11

2 Ejem

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES
" A R A G O N "

COMPORTAMIENTO DE CIMENTACIONES PROFUNDAS ANTE CARGAS LATERALES

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO CIVIL
P R E S E N T A :

JOSE ANTONIO GARCIA ESCOTO

MEXICO, D. F. 1984

I N D I C E

CAPITULO I

INTRODUCCION

Una gran cantidad de estructuras cimentadas en pilotes o pilas, están sujetas a la acción de cargas laterales. Por -- ejemplo en torres de transmisión donde actúan fuerzas de viento; en muelles y estructuras portuarias, en donde las fuerzas horizontales son producidas por el impacto de embarcaciones - durante el atracamiento y por la acción del oleaje; en edificios u otras construcciones localizadas en zonas sísmicas; y en estructuras marinas tales como plataformas dedicadas a la explotación y extracción del petróleo, las cuales están sujetas a la acción del viento y del oleaje.

Debido al desarrollo de estas últimas, la industria del petróleo ha puesto considerables esfuerzos en determinar los factores que influyen en el comportamiento de cimentaciones - profundas ante cargas laterales. Muchos experimentos y pruebas de campo han sido desarrolladas en pilotes a escala real; desafortunadamente, los artículos que aparecen al respecto se concretan a resumir los resultados o conclusiones.

La resistencia lateral de cimientos profundos se rige por varios factores, siendo el más importante la relación entre -

la rigidez estructural y la del suelo. Esta rigidez relativa entre el elemento de cimentación y el suelo, es la que condiciona la forma de falla y la manera en la cual el pilote se comporta bajo una carga lateral.

En el diseño de pilotes cargados lateralmente, se contemplan dos formas de falla al igual que en otro tipo de cimentaciones; la primera es una falla por corte, que se presenta cuando se excede la resistencia del suelo o del pilote mismo. La segunda es una falla funcional que se presenta cuando se generan desplazamientos mayores a los que la estructura está limitada de acuerdo a sus condiciones de trabajo, para que tenga un buen comportamiento. Esta última en los casos prácticos suele ser la que rige el diseño de la cimentación, ya que generalmente, se desarrollan desplazamientos muy grandes antes de que se genere la falla última.

Para entender el comportamiento de un grupo de pilotes, ya sea sometidos a cargas laterales, o a una combinación de cargas laterales y cargas verticales, es necesario tener una idea clara del comportamiento de un solo pilote al que se le aplican cargas laterales.

Se han hecho varios análisis teóricos en pilotes verticales aislados, sometidos a cargas laterales, los que en la mayoría de los casos se basan en una hipótesis desarrollada por

Winkler en 1867, en la que se representa al suelo como una se rie de resortes elásticos infinitamente cercanos y trabajando independientemente, en donde la reacción del suelo en cual- - quier punto es función del desplazamiento. Esta hipótesis es el fundamento de estos análisis de interacción suelo-estructu ra, los que al ser aplicados a la estructura de cimentación y a la masa del suelo se busca que produzcan la misma configura ción de desplazamientos entre los dos elementos.

La hipótesis mencionada fue aplicada primero en estudios para vías de ferrocarril, encontrándose más tarde muchas otras áreas de aplicación tales como: sistemas de vigas, que son ca racterísticas en la construcción de cimentaciones de distin-- tas estructuras; grandes arcos y cúpulas en edificios de con- creto reforzado; y sistemas de cascarón desarrollados por re- volución que están sujetos a presión, tales como embarcacio-- nes, calderas y recipientes.

No obstante, cuando se analiza una cimentación profunda- sometida a cargas laterales, la interacción que forma la es-- tructura de cimentación con el suelo que le sirve de soporte, presenta un problema más grande debido a que los análisis del comportamiento del suelo son más complejos que los representa dos por un simple modelo matemático.

La hipótesis de Winkler sirve para desarrollar una ecuación de cuarto orden, la cual es resuelta por métodos analíti cos o numéricos, tomando estos últimos preponderancia en la - actualidad debido a la disponibilidad de computadoras en la - solución de problemas ingenieriles.

Sin embargo, la mayoría de la información para analizar- el comportamiento de cimentaciones profundas ante cargas late rales, se encuentra restringida en nuestro medio y cuando ésta es localizada regularmente resulta ser de difícil comprensión para ingenieros no especializados en el tema.

Este trabajo tiene por objeto principal, exponer en forma accesible la información actual acerca del diseño de cimen taciones profundas afectadas por cargas laterales, desde sus- principios básicos, hasta la resolución por medio del método- de diferencias finitas.

CAPITULO II

RESISTENCIA ULTIMA DEL SUELO A CARGAS LATERALES EN PILOTES

Al igual que en otros campos dentro de la Mecánica de Suelos, en el diseño de cimentaciones de pilotes sometidos a cargas laterales los problemas del suelo pueden clasificarse en dos grupos: aquellos que involucran al cálculo de una carga de falla que depende de la resistencia última del suelo y, problemas que implican el cálculo de deflexiones de acuerdo con las condiciones de carga.

En la gran mayoría de los casos prácticos, el diseño de pilotes sometidos a cargas laterales será dependiente de una deflexión lateral limitada por el tipo de estructura que se encuentre sustentada por los pilotes. La carga lateral que produce esta deflexión límite, es generalmente mucho menor que aquella que lleva al suelo a su resistencia última, no obstante, es necesario garantizar mediante un margen de seguridad adecuado, que no se llegará a la carga de falla.

En este capítulo se presentarán los mecanismos de falla del suelo que aparecen con la resistencia última, al igual que los métodos estáticos que nos permiten encontrar la carga de falla.

II.1 MECANISMOS DE FALLA DEL SUELO

Para determinar la resistencia última del suelo con un - pilote sometido a carga lateral, es necesario conocer la forma de la falla del suelo circundante al pilote.

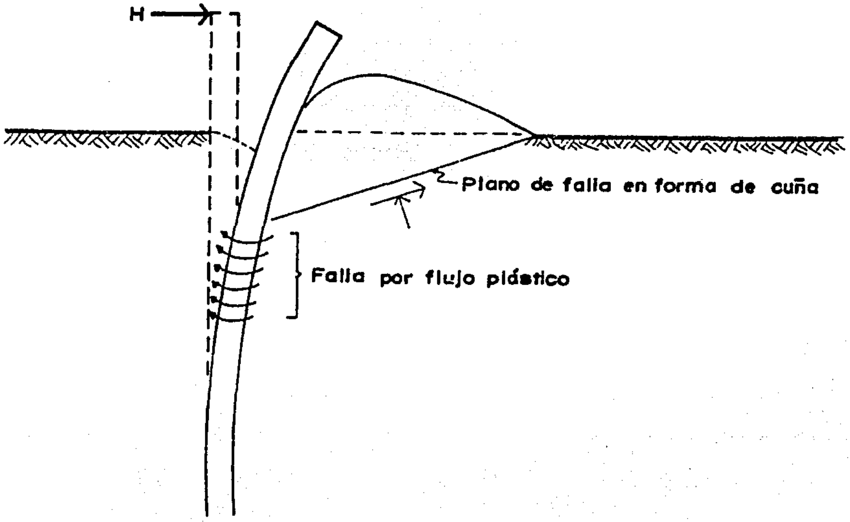


Fig. II.1 Desplazamiento del pilote ante cargas laterales

Analizando el comportamiento de un pilote sometido a cargas laterales, se puede apreciar que éste sufre al igual que- el suelo un desplazamiento (Fig. II.1). Cerca de la superficie, el suelo tiende a desplazarse hacia arriba y lateralmente en dirección de la carga que se aplica.

En investigaciones realizadas por Matlock (Ref. 1), se - ha encontrado que la falla del suelo en la parte superior será de acuerdo con la teoría de Rankine, originalmente desarrollada para empujes laterales del suelo en muros de retención. De esta manera, la falla cerca de la superficie será en forma de cuña y se deberá al empuje pasivo del pilote sobre el suelo. En la Fig. II.2 se puede apreciar la forma de cuña en la falla.

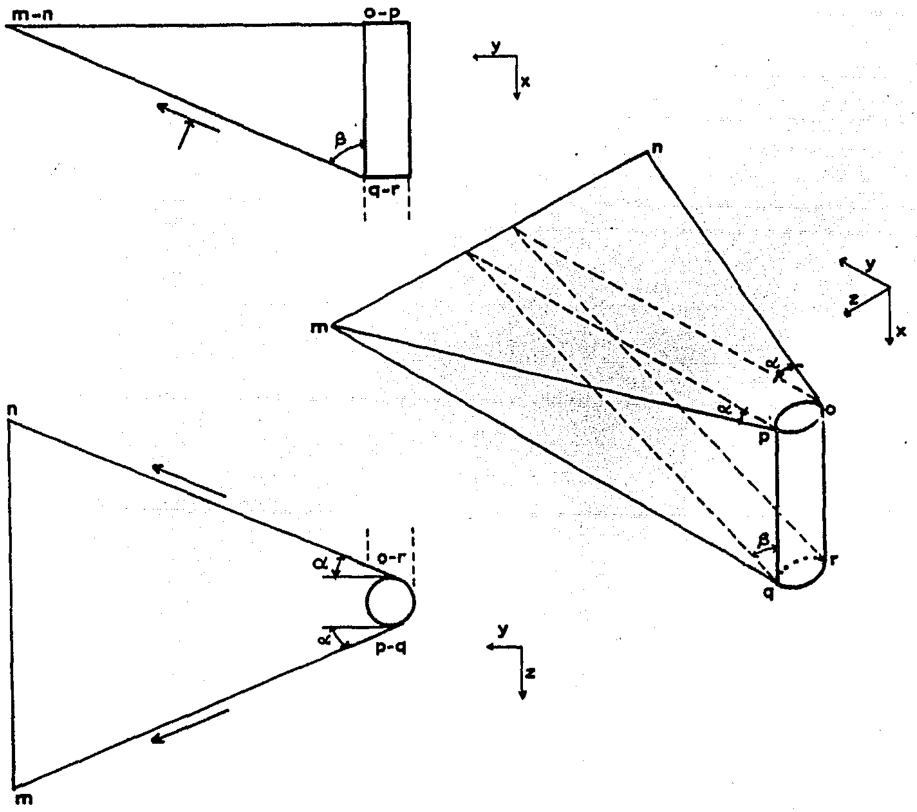


Fig. II.2 Falla en forma de cuña cerca de la superficie del suelo.

A profundidades mayores, el suelo difícilmente puede ser desplazado hacia arriba, de esta manera el suelo falla alrededor del pilote por flujo plástico. Éste consiste en que el suelo que se encuentra en el frente del pilote es removido por el empuje del mismo, fluyendo alrededor del pilote, lo que hace que se llenen los huecos producidos por la deflexión del pilote y el desplazamiento del suelo. En esta forma de falla, el pilote puede sufrir grandes desplazamientos sin que exista un franco plano de falla en el suelo, característico de otras cimentaciones. La Figura II.3 presenta en detalle la forma de falla por flujo plástico.

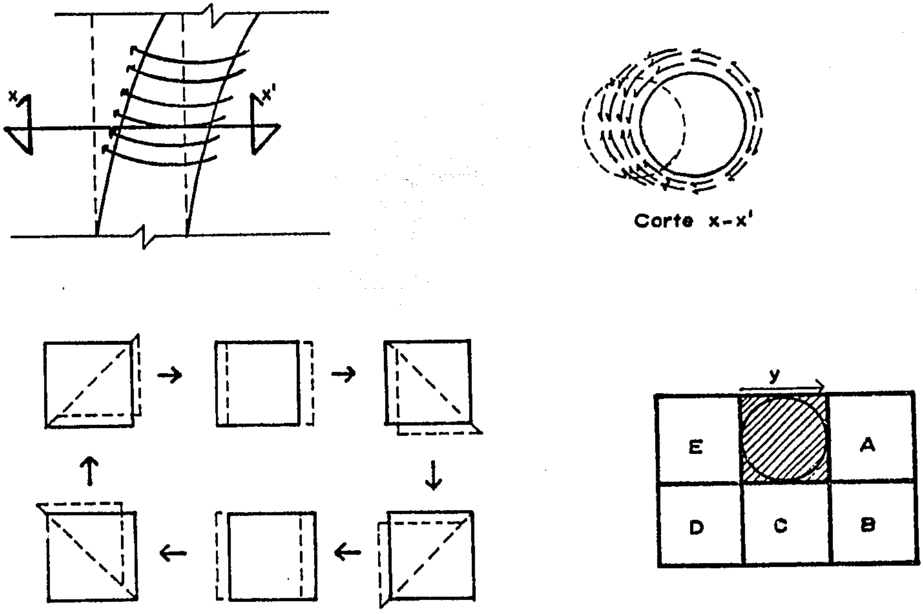


Fig. II.3 Falla por flujo plástico del suelo.

Aunque en la realidad no se presenta una transición perfectamente delineada en estas formas de falla, se han realizado varios intentos para localizar esta profundidad de transición, principalmente por Hansen, Thompson, Matlock y Reese. Esta profundidad de transición, de la falla en forma de cuña a la de flujo plástico, está determinada por la resistencia última del suelo, la cual está en función del peso específico efectivo, la resistencia al esfuerzo cortante del suelo, por la sección y el ancho del pilote.

II.2 RESISTENCIA ULTIMA DEL SUELO

La resistencia última del suelo está estrechamente ligada con los mecanismos de falla, ya que se presentan al llevar al suelo a su resistencia última. Varios investigadores han propuesto diferentes relaciones para encontrar la resistencia última del suelo en pilotes sometidos a cargas laterales.

Matlock y Reese (Ref. 2) desarrollaron la siguiente expresión para determinar la resistencia máxima de la cuña (igual a la resistencia última del suelo cerca de la superficie de éste), sometida a un empuje pasivo en un suelo cohesivo.

$$p_u = \left(3 + \gamma \frac{x}{c} + M \frac{x}{d}\right) c\, d \qquad \text{II.1}$$

donde p_u = resistencia última del suelo

γ = promedio del peso específico efectivo desde la superficie del suelo hasta el estrato en estudio.

x = profundidad desde la superficie del suelo hasta el estrato en estudio.

c = resistencia al esfuerzo cortante en una prueba no drenada en la profundidad x.

d = ancho del pilote.

