación de los asentamientos que sufrirá la edificación, evitándose de ésta manera la utilización de los métodos empíricos, la revisión exhaustiva de este aspecto está fuera del alcance de esta tesis.

## CAPITULO 4

### DESARROLLO DE LA SOLUCION NUMERICA

#### 4.1 RESUMEN

En este capítulo se exponen las soluciones numéricas de los métodos modificados de Aschenbrenner [inciso 3.6] y de Coyle-Reese [inciso 3.4].

El programa principal ATRIPILE realiza el análisis tridimensional de un grupo de pilotes verticales, inclinados o de ambos tipos, Fig. 4.1; sobre el conjunto actúan cargas paralelas a los ejes X, Y, Z y momentos alrededor de los mismos; la transmisión de las solicitaciones se lleva a cabo mediante una losa de cimentación, supuestamente rígida, a la que se consideran articuladas las cabezas de los pilotes.

El problema a resolver consiste en determinar las cargas axial y transversal que actúan sobre cada uno de los pilotes integrantes del conjunto. El método seleccionado para resolver el problema, requiere del conocimiento previo de la capacidad axial máxima del pilote representativo del conjunto; el programa presenta la opción de evaluarla o proporcionársela como dato.

El método empleado para calcular la carga individual toma en cuenta las aportaciones de la punta, cuya magnitud depende de los parámetros elásticos E,  $\nu$ ; y de la fricción lateral sobre el pilote, que depende de las características resistencia-esfuerzo-deformación del suelo circundante y que varían con la profundidad. Conocida la carga axial máxima, se procede a realizar el análisis del grupo de pilotes mediante el método inicialmente desarrollado por Aschenbrenner y modificado en este trabajo para ser consistente con sus hipótesis, según se explicó en el inciso 3.6.

El análisis realizado con este programa, permite efectuar un diseño más racional y económico de las cimentaciones piloteadas, ya que al implementarlo en una microcomputadora con un alto componente interactivo, es posible estudiar los efectos sobre el grupo por cambios en la posición, dimensiones o inclinación de los pilotes.

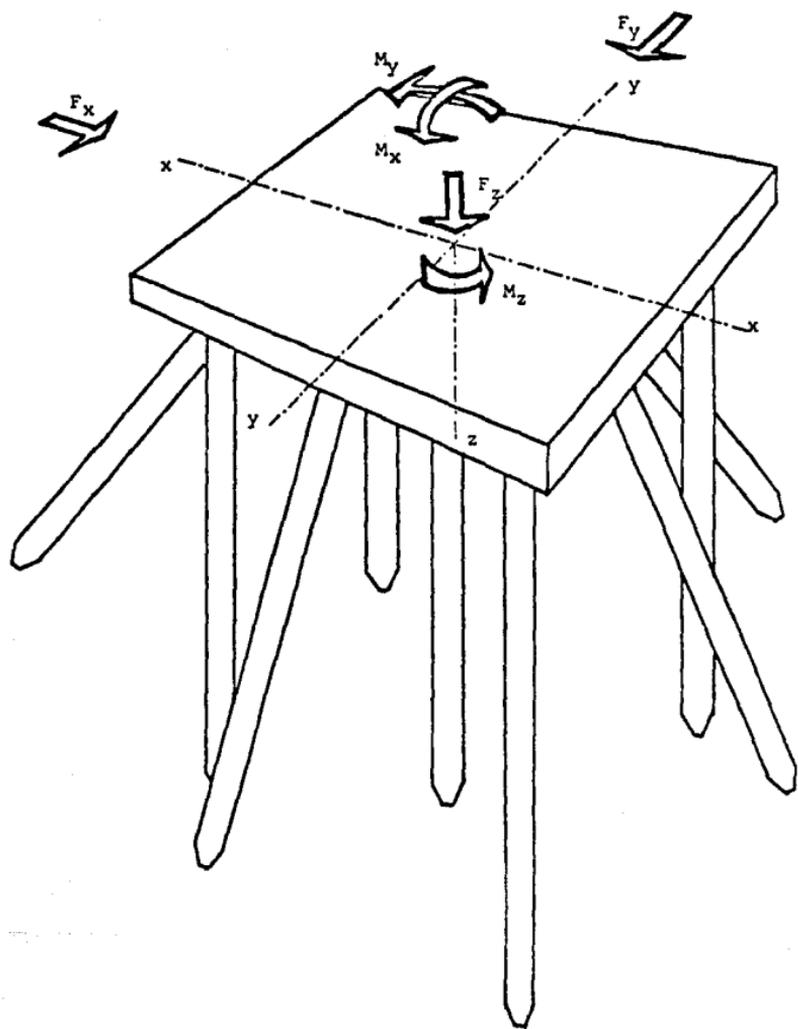


Fig. 4.1 Grupo de pilotes sujetos a cargas externas

El lenguaje de programación utilizado para desarrollar el programa fue el BASIC.

#### 4.2 PROGRAMA ATRIPILE

El análisis de las cargas axial y transversal a que se ven sometidos cada uno de los pilotes, se realiza con el método propuesto por Aschenbrenner. Sus hipótesis principales y método se expusieron ampliamente en el inciso 3.5 y 3.6.

##### 4.2.1 Algoritmo del método de Aschenbrenner

El algoritmo a partir del cual se desarrolló el programa de computadora se describe a continuación:

1. Establecer las coordenadas de las cabezas de los pilotes, sus pendientes y el ángulo ( $\alpha_{PK}$ ) que forma la proyección del eje del pilote sobre el plano XY con el sentido positivo del eje X, [ver Fig 3.33].

2. Calcular los cosenos directores y senos del eje de cada uno de los pilotes, así como sus productos.

3. Determinar las coordenadas polares de las cabezas de los pilotes.

4. Determinación del valor del coeficiente  $r = t/n$ , para cada uno de los pilotes.

5. Obtención de las constantes reducidas de cimentación  $a_{i,j}$ , necesarias para formar el sistema de ecuaciones que expresan el equilibrio. En la Tabla 3.4 se resumen los valores  $a_{i,j}$  se cumple que  $a_{i,j} = a_{j,i}$ .

6. Formación y solución del sistema de ecuaciones simultáneas, ec. 3.51, que expresan el equilibrio de fuerzas en la cimentación.

7. Se calculan los valores de los desplazamientos resultantes con las ecs. 3.55.

8. Obtención de las fuerzas, axial y transversal, sobre los pilotes ecs. 3.55 y 3.56, respectivamente.

#### 4.2.2 Alcance del programa

El programa puede manejar hasta 40 pilotes, de los cuales 21  $\leq$  40 pueden ser inclinados (este número puede ser mayor, dependiendo de la capacidad de memoria de la computadora, para lo cual se tendrá que modificar el tamaño de los arreglos mediante la proposición DIM).

Cada uno de ellos está definido por las coordenadas de su cabeza.

El programa es aplicable a las cimentaciones cuya losa sea de material y dimensiones tales que se pueda considerar completamente rígida; es decir, sólo con traslaciones y rotaciones como un todo.

A pesar de que los pilotes se consideran articulados a la losa, lo cual no parece representativo de la realidad ya que el pilote penetra y se cuela en ella; análisis realizados por Hrennikoff (1949) demostraron que las cargas resultantes son similares en ambos casos.

El momento de empotramiento del pilote se estima a partir del giro que sufre en la cabeza y del coeficiente de reacción lateral, criterio de Hetenyi (1946). También se evalúa siguiendo el criterio de Randolph (1981) que se comentó en el inciso 3.6 y que requiere del conocimiento del módulo al cortante del suelo; además permite conocer la distribución del momento flexionante a lo largo de la longitud crítica.

La variable que más afecta los resultados del programa, es la carga axial máxima que soporta el pilote. La carga máxima se obtiene a partir de algún criterio de capacidad de carga de pilotes, pruebas de campo o bien utilizando el método de transferencia de carga (inciso 3.4), y para el cual se realizó el programa TRANSCARG, que se expondrá en el inciso 4.3.

#### 4.2.3 Variables utilizadas

A continuación se presenta la lista de las variables utilizadas en el programa así como su significado.

- A(1,J) Coeficientes  $a_{1j}$  de la matriz de equilibrio (Tabla 3.4)
- AC Area de la losa o cajón de cimentación
- AT(I) Area tributaria de la cimentación, correspondiente al pilote I

### Cargas externas sobre la losa:

B(1) fuerza sobre el eje X  
B(2) fuerza sobre el eje Y  
B(3) fuerza sobre el eje Z  
B(4) momento alrededor del eje X  
B(5) momento alrededor del eje Y  
B(6) momento alrededor del eje Z

### Para cada pilote I:

BR(I,1) desplazamiento final en dirección del eje x  
BR(I,2) desplazamiento final en dirección del eje y  
BR(I,3) desplazamiento final en dirección del eje z  
BR(I,4) giro final alrededor del eje x  
BR(I,5) giro final alrededor del eje y  
BR(I,6) giro final alrededor del eje z  
D(I) distancia del origen a la cabeza del pilote I  
FC(I) factor de aportación del pilote I, a la matriz de coeficientes  
MX(I) momento de empotramiento, alrededor del eje x  
MY(I) momento de empotramiento, alrededor del eje y  
MZ(I) momento de empotramiento, alrededor del eje z  
Q(I) fuerza transversal resultante sobre el pilote I  
RDN(I) fuerza resultante en dirección normal  
RXD(I) desplazamiento transversal en dirección del eje x  
RYD(I) desplazamiento transversal en dirección del eje y  
RZD(I) desplazamiento transversal en dirección del eje z  
SL(I) componente vertical de la pendiente del pilote I  
X(I),Y(I) coordenadas de la cabeza del pilote I

CN constante del pilote, definida como la fuerza que actúa sobre la cimentación cuando la cabeza del pilote sufre un desplazamiento unitario en dirección normal  
DF Profundidad de desplante de la losa o del cajón de cimentación  
GA Peso volumétrico del suelo retirado para alojar la losa o el cajón de cimentación  
M\* nombre del archivo que contiene las constantes n y t  
MM\* nombre del archivo que contiene la localización de los pilotes  
ND número de secciones diferentes de pilote con que cuenta la cimentación  
NT número total de pilotes, incluye los inclinados  
P\* nombre del problema a resolver  
Q\* indicador de toma de decisión (S/N)  
R cociente definido como  $r = t/n$ , que pueden ser tantos como el número de secciones diferentes ND  
T constante del pilote, definida como la fuerza que actúa sobre la cimentación cuando la cabeza del pilote sufre un desplazamiento unitario en dirección transversal

TR	tipo de pilote
WI	Peso total de la estructura
ZI	número de pilotes inclinados
ZV	número de pilotes verticales

El significado de las siguientes constantes, para cada pilote, se puede ver en la Fig. 3.33.

AKT	$\cos \alpha_{kz}$
APK	ángulo que forma la proyección del eje del pilote sobre el plano XY con el eje X(+)
BKT	$\cos \beta_{kz}$
CAK	$\cos \alpha_k$
CBK	$\cos \beta_k$
CGK	$\cos \gamma_k$
CDC	$\cos \alpha_{AK}$
GKT	$\cos \gamma_{kt}$
OEP	$\cos \epsilon_k$
SAK	$\sin \alpha_k$
SBK	$\sin \beta_k$
SEC	$\sin \alpha_{AK}$
SGK	$\sin \gamma_k$
TGK	$\tan \gamma_k$

#### 4.2.4 Diagrama de bloques

En la Fig. 4.2 se muestra el diagrama de bloques correspondiente al programa ATRIPILE.

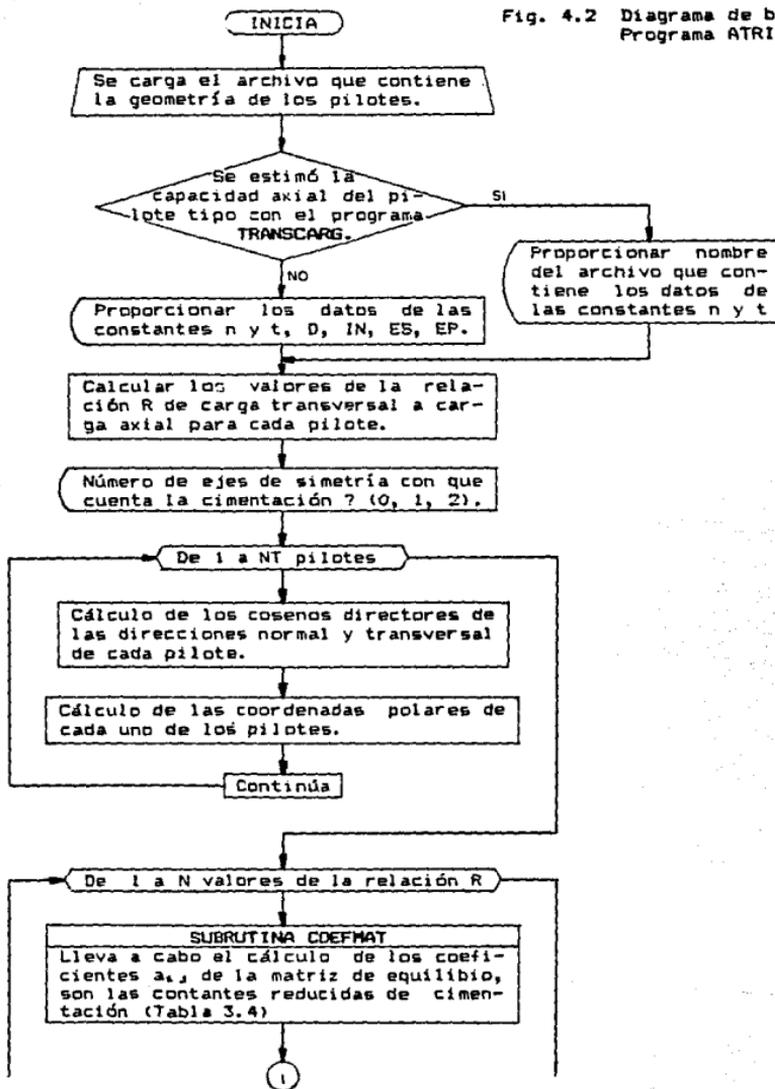
#### 4.2.5 Opciones del programa

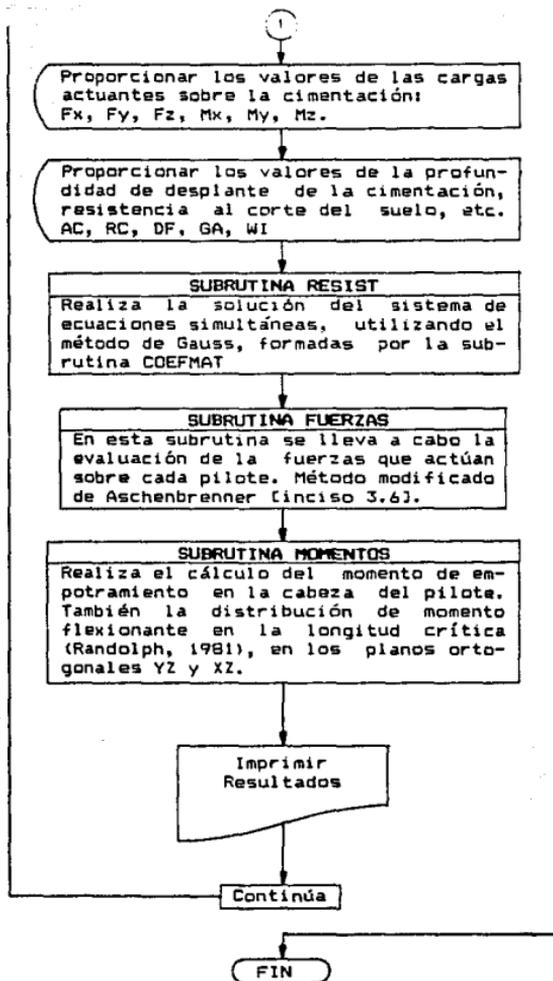
Como ya se indicó, el método propuesto por Aschenbrenner requiere del conocimiento previo de la carga axial máxima que soporta el pilote tipo o tipos, ya que el método expuesto en el inciso 3.6 permite realizar el análisis de una cimentación piloteada con dos secciones diferentes de pilotes. El programa presenta las opciones de proporcionarsela(s) como dato o calcularla(s); para este último caso es necesario utilizar el programa opcional TRANSCARG que se comentará en el inciso 4.3.

Además, considera la presencia de, uno o dos ejes de simetría que puede tener una cimentación; por lo tanto, es posible analizar un número total de 160 pilotes, considerando que se tienen dos ejes de simetría.

Otra opción que tiene este programa es que calcula los momentos de empotramiento en la cabeza de los pilotes, utilizando dos criterios (Hetenyi y Randolph) así como la dis-

Fig. 4.2 Diagrama de bloques, Programa ATRIPILE





tribución del momento flexionante a lo largo de la longitud crítica.

Con objeto de optimar el uso del programa principal ATRIPILE, ya que su fin es el de permitir al usuario realizar un diseño más económico de la cimentación, se hace necesaria la utilización de un subprograma llamado PILOTE GEDM, el cual forma un archivo de datos que contiene la distribución de los pilotes en el grupo; posteriormente si se desea modificar la posición de algunos pilotes, ésto se facilita con el programa CAMBIO GEDM; ambas actividades se llevan a cabo fuera del programa principal.

#### 4.2.6 Datos del programa

En este inciso se describe cada uno de los datos requeridos por el programa principal para su ejecución.

Antes de utilizar el programa ATRIPILE es requisito haber corrido el subprograma PILOTE GEDM.

#### **\$ Programa PILOTE GEDM**

##### **1. Datos de los pilotes.**

En este programa se forma el archivo que contiene la distribución de los pilotes en el grupo y su localización está definida por las coordenadas X, Y, el ángulo que forma la proyección de su eje en el plano XY con el eje X(+), la componente vertical de la pendiente, tipo de sección del pilote, el factor de aportación del pilote a la matriz de coeficientes [Tabla 3.4] y el área tributaria del pilote. Se deben proporcionar primero los datos de los pilotes inclinados y por último los verticales. Es importante recordar que la línea de acción de las fuerzas externas coinciden con los ejes coordenados del sistema de referencia. En el caso de los pilotes verticales el valor de la componente vertical se dará como cero. Los datos anteriores se deben proporcionar en el orden en que se enumeran a continuación:

- X(I), Y(I), APY(I), SL(I), TR(I), FC(I), AT(I)

I varía de 1 hasta el número total de pilotes NT. El valor del factor de aportación (FC) será igual a 1 cuando el pilote no esté sobre algún eje o cuando no exista simetría, igual a 2 cuando esté sobre un eje de simetría e igual a 4 cuando el pilote coincida con la intersección de dos eje de simetría.

2. Número de pilotes inclinados: II

3. Nombre del archivo que almacenará la geometría.

## \* Programa CAMBIO GEOM

Este programa, además de llamar a pantalla e impresión la distribución de los pilotes, permite realizar cambios en la localización e inclinación de los mismos, sin la necesidad de teclear nuevamente todos y cada uno de ellos.

1. Nombre del archivo que contiene la distribución de los pilotes.
2. RE\* = S se realizarán cambios en la posición de los pilotes. Ver punto 3.

RE\* = N no se desea realizar cambio alguno, únicamente se imprime el archivo de datos.

3. Datos nuevos.
  - Número del pilote
  - X(I), Y(I), APK(I), SL(I), TR(I), FC(I), AT(I)proporcionarlos en el orden indicado. I es el número del pilote que cambiará su localización o inclinación.

4. "Son todos los cambios (S/N) ?"; RF\*

RF\* = N continuar introduciendo los datos correspondientes de acuerdo al punto 3.

RF\* = S "Se desea agregar más pilotes a la geometría original (S/N) ?"; PP\*

5. PP\* = N proporcionar el número de pilotes inclinados, ZI.

PP\* = S dar el número de pilotes adicionales a la geometría original y proporcionar los datos como se indica en el punto 3.

NOTA: Recordar que el archivo de geometría debe tener en primer lugar los datos de los pilotes inclinados y por último los verticales.

6. Nombre del archivo que almacenará la nueva geometría.

## \* Programa ATRIPILE

1. Encabezado del problema.

Es el título o nombre del problema por analizar

2. La computadora pregunta acerca de

Q\* = S Si la carga axial máxima se estimó utilizando

el criterio expuesto en el inciso 3.4 (Método de Coyle y Reese). Por lo tanto, proporcionar el nombre del archivo que contiene los valores de las constantes CN(1), CN(2) y T.

$Q_s = N$  Cuando la carga se calcula con cualquier otro método, indicar el número de secciones transversales diferentes de pilotes con que contará la cimentación; proporcionando para cada sección los valores de las constantes CN(1), CN(2) y T. Así mismo los valores geométricos: diámetro o ancho del pilote y momento de inercia, el coeficiente de reacción lateral, SUB(I), y la carga axial máxima que soporta el pilote PP(I). Por último el módulo de elasticidad del pilote EP, módulo de elasticidad ETP y de Poisson PIO que presenta el suelo desde la superficie hasta una profundidad de 10 veces el diámetro o ancho del pilote.

CN(1) es el cociente carga axial máxima PP(I)/desplazamiento del pilote DY(I) [F/L]; dicho desplazamiento es la suma de la deformación elástica del pilote más la del suelo.

CN(2) está definido igual que CN(1), con la diferencia de que el desplazamiento del pilote es únicamente la deformación elástica del mismo.

T se estima con la ecuación 3.53 y es el cociente de la carga lateral sobre el pilote que le ocasiona un desplazamiento lateral unitario [F/L].

3. Nombre del archivo que contiene los datos de la localización de los pilotes dentro del conjunto.

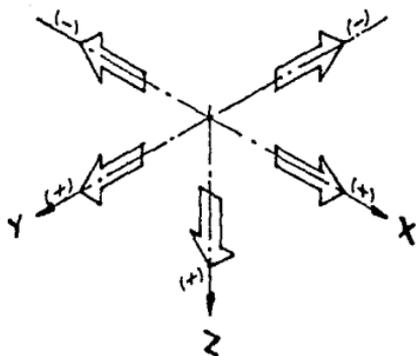
4. Indicar si todos los pilotes son verticales.

5. Se proporcionan las fuerzas externas que actúan sobre el grupo de pilotes en el siguiente orden:

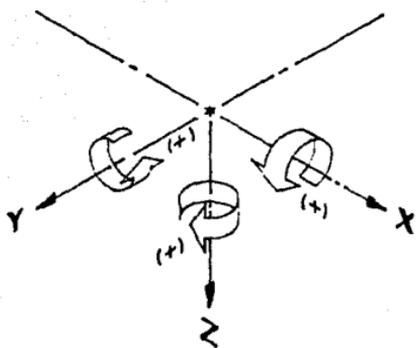
- Fuerza sobre el eje X, B(1)
- Fuerza sobre el eje Y, B(2)
- Fuerza sobre el eje Z, B(3)
- Momento alrededor del eje X, B(4)
- Momento alrededor del eje Y, B(5)
- Momento alrededor del eje Z, B(6)

el valor de la fuerza sobre el eje z será el valor neto del peso de la estructura, sobre la cimentación.

La convención del sentido de las fuerzas y momentos sobre la cimentación utilizada se muestra en la Fig. 4.3.



a) Fuerzas



b) Momentos

Fig. 4.3 Convención de signos

Durante un sismo la cimentación de un edificio se ve sometida a desplazamientos horizontales, a los cuales el suelo responde con un empuje pasivo sobre los muros del cajón, contribuyendo a la absorción del cortante basal, dicho empuje será mayor conforme aumente la profundidad de desplante del cajón. De igual manera la subpresión aumenta conforme la profundidad de desplante, actuando sobre la losa o cajón de cimentación y reduciendo la acción del peso propio de la estructura, siempre que se tenga la seguridad de que el cajón es estanco, cuando se encuentre una porción de él bajo el nivel freático. Con estas consideraciones se tomaría en cuenta el nivel de desplante de la losa.

6. Se proporcionan los siguientes datos necesarios para la estimación de las cargas axiales sobre los pilotes.

- Área de la cimentación (m)
- Resistencia al corte del suelo a una profundidad de  $B/2$ , a partir del nivel de desplante (t/m<sup>2</sup>)
- Profundidad de desplante del cajón o losa de cimentación (m)

Desde luego todos los datos se deben proporcionar en unidades congruentes.

7. Se proporciona el número del pilote del cual se desea conocer la distribución del momento flexionante.

#### 4.2.7 Impresiones del programa

Para cada relación  $r$ , el programa ATRIPILE imprime la carga axial y transversal que soporta cada pilote, al que se identifica por su número. Se imprimen los desplazamientos en las tres direcciones, así como el giro alrededor de cada uno de los ejes. Finalmente, los resultados de los momentos de empotramiento para cada uno de los pilotes de acuerdo a los dos criterios ya indicados, así como la distribución del momento flexionante de los pilotes requeridos por el usuario.

#### 4.2.8 Interpretación de resultados

La carga axial que soportará cada uno de los pilotes que constituyen el conjunto, puede ser de tensión o compresión; esto queda indicado en el signo que presente el resultado; así tenemos que, en caso de compresión el signo es negativo mientras que se tendrán tensiones cuando sea positivo.

La dirección en que actúan las fuerzas horizontales en cada uno de los pilotes, será la misma en que se presenta la fuerza externa; la misma consideración se hace para los desplazamientos en los tres ejes.

Los giros alrededor de los ejes siguen la convención de la mano derecha, al igual que los momentos de empotramiento.

Cuando se tengan ejes de simetría, la carga en cada pilote será igual a la que presente su simétrico, considerado en la geometría.

#### 4.2.9 Listado del programa

Como parte de la documentación del programa ATRIPILE, se anexa su listado, así como los correspondientes a los subprogramas PILOTE GEOM y CAMBIO GEOM.

#### 4.3 PROGRAMA TRANSCARG

La evaluación de la carga axial máxima que soporta el pilote se lleva a cabo con el método expuesto en el inciso 3.4 desarrollado por Coyle y Reese, con algunas modificaciones que ya se apuntaron en el inciso referido. El método programado es un proceso iterativo en el que se evalúan las aportaciones de resistencia por punta y por fricción lateral, de segmentos discretizados del pilote.