M = factor que depende del tipo de arcilla.

para un suelo cohesivo, Matlock y Reese consideran que para la falla de cuña presentada en la Figura II.2, $\alpha = 0°$ y $\beta = 45°$

A profundidades mayores en un suelo cohesivo, se aplica el factor desarrollado por Skempton para encontrar la resistencia última del suelo. Cuando la forma de falla es por flujo plástico, la resistencia última del suelo se obtiene por medio de la siguiente expresión:

$$p_u = 9c\ d \qquad \text{II.2}$$

donde p_u, c y d corresponden a los valores mencionados en la ecuación II.1

Al igualar las ecuaciones II.1 y II.2 y despejando a x, encontramos la profundidad de transición en las formas de falla. De la superficie del suelo a la profundidad x, se aplica la ecuación II.1 para encontrar la resistencia última del suelo, mientras que para otras profundidades mayores se aplica la ecuación II.2

En suelos granulares cerca de la superficie del suelo, Reese presenta la siguiente expresión para encontrar la resistencia máxima de la cuña (igual a la resistencia última del suelo), sometida al empuje pasivo (Ref. 2).

$$p_u = x \left[\frac{K_o x\,(\tan\phi \operatorname{sen}\beta)}{\tan(\beta - \phi)\cos\alpha} + \frac{\tan\beta}{\tan\alpha(\beta - \phi)}(b + x\tan\beta\tan\alpha) + K_o x\tan\beta\,(\tan\phi\operatorname{sen}\beta - \tan\alpha) - K_a b \right] \qquad \text{II.3}$$

donde K_o = coeficiente de presión de tierras en reposo igual a 0.4

ϕ = ángulo de fricción interna

β = $45° + \phi/2$

α = $\phi/2$

K_a = $\tan^2(45° - \phi/2)$

los valores α y β corresponden a los presentados en la cuña de la Figura II.2

A mayores profundidades en suelos granulares, donde la falla se presenta por flujo plástico del suelo circundante al pilote, la resistencia última del suelo es expresada por Parker y Reese como:

$$P_u = K_a d\gamma x(\tan^8\beta - 1) + K_o d\gamma x \tan\phi\tan^4\beta \qquad \text{II.4}$$

En suelos granulares la transición de la falla de cuña a la de flujo plástico, ocurrirá cuando la resistencia a fluir sea menor que la requerida para mover la cuña, es decir, que la resistencia última del suelo en la profundidad x corresponde al valor menor proporcionado entre las ecuaciones II.3 y II.4.

Es necesario señalar que las expresiones de Matlock y Reese para encontrar la resistencia última del suelo (ecuaciones II.1 a II.4), son usadas en análisis no lineales, desarrollados principalmente por el mismo Reese, y que se estudiarán en forma más detallada en capítulos posteriores.

Brinch Hansen (Ref. 3) presenta una expresión que permite encontrar la resistencia última del suelo para el caso más general en que se tenga un suelo cohesivo-friccionante. Esta expresión está basada en la teoría de esfuerzos del suelo y considera la variación de la resistencia del suelo con la profundidad a lo largo del pilote. El método propuesto por Hansen no presenta una transición delineada en los mecanismos de falla del suelo. La resistencia última del suelo en cualquier profundidad x bajo la superficie está expresada como:

$$p_u = q\ Kq + c\ Kc \qquad \text{II.5}$$

donde:

q = presión vertical de sobrecarga

c = cohesión

Kc, Kq = factores que son función del ángulo de fricción interna y de la relación x/d. Estos factores pueden encontrarse en la Figura II.4a y II.4b.

Otra forma de encontrar la resistencia última del suelo es propuesta por Broms, el cual simplifica la resistencia última en suelos cohesivos, en donde presenta un valor constante de 9c a partir de una profundidad de 1.5d (Ref. 4). En el caso de los suelos friccionantes presenta la siguiente expresión para encontrar la resistencia última:

$$p_u = 3\sigma'_v Kp \qquad \text{II.6}$$

donde:

σ'_v = presión efectiva vertical de sobrecarga.

$Kp = (1 + \text{sen}\,\phi) / (1 - \text{sen}\,\phi)$.

ϕ = ángulo de fricción interna (esfuerzo efectivo).

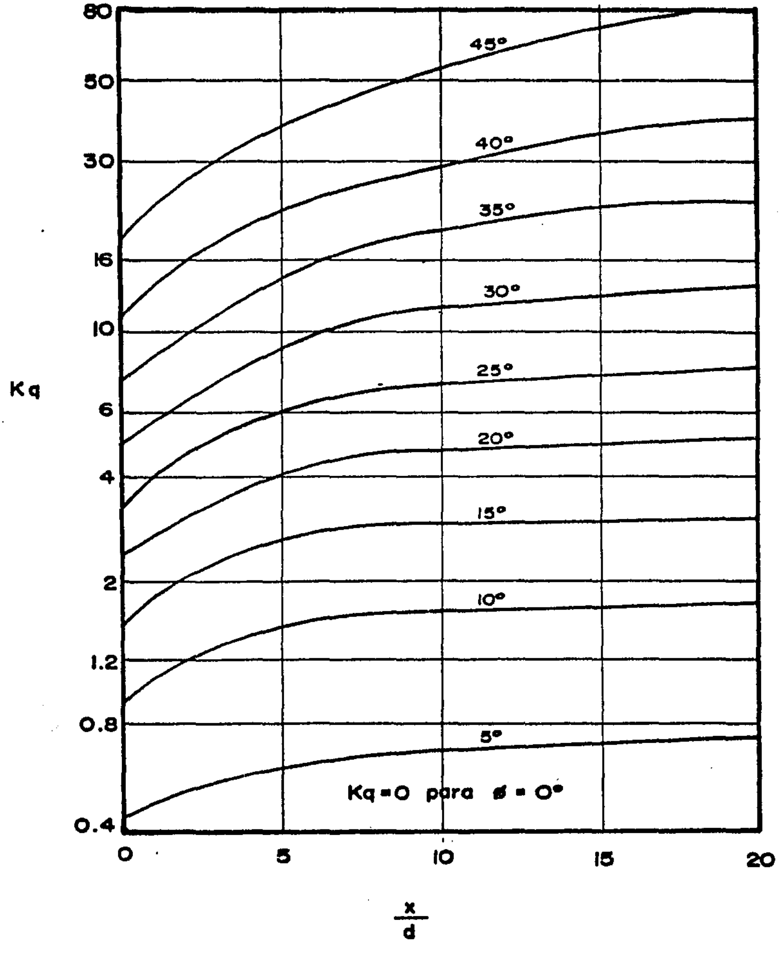


Fig. II.4a. Factor de resistencia lateral Kq.

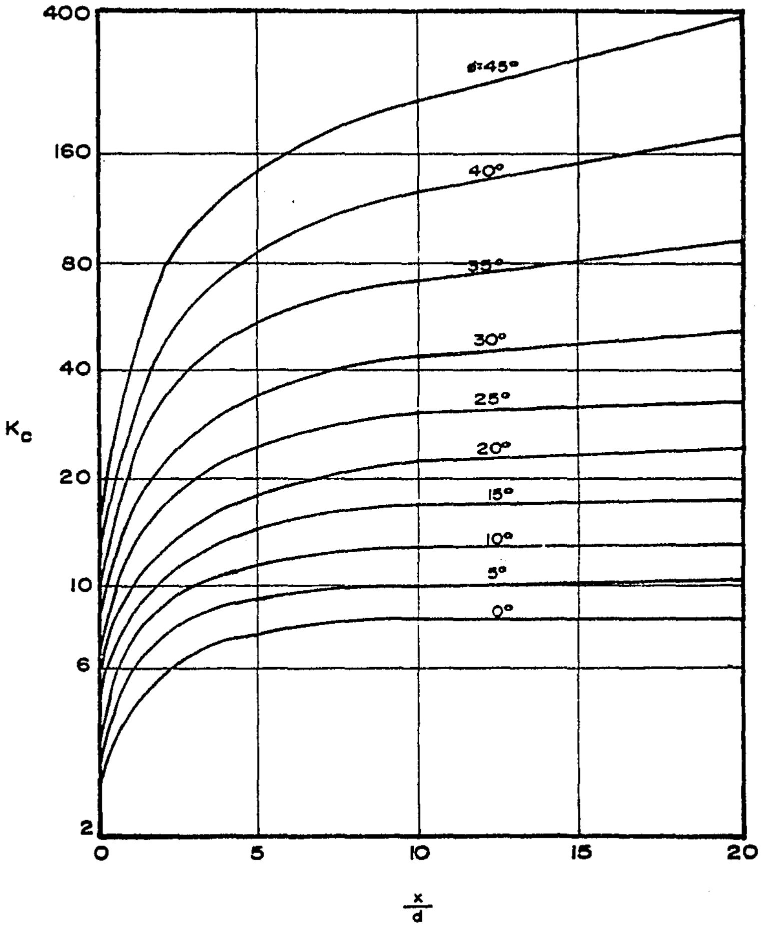


Fig. II.4b Factor de resistencia lateral Kc.

El análisis desarrollado por Broms se basa en las siguientes consideraciones:

1. La presión activa del suelo actuando en la espalda -- del pilote se considera despreciable.

2. La distribución pasiva a lo largo del frente del pilote se considera igual a tres veces la presión pasiva de Rankine.

3. La forma de la sección del pilote no tiene influencia en la distribución de la resistencia lateral última.

4. La resistencia lateral se moviliza completamente en - el movimiento considerado.

Las simplificaciones que hace Broms para encontrar la resistencia última del suelo, son usadas para determinar la carga de falla del conjunto suelo-pilote en la teoría desarrollada por el mismo Broms. De la misma manera, el método presentado por Hansen para encontrar la resistencia última del suelo - se usa generalmente en el procedimiento estático, el cual se - presentará en la sección II.3. Sin embargo, es posible usar - la resistencia última del suelo encontrada por el método de -- Broms, en el análisis estático o viceversa.

II.3 ANALISIS DE EQUILIBRIO ESTATICO PARA ENCONTRAR LA CARGA DE FALLA DEL CONJUNTO SUELO-PILOTE

Actualmente el diseño de pilotes sometidos a cargas laterales incluye la resolución de ecuaciones diferenciales de cuarto orden, las cuales nos permiten conocer las deflexiones, el esfuerzo cortante, el momento, la curvatura y la reacción del suelo, no obstante, se han desarrollado varios métodos que permiten encontrar la carga de falla, ya sea llevando al suelo a su resistencia última por medio de su mecanismo de falla o encontrando el momento de falla en el pilote. Dentro de estos procedimientos, se cuenta con el análisis estático convencional y el procedimiento de Broms principalmente (Ref. 4).

Procedimiento Estático Convencional

El método más sencillo para encontrar la resistencia lateral última de un pilote flotante de cabeza libre al giro, es realizar un análisis de equilibrio estático del pilote como el mostrado en la Figura II.5. Se considera que el pilote es lo bastante rígido, de tal manera que la falla del suelo se presenta antes de la del pilote mismo.

El análisis se basa en considerar un equilibrio de fuerzas horizontales y momentos que llevan al suelo a su resistencia última, y resolver las ecuaciones simultáneas de esta manera planteadas para una profundidad desconocida z_r (donde se presenta la rotación del pilote) y, para una carga lateral última H_u. (El momento M_u se considera igual a $H_u e$ donde, e = excentricidad de la carga). Considerando al pilote como una lámina de ancho o diámetro d, las ecuaciones en forma general son:

$$H_u = \int_0^{z_r} p_u \, d \, \delta z \; - \int_{z_r}^{L} p_u \, d \, \delta z \qquad \text{II.7}$$

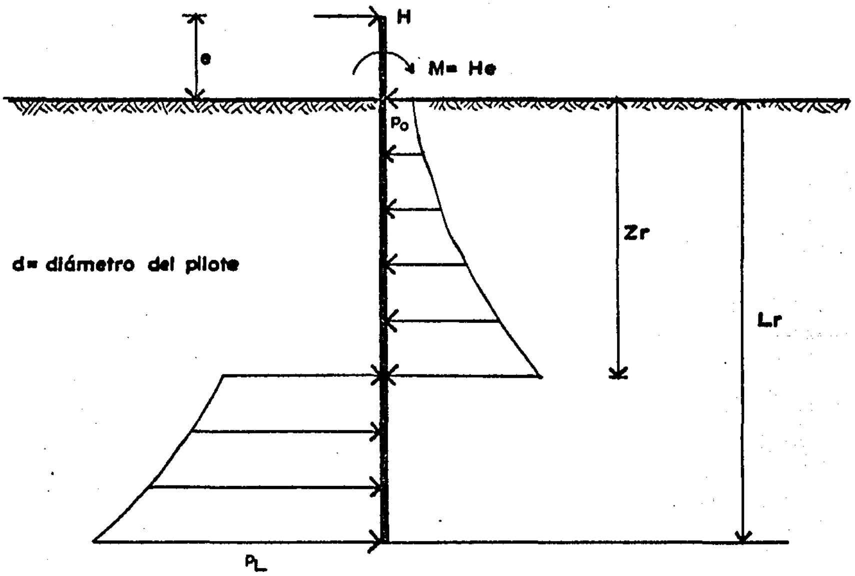


Fig. II.5 Pilote cargado lateralmente de cabeza libre al giro.

$$M_u = H_u e = -\int_0^{z_r} p_u \, \delta z \, \delta z + \int_{z_r}^{L} p_u \delta z \, \delta z \qquad \text{II.8}$$

En el caso de que se considere una distribución uniforme de la resistencia del suelo con la profundidad a lo largo dela longitud completa del pilote ($p_o = p_L = p_u$), las ecuacio--nes anteriores conducen a los siguientes valores para la profundidad de rotación z_r, y la carga lateral última H_u:

$$z_r = \frac{1}{2}\left[\frac{H_u}{p_u d} + L\right] \qquad \text{II.9}$$

$$\frac{H_u e}{p_u d L^2} = \frac{1}{4}\left[1 - \left(\frac{2 H_u}{p_u d L}\right) - \left(\frac{H_u}{p_u d L}\right)^2\right] \qquad \text{II.10}$$

$$\frac{H_u}{p_u d L} = \sqrt{\left(1 + \frac{2e}{L}\right)^2 + 1} - \left(1 + \frac{2e}{L}\right) \qquad \text{II.11}$$

El valor de $\frac{H_u}{p_u dL}$ se encuentra graficado contra $\frac{e}{L}$ en la figura II.6.

En el caso de que se tenga una variación lineal de la resistencia del suelo con la profundidad, desde p_o en la super ficie del suelo a p_L en la punta del pilote, se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$4\left(\frac{z_r}{L}\right)^3 + \left[6\left(\frac{z_r}{L}\right)^2\right]\left[\frac{e}{L} + \frac{p_o}{p_L - p_o}\right] + \left(\frac{12\ p_o}{p_L - p_o}\right)\left(\frac{e}{L}\right)\left(\frac{z_r}{L}\right)$$

$$- \left(3\ \frac{e}{L}\right)\left(\frac{p_o + p_L}{p_L - p_o}\right) - \left(\frac{2p_L - p_o}{p_L - p_o}\right) = 0 \qquad \text{II.12}$$

$$\frac{H_u}{p_u\ d\ L} = \left(1 - \frac{p_o}{p_L}\right)\left(\frac{z_r}{L}\right)^2 + \left(2\ \frac{p_o}{p_L}\right)\left(\frac{z_r}{L}\right) - \frac{1}{2}\left(1 + \frac{p_o}{p_L}\right) \qquad \text{II.13}$$

El valor de H_u/p_u dL se encuentra graficado también en la figura II.6 conta e/L para el caso en que se tenga $p_o = 0$.

Hasta ahora se ha considerado que el pilote es lo bastante rígido, de tal manera que se presenta la falla en el suelo antes que en el pilote, sin embargo, en pilotes relativamente largos, la resistencia última lateral puede depender del momento de falla del pilote, el cual puede encontrarse antes de llegar a la resistencia última del suelo. En tales casos el momento máximo (el cual se tiene en el punto de cero esfuerzo cortante para un pilote de cabeza libre) deberá calcularse -

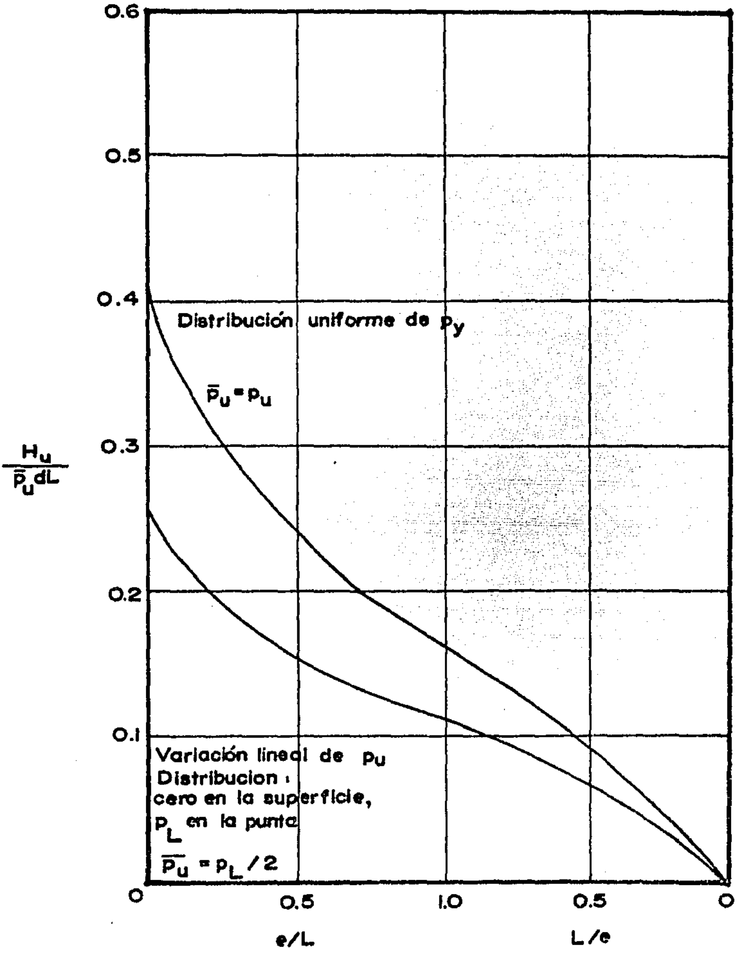


Fig. II.6 Resistencia última de pilotes rígidos, no restringidos al giro.

considerando la movilización completa de la resistencia del suelo anterior a este punto. Puesto que el momento máximo no puede exceder al momento de falla de la sección del pilote, la resistencia última lateral es la menor de:

i. La carga horizontal necesaria para producir la falla del suelo a lo largo de la longitud completa del pilote (en - este caso el pilote es considerado rígido y su capacidad está en función de la resistencia del suelo).

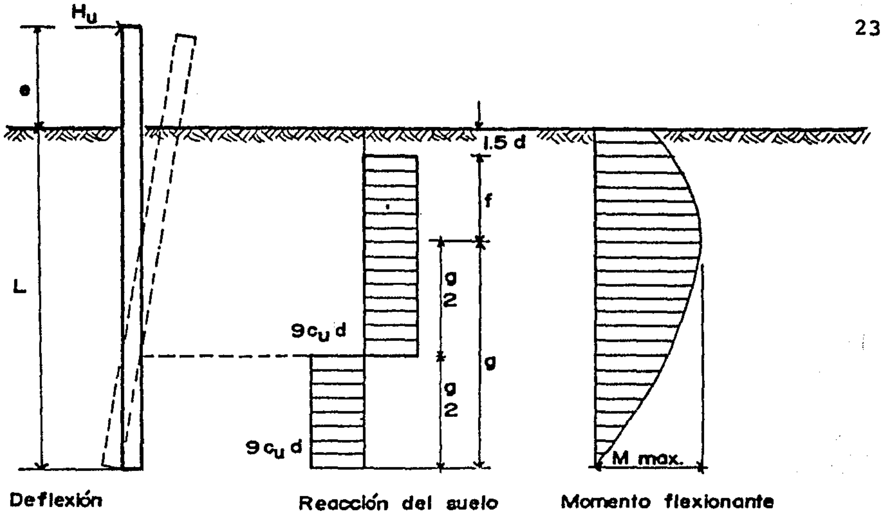
ii. La carga horizontal necesaria para producir un momento máximo, igual al momento de falla del pilote (aquí la - carga lateral está en función de las características del pilote).

Teoría de Broms

Esta teoría es similar a la descrita en el análisis estático, pero Broms considera una distribución simplificada en - la resistencia última del suelo, además de que esta teoría -- puede usarse tanto en pilotes de cabeza restringida al giro - como en pilotes de cabeza libre. Por conveniencia, los pilotes que se encuentran en suelos puramente cohesivos serán estudiados en forma separada a los que se encuentran en suelos- friccionantes.

1. Pilotes en suelos cohesivos

Como habíamos mencionado anteriormente, en suelos cohesi



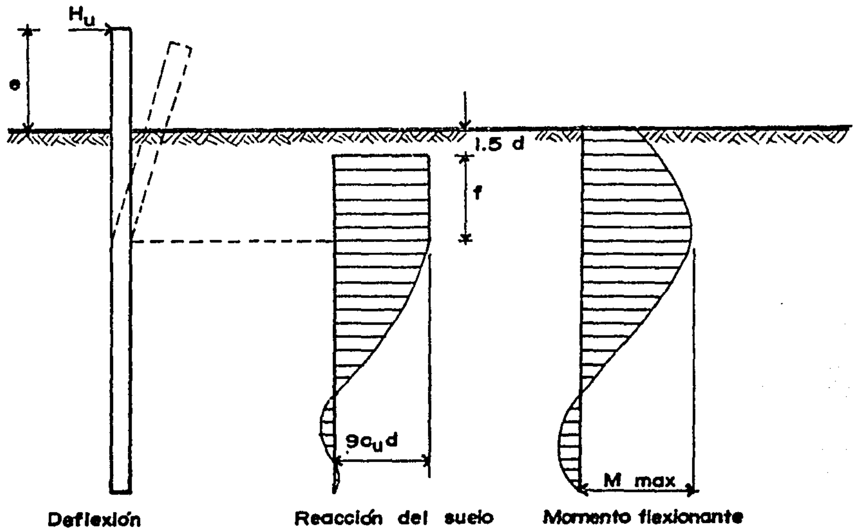


Fig. II.7. Pilotes de cabeza libre al giro en suelos cohesivos (a) cortos; (b) - largos.

vos Broms sugirió una distribución simplificada de la resis-- tencia última del suelo, siendo cero desde la superficie hasta una profundidad de 1.5d y un valor constante de 9 c_u bajo- esta profundidad (c_u = resistencia al esfuerzo cortante en -- una prueba no drenada). Broms considera que los desplazamientos sufridos por el pilote serán suficientes para generar esta reacción en las zonas críticas, cuya localización dependerá de las características del pilote, las cuales varían de -- acuerdo con la restricción al giro que exista en la cabeza -- del pilote y el grado de rigidez del mismo.

a) Pilotes de cabeza libre al giro.

Las posibles formas de trabajo para pilotes cortos y largos de cabeza libre al giro se muestran en la Figura II.7 junto con las distribuciones de reacción del suelo y momentos -- flexionantes.

Los pilotes cortos (también llamados rígidos), son aquellos cuya capacidad lateral es dependiente de la resistencia- del suelo, mientras que los pilotes largos cuya capacidad lateral está en función del momento de falla del pilote. En la figura II.7, f define la localización del momento máximo donde el esfuerzo cortante tiene un valor igual a cero. Igualando fuerzas horizontales tenemos:

$$f = \frac{H_u}{9\ c_u\ d} \qquad \text{II.14}$$

donde

c_u = resistencia al esfuerzo cortante en una prueba no drenada.

Tomando momentos en la localización del momento máximo - en la parte superior se tiene:

$$M_{max} = H_u\ (e + 1.5\ d + 0.5\ f) \qquad \text{II.15a}$$

en la parte inferior

$$M_{max} = 2.25\ d\ g^2\ c_u \qquad \text{II.15b}$$

La solución se encuentra graficada en la figura II.8a, - en términos de los parámetros adimensionales L/d y $H_u/c_u d^2$, y se aplica para pilotes cortos en los cuales el momento de falla $M_y > M_{max}$, siendo la desigualdad verificada por las ecuaciones II.14 y II.15a.

Para pilotes largos H_u se obtiene de las ecuaciones II.14 y II.15a, colocando el M_{max} igual al valor conocido del momento de falla del pilote M_y. Esta solución se encuentra grafica da en la figura II.8b en función de los parámetros H_u/c_ud^2 y M_y/c_ud^3.

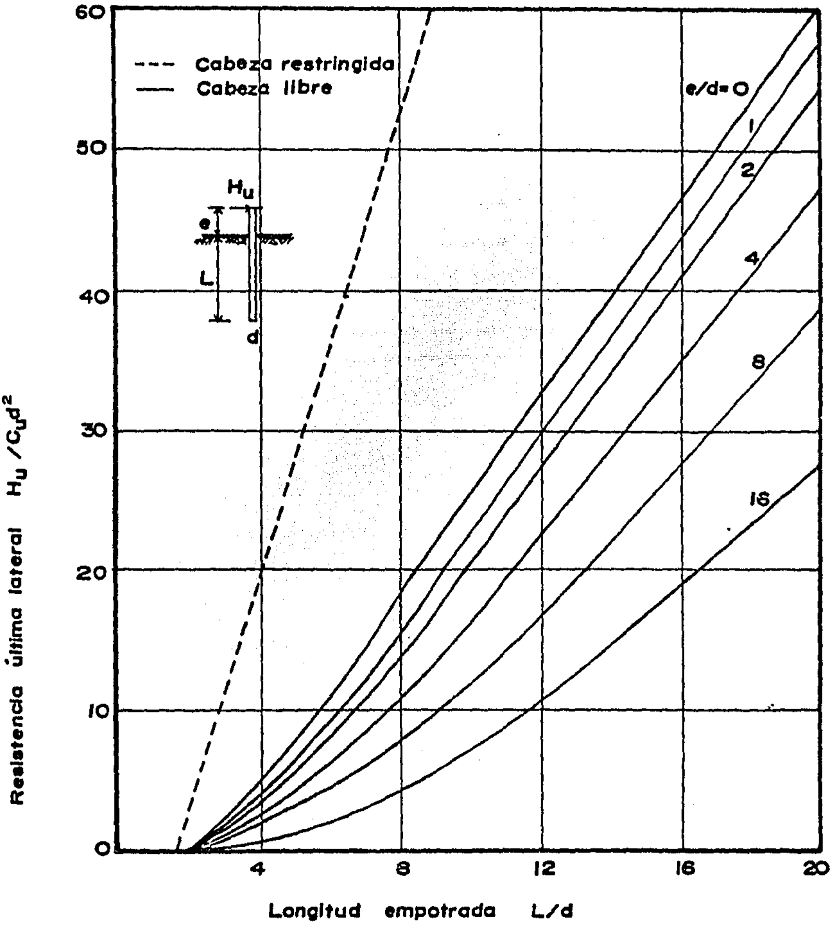


Fig. II.8a Resistencia lateral última de pilotes cortos en suelos cohesivos.