La resistencia unitaria por punta  $PU$ , depende del desplazamiento supuesto en la punta  $TI$ ; su valor se calcula considerando un comportamiento elástico del suelo, con la siguiente ecuación:

$$TI = \frac{PU B (1 - \nu^2) I_w}{E_s}$$

donde

- TI asentamiento o deformación elástica que sufre la cimentación
- PU intensidad de la presión de contacto suelo-punta del pilote
- B ancho o diámetro del pilote

PROGRAMA PILOTE GEOM

```
3 HOME
5 DIM X(50),Y(50),APK(50),SL(50)

7 DIM TR(50),FC(50),AS(50)
10 PRINT "PROGRAMA QUE FORMA EL
    ARCHIVO GEOMETRICO DE LA DIS
    TRIBUCION DE LOS PILOTES"
14 PRINT : PRINT
20 PRINT : PRINT " OJO dar los d
    atos de los pilotes inclinad
    os y por ultimo los vertical
    es"
30 PRINT : PRINT "EL ANGULO ALFA
    ES EL FORMADO POR LA PROYEC
    CION DEL EJE DEL PILOTE SOBR
    E EL PLANO XY CON EL SENTIDO
    POSITIVO DEL EJE X"
35 PRINT
40 INPUT "NUMERO DE PILOTES ?";N
    T
50 PRINT : PRINT
60 FOR I = 1 TO NT
70 PRINT : PRINT "PILOTE NUMERO
    ";I
80 INPUT "COORD X, COOR Y, ANGULO
    ALFA, PENDIENTE DEL PILOTE,
    No. SECCION DEL PILOTE ?";X
    (I),Y(I),APK(I),SL(I),TR(I)
90 PRINT : INPUT "TODO BIEN (S/N
    ) ?";RP$
100 IF LEFT$(RP$,1) = "N" THEN
    70
110 NEXT I
120 PRINT : PRINT
130 INPUT "NUMERO DE PILOTES INC
    LINADOS ?";ZI
140 ZV = NT - ZI
142 PRINT : PRINT
145 PRINT : PRINT "Si el pilote
    se encuentra sobre un eje de
    simetria el valor del facto
    r de aportacion sera 2, si e
    sta en la interseccion de lo
    s dos ejes 4 y en el caso de
    la no existencia de ejes de
    simetria 1 y cuando no este
    sobre un eje
146 PRINT : PRINT
147 FOR I = 1 TO NT
148 PRINT "PARA EL PILOTE ";I; INPUT
    "EL FACTOR DE APORTACION Y S
    U AREA TRIBUTARIA ES ";FC(I)
    ,AS(I)
149 PRINT
150 NEXT I
152 PRINT : PRINT
170 DS = CHR$(4)
180 PRINT : INPUT "NOMBRE DEL AF
    CHIVO QUE ALMACENA LOS VALOR
    ES DE LA GEOMETRIA DE LA CIM
    ENTACION ?";MM$
185 INPUT "PONGA UN DISKETTE EN
    EL DRIVE 1 Y TECLÉ RETURN";R
    $
190 PRINT DS;"OPEN";MM$
200 PRINT DS;"WRITE";MM$
210 PRINT NT
212 PRINT ZV
214 PRINT ZI
216 FOR I = 1 TO NT
217 PRINT X(I)
218 PRINT Y(I)
220 PRINT APK(I)
222 PRINT SL(I)
223 PRINT TR(I)
224 PRINT FC(I)
225 PRINT AS(I)
227 NEXT I
228 PRINT DS;"CLOSE";MM$
230 END
```

PROGRAMA CAMBIO GEOM

```

3 HOME
5 DIM X(50),Y(50),APK(50),SL(50)

7 DIM TR(50),FC(50),AS(40)
10 PRINT : PRINT "PROGRAMA DUE L
    LAMA A LA PANTALLA LOS DATOS
    DE LA GEOMETRIA DE LA CIMEN
    TACION"
15 D$ = CHR$(4)
20 PRINT : INPUT "NOMBRE DEL ARC
    HIVO QUE CONTIENE LOS DATOS
    GEOMETRICOS DE LA CIMENTACIO
    N ?";M$
30 PRINT D$;"OPEN";M$
40 PRINT D$;"READ";M$
50 INPUT NT
60 INPUT ZV
70 INPUT ZI
80 FOR I = 1 TO NT
90 INPUT X(I)
100 INPUT Y(I)
110 INPUT APK(I)
120 INPUT SL(I)
121 INPUT TR(I)
122 INPUT FC(I)
124 INPUT AS(I)
130 NEXT I
140 PRINT D$;"CLOSE";M$
160 PRINT "LA GEOMETRIA DE LA CI
    MENTACION ";M$
170 PRINT
180 PRINT : PRINT TAB(1);"No";
    TAB(3);"COORD X"; TAB(13);
    "COORD Y"; TAB(21);"ALFA"; TAB(
    26);"PEND"; TAB(31);"TIPO";
    TAB(36);"FA"; TAB(39);"AT
    "
190 PRINT : PRINT
200 FOR I = 1 TO NT
210 PRINT TAB(1);I; TAB(6);X(
    I); TAB(14);Y(I); TAB(22);
    APK(I); TAB(27);SL(I); TAB(
    32);TR(I); TAB(36);FC(I); TAB(
    39);AS(I)
212 NEXT I
230 PRINT : INPUT "DESEA HACER C
    AMBIOS EN LA GEOMETRIA (S/N)
    ?";RE$
240 IF LEFT$(RE$,1) = "N" THEN
    286
250 INPUT "PILOTE NUMERO ";I
260 INPUT "COORD X,COORD Y, ANGULO
    ALFA, PENDIENTE DEL PILOTE,
    No. DE SECCION DEL PILOTE,
    FACTOR DE APORTACION, AREA T
    RIBUTARIA ?";X(I),Y(I),APK(I
    ),SL(I),TR(I),FC(I),AS(I)
270 PRINT : INPUT "TODD BIEN (S/
    N) ?";RE$
280 IF LEFT$(RE$,1) = "N" THEN
    250
282 PRINT : INPUT "SON TODOS LOS
    CAMBIOS (S/N) ?";RE$
284 IF LEFT$(RE$,1) = "N" THEN
    250
286 PRINT : INPUT "DESEA AGREGAR
    MAS PILOTES A LA GEOMETRIA
    ORIGINAL (S/N) ?";PP$
288 IF LEFT$(PP$,1) = "N" THEN
    304
290 PRINT : INPUT "NUMERO DE PIL
    OTES ADICIONALES ?";N
293 FOR I = NT + 1 TO NT + N
294 PRINT : INPUT "PILOTE NUMERO
    ";I
296 INPUT "COORD X, COORD Y, ANGUL
    O ALFA, PENDIENTE DEL PILOTE
    , No. DE SECCION DEL PILOTE,
    FACTOR DE APORTACION ?";X(I
    ),Y(I),APK(I),SL(I),TR(I),FC
    (I)
298 PRINT : INPUT "TODD BIEN (S/
    N) ?";RE$
300 IF LEFT$(RE$,1) = "N" THEN
    294
302 PRINT : NEXT I
303 NT = NT + N
304 PRINT : INPUT "NUMERO DE PIL
    OTES INCLINADOS ?";ZI;ZV = N
    T - ZI
305 PRINT : INPUT "NOMBRE DEL AR
    CHIVO QUE ALMACENARA LOS VAL
    ORES DE LA GEOMETRIA DEL CON
    JUNTO ?";MM$
310 INPUT "PONGA UN DISKETTE EN
    EL DRIVE 1 Y TECLE RETURN";R
    $
320 PRINT D$;"OPEN";M$
322 PRINT D$;"WRITE";M$
324 PRINT NT
326 PRINT ZV
328 PRINT ZI
330 FOR I = 1 TO NT
332 PRINT X(I)
334 PRINT Y(I)
336 PRINT APK(I)
337 PRINT SL(I)
338 PRINT TR(I)
339 PRINT FC(I)
340 PRINT AS(I)
342 NEXT I
350 PRINT D$;"CLOSE";M$
440 END

```

PROGRAMA ATRIPILE

```

5 HOME
8 DIM CP(40,2),IC(40),SU(40),MX(
  40),MY(40),LC(40)
9 DIM R(40,2),TT(5),I(40),CN(5,2
  )
10 DIM SL(40),X(40),Y(40),APK(40
  ),SAK(40),SBK(40),SGK(40)
12 DIM CAK(40),CBK(40),CGK(40),T
  GK(40),DI(40),SEC(40)
14 DIM COC(40),TR(40),FC(40)
15 DIM DEP(40),BKT(40),GKT(40),A
  KT(40)
16 DIM A(6,6),B(6),L(6),K(6,2)
17 DIM P(40),Q(40),BR(40,6)
18 DIM RDN(40),RXD(40),RYD(40),R
  ZD(40)
20 DIM QX(40),QY(40),QZ(40)
21 DIM PA(40),D(40),MZ(40)
22 DIM ZL(12),MH(12),MM(12)
25 DIM AB(15),QAQ(15),QR(40),QD(
  40),QN(40)
27 DIM AS(40),PD(40),QS(40),HH(4
  0)
28 DIM DR(40),PB(40)
70 PRINT : PRINT TAB(8);"*****
  *****"
71 PRINT TAB(8);"*"; TAB(41);
  "*"
72 PRINT TAB(8);"*"; TAB(15);
  "PROGRAMA QUE REALIZA"; TAB(
  41);"*"
74 PRINT TAB(8);"*"; TAB(41);
  "*"
76 PRINT TAB(8);"*"; TAB(12);
  "EL ANALISIS TRIDIMENSIONAL"
  ; TAB(41);"*"
77 PRINT TAB(8);"*"; TAB(41);
  "*"
78 PRINT TAB(8);"*"; TAB(22);
  "DE UN"; TAB(41);"*"
80 PRINT TAB(8);"*"; TAB(41);
  "*"
82 PRINT TAB(8);"*"; TAB(17);
  "GRUPO DE PILOTES"; TAB(41)
  ;"*"
84 PRINT TAB(8);"*"; TAB(41);
  "*"
86 PRINT TAB(8);"*****"
  *****"
90 PRINT : PRINT : PRINT
91 INPUT "TITULO DEL PROBLEMA: "
  ;P$
92 PRINT : INPUT "SE ESTIMO LA C
  ARGA AXIAL DEL PILOTE TIPO C
  ON EL PROGRAMA TRANSCARG (S/
  N) ?";Q$
94 IF LEFT$(Q$,1) = "S" THEN 1
  04
96 PRINT : INPUT "NUMERO DE SECC
  IONES DIFERENTES DEL PILOTE
  ? ";ND: PRINT
98 FOR I = 1 TO ND
99 PRINT : PRINT "VALORES DE LA
  SECCION ";I
100 INPUT "VALOR DE CN(1) ?";CN(
  I,1); INPUT "VALOR DE CN(2)
  ?";CN(I,2); INPUT "VALOR DE
  T ?";TT(I); INPUT "DIAMETRO
  Y MOMENTO DE INERCIA DEL PIL
  OTE ?";D(I),IN(I); INPUT "CO
  EFICIENTE DE REACCION LATERA
  L (t/m3)";SUB(I);SUB(I) = SU
  B(I) * D(I)
101 INPUT "CARGA AXIAL MAXIMA QU
  E SOPORTA EL PILOTE ?";PP(I)
  ; NEXT I
102 PRINT : INPUT "MODULO DE ELA
  STICIDAD DEL PILOTE (t/m2)?"
  ;EP; INPUT "MODULO DE ELASTI
  CIDAD (t/m2) Y DE POISSON DE
  L SUELO ?";ETP,PIO
103 GOTO 125
104 D$ = CHR$(4)
106 PRINT : INPUT "NOMBRE DEL AR
  CHIVO QUE TIENE EL VALOR DE
  LA CONSTANTE T ?";M$
107 PRINT D$;"OPEN";M$
108 PRINT D$;"READ";M$
109 INPUT ND
110 FOR I = 1 TO ND
111 INPUT PP(I)
113 INPUT SUB(I)
114 INPUT CN(I,1)
115 INPUT CN(I,2)
116 INPUT TT(I)
117 INPUT D(I)
118 INPUT IN(I)
119 NEXT I
120 INPUT FL
121 INPUT EP
122 INPUT ETP
123 INPUT PIO
124 PRINT D$;"CLOSE";M$
125 FOR J = 1 TO ND
126 RE(J,1) = TT(J) / CN(J,1)
128 RE(J,2) = TT(J) / CN(J,2)
129 DS(J) = D(J)
130 NEXT J
151 D$ = CHR$(4)
152 PRINT : INPUT "NOMBRE DEL AR
  CHIVO QUE CONTIENE LOS DATOS
  DE LA GEOMETRIA DE LA CIMEN
  -"; INPUT "TACION ? ";MM$

```



```

598 PRINT : PRINT
600 IF H = 0 THEN 1000
605 IF H = 1 THEN 3000
610 GOSUB 4000
652 PRINT : PRINT : PRINT "CUALE
S SON LOS VALORES DE LAS CAR
GAS ACTUANTES ?": PRINT
653 INPUT "FUERZA EN X = ?":B(1)
654 INPUT "FUERZA EN Y = ?":B(2)
655 INPUT "FUERZA EN Z = ?":B(3)
656 INPUT "MOMENTO ALREDEDOR DEL
EJE X = ?":B(4)
657 INPUT "MOMENTO ALREDEDOR DEL
EJE Y = ?":B(5)
658 INPUT "MOMENTO ALREDEDOR DEL
EJE Z = ?":B(6)
659 WT = B(3)
660 GOSUB 2000
689 PRINT TAB( 3);"R("I)" = ";RE
(1,1); TAB( 22);"diametro de
l pilote = ";D(I)" m"
700 PRINT : PRINT
710 GOSUB 5000
720 PRINT : PRINT : PRINT : PRINT
TAB( 3);"**** FUERZAS EN LA
CABEZA DE LOS PILOTES, EN t
****"
722 PRINT : PRINT TAB( 1);"PILO
TE": PRINT TAB( 3);"No"; TAB(
8);"FZA EN X"; TAB( 22);"FZA
EN Y"; TAB( 35);"FZA AXIAL"
730 FOR I = 1 TO NT
732 QX(I) = ( INT (QX(I) * 100) ) /
100;QY(I) = ( INT (QY(I) * 1
00) ) / 100
733 P(I) = ( INT (P(I) * 100) ) /
100
740 PRINT TAB( 2);I; TAB( 8);QX
(I); TAB( 22);QY(I); TAB( 35
);P(I)
750 NEXT I
760 PRINT : PRINT "NOTA: Cuando
es compresion el signo es ne
gativo en la carga axial."
762 PRINT TAB( 7);"Las fuerzas
en X y en Y actuan en el pla
no horizontal, incluso"
763 PRINT TAB( 7);"para los pil
otes inclinados."
770 PRINT : PRINT : PRINT TAB(
3);"**** DESPLAZAMIENTOS EN
LA CABEZA DE LOS PILOTES, EN
m ****"
780 PRINT TAB( 1);"PILOTE": PRINT
TAB( 1);"No"; TAB( 9);"DESP
X"; TAB( 25);"DESP Y"; TAB(
37);"DESP AXIAL": PRINT
790 FOR I = 1 TO NT
792 BR(I,1) = ( INT (BR(I,1) * 10
00) ) / 1000;BR(I,2) = ( INT
(BR(I,2) * 1000) ) / 1000
793 BR(I,3) = ( INT (BR(I,3) * 10
00) ) / 1000
802 PRINT TAB( 1);I; TAB( 4);BR
(I,1); TAB( 20);BR(I,2); TAB(
36);BR(I,3)
804 NEXT I
806 IF (B(4) = 0) AND (B(5) = 0)
THEN 5440
810 PRINT : PRINT : PRINT TAB(
3);"**** GIRO EN LA CABEZA D
E LOS PILOTES, EN rad ****"
812 PRINT TAB( 1);"PILOTE": PRINT
TAB( 1);"No"; TAB( 9);"GIRO
X"; TAB( 25);"GIRO Y"; TAB(
38);"GIRO Z": PRINT
814 FOR I = 1 TO NT
815 W8 = ( INT (BR(I,4) * 100000)
) / 100000;W9 = ( INT (BR(I,
5) * 100000) ) / 100000;W0 =
( INT (BR(I,6) * 100000) ) /
100000
816 PRINT TAB( 1);I; TAB( 5);W8
; TAB( 21);W9; TAB( 37);W7
820 NEXT I
821 PRINT : PRINT "NOTA: El titu
lo GIRO X, indica que el gir
o es alrededor del eje X."
830 PRINT : PRINT : PRINT TAB(
5);"**** FUERZA TRANSVERSAL
MAXIMA Y DESPLAZAMIENTO TOTA
L ****"
831 PRINT TAB( 15);"EN LA CABEZ
A DE LOS PILOTES, EN t y m .
": PRINT
832 PRINT TAB( 1);"PILOTE"; TAB(
11);"FUERZA"; PRINT TAB( 3)
;"No"; TAB( 12);"TRANS"; TAB(
24);"DESPLAZ": PRINT
834 FOR I = 1 TO NT;D(I) = ( INT
(D(I) * 100) ) / 100
836 DT = SQR ((BR(I,1) ^ 2 + BR(
I,2) ^ 2 + BR(I,3) ^ 2))
837 DT = ( INT (DT * 1000) ) / 100
0
838 PRINT TAB( 3);I; TAB( 9);Q(
I); TAB( 22);DT
840 NEXT I

```

```

850 PRINT : PRINT "NOTA: La fuerza transversal maxima corresponde a la suma vectorial de "; PRINT TAB( 7); "las fuerzas ortogonales actuantes en un plano perpendicular al"; PRINT TAB( 7); "eje del pilote."
851 PRINT TAB( 7); "El desplazamiento total es la resultante de sus componentes en"; PRINT TAB( 7); "X, Y y Z"
852 PRINT : PRINT : PRINT : PRINT TAB( 3); "#### MOMENTOS EN LA CABEZA DE LOS PILOTES, EN t-m ####"
867 GOSUB 5200
868 PRINT : PRINT TAB( 1); "PIL" : PRINT TAB( 1); "No"; TAB( 5); "MOMENTO X", TAB( 17); "MOMENTO Y"; TAB( 29); "MOMENTO Z"; TAB( 41); "LONG CRIT, m"
869 PRINT
870 FOR I = 1 TO NT
871 MX(I) = ( INT (MX(I) * 100) ) / 100; MY(I) = ( INT (MY(I) * 100) ) / 100; LC(I) = ( INT (LC(I) * 1000) ) / 1000
872 PRINT TAB( 1); I; TAB( 5); MX(I); TAB( 17); MY(I); TAB( 29); MZ(I); TAB( 41); LC(I)
874 NEXT I
875 IF ZI = 0 THEN 896
876 PRINT : PRINT : PRINT
896 IF CO = "HETENEYI" THEN 530
898 PRINT : PRINT
900 GOSUB 5400
907 FOR I = 1 TO NT
908 CDM = ABS (P(I))
909 IF CDM < PA(I) THEN 912
910 PRINT : PA(I) = ( INT (PA(I) * 100) ) / 100
911 PRINT "EL PILOTE "I" EXCEDE LA CARGA MAXIMA "PA(I)" t"
912 NEXT I
914 PRINT : PRINT : PRINT : PRINT
915 GOTO 6000
916 J1 = J1 + 1
918 IF J1 = 3 THEN 6000
920 PRINT : PRINT "-----"
-----
-----
-----
922 PRINT "PARA EL COCIENTE R QUE CONSIDERA SOLO LA DEFORMACION ELASTICA DEL PILOTE": PRINT "SE OBTIENEN LOS SIGUIENTES RESULTADOS"
924 PRINT "-----"
-----
926 PRINT : PRINT TAB( 3); "Los valores del cociente R son": PRINT
928 FOR I = 1 TO ND
930 PRINT TAB( 3); "R("I")= "; RE(I, 2); TAB( 22); "diametro de l pilote "; DS(I) " m"
932 NEXT I
934 GOTO 596
1000 REM ### SUBROUTINA COEFMAT ### CALCULA LOS COEFICIENTES Aij DE LA MATRIZ DE EQUIBRIBRID
1010 FOR I = 1 TO 6: FOR J = 1 TO 6: A(I, J) = 0
1020 NEXT J: NEXT I
1030 IF LEFT$(NI$, 1) = "S" THEN 1330
1040 FOR L = 1 TO ZI
1045 R = R(L, J1) / FC(L)
1050 A(1, 1) = A(1, 1) + (CAK(L) ^ 2 + R * SAK(L) ^ 2) * (- 1)
1060 A(1, 2) = A(1, 2) + ((R - 1) * CAK(L) * CBK(L))
1070 A(1, 3) = A(1, 3) + CAK(L) * CBK(L)
1080 A(1, 4) = A(1, 4) + (R - 1) * CAK(L) * CGK(L) * Y(L)
1090 A(1, 5) = A(1, 5) + (1 - R) * CAK(L) * CGK(L) * X(L)
1100 A(1, 6) = A(1, 6) + (- CAK(L) * DEP(L) + R * (SEC(L) + CAK(L) * DEP(L))) * D(L)
1110 REM
1120 A(2, 2) = A(2, 2) + (CBK(L) ^ 2 + R * SBK(L) ^ 2) * (- 1)
1130 A(2, 3) = A(2, 3) + (R - 1) * CBK(L) * CGK(L)
1140 A(2, 4) = A(2, 4) + (R - 1) * CBK(L) * CGK(L) * Y(L)
1150 A(2, 5) = A(2, 5) + (1 - R) * CBK(L) * CGK(L) * X(L)
1160 A(2, 6) = A(2, 6) + ((- 1) * CBK(L) * DEP(L) - R * (COCL) - CBK(L) * DEP(L)) * D(L)

```

```

1170 REM
1180 A(3,3) = A(3,3) + (CGK(L) ^
2 + R * SGK(L) ^ 2) * (- 1)

1190 A(3,4) = A(3,4) + (- CGK(L)
^ 2 - R * SGK(L) ^ 2) * Y(L)
)

1200 A(3,5) = A(3,5) + (CGK(L) ^
2 + R * SGK(L) ^ 2) * X(L)

1210 A(3,6) = A(3,6) + ((R - 1) *
CGK(L) * DEP(L) * D(L))

1220 REM
1230 A(4,4) = A(4,4) + ((- 1) *
Y(L) ^ 2 * (CGK(L) ^ 2 + R *
SGK(L) ^ 2))

1240 A(4,5) = A(4,5) + ((CGK(L) ^
2 + R * SGK(L) ^ 2) * X(L) *
Y(L))

1250 A(4,6) = A(4,6) + ((R - 1) *
CGK(L) * DEP(L) * D(L) * Y(L)
)

1260 REM
1270 A(5,5) = A(5,5) + ((- 1) *
X(L) ^ 2 * (CGK(L) ^ 2 + R *
SGK(L) ^ 2))

1280 A(5,6) = A(5,6) + ((1 - R) *
CGK(L) * DEP(L) * D(L) * X(L)
)

1290 REM
1300 A(6,6) = A(6,6) + ((CAK(L) *
DEP(L) - R * (SEC(L) + CAK(L)
) * DEP(L))) * D(L) * Y(L) -
(CBK(L) * DEP(L) + R * (COC(
L) - CBK(L) * DEP(L))) * D(L)
) * X(L))

1310 NEXT L
1315 REM ***** PILOTES VERTICAL
ES *****

1320 IF ZI = NT THEN 1490
1330 FOR L = ZI + 1 TO NT
1335 R = R(L,JI) / FC(L)
1340 A(1,1) = A(1,1) + (R * (- 1)
)

1350 A(1,6) = A(1,6) + R * Y(L)
1360 A(2,2) = A(2,2) + (- 1) * R

1370 A(2,6) = A(2,6) + (- R * X(
L)
)
1380 A(3,3) = A(3,3) - 1
1390 A(3,4) = A(3,4) + (- Y(L))
1400 A(3,5) = A(3,5) + X(L)
1410 A(4,4) = A(4,4) + (- 1) * (
Y(L) ^ 2)
1420 A(4,5) = A(4,5) + (X(L) * Y(
L)

1430 A(5,5) = A(5,5) + (- 1) * (
X(L) ^ 2)
1440 A(6,6) = A(6,6) + ((- 1) *
R * (D(L) ^ 2))

1450 NEXT L
1490 FOR I = 1 TO 6
1500 FOR J = 1 TO 6
1510 A(I,1) = A(I,J)
1520 NEXT J: NEXT I
1540 REM
1550 GOTO 652
2000 REM ***** SUBROUTINA RESIST
***** RESUELVE EL SISTEMA
DE ECUACIONES
2139 J = 1
2140 DT = 1.:N = 6.
2150 FOR I = 1 TO N
2160 L(I) = 0
2170 NEXT I
2180 FOR IR = 1 TO N
2190 AM = 0.
2200 FOR I = 1 TO N
2210 IF L(I) = 1 THEN 2300
2220 FOR J = 1 TO N
2230 IF L(J) = 1 THEN 2290
2240 Z = ABS(AM)
2250 AA = ABS(A(I,J))
2260 IF (Z > AA) THEN 2290
2270 II = J
2280 JJ = I
2290 NEXT J
2300 NEXT I
2310 P = A(II,JJ)
2320 ZZ = ABS(P)
2330 IF ZZ < 1E - 9 THEN 2735
2340 DT = DT * P
2350 K(IR,1) = II
2360 K(IR,2) = JJ
2370 L(JJ) = 1
2380 IF II = JJ THEN 2480
2390 DT = - DT
2400 FOR J = 1 TO N
2410 C = A(II,J)
2420 A(II,J) = A(JJ,J)
2430 A(JJ,J) = C
2440 NEXT J
2450 C = B(II)
2460 B(II) = B(JJ)
2470 B(JJ) = C
2480 A(JJ,JJ) = 1.
2490 FOR J = 1 TO N
2500 A(JJ,J) = A(JJ,J) / P
2510 NEXT J
2520 B(JJ) = B(JJ) / P
2530 FOR I = 1 TO N
2540 IF I = JJ THEN 2610