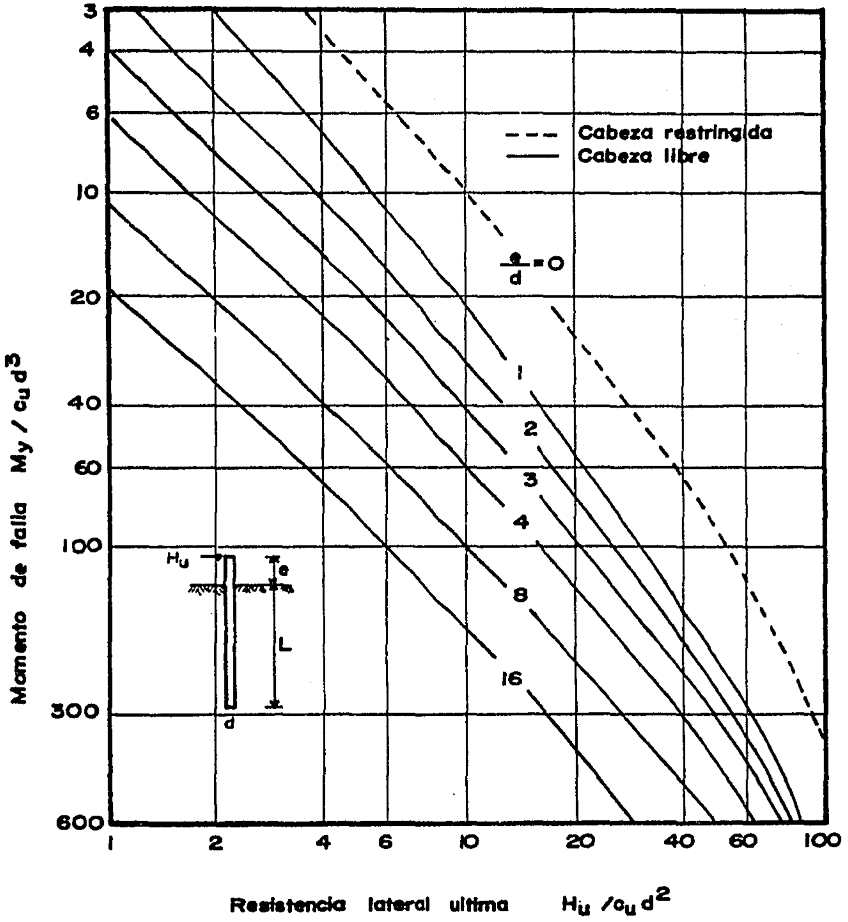


Fig. II.8b Resistencia lateral última de pilotes largos en suelos cohesivos.

b) Pilotes de cabeza restringida al giro

En los pilotes de cabeza restringida al giro, las posibles formas de trabajo están mostradas en la figura II.9 junto con las distribuciones de reacción del suelo y momento flexionante. En pilotes de cabeza restringida se considera la existencia de un momento resistente en la cabeza del pilote igual al momento actuante, esto es para que no exista rotación en la superficie del suelo. El pilote actuará como corto, intermedio o largo, de acuerdo con las características del pilote, es decir, en función de su momento de falla.

De la figura II.9 se obtienen las siguientes expresiones para pilotes cortos:

$$H_u = 9\ c_u d\ \ (L - 1.5\ d) \qquad \text{II.16}$$

$$M_{max} = H_u\ (0.5\ L\ +\ 0.75\ d) \qquad \text{II.17}$$

Las soluciones en forma adimensional están mostradas en la figura II.8a.

Para pilotes intermedios (la primera falla del pilote ocurre en la cabeza) los cuales se encuentran en la figura II.9b, se usa la ecuación II.14, de donde tomando momentos con respecto a la superficie se obtiene:

$$M_y = 2.25\ c_u\ dg^2 - 9\ c_u\ df\ \ (1.5\ d\ +\ 0.5\ f) \qquad \text{II.18}$$

Esta ecuación junto con la relación $L = 1.5\ d + f + g$, pueden resolverse para encontrar H_u. Es necesario verificar que el momento máximo positivo en la profundidad $f + 1.5\ d$ sea menor que M_y; si no es así, el pilote trabajará como elemento largo (figura II.9c) empleándose en este caso la siguiente relación:

$$H_u = \frac{2\ M_y}{1.5\ d + 0.5\ f} \qquad \text{II.19}$$

Las soluciones en forma adimensional están mostradas en la figura II.8b.

2. Pilotes en suelos friccionantes

Las consideraciones que hace Broms en suelos friccionantes fueron analizadas en la sección anterior.

a) Pilotes de cabeza libre al giro

Al igual que en las consideraciones anteriores el pilote trabajará como corto, si el momento máximo es menor que el momento de falla del pilote. En la figura II.10a, la rotación del pilote se considera cercana a la punta y se reemplazan las altas presiones actuando cerca de este punto por una sola fuerza concentrada en la punta.

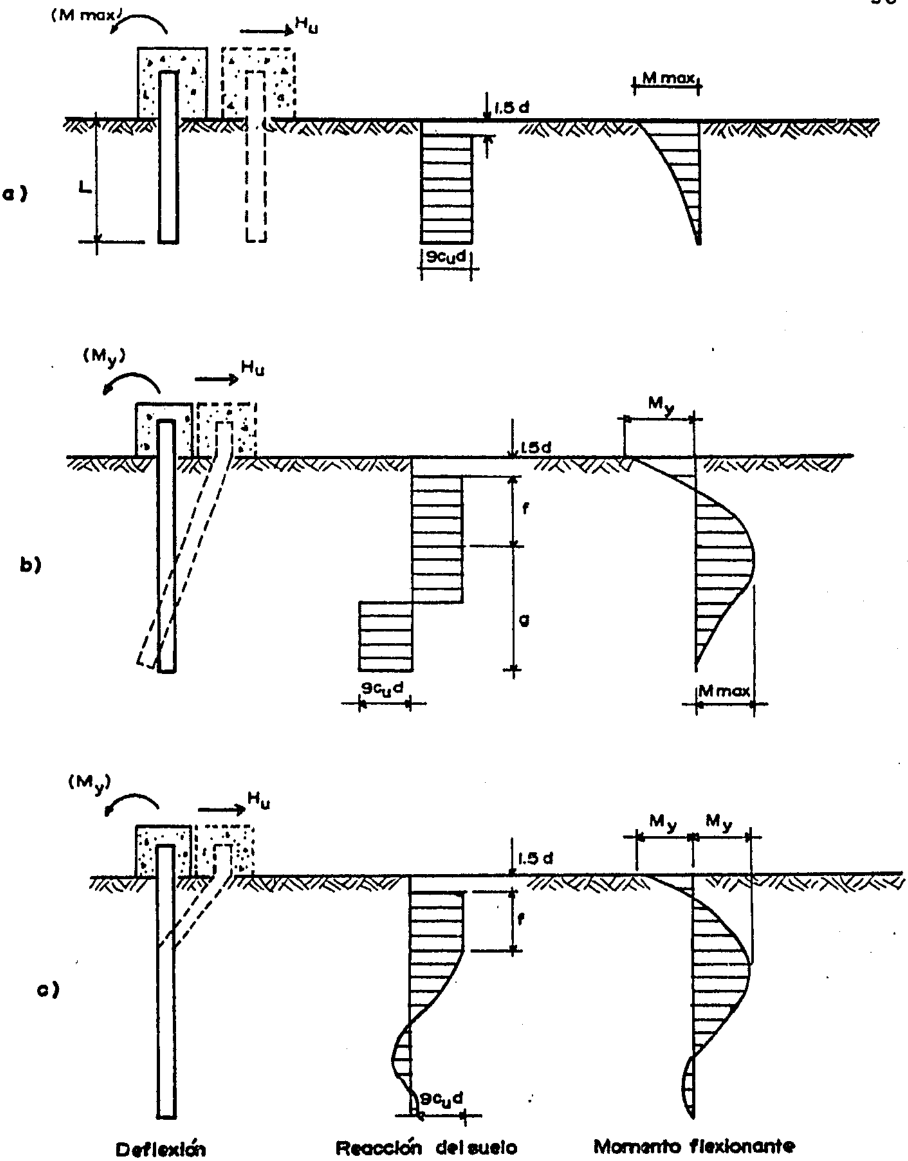


Fig. II.9 Pilotes de cabeza restringida al giro en suelos cohesivos. (a) cortos; (b) intermedios; y (c) largos.

Tomando momentos con respecto a la base del pilote de la figura II.10a se obtiene:

$$H_u = \frac{0.5\ \gamma\ d\ L^3 K_p}{e + L} \qquad \text{II.20}$$

Esta relación se encuentra graficada en la figura II.11a mediante los parámetros adimensionales L/d y $H_u/K_p\ \gamma\ d^3$. El momento máximo se encuentra a una distancia f bajo la superficie, en donde:

$$H_u = \frac{3}{2}\ \gamma\ d\ f^2 K_p \qquad \text{II.21}$$

que es igual a tener:

$$f = 0.82\sqrt{\frac{H_u}{d\ K_p \gamma}} \qquad \text{II.21}$$

de esta manera el momento máximo es:

$$M_{max} = H_u \left(e + \frac{2}{3}\ f \right) \qquad \text{II.22}$$

Si después de usar la ecuación II.20, se tiene que para el valor de H_u resulta $M_{max} > M_y$, entonces el pilote actuará como un pilote largo y H_u deberá calcularse de las ecuaciones II.21 y II.22, igualando el momento máximo al momento de falla del pilote ($M_{max} = M_y$). Las soluciones para pilotes largos están graficados en la figura II.11b, en términos de $H_u/K_p\ \gamma\ d^3$ y de $M_y/K_p\ \gamma\ d^4$.

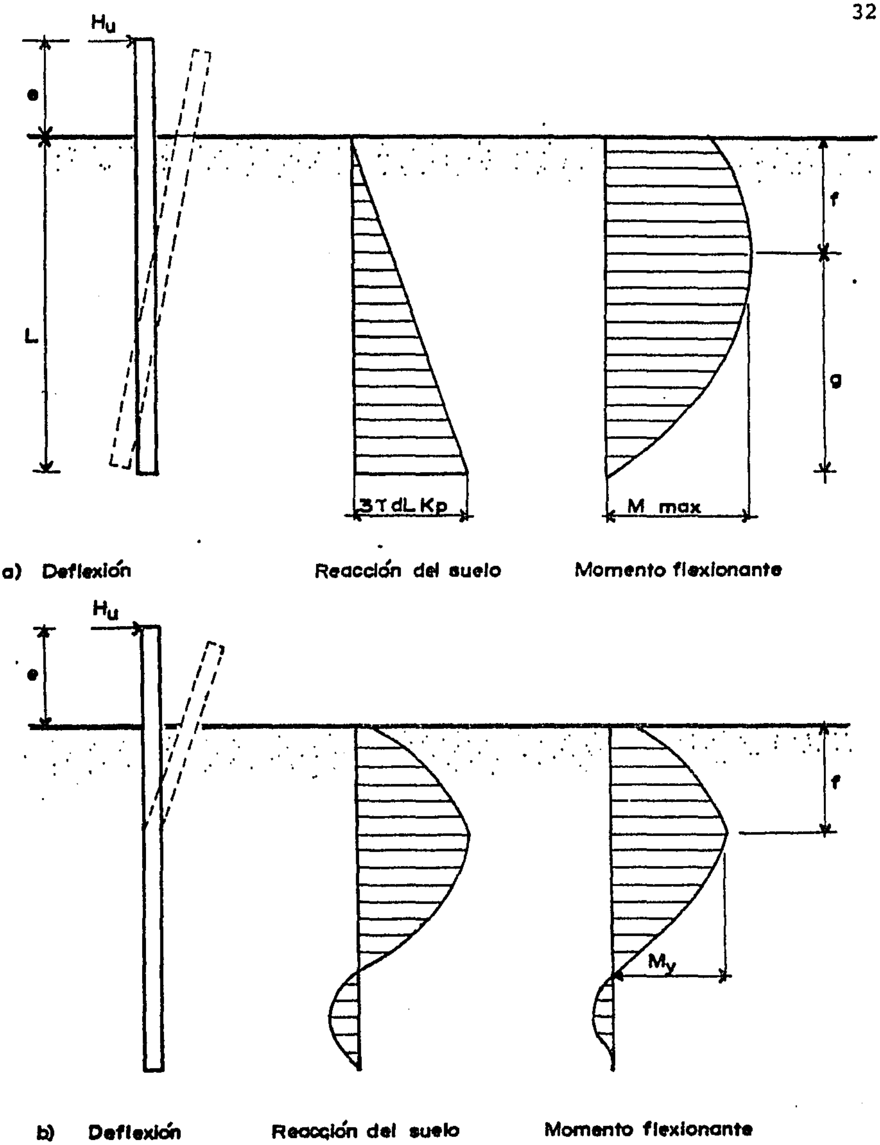


Fig. II.10 Pilotes de cabeza libre en suelos friccionantes, (a) cortos; y (b) largos.

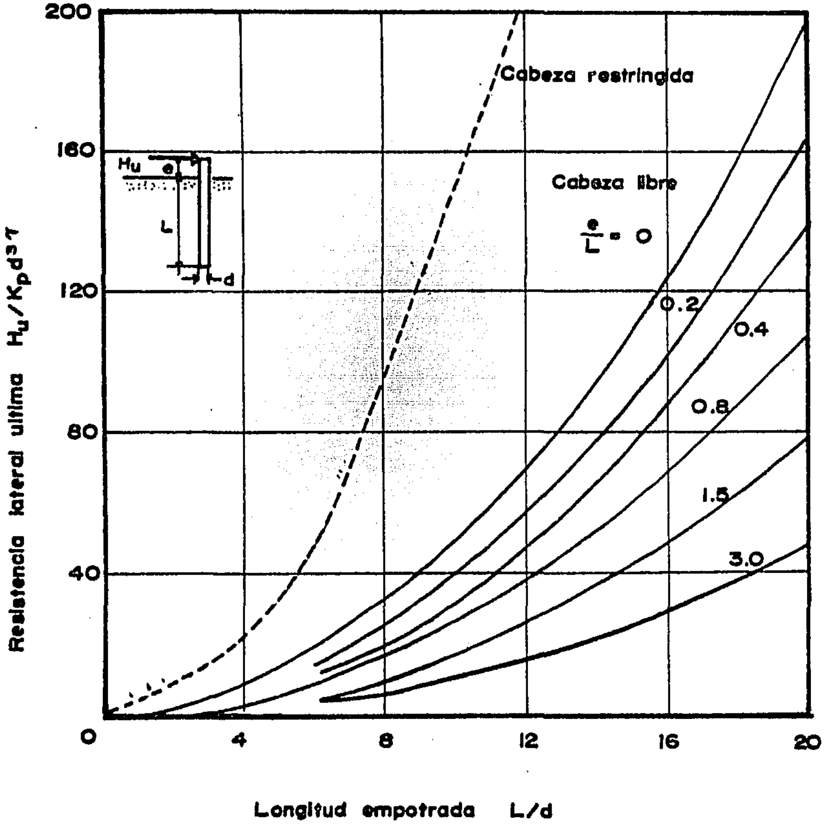


Fig. II.11a Resistencia lateral última de pilotes cortos en suelos friccionantes.