```

```

2550 CE = A(I,JJ)
2560 A(I,JJ) = 0.
2570 FOR J = 1 TO N
2580 A(I,J) = A(I,J) - CE * A(JJ,
J)
2590 NEXT J
2600 B(I) = B(I) - CE * B(JJ)
2610 NEXT I
2620 NEXT IR
2630 FOR IR = 1 TO N
2640 I = N - IR + 1
2650 IF K(I,1) = K(I,2) THEN 273
0
2660 II = K(I,1)
2670 JJ = K(I,2)
2680 FOR I = 1 TO N
2690 C = A(II,II)
2700 A(I,II) = A(I,JJ)
2710 A(I,JJ) = C
2720 NEXT I
2730 NEXT IR
2735 PRINT
2740 GOTO 700
3000 REM *** SUBROUTINA COEFMAT
I *** CALCULA LOS COEFICIE
NTES Aij DE LA MATRIZ DE EDU
ILIBRIO, CUANDO SE TIENE UN
SOLO PLANO DE SIMETRIA
3010 FOR I = 1 TO 6: FOR J = 1 TO 2
6: A(I,J) = 0
3020 NEXT J: NEXT I
3030 IF LEFT$(N19,1) = "S". THEN
3190
3040 FOR L = 1 TO ZI
3045 R = R(L,JI)
3050 A(1,1) = A(1,1) + (CAK(L) ^
2 + R * SAK(L) ^ 2) * (- 2)
* (1 / FC(L))
3060 A(1,3) = A(1,3) + ((1 - R) *
CAK(L) * CGK(L) * X(L)) * (2
/ FC(L))
3070 A(1,6) = A(1,6) + (2 / FC(L)
) * (- CAK(L) * DEP(L) + R *
(SEC(L) + CAK(L) * DEP(L))) *
D(L)
3080 A(2,2) = A(2,2) + (CBK(L) ^
2 + R * SBK(L) ^ 2) * (- 2)
* (1 / FC(L))
3090 A(2,3) = A(2,3) + ((R - 1) *
CBK(L) * CGK(L)) * (2 / FC(L)
))
3100 A(2,4) = A(2,4) + ((R - 1) *
CBK(L) * CGK(L) * Y(L)) * (2
/ FC(L))
3110 A(3,3) = A(3,3) + (CBK(L) ^
2 + R * SBK(L) ^ 2) * (- 2)
* (1 / FC(L))
3120 A(3,4) = A(3,4) + (CBK(L) ^
2 + R * SBK(L) ^ 2) * Y(L) *
(- 2) * (1 / FC(L))
3130 A(4,4) = A(4,4) + ((- 2) *
Y(L) ^ 2 * (CBK(L) ^ 2 + R *
SGK(L) ^ 2)) * (1 / FC(L))
3140 A(5,5) = A(5,5) + ((- 2) *
X(L) ^ 2 * (CBK(L) ^ 2 + R *
SGK(L) ^ 2)) * (1 / FC(L))
3150 A(5,6) = A(5,6) + (((1 - R) *
CGK(L) * DEP(L) * D(L) * X(L)
)) * (2 / FC(L))
3160 A(6,6) = A(6,6) + (((CAK(L) *
DEP(L) - R * (SEC(L) + CAK(L)
) * DEP(L))) * D(L) * Y(L) -
(CBK(L) * DEP(L) + R * (COC(
L) - CBK(L) * DEP(L))) * D(L)
) * X(L)) * (2 / FC(L))
3170 NEXT L
3175 REM *** PILOTES VERTICALES
***
3180 IF ZI = NT THEN 3290
3190 FOR L = ZI + 1 TO NT
3195 R = R(L,JI)
3200 A(1,1) = A(1,1) + (R * (- 2
)) * (1 / FC(L))
3210 A(1,6) = A(1,6) + R * Y(L) *
(2 / FC(L))
3220 A(2,2) = A(2,2) + (- 2) * R
* (1 / FC(L))
3230 A(3,3) = A(3,3) - 2 * (1 / F
C(L))
3240 A(3,4) = A(3,4) + Y(L) * (-
2) * (1 / FC(L))
3250 A(4,4) = A(4,4) + (- 2) * (
Y(L) ^ 2) * (1 / FC(L))
3260 A(5,5) = A(5,5) + (- 2) * (
X(L) ^ 2) * (1 / FC(L))
3270 A(6,6) = A(6,6) + ((- 2) *
R * (D(L) ^ 2)) * (1 / FC(L)
)
3280 NEXT L
3290 FOR I = 1 TO 6
3300 FOR J = 1 TO 6
3310 A(J,I) = A(I,J)
3320 NEXT J: NEXT I
3340 REM
3350 GOTO 652

```

```

4000 REM *** SUBROUTINA COEFMAT
      II *** CALCULA LOS COEFICIENTES ALJ DE LA MATRIZ DE EQUIBRIBRO CUANDO SE TIENEN DOS PLANOS DE SIMETRIA
4010 FOR I = 1 TO 6: FOR J = 1 TO 6: A(I,J) = 0
4020 NEXT J: NEXT I
4030 IF LEFT$(NIS,1) = "S" THEN 4151
4040 FOR L = 1 TO ZI
4044 R = R(L,JI)
4050 A(1,1) = A(1,1) + (CAK(L) ^ 2 + R * SAK(L) ^ 2) * (- 4) * (1 / FC(L))
4060 A(1,5) = A(1,5) + ((1 - R) * CAK(L) * CGK(L) * X(L)) * 4 * (1 / FC(L))
4070 A(2,2) = A(2,2) + (CBK(L) ^ 2 + R * SBK(L) ^ 2) * (- 4) * (1 / FC(L))
4080 A(2,4) = A(2,4) + ((R - 1) * CBK(L) * CGK(L) * Y(L)) * 4 * (1 / FC(L))
4090 A(3,3) = A(3,3) + (CGK(L) ^ 2 + R * SGK(L) ^ 2) * (- 4) * (1 / FC(L))
4100 A(4,4) = A(4,4) + ((- 4) * Y(L) ^ 2 * (CGK(L) ^ 2 + R * SBK(L) ^ 2)) * (1 / FC(L))
4110 A(5,5) = A(5,5) + ((- 4) * X(L) ^ 2 * (CGK(L) ^ 2 + R * SBK(L) ^ 2)) * (1 / FC(L))
4120 A(6,6) = A(6,6) + 4 * ((CAK(L) * DEP(L) - R * SEC(L) + CAK(L) * DEP(L)) * D(L) * Y(L) - (CBK(L) * DEP(L) + R * COC(L) - CBK(L) * DEP(L)) * D(L) * X(L)) * (1 / FC(L)))
4130 NEXT L
4140 REM *** PILDOTES VERTICALES
      ***
4150 IF ZI = NT THEN 4360
4151 IF ND = 1 THEN 4300
4152 S1 = O1R1 = O1S2 = O1R2 = 0
4154 V1 = O1H1 = O1VJ = O1HJ = 0
4160 FOR L = ZI + 1 TO NT
4164 R = R(L,JI)
4184 IF TR(L) = 2 THEN 4187
4185 S1 = 4 / FC(L): S2 = S1 + S2
4186 GOTO 4188
4187 R1 = 4 / FC(L): R2 = R1 + R2
4188 IF L < NT THEN 4198
4192 A(1,1) = S2 * TT(1) / TT(2) + R21A(1,1) = A(1,1) * (- 1)
4194 A(2,2) = S2 * TT(1) / TT(2) + R21A(2,2) = A(2,2) * (- 1)
4196 A(3,3) = S2 * CN(1,JI) / CN(2,JI) + R21A(3,3) = A(3,3) * (- 1)
4198 IF TR(L) = 2 THEN 4206
4200 V1 = V1 + Y(L) ^ 2 * (- 4) / FC(L)
4202 VJ = VJ + X(L) ^ 2 * (- 4) / FC(L)
4204 GOTO 4210
4206 H1 = H1 + Y(L) ^ 2 * (- 4) / FC(L)
4208 HJ = HJ + X(L) ^ 2 * (- 4) / FC(L)
4210 IF L < NT THEN 4220
4212 A(4,4) = CN(1,JI) * V1 + CN(2,JI) * H1
4213 A(5,5) = CN(1,JI) * VJ + CN(2,JI) * HJ
4220 A(6,6) = A(6,6) + ((- 4) * R * (D(L) ^ 2)) * (1 / FC(L))
4230 NEXT L
4240 GOTO 4360
4300 FOR L = ZI + 1 TO NT
4302 R = R(L,JI)
4304 A(1,1) = A(1,1) + (R * (- 4)) * (1 / FC(L))
4306 A(2,2) = A(2,2) + (R * (- 4)) * (1 / FC(L))
4308 A(3,3) = A(3,3) + (- 4) * (1 / FC(L))
4310 A(4,4) = A(4,4) + (- 4) * (Y(L) ^ 2) * (1 / FC(L))
4312 A(5,5) = A(5,5) + (- 4) * (X(L) ^ 2) * (1 / FC(L))
4314 A(6,6) = A(6,6) + ((- 4) * R * (D(L) ^ 2)) * (1 / FC(L))
4316 NEXT L
4360 FOR I = 1 TO 6: FOR J = 1 TO 6
4370 A(J,I) = A(I,J)
4380 NEXT J: NEXT I
4400 GOTO 652
5000 REM *** SUBROUTINA FUERZAS
      *** EVALUA LAS FUERZAS RESULTANTES
5002 IF LEFT$(NIS,1) = "S" THEN 5070
5010 FOR I = 1 TO ZI

```

```

5015 R = R(I,JI)
5020 RDN(I) = (- 1) * B(1) * CAK
(I) - B(2) * CBK(I) - B(3) *
CGK(I) - B(4) * Y(I) * CGK(I)
) + B(5) * X(I) * CGK(I) - B
(6) * D(I) * OEP(I)
5030 RXD(I) = (- 1) * B(1) * (SA
K(I)) ^ 2 + B(2) * CAK(I) *
CBK(I) + B(3) * CAK(I) * CGK
(I) + B(4) * CAK(I) * CGK(I)
* Y(I) + (- 1) * B(5) * CA
K(I) * CGK(I) * X(I) + B(6) *
(SEC(I) + CAK(I) * OEP(I)) *
D(I)
5040 RYD(I) = B(1) * CAK(I) * CBK
(I) - B(2) * (SBK(I) ^ 2) +
B(3) * CBK(I) * CGK(I) + B(4)
* CBK(I) * CGK(I) * Y(I) -
B(5) * CBK(I) * CGK(I) * X(I)
) + B(6) * ((- 1) * COC(I) +
CBK(I) * OEP(I)) * D(I)
5050 RZD(I) = B(1) * CAK(I) * CGK
(I) + B(2) * CBK(I) * CGK(I)
- B(3) * (SGK(I) ^ 2) - B(4)
) * (SGK(I) ^ 2) * Y(I) + B(
5) * (SGK(I) ^ 2) * X(I) + B
(6) * CGK(I) * OEP(I) * D(I)
5060 Q(I) = R * SQR (RXD(I) ^ 2 +
RYD(I) ^ 2 + RZD(I) ^ 2)
5062 QX(I) = R * RXD(I) / QY(I) = R
* RYD(I) / QZ(I) = R * RZD(I)
5063 P(I) = RDN(I)
5064 NEXT I
5070 FOR I = ZI + 1 TO NT
5071 R = R(I,JI)
5072 IF ND > 1 THEN 5074
5073 CN(1,JI) = 1; CN(2,JI) = 1; TT
(1) = 1; TT(2) = 1
5074 IF TR(I) = 1 THEN 5080
5075 PB(I) = - B(4) * CN(2,JI) *
Y(I) + B(5) * CN(2,JI) * X(I)
); RDN(I) = (- 1) * B(3)
5076 RXD(I) = (- 1) * B(1) + B(6)
) * Y(I)
5078 RYD(I) = (- 1) * B(2) - B(6)
) * X(I)
5079 GOTO 5084
5080 PB(I) = - B(4) * CN(1,JI) *
Y(I) + B(5) * CN(1,JI) * X(I)
); RDN(I) = (- 1) * B(3) * C
N(1,JI) / CN(2,JI)
5082 RXD(I) = (- 1) * B(1) * TT(
1) / TT(2) + B(6) * Y(I)

```

```

5083 RYD(I) = (- 1) * B(2) * TT(
1) / TT(2) - B(6) * X(I)
5084 RZD(I) = 0
5085 IF ND = 1 THEN 5090
5087 R = 1
5090 Q(I) = R * SQR ((RXD(I) ^ 2
+ RYD(I) ^ 2 + RZD(I) ^ 2))
5091 P(I) = RDN(I) + PB(I)
5092 QX(I) = R * RXD(I) / QY(I) = R
* RYD(I) / QZ(I) = R * RZD(I)
5093 NEXT I
5094 FOR I = 1 TO NT
5095 R = R(I,JI)
5096 BR(I,1) = QX(I) / T(I)
5098 BR(I,2) = QY(I) / T(I)
5110 BR(I,3) = P(I) / CP(I,JI)
5112 FOR L = 4 TO 6
5114 BR(I,L) = B(L) / CP(I,JI)
5116 NEXT L
5118 NEXT I
5119 IF (NI * "S") THEN 5500
5120 GOTO 720
5200 REM *** SUBROUTINA MOMENTO
*** CALCULA LOS MOMENTOS EN
LA CABEZA DEL PILOTE, EN LO
S EJES X Y Y; UTILIZANDO LA
SOLUCION DE HETENEYI
5201 CD$ = "HETENEYI"
5202 FOR I = ZI + 1 TO NT
5204 LC(I) = 4 * (EP * IC(I) / (S
U(I) / DI(I))) ^ (0.25)
5206 MX(I) = (BR(I,4) - (QY(I) *
(- 1) / SU(I)) * (4 / LC(I)
) ^ 2) * (SU(I) / 1.41421) *
(LC(I) / 4) ^ 3
5208 MY(I) = (BR(I,5) - (QX(I) *
(- 1) / SU(I)) * (4 / LC(I)
) ^ 2) * (SU(I) / 1.41421) *
(LC(I) / 4) ^ 3
5210 NEXT I
5212 IF ZI = 0 THEN 5250
5213 FOR I = 1 TO ZI
5215 LC(I) = 4 * (EP * IC(I) / SU
(I)) ^ (.25)
5217 MX(I) = (BR(I,4) * CGK(I) -
(QY(I) * CGK(I) * (- 1) / S
U(I)) * (4 / LC(I)) ^ 2) * (
SU(I) / 1.41421) * (LC(I) /
4) ^ 3
5218 MY(I) = (BR(I,5) * CGK(I) -
(QX(I) * CGK(I) * (- 1) / S
U(I)) * (4 / LC(I)) ^ 2) * (
SU(I) / 1.41421) * (LC(I) /
4) ^ 3

```

```

5220 NEXT I
5250 PRINT : PRINT : PRINT TAB(
5);"**** CRITERIO DE HETENYI
****"; PRINT
5252 GOTO 868
5300 REM *** SUBROUTINA RANDOLP
H **** CALCULA LOS MOMENTOS
EN LA CABEZA DEL PILOTE, EN
LOS EJES X Y Y; UTILIZANDO
LA SOLUCION DE RANDOLPH
5301 CD# = "RANDOLPH"
5302 G = ETP / (2 * (1 + P10));GC
= G * (1 + 0.75 * P10)
5303 EX = EP
5304 FOR I = Z1 + 1 TO NT
5306 EPE = EX * IC(I) / (.78539 *
(DI(I) / 2) ^ 4)
5307 RO = 1
5308 LC(I) = 2 * (DI(I) / 2) * (E
PE / GC) ^ (0.28571)
5309 QY(I) = QY(I) * (- 1)
5310 MX(I) = ((BR(1,4) * RO * GC /
((EPE / GC) ^ (1 / 7))) - 0.
3 * QY(I) * 4 / (LC(I) ^ 2))
* 1 / (0.8 * RO ^ (0.5)) *
(LC(I) / 2) ^ 3
5311 QX(I) = QX(I) * (- 1)
5312 MY(I) = ((BR(1,5) * RO * GC /
((EPE / GC) ^ (1 / 7))) - 0.
3 * QX(I) * 4 / (LC(I) ^ 2))
* 1 / (0.8 * RO ^ (0.5)) *
(LC(I) / 2) ^ 3
5314 NEXT I
5315 EP = EX
5316 IF Z1 = 0 THEN 5348
5317 EX = EP
5318 FOR I = 1 TO Z1
5320 EPE = EX * IC(I) / (.78539 *
(DI(I) / 2) ^ 4)
5321 RO = 1
5322 LC(I) = 2 * (DI(I) / 2) * (E
PE / GC) ^ (0.28571)
5324 QY(I) = QY(I) * (- 1)
5325 MX(I) = ((BR(1,4) * CGK(I) *
RO * GC / ((EPE / GC) ^ (1 /
7))) - 0.3 * QY(I) * CGK(I) *
4 / (LC(I) ^ 2)) * 1 / (0.8 *
RO ^ (0.5)) * (LC(I) / 2) ^
3
5326 QX(I) = QX(I) * (- 1)
5327 MY(I) = ((BR(1,5) * CGK(I) *
RO * GC / ((EPE / GC) ^ (1 /
7))) - 0.3 * QX(I) * CGK(I) *
4 / (LC(I) ^ 2)) * 1 / (0.8 *
RO ^ (0.5)) * (LC(I) / 2) ^
3
5328 NEXT I
5330 EP = EX
5348 PRINT : PRINT : PRINT : PRINT
TAB( 5);"**** CRITERIO DE R
ANDOLPH ****"; PRINT
5350 GOTO 868
5400 REM *** SUBROUTINA DISTRIBU
CION *** SE REALIZA LA DIST
RIBUCION DEL MOMENTO FLEXION
ANTE, A TODO LO LARGO DE LA
LONGITUD CRITICA, DEBIDO A L
A FUERZA HORIZONTAL Y AL MOM
ENTO EN LA CABEZA.
5401 PRINT : PRINT : PRINT "****
*****
*****
*****
*****"
5402 PRINT TAB( 3);"**** DISTRI
BUCION DEL MOMENTO FLEXIONAN
TE EN LA LONGITUD ***"
5403 PRINT TAB( 17);"CRITICA DE
LOS PILOTES, EN t-m"; PRINT
TAB( 23);"CRITERIO DE RANDO
LPH"
5412 PRINT : PRINT : INPUT "DIST
RIBUCION EN EL PILOTE ";PRINT
5414 PRINT TAB( 1);"PROFUNDIDAD
"; TAB( 15);"PLANO XZ"; TAB(
30);"PLANO YZ"
5415 PRINT TAB( 6);"m"; TAB( 17
);"t-m"; TAB( 32);"t-m"; PRINT
5416 FOR I = 1 TO 11
5418 M1 = MH(I) * QX(J) * LC(J) +
MY(J) * MM(I)
5420 M2 = MH(I) * QY(J) * LC(J) +
MX(J) * MM(I)
5421 Z = LC(J) * ZL(I);Z = ( INT
(Z * 100)) / 100
5422 M1 = ( INT (M1 * 100)) / 100
;M2 = ( INT (M2 * 100)) / 10
0
5426 PRINT TAB( 1);Z; TAB( 14);
M1; TAB( 29);M2; NEXT I
5430 PRINT : PRINT
5431 INPUT "DESEA REALIZAR LA DI
STRIBUCION PARA OTRO PILOTE
(S/N) ?";RE#
5433 PRINT
5434 IF LEFT$(RE#,1) = "S" THEN
5412

```

```

5436 PRINT : PRINT "NOTA: Los momentos antes listados son el resultado de la suma de los"; PRINT TAB(7); "provocado s por la carga transversal e n el caso general (horiz-"; PRINT TAB(7); "zontal en el caso de pilotes verticales)."
```

```

5440 PRINT : PRINT : PRINT
5442 PRINT : PRINT : PRINT TAB(3); "#### PILOTES QUE EXCEDEN LA CARGA MAXIMA ####": PRINT
```

```

5450 GOTO 907
5500 REM ### SUBROUTINA QUE REALIZA LA DISTRIBUCION DE LAS FUERZAS AXIALES, CONSIDERANDO LA RIGIDEZ DE LA LOSA ###
5501 N3 = 0
5502 FOR I = 1 TO NT
5503 IF H = 2 THEN 5505
5504 N3 = N3 + 2 / FC(I); GOTO 5507
5505 N3 = N3 + 4 / FC(I)
5507 NEXT I
5508 IF B(3) = 0 THEN 720
5510 PRINT : INPUT "AREA DE LA CIMENTACION (m2) "; AC; PRINT "RESISTENCIA AL CORTE DEL SUELO A UNA PROFUNDIDAD DE B/2, A PARTIR DEL"; INPUT "NIVEL DE DESPLANTE (t/m2) "; RC
5515 PRINT "PROFUNDIDAD DE DESPLANTE ANTE DEL CAJON O LOSA DE CIMENTACION (m) Y PESO"; INPUT "VOLUMETRICO DEL SUELO DESALGADO (t/m3) ? "; DF; GA
5520 INPUT "PESO TOTAL DE LA ESTRUCTURA (t) ? "; WI; INPUT "TODA LA CARGA LA TOMAN LOS PILOTES (S/N) ? "; TB
5525 RE = SQR (AC / 3.14159); QEP = (3 / 2) * RC + GA * DF; LO = WI - WT
5530 RD = WI / LO - 1; LO = LO * (-1); QA = LO / AC; QX = QA / QEP
5534 REM INTERPOLACION DE LA CURVA Qa/Qep vs a
5535 FOR I = 1 TO 15
5536 QX = ABS (QX)
5537 IF QX < 1 THEN 5549
5538 IF (QX > QAQ(I)) AND (QX < QAQ(I + 1)) THEN 5542
5540 GOTO 5546
```

```

5542 AR = ((AB(I + 1) - AB(I)) / (QAQ(I + 1) - QAQ(I))) * (QX - QAQ(I)) + AB(I)
5544 GOTO 5550
5546 NEXT I
5549 AR = 0.4
5550 CC = 1 / (2 - SQR (1 - AR ^ 2)); RD = AR * RE
5554 FOR I = 1 TO NT
5558 IF (D(I) > = 0) AND (D(I) < R) THEN 5568
5562 QR(I) = QEP
5564 GOTO 5570
5568 QR(I) = CC * QA / (SQR (1 - (D(I) / RE) ^ 2))
5570 NEXT I
5576 QU = LO / AC; SM = 0
5578 FOR I = 1 TO NT
5580 QD(I) = QU - QR(I); PD(I) = QD(I) / QR(I)
5582 IF H = 2 THEN 5584
5583 V7 = 2; GOTO 5585
5584 V7 = 4
5585 QN(I) = LO / N3; QS(I) = QN(I) * (1 - PD(I)); SM = QS(I) * V7 / FC(I) + SM
5588 NEXT I
5590 IF (ABS ((LO - SM) / LO)) < = 0.05 THEN 5628
5592 IF SM < ABS (LO) THEN 5598
5594 P4 = (LO - SM) / LO; GOTO 5600
5598 P4 = (LO - SM) / SM
5600 SM = 0
5604 FOR I = 1 TO NT
5608 QS(I) = QS(I) * (1 + P4); SM = QS(I) * V7 / FC(I) + SM
5612 NEXT I
5616 IF (ABS ((LO - SM) / LO)) < = 0.05 THEN 5624
5620 GOTO 5592
5624 IF I% = "PASE" THEN 5680
5628 FOR I = 1 TO NT
5632 HH(I) = D(I); NEXT I
5636 FOR J = 1 TO NT - 1
5638 FOR I = J + 1 TO NT
5640 IF HH(J) > HH(I) THEN 5644
5644 K1 = HH(I); HH(I) = HH(J); HH(J) = K1
5646 NEXT J
5646 NEXT I
5650 SM = QS(1) * V7 / FC(1)
5654 FOR I = 2 TO NT
5658 D5 = D(I) / HH(NT)
```

```

5660 GOSUB 5730
5664 QB(I) = QB(I) * (1 + CB) / SM =
SM + QS(I) * V7 / FC(I)
5668 NEXT I
5672 IF (ABS((LD - SM) / LD)) <
= 0.05 THEN 5680
5674 Z# = "PASE"
5676 GOTO 5592
5680 IF LEFT$(TB#,1) = "N" THEN
5682
5681 RQ = RQ + 1
5682 FOR I = 1 TO NT
5684 QS(I) = (1 + RQ - 1) * QS(I)
* (- 1) / DP = QS(I) / CP(I,
JI)
5688 UV = UV + DP * AS(I) * H * 2
/ FC(I); NEXT I
5692 FOR I = 1 TO NT
5694 DR(I) = UV / AC
5700 BR(I,3) = DR(I) + (PB(I) / C
P(I,JI))
5704 IF ND > 1 THEN 5714
5708 P(I) = PB(I) + QS(I)
5710 GOTO 5718
5714 QB = WT / NS
5716 P(I) = PB(I) + (RDN(I) - QB +
QS(I))
5718 P(I) = (INT(P(I) * 100)) /
100; NEXT I
5720 GOTO 720
5730 REM *** SUBROUTINA INTERPOL
ACION ***
5732 IF (D5 > = 0) AND (D5 < =
.35) THEN 5742
5734 IF (D5 > .35) AND (D5 < =
.565) THEN 5744
5736 IF (D5 > .565) AND (D5 < =
.71) THEN 5746
5738 IF (D5 > .71) AND (D5 < =
.79) THEN 5748
5740 CB = (.9 / .21) * (D5 - .79)
+ .85; GOTO 5750
5742 CB = .23 * D5 / .35; GOTO 57
50
5744 CB = (D5 - .35) * .27 / .215
+ .23; GOTO 5750
5746 CB = (D5 - .565) * .2 / .145
+ .5; GOTO 5750
5748 CB = (D5 - .71) * .15 / .08 +
.7
5750 RETURN
6000 END
6001 DATA 0,0,1
6002 DATA .1,.062,.84
6003 DATA .2,.09,0.71
6004 DATA 0.3,0.093,.52

```

```

6005 DATA 0.4,.076,.37
6006 DATA 0.5,0.058,0.24
6007 DATA .6,.043,.14
6008 DATA .7,.03,.08
6009 DATA 0.8,0.018,0.05
6010 DATA .9,.008,.02
6011 DATA 1.0,0,0
6020 DATA 1.0,0
6021 DATA .995,.2
6022 DATA .99,.3
6023 DATA .975,.4
6024 DATA .955,.5
6025 DATA .93,.6
6026 DATA .89,.7
6027 DATA .86,.76
6028 DATA .835,.8
6029 DATA .8,.84
6030 DATA .73,.9
6031 DATA .69,.92
6032 DATA .59,.96
6033 DATA .5,.98
6034 DATA .4,.99

```

- Iu factor de influencia que depende de la forma del pilote
- Eu módulo de elasticidad del suelo a una profundidad de 2 o 3 veces el diámetro o ancho del pilote, a partir del nivel de la punta.
- v módulo de Poisson del suelo

Como el pilote sufre acortamiento elástico, y como el valor TI no necesariamente es el verdadero, los desplazamientos de los segmentos del pilote son variables, por lo que es necesario realizar un proceso de aproximaciones sucesivas, hasta alcanzar la tolerancia requerida (que es la diferencia entre valores consecutivos de los desplazamientos) en cada segmento.

La resistencia friccionante de cada segmento de pilote es función de su desplazamiento; por lo tanto, para su evaluación se requiere la interpolación de la curva seleccionada, desplazamiento (X) vs. relación entre carga transferida y la resistencia al corte (Y); para los casos que se analizarán en el capítulo 5 dicha curva es la mostrada en la Fig. 3.30, la cual se introduce al programa principal (TRANSCARG), haciendo uso del subprograma CURVA DEF. La interpolación se realiza en la subrutina RATIO, en la cual también se efectúa el cálculo del cociente reducido  $CT/RC=(RA)$  [ver inciso 3.4] de acuerdo a la posición que guarda el segmento analizado, respecto a la longitud efectiva de fricción positiva (ER). Además, en función del valor de ER se presenta un incremento en la resistencia al esfuerzo cortante (YE), con el cual finalmente se obtiene el valor de la carga transferida por el segmento analizado [inciso 3.4].

#### 4.3.1 Algoritmo para evaluar la carga transferida

Este algoritmo, como ya se indicó, se basa en el método de cálculo propuesto en este trabajo [inciso 3.4] y se detalla a continuación:

1. Se divide el pilote en n segmentos. Suponer el movimiento inicial de la punta, siendo igual a la deformación del suelo. El movimiento supuesto estará de acuerdo al tipo de pilote (punta o fricción) por analizar y del tipo de suelo en el que se apoye.
2. Se determina la fuerza que ocasiona el movimiento en la punta.

3. Se supone que el punto medio del segmento tiene el mismo desplazamiento que la punta.
4. Obtener el coeficiente (CT/RC) de la gráfica que relaciona CT/RC. vs. Deformación [Fig. 3.30].
5. Obtener el factor  $\gamma$  de la curva  $\gamma$ (CT/RC) vs.  $\%L_{\text{máx}}$ , [Fig. 3.31].
6. Se define la resistencia al corte del suelo a la profundidad a la que se encuentra el segmento analizado, con base en la variación con la profundidad de la resistencia al corte del suelo en el sitio de estudio.
7. Obtener el factor  $\chi$  de la curva factor de ganancia de resistencia vs.  $\%L_{\text{máx}}$ , [Fig. 3.32].
8. Calcular la carga transferida por el segmento, así como la carga en el extremo superior del mismo.
9. Se determina la deformación elástica del punto medio del segmento (ec. 3.39) y se compara con la supuesta en el punto 1; si es igual o está dentro de la tolerancia especificada se procede a realizar los mismos cálculos para el segmento superior inmediato; en caso contrario, con ésta deformación calculada se repiten los pasos 4 al 9.

#### 4.3.2 Alcance del programa

El programa es capaz de manejar hasta 20 segmentos, en los que se divide el pilote tipo por analizar, el cual se encuentra definido por su longitud, ancho o diámetro, área, perímetro y momento de inercia.

El programa permite realizar el análisis de 5 secciones; es decir, con diferentes dimensiones y forma, incluso en una misma corrida se pueden introducir secciones circulares y cuadradas.

El programa realiza la búsqueda de la carga axial máxima que soportará el pilote; en el instante en que se obtiene, el proceso de cálculo se detiene e imprime dicho valor con el desplazamiento total sufrido por la cabeza del pilote. La variación del movimiento de la punta es generado internamente por el programa.

La forma de considerar el nivel de desplante (D.) de la losa de cimentación es colocando el cero de longitud del pilote a dicho nivel, a partir del cual se referirá la profundidad del segmento analizado y el valor correspondiente de la resistencia al corte.

Los puntos que definen la curva CT/RC vs. Deformación son proporcionados por un archivo de datos, el cual se forma con el subprograma CURVA DEF y es llamado a impresión con el CTR RECU. Mientras que la curva  $\%(\text{CT/RC})$  vs.  $\%L_{\text{e}}$  se proporciona como un paquete de datos. Para ambas curvas el máximo número de puntos con que se pueden definir es de 20; la curva factor de ganancia de resistencia vs.  $\%L_{\text{e}}$  está definida por las tres ecuaciones que la forman [Fig. 3.32].

#### 4.3.3 Variables utilizadas

A continuación se presenta una lista de las variables utilizadas en el programa, así como su significado.

A	área del pilote
A\$	toma de decisión (S/N)
B	lado del pilote cuadrado
C\$	toma de decisión (S/N)
CC\$	toma de decisión (S/N)
CN	constante del pilote $n = P/d_n$
CT	carga transferida
D	diámetro del pilote
DE	desplazamiento de la punta del pilote
DI	diferencia entre el desplazamiento supuesto y el calculado
DL	deformación elástica del punto medio del segmento
DN	desplazamiento axial mínimo del pilote
DY	desplazamiento final de la cabeza del pilote
EP	módulo de elasticidad del pilote
ER	% de longitud efectiva de fricción positiva
ES	módulo de elasticidad del suelo a una profundidad de 2 o 3 veces el diámetro o ancho del pilote, a partir del nivel punta del mismo
ÉTP	módulo de elasticidad del suelo, a partir de la cabeza del pilote hasta una profundidad de 10 veces el diámetro o ancho del pilote
F\$	toma de decisión (S/N)
FG	factor máximo de ganancia de resistencia al corte
FK	factor de resistencia $K_{\text{sz}}$ , Zeevaert (1974)
FL	longitud del pilote
FM	número de segmentos en que se divide el pilote
GA	promedio del peso volumétrico sumergido del suelo, suponiendo que siempre y en toda la longitud del pilote lo estará.
GP	esfuerzo efectivo a la profundidad PR
IN	momento de inercia de la sección del pilote
LL	carga total en la cabeza del pilote
MX	desplazamiento axial máximo
NC	número máximo de iteraciones para un sólo segmento
ND	número de secciones diferentes a estudiar
NR\$	nombre del archivo que contiene la curva CT/RC vs. deformación

P           perímetro del pilote  
 PM          carga en el punto medio del segmento  
 PIO        módulo de Poisson del suelo, a partir de la cabeza  
           del pilote y hasta una profundidad de 10 veces el  
           diámetro o ancho del pilote  
 PO        módulo de Poisson del suelo de apoyo de la punta del  
           pilote  
 PP        carga en la parte superior del segmento  
 PR        profundidad del punto medio del segmento  
 PU        carga en la punta que ocasiona el desplazamiento DE  
 R\*        toma de decisión (S/N)  
 RA        cociente CT/RC  
 RE        resistencia del suelo al esfuerzo cortante a la  
           profundidad PR  
 RP        capacidad de carga del pilote por punta  
 S1        número del segmento analizado  
 SE        longitud del segmento S1  
 SUB       coeficiente de reacción lateral  
 T        constante del pilote,  $t = Q/d_e$   
 T(I)       $\%CT/RC$   
 TI        desplazamiento supuesto de la punta del pilote  
 TP        tolerancia = 0.001  
 X(I),Y(I) puntos de la curva desplazamiento vs. CT/RC

#### 4.3.4 Diagrama de bloques

En la Fig. 4.4 se muestra el diagrama de bloques correspondiente al programa TRANSCARG.

#### 4.3.5 Opciones del programa

El programa TRANSCARG presenta las siguientes opciones:

1. Realizar el análisis, en una sola corrida, de hasta 5 secciones transversales diferentes de pilotes.
2. Calcular las características geométricas de la sección transversal, la cual puede ser circular o cuadrada, o proporcionárselas como datos.
3. Dar las características mecánicas del pilote y suelo en forma directa o como un paquete de datos.
4. Se distinguen los módulos de elasticidad y de Poisson que presenta el suelo a partir del nivel de desplante del cajón o losa de cimentación hasta una profundidad de 10 veces el diámetro o ancho del pilote, y el que presenta a una profundidad de 2 o 3 veces el ancho o diámetro del pilote, a partir del nivel de la punta del mismo.

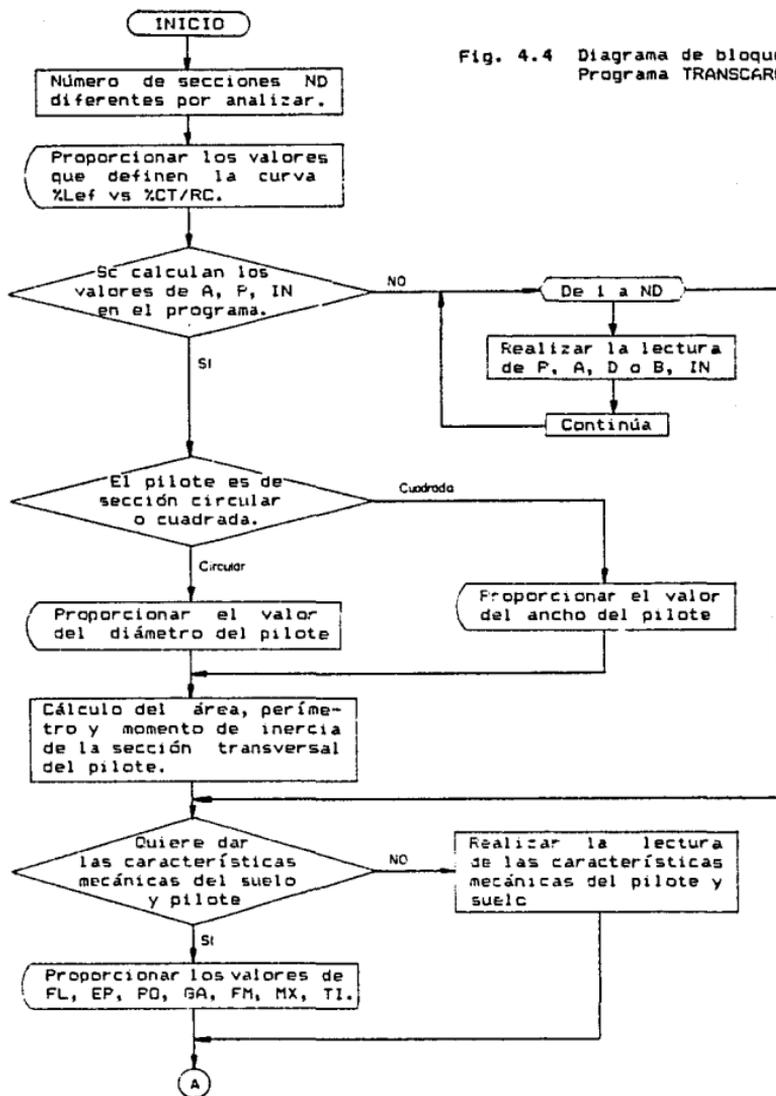
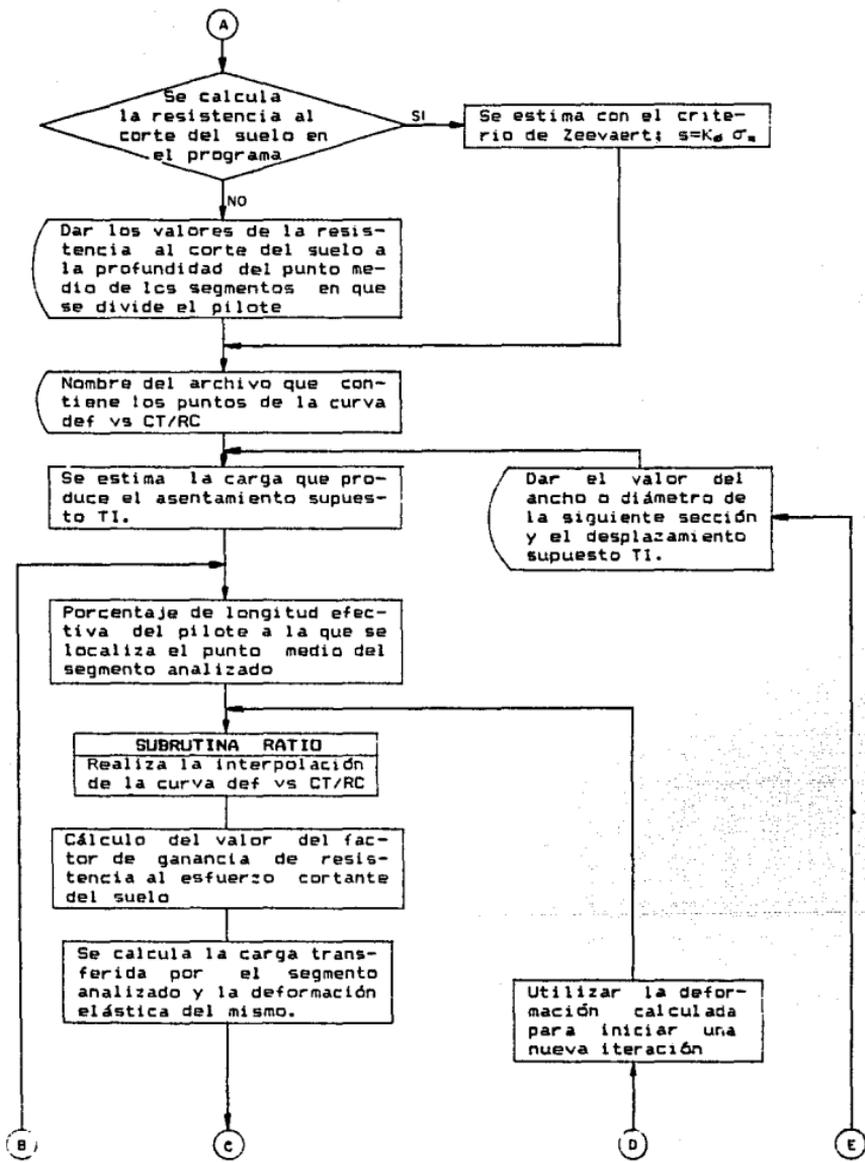
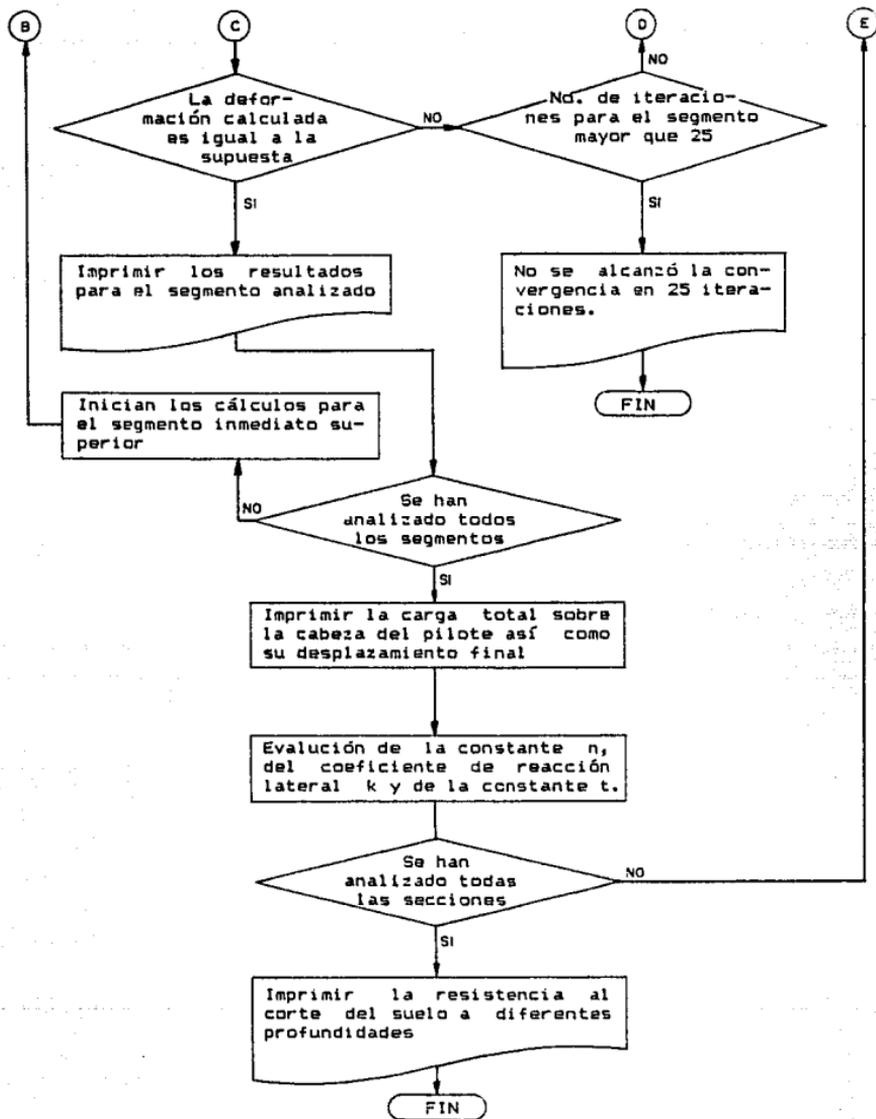


Fig. 4.4 Diagrama de bloques, Programa TRANSCARG





5. Proporcionar los datos de la resistencia al esfuerzo cortante del suelo acorde con la variación que se presenta con la profundidad. La otra opción es que sea calculada por el programa utilizando el criterio de Zeevaert que es función de los esfuerzos efectivos, adoptando cierto valor de  $K_{az}$  y del tipo de superficie lateral del pilote, como se comentó en el inciso 3.2.3, Fig. 3.5.

6. El factor máximo de incremento de resistencia al corte se puede dar de acuerdo al criterio del diseñador [Fig. 3.32].

7. Realizar el análisis con un desplazamiento diferente a los generados internamente por el programa.

#### 4.3.6 Datos del programa

Para una correcta preparación de los datos del programa se recomienda lo siguiente:

a) dividir el pilote en el número de segmentos que se requiera; un número razonable sería aquel que proporcione una longitud de segmento de 1.0 a 1.5 m, con lo cual no se tendrá una gran variación de la resistencia al corte del suelo en cada segmento.

b) localizar a qué profundidad se encuentra el punto medio de cada uno de los segmentos.

Antes de correr el programa TRANSCARG, es necesario haber utilizado el programa CURVA DEF.

#### **\* Programa CURVA DEF**

La realización de este programa tiene por objeto formar el archivo que tendrá los valores que definen la curva Deformación vs. CT/RC, que será requerida por el programa TRANSCARG; sus pasos son los siguientes:

1. Número de puntos que definen la curva, (NP).
2. Los valores de los puntos se darán en el siguiente orden:  
- Deformación(I), CT/RC(I)

donde I varía de 1 a NP

3. Nombre del archivo que guardará los puntos de la curva.

### \* Programa CTR RECU

Este programa llama e imprime los valores de los puntos que definen la curva Deformación vs. CT/RC.

El único dato que se requiere es el nombre del archivo que contiene dichos puntos.

### \* Programa TRANSCARB

1. Número de secciones diferentes que se analizarán. ND
2. Las características geométricas de la sección transversal del pilote son proporcionadas como un paquete de datos ?; F\*

F\* = S proporcionar los datos en la siguiente forma:

```
2001 + NL + 2      DATA  D o B, P, A, IN
      .            .      .  .  .  .
      .            .      .  .  .  .
2001 + NL + ND + 1 DATA  D o B, P, A, IN
```

F\* = N indicar si la sección es circular o cuadrada, C\*. Se proporcionará el valor correspondiente, para cada sección diferente, de acuerdo a lo siguiente:

```
C* = CUA dar el valor del lado del pilote
C* = CIR dar el valor del diámetro del pilote
```

3. Lectura del número de puntos (NL) que definen la curva %(CT/RC) vs. %Lef. El número de puntos dependerá de que tan precisa se quiera definir la curva; un punto recomendable es 15.

```
1999 DATA NL
```

4. Lectura de los puntos que definen la curva %Lef vs. %(CT/RC). Los valores se darán por parejas en el siguiente orden:

```
2001 DATA %Lef(1), %(CT/RC)(1)
      .            .            .
      .            .            .
      .            .            .
2001 + NL - 1 DATA %Lef(NL), %(CT/RC)(NL)
```

5. Lectura de las características mecánicas del pilote y

el suelo.

2001 + NL DATA FL, EP, ES, PO, GA, ETP  
2001 + NL +1 DATA PIO, FM, MX, TI, TP

6. Se calcula la resistencia al esfuerzo cortante en el programa o se desea dar los valores de la misma ?; CC#

CC# = N En este caso se dará la resistencia al esfuerzo cortante de acuerdo a la profundidad a la que se encuentre el punto medio de cada uno de los segmentos. Es recomendable que antes de correr el programa se determinen dichas profundidades, así como la resistencia correspondiente.

CC# = S La resistencia al esfuerzo cortante será calculada por el programa, para lo cual se utiliza el criterio de Zeevaert, en el que el valor de  $K_{cs}$  será proporcionado por el diseñador [inciso 4.3.5, punto 5].

7. Nombre del archivo que contiene los puntos que definen la curva Deformación vs. CT/RC.
8. Valor máximo del factor de ganancia de resistencia (FG), el cual se establece de acuerdo a lo indicado en el inciso 3.3.2 y en la Fig. 3.32.
9. El incremento en el movimiento supuesto de la punta del pilote se realiza con 0.002 m. Si desea cambiarlo, teclear la siguiente instrucción:

517 TI = TI + (Incremento deseado)

10. Nombre del archivo que guardará los valores de las constantes n y t para cada una de las secciones.

NOTA: Los paquetes de datos que sean necesarios para el programa se proporcionarán antes de correr él mismo.

#### \* Programa RECUPERACION

Programa que llama a la pantalla e imprime los valores de las constantes n, t, D y FL, calculados por el programa TRANSCARG. Para lo cual únicamente hay que proporcionar el nombre del archivo.

#### **4.3.7 Impresiones del programa**

Para la carga máxima se imprimen los resultados del proceso iterativo de cada segmento, hasta obtener la carga axial sobre la cabeza, así como el valor del desplazamiento que sufre; también se imprimen los valores de las constantes  $n$  y  $t$ , para las distintas secciones analizadas, y finalmente la resistencia al cortante del suelo para las diversas profundidades.

#### **4.3.8 Listado del programa**

Se anexa el listado completo del programa, así como los correspondientes a los subprogramas.

El ejemplo de aplicación de los programas anteriormente comentados se realizará en el capítulo 5.

### **4.4 COMPUTADORA**

La microcomputadora utilizada fue la Apple IIe, que cuenta con una capacidad de memoria de 128 Kbytes de RAM (random-access memory). Esta computadora no es compatible con IBM o sus compatibles. De acuerdo al modelo y tipo de computadora con que se cuente, algunas instrucciones de los programas expuestos deberán ser modificadas.

Dentro del equipo periférico con que cuente la microcomputadora utilizada están:

- Un monitor de 21.6 cm x 16cm, con una capacidad de pantalla de 80 caracteres por línea y 24 líneas.
- Dos unidades para disco flexible de 5.25 pulgadas de diámetro; con la opción de conectar dos unidades más al CPU.
- Una impresora de 130 caracteres por segundo.

PROGRAMA CURVA DEF

```
4 HOME
5 DIM X(20),Y(20)
6 D$ = CHR$(4)
10 INPUT "Número de puntos que d
sterminan la curva CT/RC vs
DEF ?";NP
20 FOR I = 1 TO NP
30 INPUT X(I),Y(I)
40 NEXT I
50 INPUT "Nombre del archivo ?";
NR$
60 INPUT "PONGA UN DISKETTE EN E
L DRIVE 1 Y TECLE RETURN ";R
$
70 PRINT D$;"OPEN";NR$
80 PRINT D$;"WRITE";NR$
90 PRINT NP
100 FOR I = 1 TO NP
110 PRINT X(I)
115 PRINT Y(I)
120 NEXT I
130 PRINT D$;"CLOSE";NR$
140 END
```

PROGRAMA CTR RECU

```
5 HOME
6 DIM X(20),Y(20)
7 D$ = CHR$(4)
10 INPUT "NOMBRE DEL ARCHIVO ?";
NR$
20 PRINT D$;"OPEN";NR$
30 PRINT D$;"READ";NR$
40 INPUT NP
50 FOR J = 1 TO NP
55 INPUT X(J)
65 INPUT Y(J)
70 NEXT J
80 PRINT D$;"CLOSE";NR$
82 PR# 1
84 PRINT "LOS VALORES QUE DEFINE
N LA CURVA CT/RC vs. DEF SON
!"
90 PRINT : PRINT : PRINT TAB( 4
);"Def.:"; TAB( 12);"CT/RC": PRINT

100 FOR I = 1 TO NP
110 PRINT TAB( 5);X(I); TAB( 12
);Y(I)
120 NEXT I
130 PRINT : PRINT : PRINT "EL NU
MERO DE PUNTOS QUE DEFINE LA
CURVA SON: ";NP
140 END
```

PROGRAMA TRANSCARG

```

5 HOME
6 DIM CN(5,2),D(5),TT(5)
7 DIM X(20),Y(20),FM(20),RC(20),
  GT(20),PFD(20)
8 DIM RE(20),LF(20),T(20),NF(20)
  ,NC(20)
9 REM SE UTILIZA EL METODO PRO-
  PUESTO POR COYLE Y REESE PA-
  RA CALCULAR LA CAPACIDAD DE
  CARGA DE LOS PILOTES
10 PRINT : PRINT TAB(8);"*****
  *****"; PRINT
  TAB(8);"@"; TAB(35);"@"
12 PRINT TAB(8);"@"; TAB(12);
  "PROGRAMA QUE REALIZA"; TAB(
  35);"@"; PRINT TAB(8);"@";
  TAB(35);"@"
13 PRINT TAB(8);"@"; TAB(14);
  "EL CALCULO DE LA"; TAB(35)
  ;"@"; PRINT TAB(8);"@"; TAB(
  35);"@"
14 PRINT TAB(8);"@"; TAB(13);
  "CARGA AXIAL MAXIMA"; TAB(3
  5);"@"; PRINT TAB(8);"@"; TAB(
  35);"@"
15 PRINT TAB(8);"@"; TAB(19);
  "DE UN"; TAB(35);"@"; PRINT
  TAB(8);"@"; TAB(35);"@"
16 PRINT TAB(8);"@"; TAB(19);
  "PILOTE"; TAB(35);"@"; PRINT
  TAB(8);"@"; TAB(35);"@"
17 PRINT TAB(8);"*****
  *****"; PRINT : PRINT
  : PRINT
18 PRINT : PRINT
19 D$ = CHR$(4)
22 INPUT "SON PILOTES DE FRICCIO
  N (S/N)? ";RF$; INPUT "SE GE
  NERARA FRICCION NEGATIVA (S/
  N)? ";RB$
24 IF LEFT$(RF$,1) = "N" THEN
  30
26 PRINT : PRINT : PRINT TAB(8)
  ;"*** PILOTE DE FRICCION **
  *"; PRINT TAB(11);"-----
  -----"
27 PRINT : PRINT : PRINT : PRINT
28 GOTO 40
30 PRINT : PRINT : PRINT TAB(8)
  ;"*** PILOTE DE PUNTA ***";
  PRINT TAB(11);"-----
  -----"
31 PRINT : PRINT : PRINT : PRINT

40 PRINT "LAS CARACTERISTICAS GE
  OMETRICAS DE LA SECCION TRAN
  SVERSAL DEL PILOTE"; INPUT "
  SON PROPORCIONADAS COMO UN P
  AQUETE DE DATOS (S/N) ?";F$
42 PRINT : PRINT : INPUT "CUANTO
  S PILOTES DE SECCION DIFEREN
  TE SE ANALIZARAN ?";ND
44 IF LEFT$(F$,1) = "S" THEN 1
  90
54 PRINT : II = 1
55 INPUT "EL PILOTE ES DE SECCIO
  N CUADRADA (CUA) O DE SECCIO
  N CIRCULAR (CIR) ?";C$
60 IF LEFT$(C$,2) = "CU" THEN
  150
90 PRINT : INPUT "DIAMETRO DEL P
  ILOTE D = ";D(II)
92 D = D(II)
100 P = 3.14159 * D
110 A = 3.14159 * (D ^ 2) / 4
120 IN = 3.14159 * (D ^ 4) / 64
121 IN(II) = IN
130 GOTO 190
150 PRINT : INPUT "LADO DEL PILO
  TE B = ";B(II)
152 B = B(II)
160 P = 4 * B; B1A = B ^ 2
170 IN = (B ^ 4) / 12; D = B1D(II)
  = B(II)
171 IN(II) = IN
190 READ NL
192 REM SE INICIA LA LECTURA DE
  LA CURVA %CT vs %Lef, PARA
  LA FRICCION POSITIVA
194 FOR I = 1 TO NL: READ LF(I),
  T(I)
196 NEXT I
198 REM SE INICIA LA LECTURA DE
  LA CURVA %CT vs %Lef, PARA
  FRICCION NEGATIVA
200 FOR I = 1 TO NL: READ NF(I),
  NC(I)
202 NEXT I
210 PRINT : PRINT "DIAMETRO O AN
  CHO DEL PILOTE = ";D(II) " m";
  PRINT "PERIMETRO = ";F " m"; PRINT
  "AREA = ";A " m2"; PRINT "HOME
  NTO DE INERCIA = ";IN " m4"; PRINT