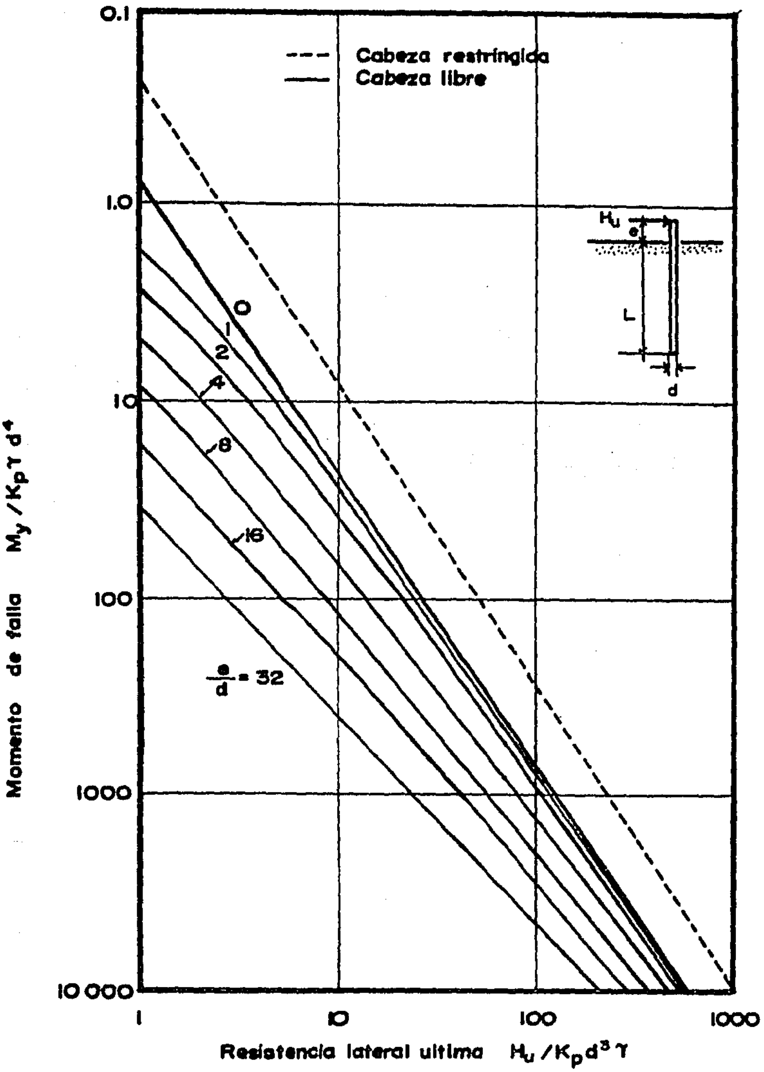


Fig. II.11b Resistencia lateral última de pilotes largos en suelos friccionantes.

b) Pilotes de cabeza restringida al giro

En este caso también se considera la existencia de un momento resistente en la cabeza del pilote. Las distintas condiciones de trabajo en función de las características del pilote están mostradas en la figura II.12.

Para un pilote corto (figura II.12a) del equilibrio horizontal se obtiene:

$$H_u = 1.5\gamma\ L^2\ d\ K_p \qquad \text{II.23}$$

Esta solución se encuentra graficada en la figura II.11a en forma adimensional. El momento máximo es:

$$M_{max} = \frac{2}{3}\ H_u\ L \qquad \text{II.24}$$

Si $M_{max} > M_y$, entonces el pilote se comportará como un pilote intermedio, siempre y cuando el momento desarrollado en la profundidad f sea menor que M_y, siendo f la distancia calculada en la ecuación II.21. De la figura II.21b haciendo un equilibrio horizontal se tiene:

$$F = \frac{3}{2}\ \gamma\ \ d.L^2\ K_p \quad - \ H_uL \qquad \text{II.25}$$

Tomando momentos en la cabeza del pilote y sustituyendo F de la ecuación II.25 se obtiene:

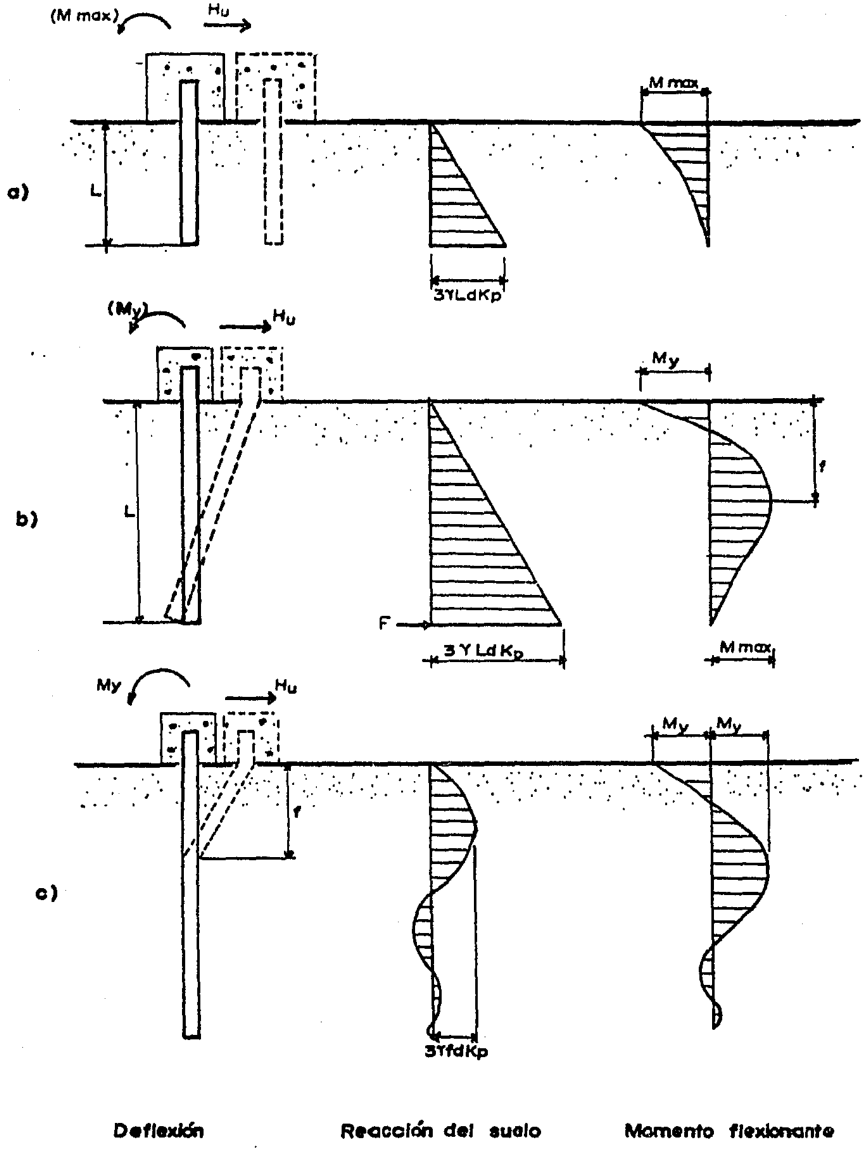


Fig. II.12 Pilotes de cabeza restringida en suelos friccionantes. (a) cortos; (b) intermedios; y (c) largos.

$$M_y = 0.5 \gamma d L^3 K_p - H_u L \qquad \text{II.26}$$

De esta forma se obtiene H_u. Si el momento máximo en la profundidad f es mayor que M_y (donde f es calculado de - la ecuación II.21), entonces el pilote se considera largo. En esta situación el momento de falla del pilote se presenta en dos lugares de acuerdo con la figura II.12c, de esta manera - se tiene que:

$$H_u \left(e + \frac{2}{3} f \right) = 2 M_y \qquad \text{II.27}$$

Las soluciones adimensionales de esta ecuación están mos tradas en la figura II.11b.

CAPITULO III

INTERACCION SUELO-ESTRUCTURA

Los esfuerzos generados en una estructura descansando sobre el suelo y los desplazamientos sufridos por ella, están determinados por las cargas actuantes y por la relación de la rigidez de la estructura a la rigidez del suelo sobre la cual descansa. No obstante, en el diseño de cimentaciones, generalmente se han calculado las deformaciones de acuerdo con la carga y las características del suelo, sin tomar en cuenta la rigidez de la estructura. En este capítulo se presenta la forma en que se ha tratado de hacer compatible la deformación del suelo y la deflexión del elemento de cimentación, ambos causados por las condiciones de carga actuantes en la estructura.

III.1 HIPOTESIS DE WINKLER

Un modelo en especial, el desarrollado por Winkler en 1867, es el que se ha usado en la mayoría de los análisis teóricos de cimentaciones. Este modelo fue usado primero en el análisis de esfuerzos y deflexiones en vías de ferrocarril, aunque su uso se ha extendido a una gran variedad de campos, sobre todo en el concerniente a cimentaciones. Las principales investigaciones en el modelo de Winkler en esta área han sido realizadas por Vesic (1961), quien encontró que existe - un error inherente en la hipótesis de Winkler, esto se debe a que el comportamiento del suelo es mucho más complicado que - el representado por un simple modelo matemático, aunque éste se considera insignificante para propósitos prácticos.

Se han propuesto otros modelos en la representación del suelo y se ha tratado de hacer algunas modificaciones al modelo original de Winkler, sin embargo, éste es el que representa con mayor éxito el comportamiento del conjunto suelo-estructura, esto es debido a que el modelo de Winkler es menos complicado en su desarrollo teórico, y de que en pruebas realizadas por varios investigadores (Hayashi, Hetenyi, Wölfer y -- Sherif; Ref. 5) el comportamiento del conjunto suelo-estructura fue compatible con el modelo propuesto por Winkler.

Winkler en su modelo considera que el suelo puede ser representado por una serie infinitamente cercana de resortes - elásticos trabajando independientemente (Ref. 6). La figura III.1, muestra una viga descansando en una cimentación elástica. La reacción en cualquier punto en la base de la viga es función de la deflexión de ese punto, en donde el material - del suelo exhibe un comportamiento distinto al generado en - otro punto.

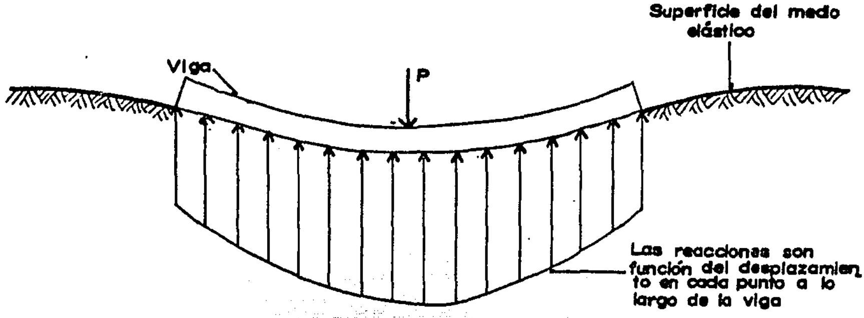


Fig. III.1. Viga en cimentación elástica

La viga mostrada en la figura III.1, puede ser sustituí- por la viga idealizada en la figura III.2, donde descansa - sobre una cama de resortes elásticos, en la que cada resorte - es independiente de los demás. De acuerdo con la hipótesis de Winkler, la reacción en cada punto en la base de la viga de la figura III.2, es solamente dependiente de la deflexión en ese- punto.

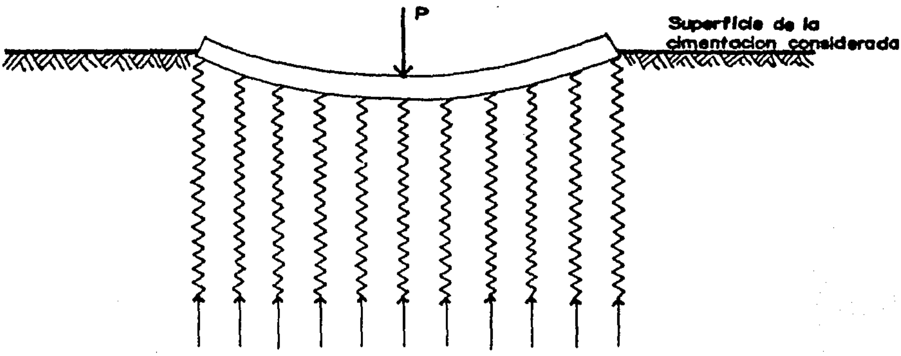


Fig. III.2. Viga sobre una cama de resortes elásticos.

De esta manera de acuerdo con las consideraciones anteriores, donde la reacción del suelo en cualquier punto es proporcional a la deflexión en ese punto, se tiene que:

$$p = k_h y \qquad \text{III.1}$$

donde p = reacción del suelo (F/L^2)

y = deflexión de la viga (L)

k_h = módulo de reacción de la subrasante (F/L^3)

Al valor de k_h que representa la constante del resorte se le conoce por una gran variedad de nombres pero comúnmente, se le denomina módulo de reacción de la subrasante o módulo de la subrasante.

Considerando que la viga tiene una sección uniforme, se puede incluir el ancho de ésta en la ecuación III.1.

$$p = k\,y \qquad \text{III.2}$$

donde p = reacción del suelo por unidad de ancho (F/L)

y = deflexión de la viga (L)

k = módulo de reacción de la subrasante (F/L^2)

Es importante recordar la abreviación realizada en la ecuación anterior, ya que varios investigadores en sus análisis consideran implícitamente el ancho de la viga.