```

```

211 PRINT ; PRINT ; INPUT "QUIER
E DAR LAS CARACTERISTICAS ME
CANICAS DEL PILOTE Y SUELO (
S/N) ?";A$
212 IF LEFT$(A$,1) = "N" THEN
223
213 IF LEFT$(RF$,1) = "S" THEN
215
214 PRINT ; PRINT ; INPUT "RESIS
TENCIA POR PUNTA DEL PILOTE
(t) ?";RR: GOTO 216
215 IF LEFT$(RB$,1) = "N" THEN
217
216 INPUT "FRONTERA SUPERIOR DEL
ESTRATO COMPRESIBLE (m) ?";
Z(1); INPUT "FRONTERA INFERI
OR DEL ESTRATO COMPRESIBLE (
m) ?";Z(2); INPUT "PROFUNDID
AD A LA QUE SE APOYA LA PUNT
A DEL PILOTE (m) ?";Z(3)
217 PRINT ; PRINT ; INPUT "LONGI
TUD DEL PILOTE (m) ?";FL: INPUT
"MODULO DE ELASTICIDAD DEL P
ILOTE (t/m2) ?";EP: PRINT "M
ODULO DE ELASTICIDAD (t/m2)
Y DE POISSON DEL SUELO, EN U
N TRAMO DE 10d,"; INPUT "EN
LA PARTE SUPERIOR DEL PILOTE
?";ETP,PID
218 PRINT "MODULO DE ELASTICIDAD
(t/m2) Y DE POISSON DEL SUE
LO DE APOYO DE LA PUNTA"; INPUT
"DEL PILOTE ?";ES,PO
219 INPUT "PESO VOLUMETRICO SUME
RIGIDO PROMEDIO DEL SUELO (t/
m3) ?";GA
220 INPUT "NUMERO DE SEGMENTOS D
EL PILOTE ?";FM
221 INPUT "DESPLAZAMIENTO AXIAL
MAXIMO SUPUESTO (m) ?";MX: INPUT
"MOVIMIENTO SUPUESTO DE LA P
UNTA DEL PILOTE (m) ?";TI
222 INPUT "TOLERANCIA ?";TP: GOTO
225
223 READ FL,EP,ES,PO,GA,ETP
224 READ PID,FM,MX,TI,TP
225 IF LEFT$(F$,1) = "N" THEN
250
236 II = 0
238 FOR I = 1 TO ND
240 READ D(I),P(I),A(I),IN(I)
242 NEXT I
243 II = II + 1
244 D = D(I);P = P(I);A = A(I)
;IN = IN(I)
246 IF DN > 1 THEN 264
250 NS = FM;SE = FL / FM;DE = TI;
KO = 1;FK = 0.3
251 PRINT ; PRINT "SE CALCULA LA
RESISTENCIA AL CORTE EN EL
PROGRAMA (S) O SE DESEA DAR"
; INPUT "LOS VALORES DE LA M
ISMA (N) ?";CC$
252 IF LEFT$(CC$,1) = "N" THEN 2
5a
253 PRINT ; INPUT "DE ACUERDO AL
CRITERIO DE ZEEVAERT, CUAL
ES EL VALOR DE Ko ?";FK
254 GOTO 262
256 PRINT ; PRINT "EL VALOR DE L
A RESISTENCIA SE DARA EN t/m
2. SE TRATA DE UN PROMEDIO E
N"; PRINT "LA LONGITUD DE CA
DA SEGMENTO"; PRINT
FOR S1 = FM TO 1 STEP - 1
258 CO = FM - S1 + 1;PF = (INT (
(FL - CO * SE + SE / 2) * 10
0) / 100
260 PRINT "PROFUNDIDAD=";FR: INPUT
"RESISTENCIA AL CORTE RE=";
RE(S1); PRINT
261 NEXT S1
262 PRINT ; INPUT "VALOR MAXIMO
DEL FACTOR DE GANANCIA DE RE
SISTENCIA ?";FG
263 GOTO 680
264 PRINT ; PRINT ; PRINT "####
#####
#####"; PRINT
; PRINT "SEG"
265 PRINT TAB(1);"No"; TAB(5)
;"CARG TRANSF"; TAB(10);"CA
RG AXIAL"; TAB(30);"MOVIMIE
NTO"; TAB(42);"RESIS PUNTA"
; PRINT TAB(10);"t"; TAB(
22);"t"; TAB(35);"m"; TAB(
47);"t"; PRINT
266 CO = 1;KO = 1;CO = KO;FI = FI
/ 57.29577
268 IF LEFT$(RF$,1) = "S" THEN
272
270 PU = RR / A
271 GOTO 275
272 REM SE CALCULA LA RESPUESTA
ELASTICA PARA EL AGENTAMIE
NTO SUPUESTO EN LA PUNTA (TI)
. EL VALOR 0.85 ES EL FACTOR
DE INFLUENCIA CONSIDERANDOL
O COMO CEMENTO RIGIDO CIRCU
LAR
274 PU = DE / (.85 * D * ((1 - PD
^ 2) / ES));RR = A * PU
275 PR = FL - CO * SE + SE / 2
276 RP = RR
277 PR = FL - CO * SE + SE / 2

```

```

278 S1 = NS + 1 - KO
279 IF LEFT$(CC$,1) = "N" THEN
281
280 GP = PR * GA:RE(S1) = FK * GP
281 IF ( LEFT$(RF$,1) = "S") AND
( LEFT$(RB$,1) = "N") THEN
300
284 IF RE(S1) < 0 THEN 290
286 ER = (PR - (Z(2) - Z(1))) / (
Z(3) - Z(2))
288 GOTO 320
290 ER = (PR - Z(1)) / (Z(2) - Z(
1))
291 GOTO 320
300 ER = PR / FL
320 NC = 1
325 REM RP = RESISTENCIA DE LA
PUNTA
330 GP = PR * GA
332 IF (DE / MX) = 1 THEN 337
334 REM LA SUBROUTINA RATIO OBTI
ENE LA RELACION ENTRE EL ESF
UERZO CORTANTE TRANSFERIDO Y
LA RESISTENCIA CORTANTE DEL
SUELO, CUANDO SE DESPLAZA E
L PILOTE UN VALOR -DE-
335 GOSUB 699
337 IF (ER > 0) AND (ER < = 0.2
) THEN 342
338 IF (ER > 0.2) AND (ER < = 0
.8) THEN 344
340 IF (ER > 0.8) AND (ER < = 1
.0) THEN 347
342 YE = RE(S1) * 1
343 GOTO 350
344 XG = ((FG - 1) / 0.6) * (ER -
0.2) + 1.0
345 YE = RE(S1) * XG
346 GOTO 350
347 YE = RE(S1) * FG
350 CT = RA * YE * SE * P
352 PP = RP + CT
354 PM = (PP + RP) / 2
355 REM SE CALCULA LA DEFORMACI
ON ELASTICA DEL PUNTO MEDIO
DEL PILOTE, SUPONIENDO QUE L
A CARGA VARIA LINEALMENTE EN
CADA SEGMENTO
360 DL = ((PM + RP) / 2) * (SE /
(2 * A * EP))
370 DI = DE: D2 = DI + DL
380 DI = ABS(D1 - D2)
390 IF DI > 1 THEN GOTO 630
400 IF DI < = TP THEN 445
410 NC = NC + 1
420 IF NC > 25 THEN GOTO 650
430 DE = D2
440 GOTO 334
445 S1 = NS + 1 - KO
450 D3 = ((PP + PM) / 2) * (SE /
(2 * A * EP))
460 D2 = D2 + D3: DY = D2: DN = DL +
D3 + DN
462 IF DY < MX THEN 474
463 D2 = MX: DY = MX
464 GOTO 474
465 PRINT "NO ES ADECUADO REALIZ
AR EL CALCULO PARA EL DESPLA
ZAMIENTO INICIAL SUPUESTO": PRINT
467 GOTO 1700
474 CT = ( INT (CT * 100) ) / 100:
PP = ( INT (PP * 100) ) / 100
: DY = ( INT (DY * 10000) ) /
10000: RR = ( INT (RR * 100) )
/ 100
475 PRINT TAB( 1); S1; TAB( 8); C
T; TAB( 20); PP; TAB( 32); DY;
TAB( 46); RR
476 PRINT
480 CO = CO + 1: KO = CO
490 IF KO < = NS THEN GOTO 960
491 RC(S1) = RE:GT(S1) = ( INT (G
P * 100) ) / 100: PFD(S1) = PR
492 PRINT ; PRINT "*****
*****
*****": PRINT ; PRINT
494 IF ZE = 1 THEN 526
496 PRINT "Se ha terminado el ca
lculo de desplazamiento y ca
rgas en el pilote"
498 PRINT "*** La carga axial so
bre la cabeza del pilote: ";
PR " t"
500 PRINT "El desplazamiento en
la cabeza es: ";DY" m ***"
507 IF PP < LL THEN 513
508 TI = TI + .002
509 LL = PP: TD = DY
510 DE = TI: KO = 1: CD = 1
512 GOTO 264
513 ZE = 1
514 TI = TI - 0.002
516 DE = TI: KO = 1: CD = 1

```

```

517 DN = 0
518 PR# 1
520 GOTO 264
526 PRINT : PRINT "*****
*****
*****
**"
528 PRINT "**** LA CARGA AXIAL M
AXIMA SOBRE EL PILOTE ES: ";
PP" t ****"
529 PRINT "**** EL DESPLAZAMIENT
O AXIAL MAXIMO DE LA CABEZA
ES: ";DY" m ****"
530 PRINT "*****
*****
*****"
531 PRINT : PRINT
532 ZE = 0
548 PRINT
550 PRINT "### Desplazamiento ax
ial minimo ";(( INT (DN * 10
0) / 100)" m"
551 PRINT TAB( 4);"Corresponde
al acortamiento elastico del
pilote, analizado por seg-"
: PRINT TAB( 4);"mentos.": PRINT
560 PRINT "### Desplazamienot ax
ial maximo supuesto ";MX" m"
570 IF DN < = MX THEN GOTO 590
575 PRINT "DN=";DN
580 PRINT "El desplazamiento axi
al minimo calculado es mayor
al supuesto"
588 REM SE CALCULAN LAS CONSTAN
TES N=CN, QUE REALACIONAN LA
CARGA ADMISIBLE CON EL DESP
LAZAMIENTO AXIAL
590 CN(11,1) = PP / DY;CN(11,2) =
PP / DN
620 GOTO 1600
630 PRINT "DI es mayor que la un
idad DI= ";DI
640 GOTO 2000
650 SI = NS + 1 - KD
660 PRINT "No se logra la conver
gencia con 25 iteracciones,
segmento: ";SI
670 GOTO 2000
682 PRINT : PRINT : INPUT "Nombr
e del archivo que contiene l
a curva CT/RC vs DEF ?";NR#
684 PRINT D$;"OPEN";NR#
686 PRINT D$;"READ";NR#
688 INPUT NP
690 FOR J = 1 TO NP
692 INPUT X(J)
693 INPUT Y(J)
694 NEXT J
696 PRINT D$;"CLOSE";NR#
697 PR# 0
698 GOTO 264
699 REM **** SUBROUTINA RATIO **
** REALIZA LA INTERPOLACION
DE LA CURVA CT/RC vs DEF
700 FOR I = 1 TO NP
710 J = I + 1
720 IF DE > = X(I) THEN 740
730 GOTO 770
740 IF DE < = X(J) THEN 760
750 GOTO 770
760 RA = ((Y(J) - Y(I)) / (X(J) -
X(I))) * (DE - X(I)) + Y(I)
762 GOTO 774
770 NEXT
774 IF RE(SI) < 0 THEN 884
800 FOR I = 1 TO NL
810 J = I + 1
820 IF ER > = LF(I) THEN 840
830 GOTO 870
840 IF ER < = LF(J) THEN 860
850 GOTO 870
860 XOT = ((T(J) - T(I)) / (LF(J)
- LF(I))) * (ER - LF(I)) +
T(I)
862 GOTO 945
870 NEXT I
884 FOR I = 1 TO NL
886 J = I + 1
888 IF ER > = NF(I) THEN 892
890 GOTO 900
892 IF ER < = NF(J) THEN 896
894 GOTO 900
896 XOT = ((NC(J) - NC(I)) / (NF(J)
- NF(I))) * (ER - NF(I)) +
NC(I)
898 GOTO 945
900 NEXT
945 RA = XOT * RA
949 REM SE REALIZO LA INTERPOLA
CION
950 RETURN
955 PRINT
960 RC(SI) = RE;GT(SI) = GP;PFD(S
I) = PR
961 DE = 02
962 REM SE INICIA EL CALCULO PA
RA UN NUEVO SEGMENTO
968 RP = PP
970 GOTO 277

```

```

1600 DT = ((ES * D ^ 4) / (EP * I
N)) ^ (1 / 12)
1605 SUB = 1.3 * (((D(II) ^ 4) /
(EP * IN(II))) ^ (1 / 12)) *
(1 / (1 - (PIG ^ 2))) * (ETP
^ (13 / 12))
1606 SUB(II) = SUB
1607 PRINT : PRINT "EL VALOR DEL
COEFICIENTE DE REACCION LAT
ERAL (Vesic) ES: "; ((INT (S
UB * 1000 / D(II))) / 1000) "
t/m3"; PRINT
1610 REM PARA OBTENER LA CONSTA
NTE T, SE CONSIDERA EL PILOT
E COMO UNA VIGA SOBRE UNA CI
MENTACION ELASTICA DE LONGIT
UD INFINITA, CARGADA EN EL E
XTREMO LIBRE (HETENYI)
1612 SUB = SUB / D(II)
1615 LAM = ((SUB * D) / (4 * EP *
IN)) ^ 0.25
1620 TT(II) = 0.5 * SUB * D / LAM
1622 D(II) = D
1626 PR# 1: PRINT : PRINT : PRINT
TAB( 3); "CONSTANTES DE LA C
IMENTACION, n Y t"; PRINT
1628 PRINT "Nmin= "; CN(II,1) " t/
m"
1630 PRINT "Nmax= "; CN(II,2) " t/
m"
1632 PRINT " T= "; TT(II) " t/m"
1633 PP(II) = PP
1634 IF II = ND THEN 1670
1636 PRINT : PRINT : PRINT
1637 PR# 1
1638 PRINT : PRINT : PRINT "####
# SE INICIA EL CALCULO PARA
OTRO PILOTE ####": PRINT
1641 II = II + 1
1642 IF LEFT$(F$,1) = "N" THEN
1646
1643 D = D(II); P = P(II); A = A(II)
; IN = IN(II)
1644 GOTO 1656
1645 PR# 1
1646 PRINT : INPUT "VALOR DEL DI
AMETRO O ANCHO DE LA SIGUIEN
TE SECCION ?"; D(II)
1647 PR# 1: PRINT : INPUT "EL PI
LOTE ES DE SECCION CUADRADA
(CUA) O DE SECCION CIRCULAR
(CIR) ?"; C$
1648 IF LEFT$(C$,2) = "CU" THEN
1654
1650 D = D(II); P = 3.14159 * D; A =
3.14159 * (D ^ 2) / 4; IN = 3
.14159 * (D ^ 4) / 64
1651 IN(II) = IN
1652 GOTO 1656
1654 P = 4 * D(II); A = (D(II) ^ 2
); IN = (D(II) ^ 4) / 12; D =
D(II)
1655 IN(II) = IN; PR# 1
1656 PR# 1: PRINT : PRINT : PRINT
: PRINT "DIAMETRO O ANCHO DE
L PILOTE= "; D " m"; PRINT "PE
RIMETRO= "; P " m"; PRINT "ARE
A= "; A " m2"; PRINT "MOMENTO
DE INERCIA= "; IN " m4"; PRINT
: PRINT
1657 PR# 1: INPUT "ES PILOTE DE
FRICCION (S/N) ?"; RF$: PRINT
1658 PRINT : INPUT "MOVIMIENTO S
UPUESTO DE LA PUNTA DEL PIL
OTE ?"; TI
1659 DE = TI; KO = 1; CO = KO; LL =
O; PP = O
1660 IF LEFT$(RF$,1) = "S" THEN
1668
1662 PR# 1: PRINT : INPUT "RESIS
TENCIA POR PUNTA DEL PILOTE
?"; RR
1666 PR# 0
1668 GOTO 264
1670 PRINT : INPUT "QUIERE GRABA
R EL ARCHIVO (S/N) "; IR$
1672 IF LEFT$(R$,1) = "N" THEN
1700
1673 PR# 1
1674 PRINT : INPUT "NOMBRE DEL A
RCHIVO ?"; IR$
1676 PRINT : INPUT "PONGA UN DIS
KETTE EN EL DRIVE 1 Y TECLE
RETURN"; R$
1678 PRINT D$; "OPEN"; N$
1680 PRINT D$; "WRITE"; N$
1682 PRINT ND
1683 FOR I = 1 TO ND
1684 PRINT PP(I)
1685 PRINT SUB(I)
1686 PRINT CN(I,1)
1688 PRINT CN(I,2)
1690 PRINT TT(I)
1691 PRINT D(I)
1692 PRINT IN(I)
1693 NEXT I
1694 PRINT FL
1695 PRINT EP
1696 PRINT ETP

```

```

1697 PRINT PIO
1698 PRINT D%; "CLOSE"; N%
1700 REM FINALIZAN TODOS LOS CA
      LCULOS
1701 PR# I
1702 PRINT : PRINT : PRINT : PRINT
      "*****"
1704 PRINT TAB( 1); "SEGM"; TAB(
      7); "PROF"; PRINT TAB( 1); "N
      o"; TAB( 7); "MED"; TAB( 20);
      "RES CORTE"; TAB( 34); "ESF V
      ERT"; PRINT TAB( 8); "m"; TAB(
      22); "t/m2"; TAB( 36); "t/m2";
      PRINT
1705 FOR I = 1 TO FM
1706 PFD(I) = ( INT (PFD(I) * 100
      ) ) / 100; GT(I) = ( INT (GT(I)
      ) * 100) / 100
1708 PRINT TAB( 1); I; TAB( 7); P
      FD(I); TAB( 20); RE(I); TAB(
      34); GT(I)
1710 PRINT
1712 NEXT I
1714 PRINT "*****"
1999 DATA 14
2000 END
2001 DATA 0,0
2002 DATA .05,.13
2003 DATA .15,.24
2004 DATA .225,.33
2005 DATA .3,.435
2006 DATA .4,.54
2007 DATA .5,.61
2008 DATA .6,.71
2009 DATA .65,.755
2010 DATA .7,.84
2011 DATA .75,.94
2012 DATA .8,.975
2013 DATA .85,1.0
2014 DATA 1.0,1.0
2016 DATA 0,1.0
2017 DATA 0.15,.85
2018 DATA .2,.975
2019 DATA .25,.94
2020 DATA .3,.84
2021 DATA .35,.755
2022 DATA .4,.71
2023 DATA 0.5,.61
2024 DATA .6,.54
2025 DATA .7,.435
2026 DATA .775,.33
2027 DATA .85,.24
2028 DATA .95,.13
2029 DATA 1.0,.1

```

PROGRAMA RECUPERACION

```
2 HOME
4 D% = CHR% (4)
6 PRINT "PROGRAMA QUE LLAMA A PA
  NTALLA LOS VALORES DE LAS CO
  NSTANTES DE CIMENTACION n y
  t"
8 PRINT : PRINT : INPUT "NOMBRE
  DEL ARCHIVO ?";N%
10 PRINT D%;"OPEN";N%
12 PRINT D%;"READ";N%
14 INPUT ND
16 FOR I = 1 TO ND
18 INPUT PP(I)
20 INPUT SUB(I)
22 INPUT CN(I,1)
24 INPUT CN(I,2)
26 INPUT TT(I)
28 INPUT D(I)
30 INPUT IN(I)
32 NEXT I
34 INPUT FL
36 INPUT EP
38 INPUT ETP
40 INPUT PIO
42 PRINT D%;"CLOSE";N%
46 FOR I = 1 TO ND
48 R(I,1) = TT(I) / CN(I,1);R(I,2
  ) = TT(I) / CN(I,2)
50 NEXT I
52 PRINT "VALORES DE LAS CONSTAN
  TES DE CIMENTACION n Y t"
53 PRINT : PRINT TAB(1);"SEC"
54 PRINT TAB(2);"No"; TAB(6);
  "DIAM"; TAB(13);"CN(1)"; TAB(
  26);"CN(2)"
56 FOR I = 1 TO ND
58 PRINT TAB(2);I; TAB(6);D(I
  ); TAB(13);CN(I,1); TAB(26
  );CN(I,2)
60 NEXT I
62 PRINT : PRINT : PRINT TAB(1
  );"SEC"; PRINT TAB(2);"No"
  ; TAB(6);"T"; TAB(19);"R(1
  )"; TAB(32);"R(2)"
64 FOR I = 1 TO ND
66 PRINT TAB(2);I; TAB(6);TT(
  I); TAB(20);R(I,1); TAB(33
  );R(I,2)
68 NEXT I
70 PRINT : PRINT : PRINT "LONGIT
  UD DE LOS PILOTES ANALIZADOS
  "FL" a"
71 PRINT "MODULO DE ELASTICIDAD
  DEL PILOTE ";EP" t/m2"
72 PRINT "MODULO DE ELASTICIDAD
  DEL SUELO ";ETP" t/m2"
73 PRINT "MODULO DE POISSON DEL
  SUELO 0";PIO
74 PRINT : PRINT
75 FOR I = 1 TO ND
76 PRINT "COEFICIENTE DE REACCIO
  N LATERAL Ks("I") ";SUB(I)
78 NEXT I
80 END
```

## CAPITULO 5

### APLICACIONES

#### 5.1 EJEMPLO 1 (Edificio de 17 niveles)

##### 5.1.1 Descripción del predio y proyecto

El edificio que se ha tomado como ejemplo para aplicar los dos programas comentados en el capítulo 4, forma parte de una unidad habitacional que se localiza en la zona suroriente de la ciudad. Atendiendo a la información de la investigación del subsuelo, el predio se encuentra dentro de la Zona III o zona del lago, según el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, 1987.

Esta edificación tipo torre, tiene forma de H en planta. Las alas miden  $12.5 \times 18.15$  m, separadas por un cuerpo de servicios de  $7.85 \times 5$  m; su altura total es de 46 m, se encuentra aislada de las demás edificaciones y cubre un área de  $493 \text{ m}^2$ . La estructuración se resolvió a base de muros de cortante, trabes y losas de concreto reforzado. De acuerdo con el RCDF-87, el edificio pertenece al Grupo B y su estructuración se clasifica en el tipo I. La carga permanente alcanza un valor promedio de  $20.8 \text{ t/m}^2$  al nivel de la losa de cimentación, lo que implica un peso total de la estructura de  $10254.8 \text{ t}$ .

##### 5.1.2 Estratigrafía y propiedades ingenieriles

Como ya se indicó, el subsuelo corresponde a la Zona III; en la Fig. 5.1 se muestra el perfil del suelo. A grandes rasgos, la estratigrafía del sitio es como sigue: hasta 3.5 m de profundidad se tiene intercalación de estratos arcillosos con materia orgánica, limos y arena, presentando un contenido de agua promedio de 80% y 10 golpes en la pueba de penetración estándar de 10 golpes. De 3.5 a 9.0 m aproximadamente, se encuentra un estrato de arcilla con contenido de agua que varía de 170 a 350% y cuya consistencia, de acuerdo a la penetración estándar, es muy blanda. De 9.0 a 11.0 m, un estrato de arena de compacidad media y contenido de agua de 40%. Nuevamente de 11.0 a 13.5 m se presenta arcilla con contenido de agua de 350%. Entre los

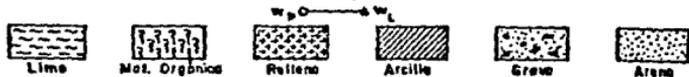
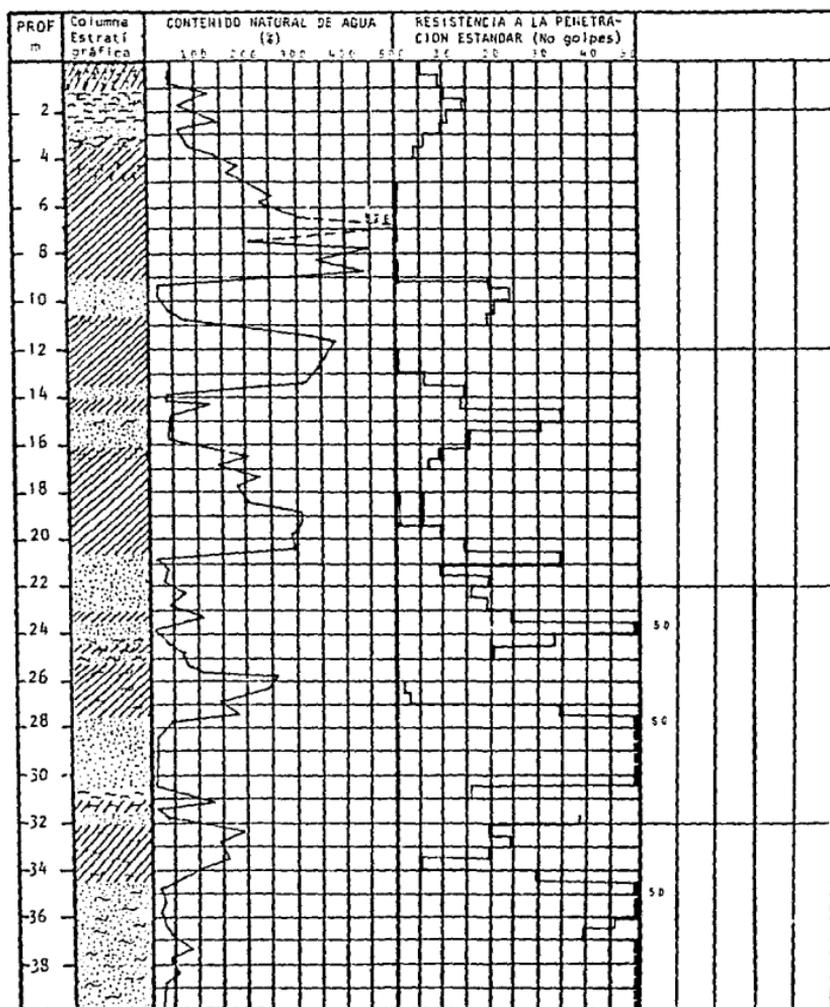


Fig. 5.1 Perfil del subsuelo del ejemplo 1

13.5 y 16.0 m, se tiene arena de compacidad media con intercalación de arcilla y contenido de agua del 40%. Hasta los 20.5 m se encuentra una formación arcillosa cuyo contenido de agua promedio es de 260% y de consistencia blanda. De 21.0 a 25.0 m se presenta arena de compacidad media con intercalación de arcilla y limo. De 25.0 a 27.5 m arcilla con contenido de agua de 180%. Entre 27.5 y 32.0 m una arena con intercalación de arcilla y limo, y un contenido de agua del 20%. Entre 32.0 y 34.5 m se presenta un estrato de arcilla con limo, cuyo contenido de agua promedio es de 120% y consistencia firme. Finalmente, a partir de los 34.5 m hasta los 40.0 m se encontró arena limosa en estado muy compacto, ya que el número de golpes registrado fue mayor de 50, con un contenido de agua de 25%. El nivel de aguas freáticas se localizó a una profundidad de 2.2 m.

El perfil simplificado, así como los parámetros ingenieriles tales como resistencia al corte, estimada en base al número de golpes; peso volumétrico de la muestra, a partir del contenido de agua, se muestran en la Tabla S.1.

### 5.1.3 Análisis de la cimentación

La cimentación se resolvió utilizando pilotes apoyados a 34.0 m en el estrato resistente. La cimentación está constituida por 128 pilotes de sección cuadrada, con 0.3 ó 0.4 m de lado y ampliación en la punta a 0.4 ó 0.5 m, respectivamente, en una longitud de 4.0 m embebida en la capa resistente. La Fig. 5.2 muestra un esquema de la planta de cimentación, mientras que en la Fig. 5.3 se presenta un corte esquemático del edificio y de su cimentación, en donde se distingue que las contratraves y la losa de cimentación se construyeron sobre la superficie del terreno.

### Capacidad de carga

Debido a la forma en que se apoyan los pilotes, se estima la capacidad última por punta de los mismos en suelos friccionantes, utilizando la expresión de las NTC-87. Sin embargo, dada la zona en la que se localiza la edificación, se generará fricción negativa a lo largo del fuste de los pilotes, ésta fricción se estima utilizando el programa TRANSCARG. Como se sabe, la fricción negativa es el fenómeno en el cual, la masa de suelo al presentar una mayor velocidad de desplazamiento descendente que la del pilote, le transfiere carga al mismo, lo que ocasiona que la capacidad de carga última del pilote se vea reducida. Este efecto se toma en cuenta en el programa referido, restando la carga transferida calculada, en los estratos susceptibles de sufrir consolidación, a la capacidad por punta del pilote y a la fricción positiva generada en la longitud embebida.

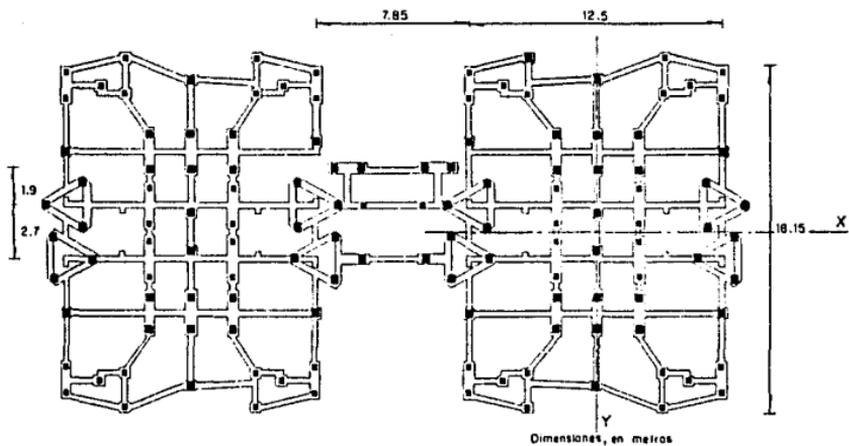


Fig. 5.2 Planta de cimentación del edificio del ejemplo 1 (Mendoza y Auvinet, 1987)

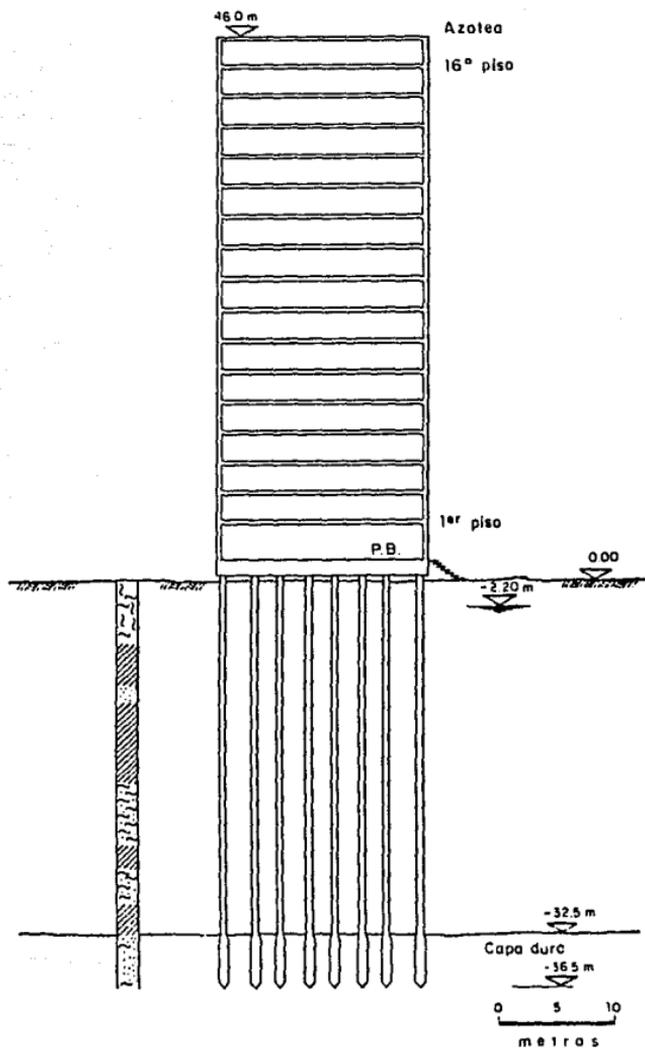


Fig. 5.3 Corte esquemático del edificio y de su cimentación (Mendoza y Auvinet, 1987)

Como la resistencia al corte del suelo a las diferentes profundidades no se calcula en el programa, ésta se proporciona como el promedio de aquellas que se tienen en la longitud de cada segmento, Tabla 5.1. Para considerar la fricción negativa que se desarrollará en los pilotes, los estratos comprendidos entre 0.0 y 28.0 m son los que sufrirán consolidación; por tal motivo, la resistencia en esa zona se proporciona con signo negativo. A partir de los 28.0 m se presentará fricción positiva.

En la Fig. 5.1, se aprecia que el estrato resistente se localiza a la profundidad de 34.5 m, y de acuerdo al número de golpes registrados ( $> 50$ ), se asignó un ángulo de fricción interna de  $36^\circ$ .

Los datos del sitio y del pilote, requeridos por el programa TRANSCARG se listan a continuación:

Lado del pilote: se analizan simultáneamente las dos dimensiones del pilote, que presenta la cimentación en estudio y que son, de 0.3 m (sección 1) y 0.4 m (sección 2).

Capacidad última por punta: es de 285 t (0.4 m) y de 394 t (0.5 m).

Frontera superior del estrato compresible: 0.0 m.

Frontera inferior del estrato compresible: 28.0 m.

Profundidad de apoyo de la punta del pilote: 36.5 m.

Longitud del pilote: 36.5 m.

Módulo de elasticidad del pilote: 1414213.6 t/m<sup>2</sup>.

Módulo de elasticidad y de Poisson del suelo cerca de la superficie, en una distancia de 10 veces el ancho del pilote: 400 t/m<sup>2</sup>, 0.3.

Módulo de elasticidad y de Poisson del suelo de apoyo de la punta del pilote: 6000 t/m<sup>2</sup>, 0.3.

Promedio del peso volumétrico sumergido del suelo: 0.4 t/m<sup>3</sup>.

Número de segmentos del pilote: 18.

Desplazamiento axial máximo supuesto: 0.1 m.

Movimiento supuesto de la punta del pilote: 0.009 m.

Tolerancia: 0.005.

De acuerdo a las consideraciones anteriores, se estimaron las siguientes capacidades de carga última por punta: para el pilote de 30 x 30 cm (ampliación a 40 cm) de 285 t y para el de 40 x 40 cm (ampliación a 50 cm) de 394 t. La capacidad de carga última, considerando la fricción negativa (FN) es de 303 t para el pilote de 30 cm, y de 418 para el de 40 cm de lado, con una fricción negativa del orden de 37 t y 50 t respectivamente. La Fig. 5.4 muestra la curva, carga sobre el pilote contra profundidad, en la que se puede observar la aportación de la fricción positiva (FP) de los estratos inferiores, presentando posteriormente una reducción por efecto de la fricción negativa, su valor se

TABLA 5.1

Prof (m)	Descripción	w %	Gs	$\gamma_m$ t/m <sup>3</sup>	N	$\sigma^*$	$\bar{\sigma}$ t/m <sup>2</sup>	Z* t/m <sup>2</sup>
0	Arcilla limosa con materia orgánica, arena y limo	80	2.2	1.23	10			5
3	Arcilla con intercalaciones de arena y materia orgánica	170	2.3	1.18	2		2.89	1.3
		350	2.4	1.15	2		5.43	1.3
9	Arena de compacidad media	40	2.5	1.75	20	32	3.88	2.9
11	Arcilla	350	2.4	1.15	2		5.38	1.3
								3.5
13.5	Arena de compacidad media con intercalación de arcilla	40	2.5	1.75	15	31	5.76	
16	Arcilla	260	2.25	1.18	2		7.63	1.3
					15			1.3
20.5	Arena de compacidad media con intercalación de limo y arcilla	50	2.5	1.67	26	53	8.44	6
		50	2.5	1.67	20	32	10.1	7.2
25	Arcilla	180	2.4	1.16	4		11.8	1.5
27.5	Arena muy compacta	30	2.5	1.8	>50	36	15.5	9
32	Arcilla limosa	120	2.4	1.23	6		16	5
34.5	Arena limosa	30	2.5	1.8	>50	36	17.6	13
40								17

\* Inferido a partir del número de golpes en la prueba de penetración estándar

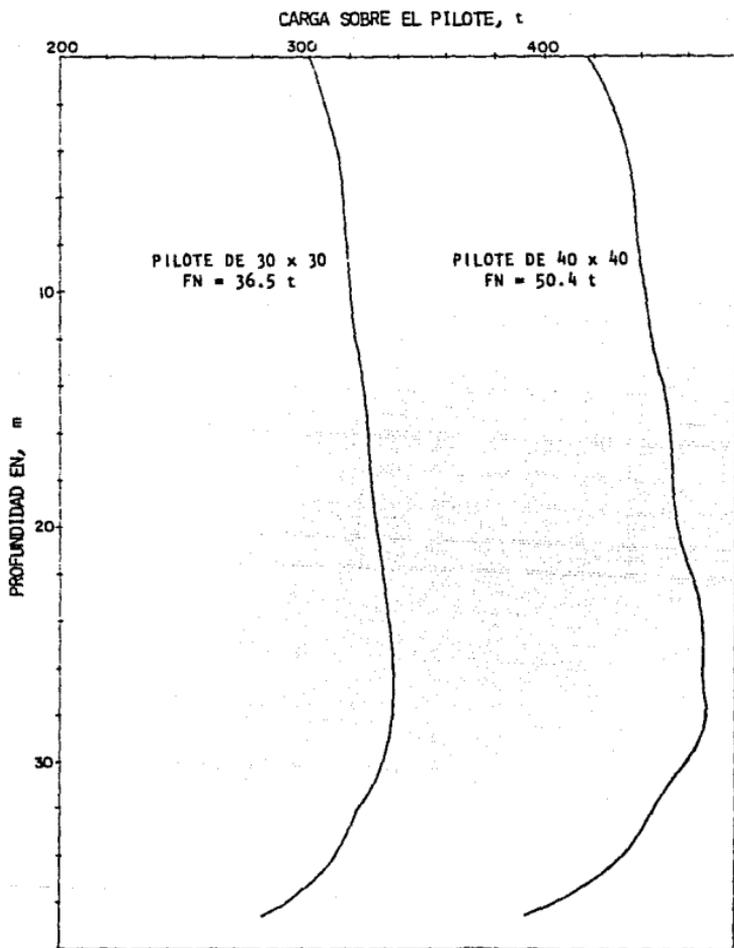


Fig. 5.4 Variación de la carga sobre los pilotes

estimó restando a la carga máxima sobre el pilote (28 m) la carga al nivel cero.

### Acciones sobre la cimentación

Como ya se indicó, la descarga debida a carga permanente es de 20.8 t/m<sup>2</sup>, lo que implica un peso total de 10254.8 t.

Con respecto a las condiciones bajo sismo, se considera que dadas las características de estructuración del edificio y su altura, es posible realizar un análisis sísmico estático simplificado del mismo. Como ya se indicó, las alas se encuentran comunicadas por un cuerpo de servicios, que es el acceso a los mismos (Fig. 5.2), el cual es muy difícil que permita el movimiento de la edificación como un todo, dada la gran diferencia de rigidez entre las alas y el cuerpo de servicios; por lo tanto, se realiza el análisis para una de las alas. Se considera un peso por piso de 249.56 t y la cimentación con 477 t. Las fuerzas sísmicas se obtienen utilizando la expresión 2.4 (capítulo 2), con un factor de comportamiento sísmico de  $Q = 4$  y un coeficiente sísmico de 0.24, para la zona de lago (RCDF-76).

Por lo tanto, las acciones externas sobre la cimentación se pueden resumir como sigue:

Fuerza cortante en la base de la estructura: 254.8 t  
Momento de volteo en la base: 8233.77 t-m

Aplicando las nuevas disposiciones establecidas por el RCDF-87, se tiene que el coeficiente sísmico para la Zona III es de 0.4 y el factor de comportamiento sísmico, por el tipo de estructura,  $Q = 3$ . Aplicando el método sísmico estático obtenemos los siguientes resultados.

Fuerza cortante en la base de la estructura: 566.2 t  
Momento de volteo en la base: 14346.0 t-m

Además, se analizan las condiciones que probablemente se presentaron durante el sismo del 19 de septiembre de 1985. Los movimientos del terreno en el sitio, probablemente fueron similares a los ocurridos en la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), por lo que el período de vibración del suelo debió ser aproximadamente  $T = 2.3$  s. Utilizando el espectro de aceleraciones de SCT con un 5% de amortiguamiento, se obtiene un coeficiente sísmico de 0.7, y considerando un factor de ductilidad de 4 se reduce a 0.17, (Ovando, et al, 1987). Para este coeficiente se estimó un momento de volteo de 19800 t-m, y para ésta condición se tienen las siguientes acciones:

Fuerza cortante en la base de la estructura: 802.4 t  
Momento de volteo en la base: 19800.0 t-m

Para conocer la magnitud de la carga vertical y horizontal a la que estarán sometidos los pilotes, se utiliza el programa ATRIPILE. Se efectuaron corridas de este programa en condiciones estáticas o permanentes, y permanentes más sismo.

Como el programa ATRIPILE requiere de la localización de cada uno de los pilotes que constituye la cimentación, y dado que ésta presenta dos ejes de simetría, el cuadrante considerado se muestra en la Fig. 5.5, y las coordenadas de cada uno de los pilotes en la Tabla 5.2. También en esta tabla se indica el tipo de sección correspondiente a cada pilote; además, dependiendo de la posición que guarden respecto a los ejes de simetría, corresponde el factor de aportación FA (capítulo 4).

TABLA 5.2

Pilote No.	Coor X m	Coor Y m	Alfa	Pend	Tipo	FA	AT m <sup>2</sup>
1	0	-1.05	0	0	2	2	4.95
2	0	-3.45	0	0	2	2	4.95
3	0	-5.4	0	0	2	2	4.95
4	0	-8.4	0	0	2	2	6.848
5	3.35	-9.6	0	0	1	1	1.615
6	3.35	-7.75	0	0	1	1	4.8
7	2.2	-5.4	0	0	2	1	7.26
8	2.2	-3.45	0	0	2	1	5.025
9	2.2	-2.15	0	0	1	1	4.06
10	2.2	-0.65	0	0	1	1	4.06
11	5.75	0	0	0	2	2	6.012
12	5.75	-2.5	0	0	2	1	7.353
13	4.7	-8.2	0	0	1	1	3.135
14	6.1	-8.95	0	0	1	1	0.765
15	6.1	-7.4	0	0	1	1	3.943
16	6.1	-4.45	0	0	2	1	5.696
17	7.8	-1.4	0	0	2	1	1.26
18	7.6	0	0	0	2	2	0.39

Las fuerzas actuantes para cada condición analizada se listan a continuación:

Condición I (carga permanente)  
Fuerza en Z 4720.0 t.

Condición II (carga permanente + sismo RCDF-76)  
Fuerza en X 254.78 t.  
Fuerza en Y -254.78 t.  
Fuerza en Z 4720.0 t.  
Momento alrededor del eje X -8233.77 t-m.  
Momento alrededor del eje Y -8233.77 t-m.  
Momento alrededor del eje Z 0

Condición III (carga permanente + sismo RCDF-87)		
Fuerza en X	566.2	t.
Fuerza en Y	-566.2	t.
Fuerza en Z	4720.0	t.
Momento alrededor del eje X	-14346.0	t-m.
Momento alrededor del eje Y	-14346.0	t-m.
Momento alrededor del eje Z	0	

Condición IV (carga permanente + sismo SCT-85)		
Fuerza en X	802.4	t.
Fuerza en Y	-802.4	t.
Fuerza en Z	4720.0	t.
Momento alrededor del eje X	-19800.0	t-m.
Momento alrededor del eje Y	-19800.0	t-m.
Momento alrededor del eje Z	0	

Los signos de las fuerzas y momentos actuantes están de acuerdo a la Fig. 4.2 y a la 5.5, de tal manera que se presente la condición de compresión sobre el cuadrante considerado.

De acuerdo al inciso 4.2.6 y según el perfil estratigráfico, la resistencia al corte del suelo a una profundidad de  $B/2$ , 7 m, es de  $1.25 \text{ t/m}^2$  (Tabla 5.1).

### Resultados

Para la condición I, en la Fig. 5.5 se presenta la magnitud de la carga axial en la cabeza, correspondiente a cada pilote y de acuerdo a las dimensiones del mismo.

Como lo especifica el RCDF-76, se realizó el análisis en ambos sentidos, considerando el 30% de las cargas del sentido perpendicular al estudiado; los incrementos de carga axial sobre cada pilote se muestran en la Fig. 5.6

El RCDF-87 establece la obligación de realizar los análisis en ambos sentidos, considerando el 30% de las cargas del sentido perpendicular al estudiado, en la Fig. 5.7 se indican los incrementos de carga axial sobre cada uno de los pilotes.

La Fig. 5.8 muestra los incrementos de carga axial sobre cada pilote, para las condiciones que probablemente se presentaron durante el sismo del 19 de septiembre de 1985.

En la tabla siguiente se hace una recopilación de los resultados obtenidos, la cual facilita la comparación entre todas las condiciones. El pilote de 30 cm considerado para la comparación es el 14 y el de 40 cm es el 4, encerrados por un círculo en la Fig. 5.9.

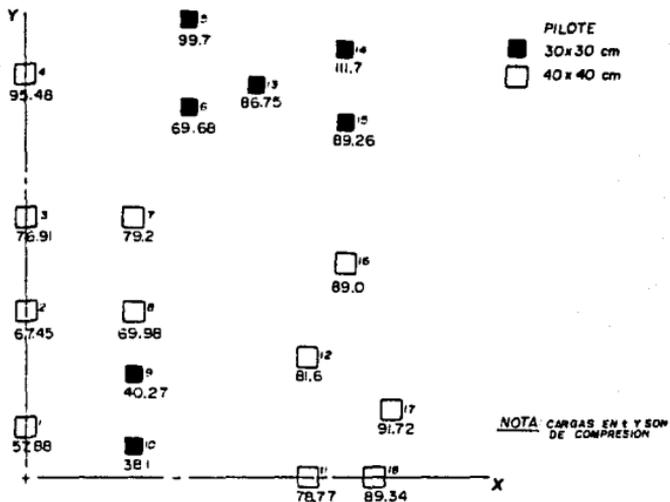


Fig. 5.5 Cargas estáticas sobre los pilotos

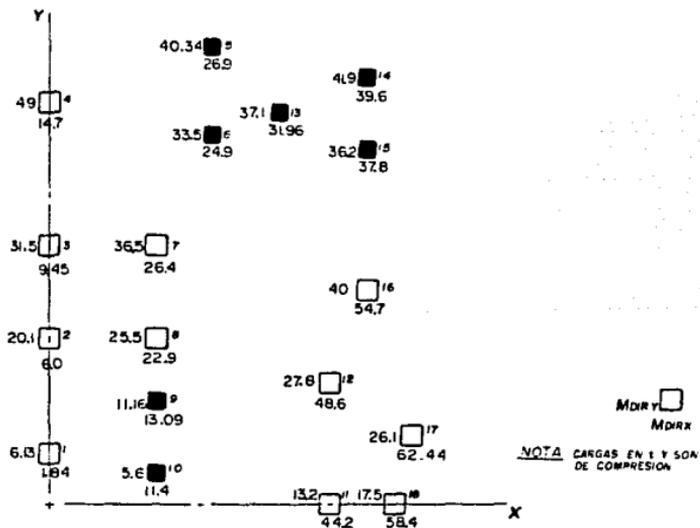


Fig. 5.6 Incremento de carga sobre los pilotos según el RCDF-76

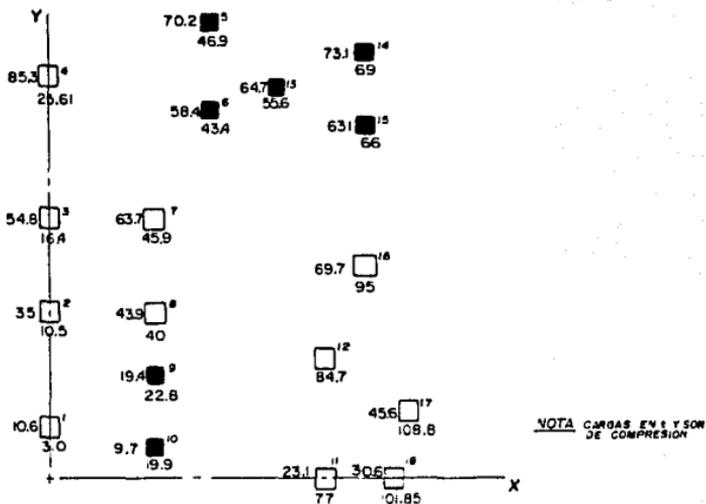


Fig. 5.7 Incremento de carga sobre los pilotos según el RCDF-87

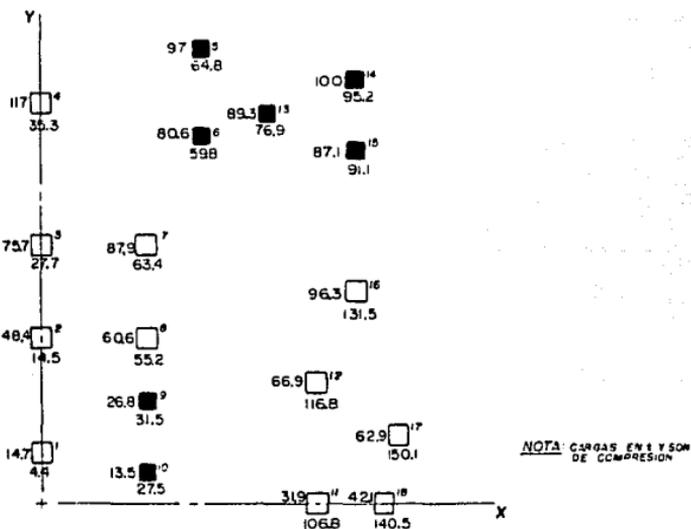


Fig. 5.8 Incremento de carga sobre los pilotos según el registro del sismo de 1955-SCT

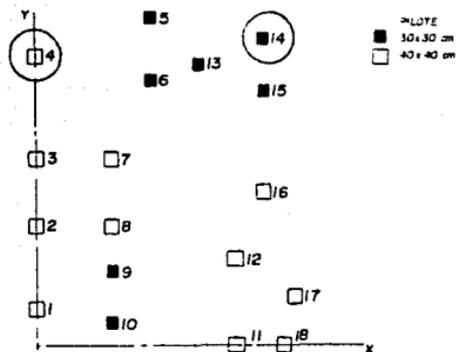


Fig. 5.9 Planta de la cimentación

TABLA 5.3

CARGA SOBRE LA CABEZA DEL PILOTE, t

Condición	Pilote	Sin FN			Con FN		
		Carga	FS	%	Carga	FS	%
Estática	30 cm	117.7	3.0	0	148.2	2.2	0
	40 cm	95.5	4.8	0	145.9	3.2	0
RDCF-76	30 cm	153.7	2.2	37	190.2	1.78	23
	40 cm	144.5	3.2	51	194.9	2.4	33
RDCF-87	30 cm	184.8	1.8	65	221.3	1.53	49
	40 cm	180.4	2.5	89	231.2	2.0	58
SCT-85	30 cm	211.7	1.6	89	248.2	1.37	67
	40 cm	212.5	2.2	122	262.9	1.79	122

NOTA: % se refiere al incremento de carga respecto a la carga en condiciones estáticas.

Como de puede observar en la Tabla 5.3, para todas las condiciones analizadas el pilote más cargado y que tiene el FS más bajo es el de 30 cm, (No. 14).

De la Fig. 5.5 se ve que un diseño basado en consideraciones tales como: presión uniforme sobre la cimentación, considerar únicamente las acciones estáticas y áreas tributarias; así como, el no tomar en cuenta los efectos que produce la rigidez de la losa o cajón y las acciones sísmicas y que son: concentración de esfuerzos en los bordes de la ci-

mentación, siendo las zonas más críticas las esquinas; conduce a colocar los pilotes más esbeltos, como en este ejemplo, en las esquinas, precisamente donde se presenta la mayor concentración de esfuerzos tanto en condiciones estáticas como bajo sismo.