III.2 LA ECUACION DE LA VIGA

La forma en que se comporta una viga en una cimentación elástica, puede ser representada por una ecuación diferencial, la cual es desarrollada a partir de la ecuación III.1. Para el planteamiento de la ecuación de la viga, se parte de un elemento diferencial encerrado entre dos cortes transversales, tal y como se muestra en la figura III.3 , en donde se considera que la viga tiene un ancho d .

En las fuerzas actuantes, en el elemento diferencial de la figura III.3 se considera que el esfuerzo cortante Q a la izquierda es positivo, al igual que el momento M actuando de acuerdo con las manecillas del reloj, de tal manera que considerando el equilibrio de fuerzas horizontales se tiene:

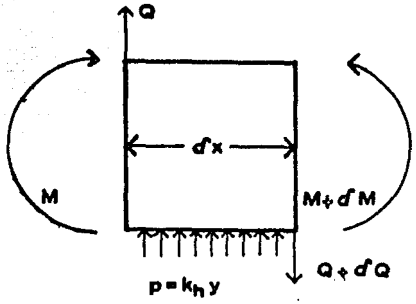


Fig. III.3 Fuerzas actuantes en un elemento diferencial de viga.

$$Q - (Q + \delta Q) + k_h y \; d \; \delta x = 0 \qquad \text{III.3}$$

$$\frac{\delta Q}{\delta x} = k_h \; y \; d$$

haciendo uso de la relación $Q = \delta M/\delta x$, y sustituyendo en la ecuación III.3 resulta:

$$\frac{\delta^2 M}{\delta x^2} = k_h y \; d \qquad \text{III.4}$$

aplicando ahora la ecuación diferencial de una viga sometida a flexión $E\,I\,(\delta^2 y/\delta x^2) = -M$ (donde E I = rigidez de la viga) y diferenciando dos veces obtenemos:

$$E\,I \; \frac{\delta^4 y}{\delta x^4} = - \frac{\delta^2 M}{\delta x^2} \qquad \text{III.5}$$

sustituyendo la ecuación III.5 en III.4

$$E\,I \frac{\delta^4 y}{\delta x^4} = - k_h y\, d \qquad \text{III.6}$$

Ésta es la ecuación de la viga expresada en forma diferencial, y puede ser resuelta para definir el comportamiento de ésta, en una cimentación elástica.

III.3 RESOLUCION DE LA ECUACION DE LA VIGA

El comportamiento de un pilote vertical cargado lateralmente es similar al de una viga en una cimentación elástica y también puede ser representado por la ecuación III.6, siendo posible resolver ésta en forma analítica o numérica, en donde varían las soluciones de acuerdo a las condiciones de carga, a los cambios de rigidez en el pilote a lo largo del eje, y a la variación del elemento resistente con la profundidad. Las soluciones que involucran las variaciones anteriormente mencionadas son mucho más complicadas que aquellas que consideran una rigidez del pilote y un valor del módulo de reacción de la subrasante constantes con la profundidad.

Soluciones Analíticas

Las soluciones por el procedimiento analítico fueron dadas por Hetenyi para un pilote cargado lateralmente en uno o más puntos a lo largo de la longitud no empotrada, pudiéndose localizar la(s) carga(s) en la superficie del suelo o sobre ella (Ref. 6). Estas soluciones sólo son aplicables cuando el módulo de reacción de la subrasante es constante o tiene variación lineal con la profundidad, y el pilote tiene una rigidez constante, siendo su desarrollo un proceso laborioso y extenso. A continuación presentaremos el desarrollo de la solución general de la ecuación de la viga aplicando a un pilote cargado lateralmente, realizado por Hetenyi.

Partiendo de la ecuación III.6, se tiene:

$$\frac{\delta^4 y}{\delta x^4} + \frac{k_h\ d\ y}{E\ I} = 0$$

esta ecuación puede ser escrita como:

$$\left(D^4 + \frac{k_h\ d}{E\ I}\right) y = 0 \qquad \text{III.7}$$

considerando a $\beta^4 = k_h\ d/4\ E\ I$, y sustituyendo en la ecuación III.7, se tiene:

$$(D^4 + 4\ \beta^4)\ y = 0 \qquad \text{III.8}$$

obteniendo raíces de la ecuación III.8:

$$m^4 + 4\ \beta^4 = 0$$

$$m_1 = -\ m_3 = \beta\,(1 + i) \quad : \quad m_2 = -\ m_4 = \beta\,(-1 + i)$$

resolviendo ahora por medio de la ecuación auxiliar para raíces imaginarias, se obtiene:

$$y= (C_1\cos\ \beta x+C_2\mathrm{sen}\ \beta x)e^{\beta x}(C_3\cos \beta x+C_4\mathrm{sen}\ \beta\ x)\ e^{-\beta x} \qquad \text{III.9}$$

obteniendo derivadas:

$$\frac{\delta y}{\delta x} = \beta e^{\beta x}(C_1\cos\ \beta\ x + C_2\mathrm{sen}\ \beta\ x -C_1\mathrm{sen}\ \beta\ x +C_2\cos\ \beta\ x)$$

$$- \beta\ e^{-\beta\ x}(C_3\cos\ \beta\ x +C_4\mathrm{sen}\ \beta\ x +C_3\mathrm{sen}\beta x -C_4\cos \beta x) \qquad \text{III.9a}$$

$$\frac{\delta^2 y}{\delta x^2} = 2\ \beta^2\ e^{\beta x}(C_2\cos \beta\ x -C_1\mathrm{sen}\,\beta\ x)$$

$$+ 2\ \beta^2 e^{-\beta x}(C_3\mathrm{sen}\ \beta x -C_4\cos \beta x) \qquad \text{III.9b}$$

$$\frac{\delta^3 y}{\delta x^3} = 2\ \beta^3\ e^{\beta x}\ (C_2\cos \beta x -C_1\mathrm{sen}\ \beta x -C_2\mathrm{sen}\ \beta x -C_1\cos\ \beta x)$$

$$+ 2\beta^3\ e^{-\beta x}(C_3\cos\beta x +C_4\mathrm{sen}\beta x-C_3\mathrm{sen}\ \beta x+C_4\cos \beta\ x) \qquad \text{III.9c}$$

$$\frac{\delta^4 y}{\delta x^4} = 4\ \beta^4 e^{\beta x}(-C_2\mathrm{sen}\ \beta x -C_1\cos\ \beta x)$$

$$+ 4\ \beta^4\ e^{-\beta x}(-C_3\cos\ \beta x -C_4\mathrm{sen}\ \beta x) \qquad \text{III.9d}$$

En las ecuaciones III.9 y sus derivadas se aplican las condiciones frontera, las cuales nos permiten encontrar los valores de las constantes C_1, C_2, C_3 y C_4. Para un pilote de longitud infinita y de cabeza libre al giro, se tiene:

cuando | condiciones frontera

$x = 0$

$$\frac{\delta^2 y}{\delta x^2} = \frac{M_t}{EI} \qquad \text{III.10}$$

$$\frac{\delta^3 y}{\delta x^3} = \frac{H_t}{EI} \qquad \text{III.11}$$

$$x \longrightarrow \infty \quad ; \quad y \longrightarrow 0 \quad ; \quad e^{-\beta x} \longrightarrow 0$$

sustituyendo en la ecuación III.9 la condición de un pilote - infinitamente largo, esto es, cuando $x \longrightarrow \infty$

$$0 = (C_1 \cos \beta x + C_2 \operatorname{sen} \beta x)$$

de donde se obtiene $C_1 = C_2 = 0$

sustituyendo ahora la condición III.10 en la ecuación III.9b, se obtiene:

$$C_4 = \frac{-M_t}{2 E I \beta^2}$$

y aplicando en la misma forma III.11 en la ecuación III.9c, - obtenemos:

$$C_3 + C_4 = \frac{Q_t}{2 E I \beta^3}$$

Los valores de las constantes se sustituyen en las ecuaciones III.9 y sus derivadas, y de esta manera se van encontrando los valores de deflexión, curvatura, momento, cortante y reacción del suelo.

Las condiciones frontera que se han usado, varían de acuerdo con las características de trabajo y del pilote. En un pilote de cabeza restringida al giro, en donde no existe rotación en la cabeza, se tiene:

cuando condición frontera

$$x = 0 \qquad S = E\,I\,\frac{\delta y}{\delta x} = 0 \qquad \text{III.12}$$

de la misma forma, considerando un pilote de punta libre:

cuando condiciones frontera

$$x = L \qquad Q = E\,I\,\frac{\delta^3 y}{\delta x^3} = 0 \qquad \text{III.13}$$

$$M = E\,I\,\frac{\delta^2 y}{\delta x^2} = 0 \qquad \text{III.14}$$

El desarrollo para la solución de las ecuaciones anteriores, es un proceso laborioso y extenso, siendo necesario consultar el libro de Hetenyi para profundizar en el tema (Ref. 6). Las soluciones particulares han sido expuestas por Barber y Broms, en forma de tablas y gráficas, las cuales serán presentadas en el capítulo V.

Soluciones Numéricas

En el método anteriormente expuesto, se ha considerado - que el módulo de reacción de la subrasante es constante o tiene un incremento lineal con la profundidad, sin embargo, en - la realidad generalmente no es lineal. La técnica de diferencias finitas ha sido usada para resolver el problema de un pilote cargado lateralmente con cualquier variación de la rigidez del pilote y del módulo de reacción de la subrasante (Ref. 7). Esta solución requiere la aplicación iterativa de los - valores del módulo de reacción de la subrasante, los cuales - son ajustados hasta que los valores de reacción del suelo "p" y deflexión "y" sean compatibles con las propiedades reales - esfuerzo-deformación del suelo.

El método de diferencias finitas, tiene la ventaja de poder incluir los efectos de la carga axial, trabajando con una forma más general de la ecuación III.6:

$$E\,I\,\frac{\delta^4 y}{\delta x^4} + P_x\,\frac{\delta^2 y}{\delta x^2} + ky = 0 \qquad \text{III.15}$$

donde P_x = carga axial

En el análisis por diferencias finitas se divide al pilote en secciones de igual longitud (Fig. III.4), en donde el - número de divisiones está en función de la aproximación reque rida, de esta forma la longitud del pilote es igual al número de divisiones por la distancia propuesta entre cada intervalo ($L = n\ h$). A los puntos que dividen el pilote en secciones finitas, se las denomina puntos nodales y el procedimiento nos permite calcular los valores de la deflexión, curvatura, momento, esfuerzo cortante y reacción del suelo en cada uno de esos puntos. En la figura III.4, los puntos -2, -1, n + 1, y n + 2 son ficticios y se usan para trabajar con las condiciones frontera en la punta del pilote y al nivel de la superficie del suelo. Estas condiciones frontera, son las mismas que las expuestas anteriormente en el análisis de Hetenyi.

A continuación presentaremos las ecuaciones de un pilote cargado lateralmente, expresadas en forma de diferencias finitas. Es conveniente recordar las ecuaciones básicas que son:

$$\frac{\delta y}{\delta x} = \frac{S}{E\ I} \qquad \text{III.16a}$$

$$\frac{\delta^2 y}{\delta x^2} = \frac{M}{E\ I} \qquad \text{III.16b}$$

$$\frac{\delta^3 y}{\delta x^3} = \frac{Q}{E\ I} \qquad \text{III.16c}$$

$$\frac{\delta^4 y}{\delta x^4} = \frac{-p}{E\ I} \qquad \text{III.16d}$$

Expresando ahora estas mismas ecuaciones, en forma de di

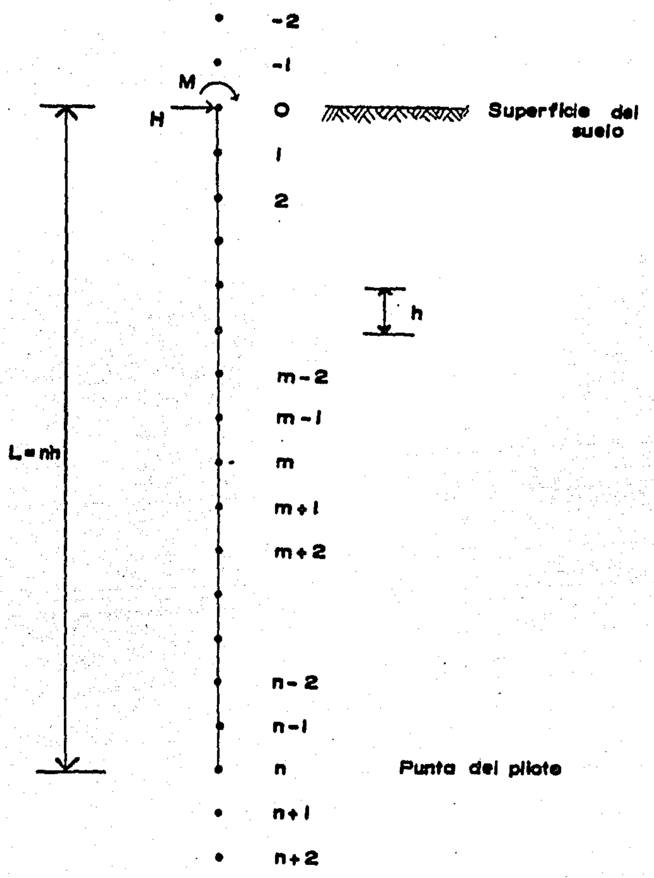


Fig. III.4 Análisis de diferencias finitas en pilotes - cargados lateralmente.

ferencias finitas para un punto cualquiera "m", se tiene:

$$\frac{\delta y}{\delta x_m} = \frac{y_{m+1} - y_{m-1}}{2h} \qquad \text{III.17a}$$

$$\frac{\delta^2 y}{\delta x_m^2} = \frac{y_{m+1} - 2y_m + y_{m-1}}{h^2} \qquad \text{III.17b}$$

$$\frac{\delta^3 y}{\delta x_m^3} = \frac{y_{m+2} - 2y_{m+1} + 2y_{m-1} - y_{m-2}}{2h^3} \qquad \text{III.17c}$$

$$\frac{\delta^4 y}{\delta x_m^4} = \frac{y_{m+2} - 4y_{m+1} + 6y_m - 4y_{m-1} + y_{m-2}}{h^4} \qquad \text{III.17d}$$

Las condiciones frontera en un pilote de cabeza libre - son:

en $x = 0$

$$\frac{\delta^2 y}{\delta x^2} = \frac{M_o}{EI} \qquad \text{III.18}$$

$$\frac{\delta^3 y}{\delta x^3} = \frac{H_o}{EI} \qquad \text{III.19}$$

expresando en forma de diferencias finitas se tiene:

$$y_1 - 2y_o + y_{-1} = \frac{M_o h^2}{EI} \qquad \text{III.18a}$$

$$y_2 - 2y_1 + 2y_{-1} - y_{-2} = \frac{2H_o h^3}{EI} \qquad \text{III.19a}$$

donde H_o y M_o son el momento y la carga horizontal aplicados en la cabeza del pilote.