Es importante indicar que los desplazamientos calculados son de tipo elástico; además la deformación axial inducida por la acción del sismo es instantánea, desapareciendo esta tan pronto como cesa la acción; sin embargo, debido a que el suelo no tiene un comportamiento elástico, al término de la acción cíclica se tiene una deformación residual.

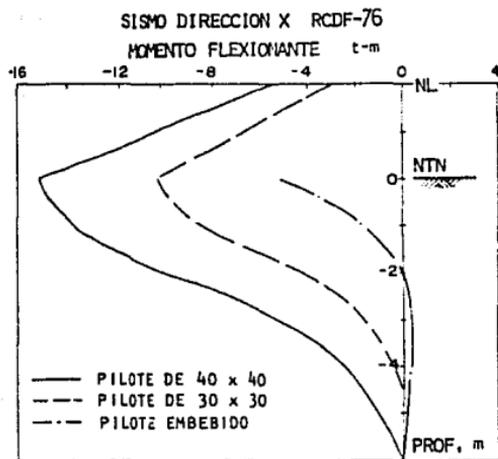
Como ya se indicó en el capítulo IV, una de las ventajas del programa ATRIPILE es la determinación del momento de empotramiento en la cabeza del pilote, así como su distribución a lo largo del mismo. En la Fig. 5.10, se muestra la distribución del momento flexionante a lo largo de la longitud crítica del pilote. Los valores obtenidos del momento en cada pilote corresponden a la condición en la que el pilote se encuentra completamente embebido en el suelo. Para tomar en cuenta la longitud del pilote fuera del terreno (2 m), se considera que los valores de los momentos calculados en el programa, se encuentran aplicados en la unión losa-pilote, y al nivel del terreno natural (NTN) el momento flexionante se ve incrementado, en una cantidad igual a el producto de la carga horizontal por la distancia entre NTN y la losa; la longitud crítica es igual a la calculada para la condición de pilote completamente embebido. En la tabla siguiente se resumen los momentos de empotramiento calculados para las diferentes condiciones:

TABLA 5.4

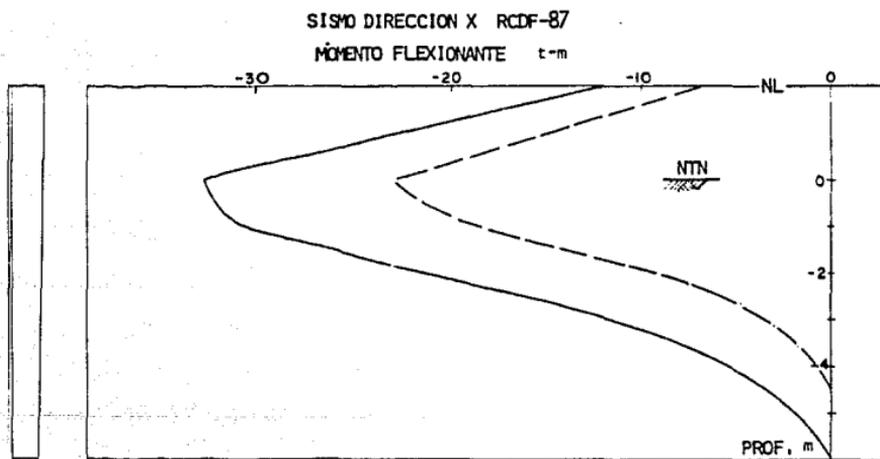
Condición	Sección	Momento alrededor eje X, t-m		Momento alrededor eje Y, t-m	
		NL	NTN	NL	NTN
RCDF-76	1	0.89	3.05	-3.04	-10.26
	2	1.60	4.48	-3.39	-15.01
RCDF-87	1	2.0	6.8	-5.73	-22.77
	2	3.57	9.97	-11.95	-33.33
SCT-85	1	2.83	9.63	-3.52	-32.24
	2	5.06	14.14	-16.91	-47.19

donde

- NL nivel losa de cimentación
- NTN nivel terreno natural
- 1 sección cuadrada de 30 x 30 cm
- 2 sección cuadrada de 40 x 40 cm



(a)



(b)

Fig. 5.10 Disipación del momento flexionante

SISMO DIRECCION X SCT-85

MOMENTO FLEXIONANTE t-m

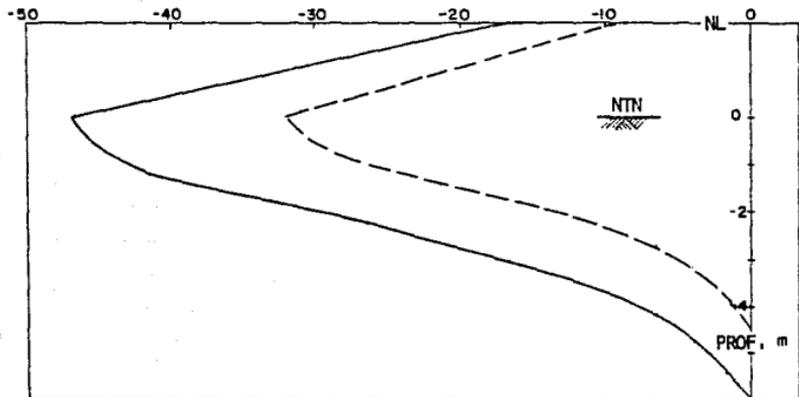


Fig. 5.10c

Debido a que la losa y contratraves de cimentación se encuentran arriba de la superficie del terreno (Fig. 5.3), eso ocasiona que al presentarse un sismo, todo el cortante horizontal, así como el momento de volteo sísmico sea tomado por los pilotes, concentrándose los esfuerzos en la unión pilote-contratrabe. Debido al cambio brusco de las condiciones de apoyo lateral de los pilotes, se presenta un incremento del momento flexionante en esa zona (NTN), del orden de tres veces la condición confinada, Fig. 5.10(a), lo que lleva a la ocurrencia incluso de daños estructurales en los mismos. En ésta figura se puede apreciar la gran diferencia que se presenta entre ambas condiciones, lo que pone de manifiesto la ventaja de que el pilote esté completamente embebido en el suelo, permitiendo una disipación más efectiva de los esfuerzos. Finalmente, debido a la disposición de los pilotes de menor sección en las orillas, estos sufren un incremento de carga de más del 100% de la sollicitación estática en las condiciones del sismo de 1985; sin embargo, no penetraron los pilotes pero sí sufrieron daños estructurales. Los incrementos de carga para las diferentes condiciones se observan claramente en la Fig. 5.11.

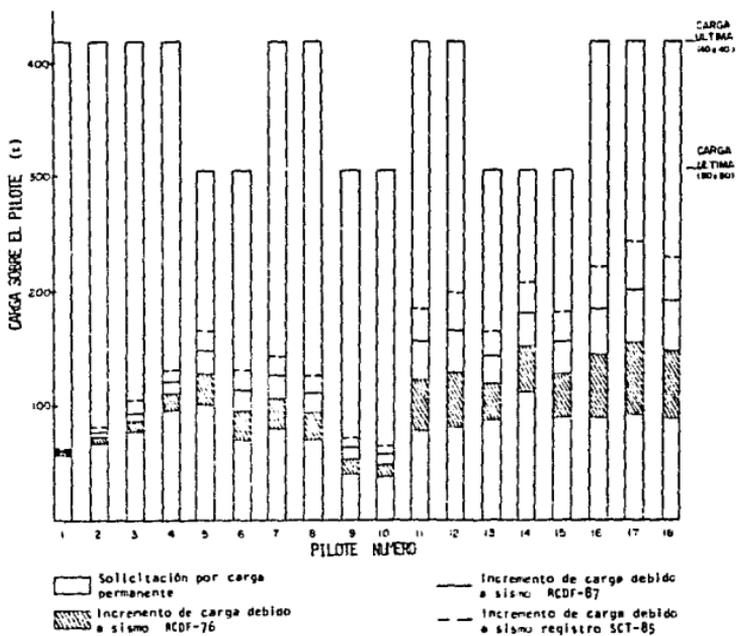


Fig. 5.11 Incrementos de carga sobre los pilotes

## 5.2 EJEMPLO 2 (APOYO DE UN PUNTE)

### 5.2.1 Descripción del predio y proyecto

El elemento estructural que se ejemplifica, forma parte de una serie de apoyos de un puente que se localiza al Sur-oriente de la ciudad. Por su ubicación, se encuentra en la Zona III o zona de lago, según el RCDF-87.

Las trabes del puente son simplemente apoyadas por lo que en el cabedal del apoyo del mismo, no se provocan momentos estáticos. Se clasifica como estructura del tipo I y del grupo A. El peso total de la estructura es de 1007.66 t.

### 5.2.2 Estratigrafía y propiedades ingenieriles

En la Fig. 5.12, se muestra el perfil estratigráfico del sitio. A grandes rasgos, la estratigrafía es como sigue: hasta 2.0 m se tiene la costra superficial constituida por rellenos. De 2.0 a 8.0 m, arena limosa, con un contenido de agua promedio de 100%, relación de vacíos de 3 y densidad de sólidos de 2.4. Entre los 8.0 y 37 m, se presenta arcilla de alta compresibilidad, consistencia blanda, color entre café y gris verdoso, contenido de agua variable entre 150 y 250%, y una relación de vacíos promedio de 6 y densidad de sólidos de 2.43; tiene intercalaciones de lentes de limo arenoso y arena limosa. El nivel de aguas freáticas se localiza a una profundidad de 3.25 m.

El perfil simplificado, así como los parámetros tales como resistencia al corte, peso volumétrico de la muestra, relación de vacíos, etc., se muestran en la Tabla 5.5.

### 5.2.3 Análisis de la cimentación

La cimentación consta de una losa de 10.0 x 7.0 m y espesor de 1.2 m desplantada a 1.6 m de profundidad, en la cual se encuentran empotrados 36 pilotes de fricción, con una sección cuadrada de 30 cm de lado, y una longitud de 27 m. La Fig. 5.13 muestra la planta y corte esquemático de la estructura.

#### Capacidad de carga

La capacidad de carga máxima de un pilote de fricción, se estimó utilizando el programa TRANSCARG. En este caso, se considera como curva nominal CT/RC vs Deformación, la mostrada en la Fig. 3.30, y la resistencia al corte del suelo, a diferentes profundidades, está de acuerdo a los resultados de pruebas triaxiales UU realizadas en muestras extraídas en el sitio y que se muestran en la Fig. 5.12. Cabe señalar que

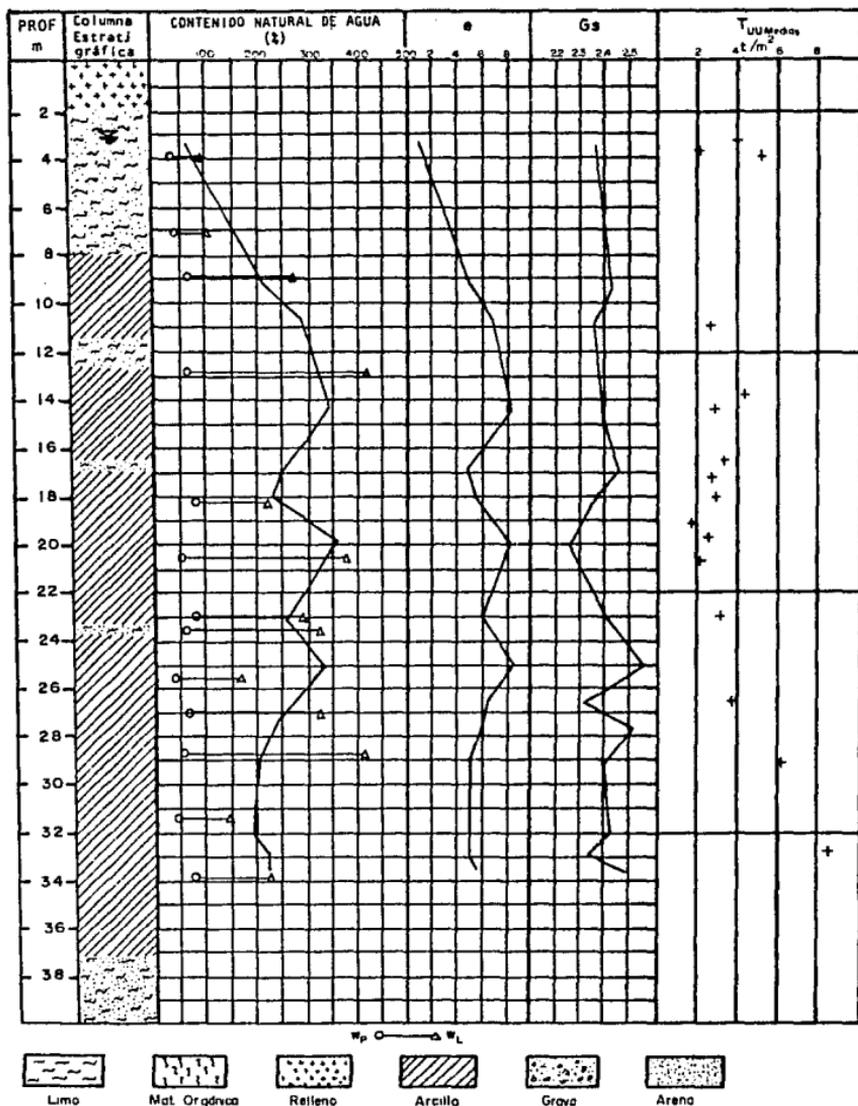


Fig. 5.12 Perfil del subsuelo del ejemplo 2

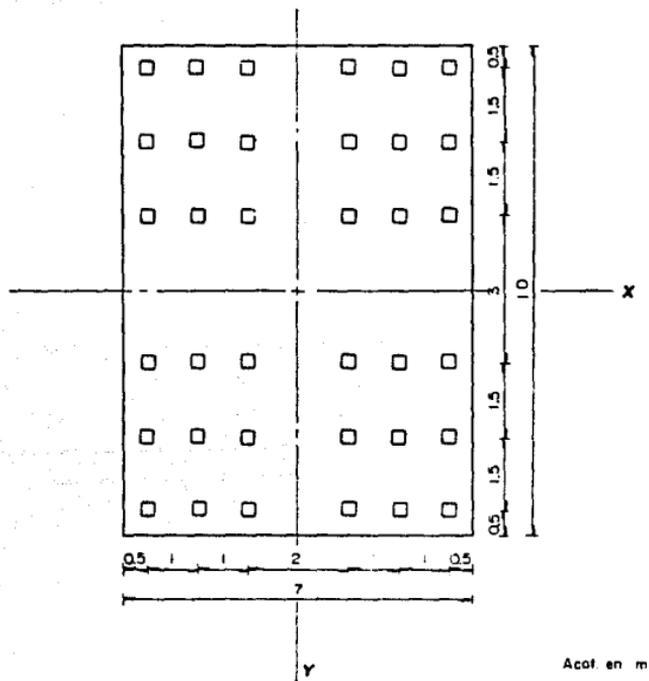


Fig. 5.13(a) Planta de cimentación del ejemplo 2

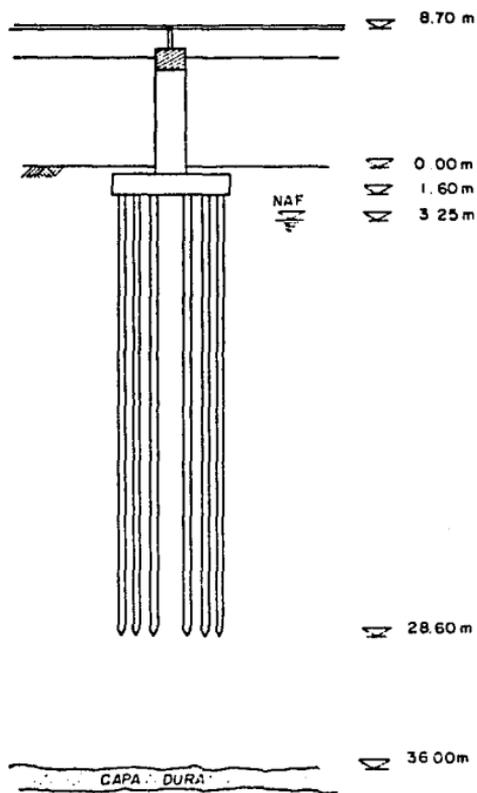


Fig. 5.13(b) Corte esquemático de la cimentación del ejemplo 2

se genera fricción negativa sobre los pilotes, lo que ocasionaría una disminución de su capacidad de carga; ello se estima en el mismo programa, obteniéndose finalmente la capacidad de carga útil del pilote. La profundidad del nivel neutro, punto donde el desplazamiento relativo pilote-suelo es nulo, se obtuvo por medio de una condición de equilibrio, resultando a una profundidad de 11.1 m, respecto al nivel del terreno natural.

Los datos del sitio, así como los del pilote, requeridos por el programa TRANSCARG, se listan a continuación:

Lado del pilote: 0.3 m, sección cuadrada, todos los pilotes tienen la misma dimensión.

Las profundidades siguientes toman como referencia el nivel de contacto losa-suelo. Como la frontera inferior del estrato compresible cruza por la parte media uno de los segmentos en los que se dividen los pilotes, dicha profundidad se ajusta a la parte inferior del segmento cruzado.

Frontera superior del estrato compresible: 0.0 m.  
Frontera inferior del estrato compresible: 10.5 m.  
Profundidad de apoyo de la punta del pilote: 27.0 m.  
Longitud del pilote: 27.0 m.  
Módulo de elasticidad del pilote: 1414213.6 t/m<sup>2</sup>.  
Módulo de elasticidad y de Poisson del suelo en la superficie, en una distancia de 10 veces el ancho del pilote: 400 t/m<sup>2</sup>, 0.3.  
Módulo de elasticidad y de Poisson del suelo de apoyo de la punta del pilote: 600 t/m<sup>2</sup>, 0.3.  
Promedio del peso volumétrico sumergido del suelo: 0.28t/m<sup>3</sup>.  
Número de segmentos en que se divide cada pilote: 18.  
Desplazamiento axial máximo supuesto: 0.1 m.  
Movimiento supuesto de la punta del pilote: 0.015 m.  
Tolerancia: 0.005.

Como la resistencia al corte del suelo a las diferentes profundidades no se calculan en el programa, éstas se proporcionan como el promedio de aquellas que se tienen en la longitud de cada segmento (1.5 m), Tabla 5.5. La posible presencia de fricción negativa se considera de la misma manera que en el ejemplo 1.

De acuerdo a las anteriores consideraciones, se estimó una capacidad de carga por punta de 4.4 t, por fricción positiva de 70.2 t, y carga por fricción negativa del orden de 20.54 t; por lo tanto, la capacidad de carga última es de 49.66 t. La Fig. 5.14, muestra la variación de la carga sobre el pilote con la profundidad, en la que se puede observar claramente la influencia de la FN y de la FP simultáneamente; también se muestra la condición en la que únicamente se desarrolla fricción positiva, estimando una capaci-

TABLA 5.5

Prof (m)	Clasificación SUCS	w %	e	G <sub>s</sub>	c t/m <sup>2</sup>	T <sub>x</sub> t/m <sup>2</sup>
0						
	Relleno	16.4				
3.25						
	Arena limosa SM	66.9	3	2.4	2.0	4.1
8.05						
	Arcilla CH	220	6	2.4	5.6	2.9
11.5						
	Arena limosa SM	26.9				
12.4						
	Arcilla CH	270	7	2.4	3.5	3.6
16.65						
	SM	44.7				
	Arcilla CH	300	7		4.2	2.2
23.25						
	SM	79.1				
	Arcilla CH	250	5	2.4	7.9	5.0
		210	5	2.4	12.3	8.3
37						
	Capa dura					

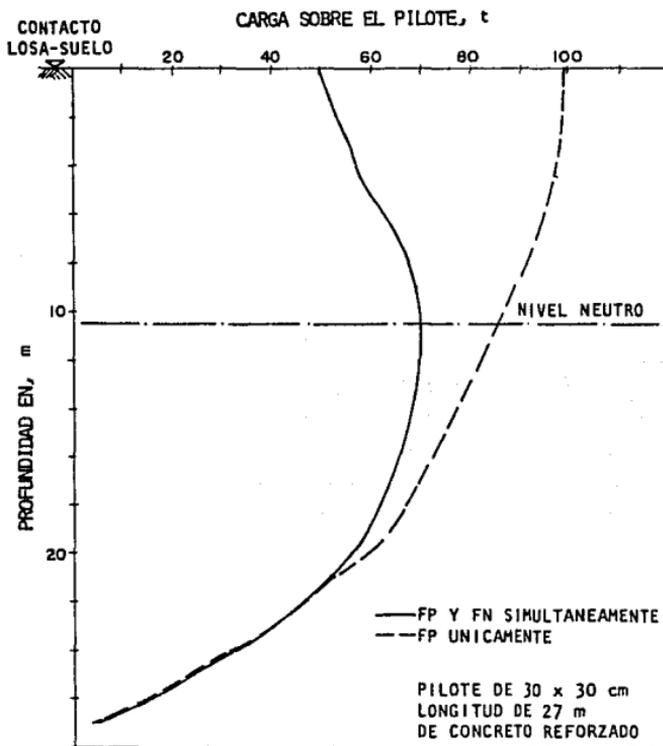


Fig. 5.14 Variación de la carga sobre el pilote

dad de carga última de 99.3 t. Se anexa el listado de la corrida.

### Acciones sobre la cimentación

La descarga a nivel de la losa de cimentación, debida a carga muerta más viva es de 1007.66 t, lo que implica una presión de 14.40 t/m<sup>2</sup>.

Con lo que respecta a las acciones bajo sismo, el análisis para obtener las fuerzas sísmicas se realizó considerando el RCDF-87, y dada la importancia de la estructura, el coeficiente sísmico para la zona de lago,  $c = 0.4$ , se incrementó en un 50%; además, el factor de comportamiento sísmico considerado es de 4, los resultados obtenidos fueron:

Momento de volteo, alrededor del eje X:	1056.2 t-m.
Momento de volteo, alrededor del eje Y:	1099.2 t-m.
Fuerza cortante en la base, sentido X:	158.16 t.
Fuerza cortante en la base, sentido Y:	151.97 t.

Con objeto de conocer la magnitud de las cargas actuantes sobre los pilotes, se utiliza el programa ATRIPILE. Se efectuaron tres corridas de este programa en condiciones estáticas, estática más sismo en X y estática más sismo en Y; para éstas dos últimas se consideró además el 50% de las acciones en el sentido perpendicular a ellas.

La cimentación presenta dos ejes de simetría, por lo que las coordenadas de los pilotes sólo se proporcionan en un cuadrante (Tabla 5.6)

TABLA 5.6

Pilote No.	Coor X m	Coor Y m	Alfa	Pend	Tipo	FA	AT m <sup>2</sup>
1	1	1.5	0	0	1	1	3.375
2	2	2.5	0	0	1	1	2.25
3	3	1.5	0	0	1	1	2.25
4	1	3	0	0	1	1	2.25
5	2	3	0	0	1	1	1.5
6	3	3	0	0	1	1	1.5
7	1	4.5	0	0	1	1	1.875
8	2	4.5	0	0	1	1	1.25
9	3	4.5	0	0	1	1	1.25

Las fuerzas consideradas para cada condición analizada se listan a continuación:

Condición I (carga permanente)  
Fuerza en Z 1007.66 t.

Condición II (carga permanente + sismo RCDF-87 en X)

Fuerza $\infty$ en X	158.6 t.
Fuerza $\infty$ en Y	75.98 t.
Fuerza $\infty$ en Z	1007.66 t.
Momento $\infty$ alrededor del eje X	528.1 t-m.
Momento $\infty$ alrededor del eje Y	-1099.2 t-m.
Momento $\infty$ alrededor del eje Z	0

Condición III (carga permanente + sismo RCDF-87 en Y)

Fuerza $\infty$ en X	79.08 t.
Fuerza $\infty$ en Y	151.9 t.
Fuerza $\infty$ en Z	1007.66 t.
Momento $\infty$ alrededor del eje X	1056.2 t-m.
Momento $\infty$ alrededor del eje Y	-549.6 t-m.
Momento $\infty$ alrededor del eje Z	0

## Resultados

### Condición I

Debido a las dimensiones de la losa de cimentación, se puede considerar rígida, lo que induce iguales desplazamientos en todos los puntos, pero diferente carga en cada uno de ellos, y esto se puede observar en la Fig. 5.15; los pilotes más cargados son los colocados cerca de la esquina, el 8 y 9, no excediendo la capacidad de carga máxima del pilote. Bajo condición estática, se tiene la influencia de la fricción negativa, lo que ocasiona que el FS promedio sea de 2.0. La deformación elástica calculada, de acuerdo con las cargas indicadas es de 1.5 cm, pero a ésta se tiene que sumar la que sufra a largo plazo por consolidación del suelo.

### Condición II

En el análisis efectuado consideró el 100% de las acciones sobre el I-I eje X (momento alrededor del eje Y), más el 50% de las acciones sobre el eje Y, junto con las cargas permanentes, en la Fig. 5.16 se muestran las cargas en cada uno de ellos. El incremento de carga calculado, debido a la acción sísmica, varía desde 8.6 t en el pilote 1, hasta 25.9 t en el pilote más alejado, lo que representa el 55 y 60% de la carga estática respectivamente.

La capacidad de carga máxima del pilote, será de 70 t, ya que bajo condiciones dinámicas parece ser que la fricción negativa desaparece, debido a los desplazamientos relativos pilote-suelo; por lo tanto, se considera que la capacidad de carga del pilote, es debida únicamente a la fricción positiva que se genera, Fig. 5.14. Lo anterior lleva a un FS para los pilotes 1 y 9 de 2.8 y 1.06 respectivamente, lo que indica que éste último se encuentra cerca de la carga máxima última. Los desplazamientos mínimo y máximo calculados son de 2 cm, en el pilote 1, y de 3 cm en el 9.

### Condición III

En la Fig. 5.17, se pueden apreciar las cargas sobre cada uno de los pilotes, debidas al considerar el 100% del momento alrededor del eje X, y el 50% en el otro eje. En este caso, el mínimo y máximo incremento de carga, debido al sismo son de 7.4 t y 22.4 t respectivamente. Estos incrementos, tanto los de la Condición II y ésta, no son capaces de ocasionar que los pilotes se vean sujetos a tensión. De igual manera que en la condición anterior la carga máxima sobre el pilote es de 70 t, lo que implica la variación del factor de seguridad desde 3.0 hasta 1.07 en el pilote 9; los pilotes más cargados, como es de esperarse, son los de las esquinas. La variación de los desplazamientos verticales es desde 2.0 cm en el 1, hasta 3.0 cm en el pilote 9.