En un pilote de cabeza restringida al giro, se tiene que la rotación del pilote al nivel de la superficie del suelo es- igual a cero, siendo expresada esta condición frontera en forma de diferencias finitas como:

$$y_1 - y_{-1} = 0 \qquad \text{III.20}$$

En la punta de un pilote flotante o de punta libre se -- tiene que el momento y el esfuerzo cortante son iguales a cero. Expresando en forma de diferencias finitas:

$$y_{n+1} - 2y_n + y_{n-1} = 0 \qquad \text{III.21}$$

$$y_{n+2} - 2y_{n+1} + 2\,y_{n-1} - y_{n-2} = 0 \qquad \text{III.22}$$

La solución de un pilote sometido a cargas laterales -- por medio de diferencias finitas es un desarrollo extenso que debe resolverse por computadora ya que presenta un sistema de n+5 ecuaciones simultáneas, el cual nos permite conocer los - n+5 desplazamientos, donde n+1 es el número de puntos nodales dentro del pilote (Fig. III.4). Los desplazamientos en los - puntos -2, -1, n-1, y n-2 son por supuesto ficticios y son ignorados en el resultado final. En el capítulo VI se profundizará en la solución de pilotes cargados lateralmente por me-- dio de diferencias finitas.

III.4 VARIACIONES AL MODELO DE WINKLER

Una desventaja del modelo propuesto por Winkler es la falta de continuidad, ya que en la realidad la subrasante del suelo es un medio continuo, generalmente no homogéneo y no isótropo. En la práctica el suelo es un medio continuo, en donde al aplicar una carga se sufre una deformación bajo la carga pero además se presentan deformaciones en zonas adyacentes al área cargada (Fig. III.5).

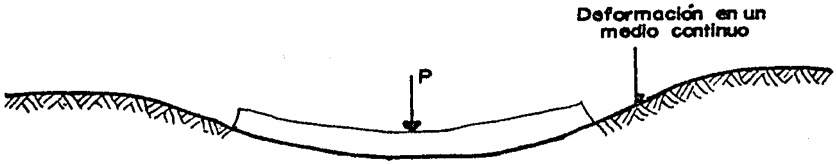


Fig. III.5 Viga apoyada en un medio continuo.

Se han sugerido variaciones al modelo de Winkler, las cuales caracterizan al suelo como un medio continuo, isótropo y linealmente elástico, en función de dos propiedades del material que son el módulo de elasticidad "E_s" y el módulo de Poisson "ν", a diferencia del material en el modelo de Winkler el cual es descrito por uno solo, que es el módulo de reacción de la subrasante. La mayoría de estos ajustes han sido realizados sobre bases intuitivas, pero existe una justificación teórica desarrollada por Vlasov y Leontiev (Ref. 5).

Entre la gran variedad de modelos propuestos que consideran al suelo como un medio continuo, el más conveniente debido a su desarrollo matemático, es aquél en donde la parte superior de los resortes formando la superficie del suelo se encuentran vinculados por una fibra o membrana elástica (Fig. III.6), sin embargo aun esta hipótesis conduce a un desarrollo teórico bastante complicado, el cual se sugiere consultar en el trabajo desarrollado por Vlasov (Ref. 8).

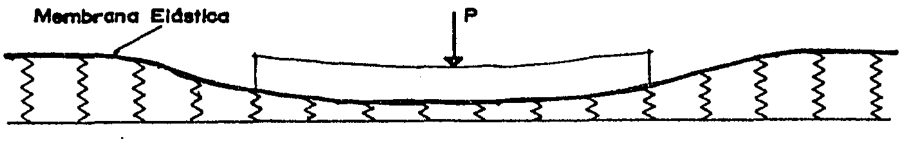


Fig. III.6 Viga apoyada en un medio continuo idealizado.

Desde un punto de vista teórico, la representación del suelo como un medio elástico continuo es más satisfactoria ya que toma en cuenta la naturaleza del suelo, sin embargo el modelo original propuesto por Winkler, es el que ha sido usado y estudiado con mayor amplitud dentro de las cimentaciones, - debido a que proporciona un medio relativamente simple de aná lisis y a que los estudios matemáticos que involucran el com- portamiento de la viga no son tan complicados como los pro- - puestos por otros autores.

En el capítulo V se presentarán soluciones al comporta-- miento de pilotes sometidos a cargas laterales en base a la - teoría del suelo como medio continuo.

CAPITULO IV

RESPUESTA DEL SUELO

Cuando un pilote vertical se encuentra sujeto a cargas laterales, el movimiento de éste es resistido por las presiones desarrolladas entre el suelo y el fuste del pilote. Antes de la aplicación de estas cargas, se tiene una distribución de presiones entre el suelo y el pilote que es considerada igual en cualquier sentido. Al aplicar las cargas laterales, el conjunto suelo-pilote sufre un desplazamiento que produce un cambio en la distribución de presiones original, la cual será distinta para cada nivel de carga aplicado, ya que producirá diferentes desplazamientos, siendo necesario señalar que esta distribución será también distinta para cada profundidad (Fig. IV.1).

En el diseño de pilotes sometidos a cargas laterales es necesario conocer la respuesta del suelo ante dichas cargas, la que se define como la relación de la resistencia del suelo al desplazamiento sufrido por el pilote en distintas profundidades bajo la superficie. Esta respuesta del suelo puede describirse en términos de una curva que relacione la reacción del suelo a la deflexión sufrida por el pilote (Fig. IV.2).

IV.1 COMPORTAMIENTO LINEAL

Realmente la respuesta del suelo está representada por una familia de curvas a lo largo de la profundidad empotrada del pilote, que relaciona la resistencia del suelo con la deformación generada por la carga, en donde las curvas difieren para las distintas profundidades. Como puede observarse en la figura IV.2, la relación entre presión y deflexión en cualquier punto a lo largo del pilote no es lineal, no obstante, frecuentemente se hace uso de un módulo secante de la reacción del suelo, el cual nos permita en base a un comportamiento lineal obtener un módulo de reacción de la subrasante, anteriormente definido por la ecuación III.1. Varios investigadores proponen usar un módulo secante (Fig. IV.3) fijado por

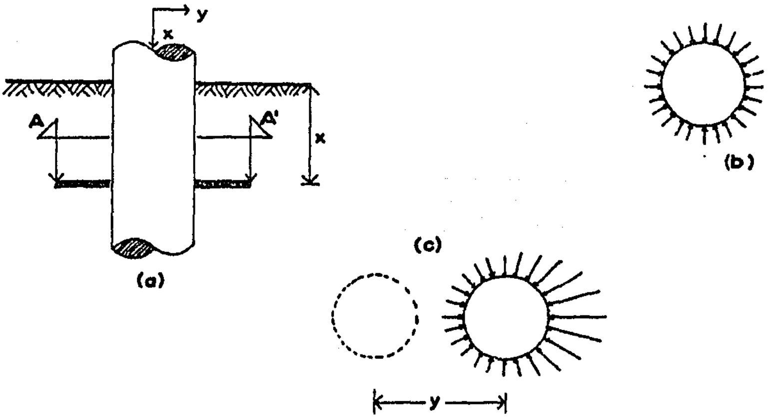


Fig. IV.1 a) Profundidad en la cual el comportamiento del suelo es considerado; b) Corte A-A' . Distribución de esfuerzos del suelo anterior a la carga; c) Corte A-A'. Distribución de esfuerzos después de la carga lateral.

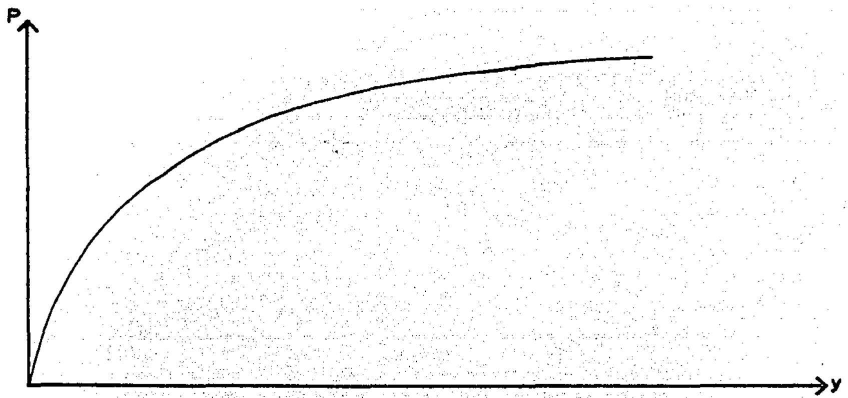


Fig. IV.2 Curva reacción del suelo-deflexión.

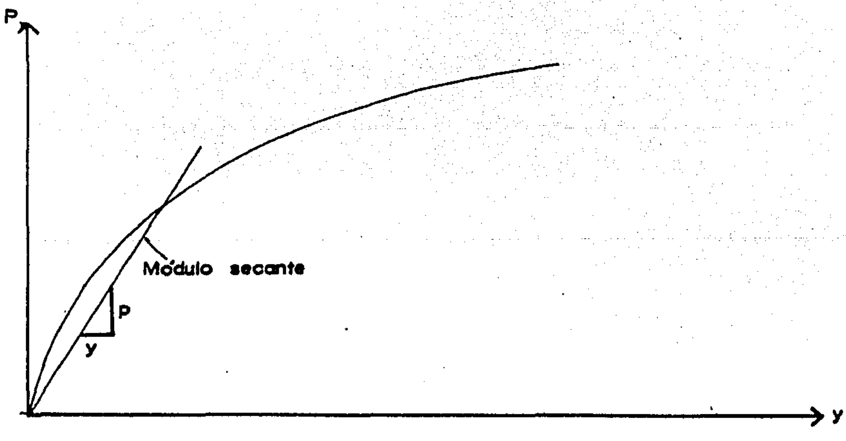


Fig. IV.3 Módulo secante en la curva reacción del suelo-deflexión.

la mitad de la resistencia última del suelo, esto se debe a que las fuerzas horizontales actuantes en pilotes generalmente son de tipo accidental, y de esta manera se asegura trabajar dentro de un rango lineal de la curva reacción del suelo-deflexión (Ref. 9 y 2). Sin embargo, las cargas aplicadas a pilotes son por lo general suficientemente altas para producir deformaciones del suelo cerca de la superficie hasta la falla o bien hasta un rango no lineal, aun cuando las cargas actuantes estén bajo la carga de falla para el conjunto suelo-pilote.

A pesar de los inconvenientes expuestos anteriormente, para considerar un comportamiento lineal en el diseño de pilotes sometidos a cargas laterales, éste se ha utilizado con frecuencia y algunos autores aconsejan usarlo para cálculos preliminares, aunque consideran que el procedimiento más satisfactorio para predecir las deformaciones por el conjunto suelo-pilote, debido a cargas laterales es llevar el análisis no lineal, el cual se presenta en la sección IV.4.

IV.2 COEFICIENTE DE VARIACION DEL MODULO DE REACCION DE LA SUBRASANTE

De acuerdo con las consideraciones anteriores, en donde para cada profundidad existe una distinta curva que relaciona la resistencia del suelo a la deflexión, el módulo de reacción de la subrasante puede variar en forma arbitraria con la profundidad. La curva no lineal de reacción del suelo contra deflexión en distintas profundidades, haría al módulo de reacción de la subrasante k_h función de la profundidad y de la deflexión, sin embargo, considerando una carga determinada, el valor de k_h puede considerarse solamente como función de la profundidad (Fig. IV.4).

Varias distribuciones de k_h a lo largo de la profundidad empotrada del pilote han sido propuestas, siendo la más usada la desarrollada por Palmer y Thompson, la cual es de la forma:

$$k_h = n_h \, x^n \qquad \text{IV.1}$$

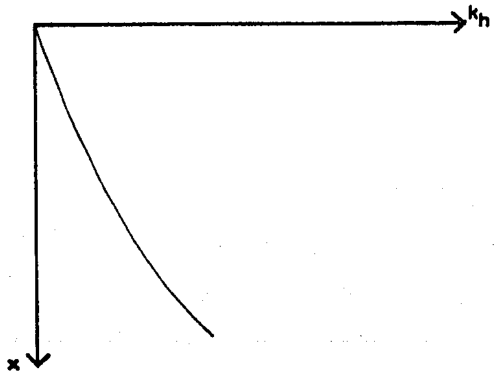


Fig. IV.4 Variación de k_h con la profundidad.

donde k_h = módulo de reacción de la subrasante.

n_h = coeficiente de variación de k_h.

n = exponente que depende del tipo de suelo y que puede ser mayor o igual a cero.

x = profundidad donde se requiere conocer el k_h.

Esta expresión varía para el tipo de suelo, siendo generalmente para suelos arcillosos preconsolidados de la forma:

$$k_h = k_L \left(\frac{x}{L} \right)^n \qquad \text{IV.2}$$

donde k_L = valor de k_h en la punta del pilote.

L = longitud empotrada.