Finalmente, los momentos de empotramiento de la cabeza de los pilotes, calculados en el programa ATRIPILE, se muestran en la siguiente tabla:

TABLA 5.7

Condición	Momento alrededor eje X, t-m	Momento alrededor eje Y, t-m
II	1.19	6.45
III	2.4	3.22

La disipación del momento flexionante, en la longitud crítica, se muestra en la Fig. 5.18.

Es importante aclarar, que los desplazamientos aquí calculados, corresponden a una condición elástica y que los inducidos por un sismo no desaparecen del todo; es decir, se tienen deformaciones residuales después de que éste ha cesado. Además, debido a la transferencia de carga que llevan acabo los pilotes al suelo, los esfuerzos efectivos se verán incrementados, y consecuentemente la estructura sufrirá asentamientos a largo plazo, por el efecto de la consolidación del suelo. Para el caso, se estimaron los asentamientos de ésta estructura, utilizando un programa desarrollado por el Dr. G. Auvinet del Instituto de Ingeniería. Este programa utiliza las ecuaciones de Mindlin para calcular los esfuerzos en la masa del suelo, producidos por cargas repartidas en áreas rectangulares a diferentes profundidades o en la superficie. Considera que el subsuelo está constituido por varias capas con curvas odométricas distintas. El asentamiento estimado para el centro de la cimentación fue de 0.06

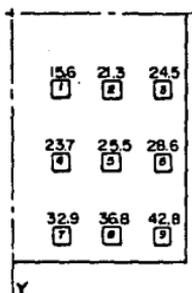


Fig. 5.15 Cargas estáticas sobre los pilotes

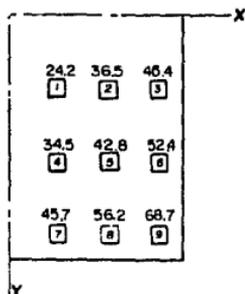
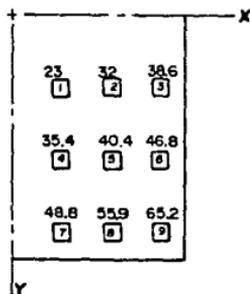


Fig. 5.16 Condición estática más sismo en sentido X



NOTA: CARGAS EN TON  
DE COMPRESION

Fig. 5.17 Condición estática más sismo en sentido Y

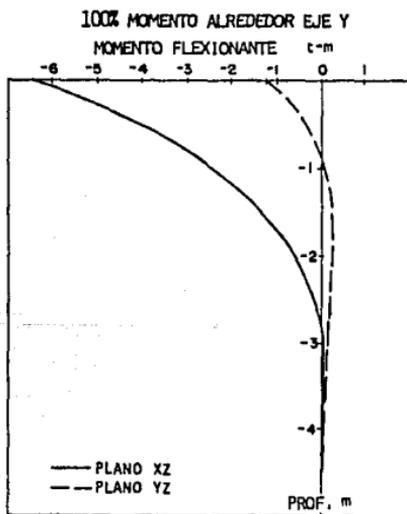
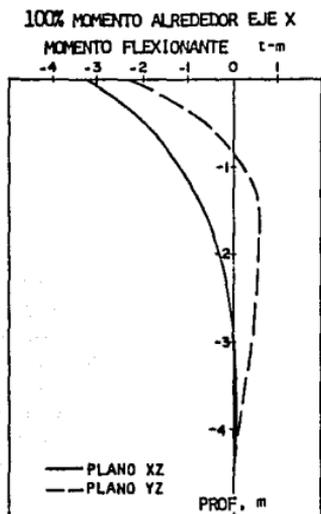


Fig. 5.18 Disipación del momento flexionante

m, en el caso en que se supuso cargas sobre los rectángulos, de acuerdo a la transferencia de carga del pilote (Fig. 5.14), distribuidos únicamente en la longitud de FP y bajo las hipótesis siguientes: a) la transferencia de carga pilote-suelo del conjunto de pilotes es igual a la estimada para uno sólo, b) la forma de la curva de distribución de carga sobre el pilote, bajo condiciones de trabajo, es igual a la que se obtiene en condiciones últimas. Para la suposición de transferencia de carga uniforme a lo largo de la longitud de FP, este asentamiento alcanza 0.35 m.

Por lo expuesto en este párrafo, es importante recalcar que en la medida en que se conozca mejor la distribución de carga entre losa-pilotes, pilotes-suelo, en presencia de fricción negativa y positiva, así como estática y dinámicamente, se podrá comprender mejor el comportamiento de estas cimentaciones y consecuentemente hacer estimaciones más razonables acerca de sus movimientos respecto al suelo.

EJEMPLO 2

JRUN

```
*****  
*  
*   PROGRAMA QUE REALIZA   *  
*  
*     EL CALCULO DE LA    *  
*  
*   CARGA AXIAL MAXIMA    *  
*  
*     DE UN                *  
*  
*     PILOTE              *  
*  
*****
```

SON PILOTES DE FRICCION (S/N)? S  
SE GENERARA FRICCION NEGATIVA (S/N)? S

\*\*\* PILOTE DE FRICCION \*\*\*  
-----

LAS CARACTERISTICAS GEOMETRICAS DE LA SECCION TRANSVERSAL DEL PILOTE  
SON PROPORCIONADAS COMO UN PAQUETE DE DATOS (S/N) ?N

CUANTOS PILOTES DE SECCION DIFERENTE SE ANALIZARAN ?1

EL PILOTE ES DE SECCION CUADRADA (CUA) O DE SECCION CIRCULAR (CIR) ?CUA

LADO DEL PILOTE B= 0.3

DIAMETRO O ANCHO DEL PILOTE= .3 m

PERIMETRO= 1.2 m

AREA= .09 m2

MOMENTO DE INERCIA= 6.75000001E-04 m4

QUIERE DAR LAS CARACTERISTICAS MECANICAS DEL PILOTE Y SUELO (S/N) ?S

FRONTERA SUPERIOR DEL ESTRATO COMPRESIBLE (m) ?0.0

FRONTERA INFERIOR DEL ESTRATO COMPRESIBLE (m) ?10.5

PROFUNDIDAD A LA QUE SE APOYA LA PUNTA DEL PILOTE (m) ?27.0

LONGITUD DEL PILOTE (m) ?27.0

MODULO DE ELASTICIDAD DEL PILOTE (t/m2) ?1414213.6

MODULO DE ELASTICIDAD (t/m2) Y DE POISSON DEL SUELO, EN UN TRAMO DE 10d,  
EN LA PARTE SUPERIOR DEL PILOTE ?400,0.3

MODULO DE ELASTICIDAD Y DE POISSON DEL SUELO DE APOYO DE LA PUNTA  
DEL PILOTE ?600,0.3  
PESO VOLUMETRICO SUMERGIDO PROMEDIO DEL SUELO (t/m3) ?0.28  
NUMERO DE SEGMENTOS DEL PILOTE ?18  
DESPLAZAMIENTO AXIAL MAXIMO SUPUESTO (m) ?0.1  
MOVIMIENTO SUPUESTO DE LA PUNTA DEL PILOTE (m) ?0.015  
TOLERANCIA ?0.002

SE CALCULA LA RESISTENCIA AL CORTE EN EL PROGRAMA (S) O SE DESEA DAR  
LOS VALORES DE LA MISMA (N) ?N

EL VALOR DE LA RESISTENCIA SE DARA EN t/m2. SE TRATA DE UN PROMEDIO EN  
LA LONGITUD DE CADA SEGMENTO

PROFUNDIDAD= 26.25  
RESISTENCIA AL CORTE RE= 8

PROFUNDIDAD= 24.75  
RESISTENCIA AL CORTE RE= 6

PROFUNDIDAD= 23.25  
RESISTENCIA AL CORTE RE= 6

PROFUNDIDAD= 21.75  
RESISTENCIA AL CORTE RE= 5

PROFUNDIDAD= 20.25  
RESISTENCIA AL CORTE RE= 5

PROFUNDIDAD= 18.75  
RESISTENCIA AL CORTE RE= 3

PROFUNDIDAD= 17.25  
RESISTENCIA AL CORTE RE= 3

PROFUNDIDAD= 15.75  
RESISTENCIA AL CORTE RE= 3

PROFUNDIDAD= 14.25  
RESISTENCIA AL CORTE RE= 3

PROFUNDIDAD= 12.75  
RESISTENCIA AL CORTE RE= 3

PROFUNDIDAD= 11.25  
RESISTENCIA AL CORTE RE= 3

PROFUNDIDAD= 9.75  
RESISTENCIA AL CORTE RE= -4

PROFUNDIDAD= 8.25  
RESISTENCIA AL CORTE RE= -5

PROFUNDIDAD= 6.75  
RESISTENCIA AL CORTE RE= -5

PROFUNDIDAD= 5.25  
RESISTENCIA AL CORTE RE= -5

PROFUNDIDAD= 3.75  
RESISTENCIA AL CORTE RE= -2

PROFUNDIDAD= 2.25  
RESISTENCIA AL CORTE RE= -2

PROFUNDIDAD= .75  
RESISTENCIA AL CORTE RE= -2

VALOR MAXIMO DEL FACTOR DE GANANCIA DE RESISTENCIA ?1.1

Nombre del archivo que contiene la curva CT/RC vs DEF ?CURVA NOMINAL

\*\*\*\*\*

SEG

No	CARG TRANSF t	CARG AXIAL t	MOVIMIENTO m	RESIS PUNTA t
18	15.84	20.26	.0191	4.42
17	11.88	32.14	.0194	4.41
16	11.3	43.44	.0198	4.41
15	7.86	51.3	.0204	4.41
14	6.68	57.98	.0211	4.41
13	3.42	61.4	.0218	4.41
12	2.99	64.39	.0225	4.41
11	2.41	66.8	.0233	4.41
10	1.71	68.51	.0241	4.41
9	1.12	69.63	.0249	4.41
8	.57	70.2	.0257	4.41
7	-1.08	69.12	.0265	4.41
6	-2.73	66.39	.0273	4.41
5	-4.08	62.31	.0281	4.41
4	-4.83	57.48	.0288	4.41
3	-2.29	55.19	.0295	4.41

2	-2.84	52.35	.0301	4.41
1	-2.69	49.66	.0307	4.41

\*\*\*\*\*

\*\*\*\*\*  
 \*\*\*\* LA CARGA AXIAL MAXIMA SOBRE EL PILOTE ES: 49.66 t \*\*\*\*  
 \*\*\*\* EL DESPLAZAMIENTO AXIAL MAXIMO DE LA CABEZA ES: .0307 m \*\*\*\*  
 \*\*\*\*\*

\*\*\* Desplazamiento axial minimo .01 m  
 Corresponde al acortamiento elastico del pilote, analizado por segmentos.

\*\*\* Desplazamiento axial maximo supuesto .1 m

EL VALOR DEL COEFICIENTE DE REACCION LATERAL (Vesic) ES: 1185.954 t/m<sup>3</sup>

CONSTANTES DE LA CIMENTACION, n Y t

Nmin= 1617.58958 t/m  
 Nmax= 4230.83858 t/m  
 T= 321.981968 t/m

QUIERE GRABAR EL ARCHIVO (S/N) S

NOMBRE DEL ARCHIVO ?PUENTE CARGA

PONGA UN DISKETTE EN EL DRIVE 1 Y TECLE RETURN

\*\*\*\*\*

SEGM	PROF		
No	MED	RES CORTE	ESF VERT
	m	t/m <sup>2</sup>	t/m <sup>2</sup>
1	.75	-2	.21
2	2.25	-2	.63
3	3.75	-2	1.05
4	5.25	-5	1.47
5	6.75	-5	1.89
6	8.25	-5	2.31

7	9.75	-4	2.73
8	11.25	3	3.15
9	12.75	3	3.57
10	14.25	3	3.99
11	15.75	3	4.41
12	17.25	3	4.83
13	18.75	3	5.25
14	20.25	5	5.66
15	21.75	5	6.08
16	23.25	6	6.5
17	24.75	6	6.93
18	26.25	8	7.35

\*\*\*\*\*

JPR#0



AREA DE LA CIMENTACION (m<sup>2</sup>) 70  
 RESISTENCIA AL CORTE DEL SUELO A UNA PROFUNDIDAD DE B/2, A PARTIR DEL  
 NIVEL DE DESPLANTE (t/m<sup>2</sup>) 4.5  
 PROFUNDIDAD DE DESPLANTE DEL CAJON O LOSA DE CIMENTACION (m) Y PESO  
 VOLUMETRICO DEL SUELO DESALOJADO (t/m<sup>3</sup>) 1.6, 1.3

\*\*\*\* FUERZAS EN LA CABEZA DE LOS PILOTES, EN t \*\*\*\*

PILOTE			
No	FZA EN X	FZA EN Y	FZA AXIAL
1	0	0	-15.58
2	0	0	-21.35
3	0	0	-24.54
4	0	0	-23.78
5	0	0	-25.54
6	0	0	-28.64
7	0	0	-32.96
8	0	0	-36.83
9	0	0	-42.8

NOTA: Cuando es compresion el signo es negativo en la carga axial.  
 Las fuerzas en X y en Y actuan en el plano horizontal, incluso  
 para los pilotes inclinados.

\*\*\*\* DESPLAZAMIENTOS EN LA CABEZA DE LOS PILOTES, EN m \*\*\*\*

PILOTE			
No	DESP X	DESP Y	DESP AXIAL
1	0	0	-.016
2	0	0	-.016
3	0	0	-.016
4	0	0	-.016
5	0	0	-.016
6	0	0	-.016
7	0	0	-.016
8	0	0	-.016
9	0	0	-.016

\*\*\*\* PILOTES QUE EXCEDEN LA CARGA MAXIMA \*\*\*\*

JPR#0

## CAPITULO 6

### CONCLUSIONES

- En el diseño de una cimentación y de cualquier estructura, es necesario estimar las acciones que actuarán sobre ella a lo largo de su vida útil; sin embargo, la determinación de su magnitud es probablemente una de las etapas más difíciles del diseño, ya que se pueden presentar variaciones durante la construcción y operación de tal estructura; ello implica que se debe tener en cuenta de manera explícita la condición de tal incertidumbre.

- El hincado de un pilote produce cambios en el estado de esfuerzos iniciales del suelo. En arcilla blanda, dichos cambios consisten en un remoldeo de la masa circundante al pilote, provocando una pérdida parcial y temporal de la resistencia al corte del suelo, lo que facilita su hincado. No obstante, conforme pasa el tiempo, la arcilla se reconso- lida y gana resistencia que generalmente es, incluso, mayor que la obtenida de especímenes muestreados antes del hinca- do. Las mediciones que ratifican lo anterior, recogidas de la literatura técnica al respecto, se exponen en el capítulo 3 de esta tesis; determinaciones cuidadosas señalan que la arcilla alrededor del pilote, sufre un incremento de resis- tencia del orden de un 50% de su valor inalterado original.

- Se revisaron los diferente métodos de diseño de pilotes de fricción; en México (NTCC-87), como en la mayoría de los países, el criterio más utilizado se basa en el análisis en términos de esfuerzos totales (método Alfa). El principal parámetro para definir a un suelo cohesivo inalterado es su resistencia al esfuerzo cortante en condiciones no drenadas.

- Se revisaron los diferentes métodos para llevar a cabo el análisis de un grupo de pilotes, encontrándose que existe una gran diferencia entre el diseño de la superestructura y la cimentación. Para cubrir en parte esta limitación, se adoptó una solución tridimensional para el análisis de un grupo de pilotes unidos a una losa de cimentación, basada en una versión modificada del método de Aschenbrenner; se le hicieron las modificaciones pertinentes ya que, aunque lo enuncia, no considera la hipótesis de rigidez de la losa.

El método de cálculo propuesto permite estimar lo siguiente:

- a) Cálculo de las cargas axial y transversal sobre los pilotes, considerando la rigidez de la losa.
- b) Estimar el momento de empotramiento en la cabeza de los pilotes; es decir, en la unión losa-pilote.
- c) Realizar la distribución del momento flexionante en la longitud crítica del pilote (Randolph, 1981)

- El método propuesto de análisis de grupos de pilotes requiere del conocimiento de la carga axial última sobre el pilote tipo, la cual se obtiene del análisis del mecanismo de transferencia de carga de los pilotes al subsuelo de apoyo. El método de cálculo propuesto para estimar la transferencia de carga está basado en el método de Coyle y Reese, el cual se ha modificado para tomar en cuenta las mediciones obtenidas en pruebas de carga de pilotes instrumentados, que se efectuaron tanto en el extranjero (Seed-Reese, 1957), como en un sitio de la ciudad de México (Reséndiz, 1964); de este análisis se derivan las siguientes conclusiones:

1. El fenómeno de transferencia de carga se debe al fenómeno de fricción entre dos superficies de naturaleza diferente.
2. La máxima carga que el pilote puede transferir al suelo, no será mayor a la resistencia al esfuerzo cortante del mismo.
3. La transferencia de carga que lleva a cabo el pilote al suelo, no es uniforme con la profundidad; esto es, depende de la profundidad a la que se localice el punto analizado, del movimiento del pilote y de la resistencia al corte del suelo circundante.
4. La carga transferida por el pilote en una zona de un 20% de la longitud del pilote cerca de la cabeza, no pone en juego la resistencia máxima del suelo, mientras que en la zona de la punta se presenta una mayor transferencia de carga, la cual el suelo no soportaría si no es por la ganancia de resistencia, señalada antes.

- En el método para el cálculo de la transferencia de carga propuesto, se sugieren las siguientes gráficas para adecuarlo a las condiciones del subsuelo de la ciudad de México.

- a) Gráfica relación carga transferida / resistencia al corte vs. deformación, obtenida a partir de pruebas de carga de pilotes, realizadas en la ciudad.

- b) Gráfica porcentaje de longitud efectiva de fricción vs. porcentaje de la relación carga transferida / resistencia al corte. Considera la variación de la carga transferida por el pilote al suelo con la profundidad.
- c) Gráfica porcentaje de longitud efectiva de fricción vs. factor de ganancia de resistencia. Para considerar la ganancia de resistencia que sufre el suelo después de hincado el pilote y transcurrido cierto tiempo.

- El método de transferencia de carga permite conocer la distribución de la carga sobre un pilote con la profundidad, y consecuentemente el esfuerzo transferido al suelo que lo rodea incluyendo la punta. El método de cálculo propuesto considera únicamente condiciones estáticas y la hipótesis de que el comportamiento de cada uno de los pilotes en un grupo es semejante al que presenta uno de ellos en condición aislada.

- El ingeniero de cualquier área cuenta con una herramienta muy poderosa para llevar a cabo la tarea de análisis y diseño y que es la computadora; actualmente es ya muy usual contar con una microcomputadora personal. En esta tesis, para analizar el mecanismo de transferencia de carga, se desarrolla el método modificado de Coyle y Reese, el cual dada su sencillez y característica iterativa, permitió el desarrollo del programa TRANSCARG. Con lo que respecta al análisis tridimensional del grupo de pilotes y dado que en el método propuesto, basado en el de Aschenbrenner, se plantea una matriz de equilibrio para conocer las cargas sobre cada uno de los pilotes, se desarrolló el programa ATRIPILE; ambos programas se efectuaron en una microcomputadora personal, su explicación así como sus listados se incluyen en el capítulo 4.

Por lo que toca a los ejemplos numéricos de casos reales, en los que se pusieron en práctica los programas para microcomputadora desarrollados con los métodos de Coyle-Reese y Aschenbrenner modificados, se alcanzaron las conclusiones siguientes:

- En el ejemplo 1 de un edificio de 17 niveles con pilotes de punta, el pilote que resultó más cargado y por lo tanto con un factor de seguridad bajo es el No. 14, colocado precisamente en la esquina de la cimentación. De este ejemplo se concluye lo inadecuado del diseño de una cimentación, en el que se toma en cuenta tan solo una distribución uniforme de presiones sobre todos los pilotes, basada en áreas tributarias y considerando únicamente condiciones estáticas. Se muestra la importancia de tener presente la rigidez de la losa o cajón, así como las acciones generadas por un sismo,

que conducen a altas concentraciones de esfuerzo en las orillas de la cimentación. El no tomar en cuenta este hecho lleva en el caso de cimentaciones piloteadas, a colocar los pilotes más esbeltos o menor cantidad de ellos en las orillas y esquinas, como en este ejemplo analizado, con los consecuentes daños en los pilotes que se apreciaron después del sismo del 19 de septiembre de 1985.

- En el ejemplo 2, que se trata del apoyo de un puente sobre pilotes de fricción, también la mayor concentración de esfuerzos se presenta en las esquinas de la cimentación; por el número de pilotes que se encuentran conectados a la losa se presentará fricción negativa sobre ellos, estimando el nivel neutro a una profundidad de 11.5 m. Es práctica común considerar en el análisis de asentamientos de pilotes de fricción, que la transferencia de carga pilote-suelo es uniforme a todo lo largo del fuste, lo que lleva a estimar valores de asentamientos muy conservadores. Considerando la distribución no uniforme de carga del pilote al suelo mediante el programa TRANSCARG, calibrado con mediciones en la ciudad de México, los asentamientos estimados parecen ser más realistas.

- Por último, una de las conclusiones más importante obtenida durante el desarrollo de este trabajo, es la necesidad de contar con datos reales de la distribución de carga en el sistema losa-pilotes-suelo; es decir, saber que cantidad de la carga total toma la losa y cuanto los pilotes y en éstos a través de su longitud, lo cual se puede saber únicamente cuando se instrumenten cimentaciones de este tipo. De igual manera para entender mejor la transferencia de carga que existe entre pilote y suelo, tanto en condiciones estáticas como dinámicas, es necesario realizar más pruebas como la efectuada por Reséndiz (1964) o la de Seed y Reese (1957).

## REFERENCIAS

Aschenbrenner, R. (1967), "Three-dimensional analysis of pile foundations", J. Struct. Div., ASCE, Vol. 93, No. ST1, pp 201-219

Auvinet, G. y Hanell, J.J. (1981), "Negative skin friction on piles in Mexico City Clay", Proceedings of the Tenth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 3, Stockholm, Sweden, pp 599-604.

Auvinet, G. y Mendoza, M.J. (1986), "Comportamiento de diversos tipos de cimentación en la zona lacustre de la Ciudad de México durante el sismo del 19 de septiembre de 1985", Simposio sobre "Los sismos de 1985: Casos de Mecánica de Suelos", memorias, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, México, pp 227-240.

Auvinet, G. y Mendoza, M.J. (1987), "Consideraciones respecto al diseño de cimentaciones sobre pilotes de fricción en zonas sísmicas", VII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, pp C223-C239.

Bazán, Z.E. y Meli P.R. (1985), Manual de diseño sísmico de edificios, Limusa, México.

Burland, J. (1973), "Shaft friction of piles in clay - a simple fundamental approach", Ground Engineering 6, No. 3, pp 30-42.

Coyle, H.M. y Reese, L.C. (1966), "Load transfer for axially loaded piles in clay", J. Soil Mech. Found. Div., ASCE, Vol 92, No. SM-2, pp 1-26.

Del Valle, E. (1987), Apuntes de la clase de Ingeniería Sísmica, DEFFI, UNAM, México.

Diversos autores (1985), Apuntes de diseño estructural, Facultad de Ingeniería, UNAM, México.

Dowrick, D.J. (1985), Diseño de estructuras resistentes a sismo, Limusa, México.

Focht, J.A. y O'Neill, M.W. (1985), "Piles and other deep foundations", Proceedings of the Eleventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, San Francisco Cal, USA, Vol. 4.

Francis, A.J. (1964), "Analysis of pile groups with flexural resistance", J. Soil Mech. Found. Div., ASCE, Vol. 90, No. SM-3, pp 1-32.

Gottfried, B.S. (1985), Programación Basic, Mc Graw Hill, Mexico, 1985.

Juárez Badillo. E. (1981), Mecánica de Suelos, Vol. 2, Limusa, México.

Kézdi, A. (1976), "Filosofía de las cimentaciones profundas", Tercera Conferencia Nabor Carrillo, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, México.

Marsal, R.J. y Mazari, M. (1959), "El subsuelo de la Ciudad de México", Facultad de Ingeniería, UNAM, México.

Mendoza, M.J. y Auvinet, G. (1987), "Comportamiento de cimentaciones de edificios en la Ciudad de México durante el sismo del 19 de septiembre de 1985", Informe interno del Instituto de Ingeniería, UNAM, México.

Mendoza, M.J. (1988), Comunicación personal, Instituto de Ingeniería, UNAM, México.

Meyerhof, G.G. (1976), "Bearing capacity and settlement of pile foundations", J. Geot. Engng. Div., Vol. 102, No. GT3, pp 195-228.

Normas Técnicas Complementarias al Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, 1977 y 1987, México.

Ovando, E., Mendoza, M.J. y Romo M.P. (1987), "Ensayes cíclicos en suelos de la capa dura de la Ciudad de México y estimaciones de asentamientos inducidos por sismo en pilotes de punta", VII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, pp E95-E111.

Polo, J. M. y Clemente J.L. (1988), "Pile-group settlement using independent shaft and point loads", Geot. Engng. Div., Vol 114, No. GT4, pp 469-487.

Poulos, H.G. y Davis, E.H. (1980), Pile foundation analysis and design, John Wiley and Sons, New York, USA.

Randolph, M.F. (1981), "The response of flexible piles to lateral loading", Geotechnique 31, No. 2, pp 247-259.

Reséndiz, D. (1964), "Estudio de campo sobre pilotes de concreto reforzado", Revista Ingeniería, enero, México, pp 101-110.

Reséndiz, D. y Auvinet, G. (1973), "Analysis of pile foundations in consolidating soils", Proceedings of the Eighth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Moscow, URSS, Vol. 3, pp 211-218.

Springall, J. (1987), Apuntes de la clase de Cimentaciones, Facultad de Ingeniería, UNAM, México.

Seed, H.B. y Reese, L.C. (1957), "The action of soft clay along friction piles", Transactions, ASCE, Vol. 122, pp 731-764.

Terzaghi, K. y Peck, B. (1967), Soil Mechanics in Engineering Practice, John Wiley and Sons, New York, USA.

Tomlinson, M.J. (1957), "The adhesion of piles driven in clay soils", Proceedings of the Fourth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, London, Vol. 2, pp 66-71.

Vesić, A.S. (1970), "Load transfer in pile-soil systems", Soil Mechanics Series, No. 23, School of Engineering, Duke University, USA.

Zeevaert, L. (1957), "Compensated friction-pile foundation to reduce the settlement of buildings on the highly compressible volcanic clay of Mexico City", Proceedings of the Fourth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, London, Vol. 2, pp 81-86.

Zeevaert, L. (1974), Foundation Engineering for Difficult Subsoil Conditions, Van Nostrand-Reinhold, New York, USA, capítulo VIII.

Zeevaert, L. (1984), "Condiciones ambientales en el diseño de cimentaciones de edificios", Séptima Conferencia Nabor Carrillo, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, México.