Para el caso de arcillas preconsolidadas, el valor de n es regularmente considerado como cero, de esta manera el módulo sería constante con la profundidad, no obstante, algunos investigadores como Davisson y Prakash, sugieren usar un valor de n = 0.15, esto se debe a que consideran la falla cerca de la superficie del suelo.

En suelos granulares y en arcillas blandas, la ecuación IV.1 es expresada como:

$$k_h = n_h \left(\frac{x}{d} \right) \qquad \text{IV.3}$$

donde d = ancho del pilote.

En suelos granulares y en arcillas blandas, el valor de n ha sido considerado regularmente como igual a uno, lo que implica que el módulo de reacción de la subrasante se incrementa linealmente con la profundidad. Reese y Matlock consideran que la adopción de un incremento lineal del módulo de --reacción de la subrasante con la profundidad, toma en cuenta -la falla del suelo y la no linealidad, ya que los valores del-módulo secante cerca de la cabeza del pilote son muy pequeños, pero se incrementan con la profundidad debido a los altos valores de la reacción del suelo y los bajos niveles de deflexión. Esta consideración es más relevante en pilotes empotrados en -arenas y en arcillas blandas. En suelos arcillosos preconsolidados, la consideración de un módulo de la subrasante constante con la profundidad puede ser más apropiado (Ref. 4).

La variación del módulo de reacción de la subrasante en -forma lineal y la de un módulo constante con la profundidad, -son aplicadas en el diseño de pilotes sometidos a cargas laterales en base a la teoría lineal, de tal modo que el diseño --puede ser resuelto por el método analítico.

En suelos estratificados, la aplicación de la teoría li--neal es difícil y se basa en una corrección del módulo de reacción de la subrasante. La influencia de la estratificación de suelos en el diseño de pilotes sometidos a cargas laterales será presentada en el capítulo V.

Matlock y Reese han sugerido otras relaciones que proporcionan la variación del módulo de reacción de la subrasante a-lo largo de la profundidad empotrada del pilote. Para un comportamiento lineal, ésta es de la forma (Ref. 10):

$$k_h d = k_o + k_1 x \qquad \text{IV.4}$$

Esta relación implica una distribución de k_h, con la profundidad de la forma presentada en la figura IV.5.

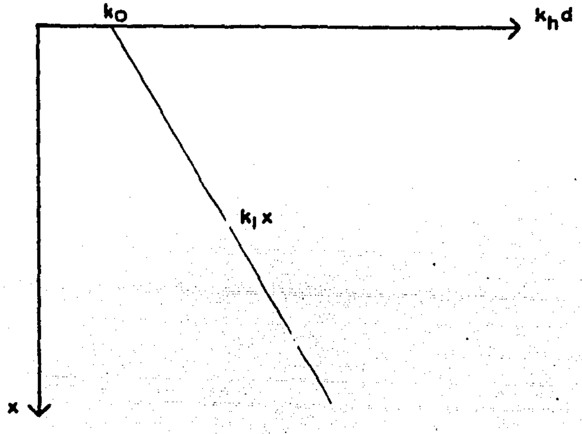


Fig. IV.5 Variación lineal de k_h con la profundidad. (Matlock y Reese).

Matlock y Reese presentan una relación polinomial que expresa la variación de k_h con la profundidad en forma no lineal:

$$k_h d = k_o + k_1 x + k_2 x^2 \qquad \text{IV.5}$$

La relación polinomial expuesta anteriormente nos presenta una distribución de k_h con la profundidad de acuerdo con la figura IV.6. Esta distribución es usada implícitamente en la elaboración de curvas "p-y", las cuales son necesarias en el --

análisis no lineal presentado en la sección IV.4.

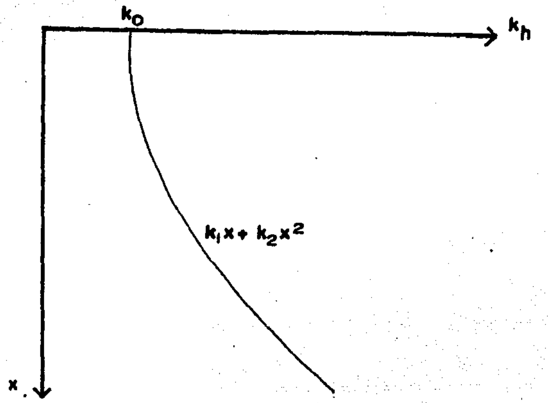


Fig.IV.6 (Variación no lineal de k_h con la profundidad. (Matlock y Reese).

IV.3. DETERMINACION DEL MODULO DE REACCION DE LA SUBRASANTE.

La determinación del módulo de reacción de la subrasante generalmente se lleva a cabo por uno de los siguientes métodos:

1. Pruebas en pilotes instrumentados a escala real.
2. Pruebas de placa.
3. Correlaciones empíricas con otras propiedades del suelo, obtenidas en el laboratorio.

1.- Tal vez la mejor forma de obtener las presiones gene radas entre el suelo y el pilote, y los desplazamientos sufridos por el pilote debido a las cargas laterales, es instrumentar éste en varios puntos dentro de la longitud empotrada y obtener -- las mediciones directamente, sin embargo, este método es demasiado costoso por lo que no es de uso común. Otra dificultad más - es el de poder representar fielmente las condiciones de trabajo- desarrolladas durante la acción de cargas accidentales.

Una alternativa en este método es la de medir las deflexiones y/o la rotación en la superficie de la tierra y, de esta manera, estimar un valor de k_h considerando una distribución apropiada con la profundidad (Ref. 4).

2.- En las pruebas de placa, cada investigador propone distintos valores al módulo de reacción de la subrasante de acuerdo con sus resultados obtenidos. El principal problema con este -- procedimiento es que los resultados obtenidos en una prueba vertical de placa, son usados para obtener el módulo horizontal de- reacción de la subrasante del suelo, lo cual no parece muy conveniente. Sin embargo, es difícil y poco práctico desarrollar - - pruebas de placa horizontales. No obstante los valores de k_h obtenidos a través de pruebas de placa han sido usados ampliamente y gozan de gran popularidad.

Terzaghi consideró que para arcillas duras, el módulo de -- reacción de la subrasante es esencialmente el mismo en forma horizontal y vertical, independientemente de la profundidad. El - sugirió la siguiente relación para la obtención de k_h:

$$k_h = \frac{1}{1.5 \quad d} \, k_{s1} \qquad \text{IV.6}$$

donde

k_{s1} = módulo de reacción para una placa cuadrada horizontal, de ancho igual a 30 cm.

d = ancho o diámetro del pilote en forma adimensional.

Los valores de k_{s1} propuestos por Terzaghi para arcillas duras, están mostrados en la tabla IV.1.

Scott considera que el comportamiento del suelo en un pilote cargado lateralmente, en realidad puede ser representado como dos resortes, sin embargo, de pruebas en arcillas duras analizadas por él, propone multiplicar por un factor de 1.5 el valor de k_{s1} desarrollado por Terzaghi (Tabla IV.2) (Ref. 5).

Bowles propone valores de k_h para arcillas duras basados en sus propias investigaciones y considera que se tiene un comportamiento distinto en arcillas duras bajo el nivel freático, que sobre éste. Para arcillas duras sobre el nivel freático, sugiere valores de k_h entre 5.62 y 22.47 Kg/cm^3 y en arcillas bajo el nivel freático, propone valores de k_h entre 2.81 y 11.24 Kg/cm^3. No obstante, Bowles no presenta los valores aconsejables a usarse dentro de los rangos considerados por él, para el k_h (Ref. 11).

Para suelos cohesivos blandos, se considera que k_h, se incrementa linealmente con la profundidad en la forma siguiente; $k_h = n_h \left(\frac{x}{d} \right)$. En la tabla IV.3, están algunos valores sugeridos para n_h en suelos cohesivos blandos.

En arenas donde se considera que k_h se incrementa con la profundidad en la misma forma que para suelos cohesivos suaves, los valores dados por Terzaghi se encuentran en la tabla IV.4. Sin embargo, cuando estos valores han sido usados en el estudio de deflexiones laterales en pilotes, se ha encontrado que sobreestiman los desplazamientos de éstos. De esta manera Scott propone doblar los valores de Terzaghi (tabla IV.5).

3.- Por medio de algunas pruebas de laboratorio, varios investigadores proponen distintas expresiones para la obtención del módulo de reacción de la subrasante. Vesic en base a sus estudios sobre vigas horizontales llegó a la ecuación IV.7 que relaciona el módulo de reacción de la subrasante con el módulo de elasticidad y con el módulo de Poisson.

$$k_h d = 0.65 \sqrt[12]{\frac{E_s\, d^4}{E\, I}} \left(\frac{E_s}{1 - \nu^2} \right) \qquad \text{IV.7}$$

donde

E_s = módulo de elasticidad del suelo

EI = rigidez de la viga

ν = módulo de Poisson

d = ancho de la viga

TABLA IV.1

Valores de k_{s1} en kg/cm^3 en arcillas preconsolidadas para placas cuadradas de 30 cm. (Terzaghi).

Consistencia de la arcilla	Firme	Muy Firme	Dura
Resistencia al esfuerzo cortante no drenado $(Kg/cm^2)\,c_1$	0.49 - 0.98	0.98- 1.96	1.96
Rango de valores de k_{s1}	48.93 -97.85	97.75-195.71	195.71
Valores propuestos de k_{s1}	73.39	146.78	293.56

TABLA IV.2

Valores de k_{s1} en Kg/cm^3 en arcillas preconsolidadas para placas cuadradas de 30 cm. (Scott)

Consistencia de la arcilla	Firme	Muy Firme	Dura
Resistencia al esfuerzo de compresión no confinado (Kg/cm^2) q_u	0.98 - 1.96	1.96 - 3.92	3.92
Rango de valores de k_{s1}	73.39 -146.78	146.78 -293.56	293.56
Valores propuestos de k_{s1}	110.09	220.17	440.34

Para obtener el valor de k_h en la ecuación IV.6 el valor del ancho del pilote (d) debe ser introducido en forma adimensional.

TABLA IV.3

VALORES DE n_h PARA SUELOS COHESIVOS BLANDOS. (Kg/cm^3)

	n_h ($x\ 10^{-3}$)	
Arcilla suave normalmente consolidada	70	Murthy
	16.64 - 352.3	Reese y Matlock
	27.74 - 55.48	Davisson y Prakash
Arcilla orgánica normal-- mente consolidada	35-100	Murthy
	11.10 - 27.74	Peck y Davisson
	11.10 - 83.21	Davisson
Turba	5.548	Davisson
	2.774- 11.10	Wilson y Hilts
Loess	804.4 - 1110	Bowles

TABLA IV.4

VALORES DE n_h PARA ARENAS

(Kg/cm^3). (Terzaghi)

Descripción de la arena	SUELTA	MEDIA	COMPACTA
n_h - arena seca o húmeda	0.2247	0.6742	1.7978
n_h - arena sumergida	0.1284	0.4495	1.0915

TABLA IV.5

VALORES DE n_h PARA ARENAS

(Kg/cm^3). (Scott)

Descripción de la arena	SUELTA	MEDIA	COMPACTA
n_h - arena seca o húmeda	0.4495	1.3484	3.5957
n_h - arena sumergida	0.2568	0.8989	2.1831

La ecuación anterior permite conocer el módulo vertical de reacción de la subrasante. Para el caso de un pilote, el cual se considera rodeado por el suelo, la ecuación IV.7 cambia a la ecuación IV.8, para obtener el módulo horizontal de reacción de la subrasante.

$$k_h d = 1.3 \sqrt[12]{\frac{E_s d^4}{E\ I}} \left(\frac{E_s}{1 - \nu^2}\right) \qquad \text{IV.8}$$

Para esta ecuación el valor de E_s puede obtenerse de:

1.- Pruebas triaxiales, con el módulo secante entre 0 y 0.25 y 0.5 el último esfuerzo desviador.

2.- Pruebas de penetración estandar, por medio de la siguiente expresión:

$$E_s = 6\ N \quad (\mathrm{Kg/cm^3}) \qquad \text{IV.9}$$

donde N = número de golpes.

Este valor sólo puede usarse en valores aproximados, ya que tiene un promedio de error entre un ± 20%, llegando a errores máximos de hasta un 100%.

3.- Datos de pruebas de consolidación en suelos cohesivos para obtener el coeficiente de deformación volumétrica, el que se usará en la obtención del módulo de elasticidad.

$$E_s = \frac{3\ (1 - 2\nu)}{m_v} \qquad \text{IV.10}$$

Esta ecuación es muy sensible al valor del módulo de Poisson que se aplique.

Glick propone en base al trabajo de otros una relación distinta para la obtención del módulo de reacción de la subrasante a partir del módulo de elasticidad y de la relación largo a ancho del pilote.

$$k_h = \frac{22.24\ E_s\ (1 - \nu)}{(1 + \nu)\ (3-4\ \nu)\ [2Ln\ (2\ \ L/d) - 0.443]} \qquad \text{IV.11}$$

Para rangos prácticos de 2L/d de 90 a 120 y una relación de Poisson de 0.2 a 0.4, la ecuación IV.11 para propósitos prácticos es:

$$k_h d \approx 0.8 \text{ a } 1.0\ \ E_s \qquad \text{IV.12}$$

Se han propuesto otras correlaciones empíricas, las cuales nos permiten conocer el valor de k_h. Para arcillas preconsolidadas donde se considera un valor constante de k_h con la profundidad, Broms relaciona el valor de k_h al módulo secante E_{50} en un medio el esfuerzo último, en una prueba no drenada como:

$$k_h d = 1.67\ \ E_{50} \qquad \text{IV.13}$$

Usando un valor de E_{50} entre 50 a 200 veces la resistencia al esfuerzo cortante en una prueba no drenada c_u Skempton sugiere:

$$k_h d = (80 \text{ a } 320) \quad c_u \qquad \text{IV.14}$$

Es importante la consideración de la ecuación IV.12, ya que algunos investigadores aún usando la hipótesis de Winkler, en su desarrollo teórico usan el módulo de elasticidad igualado al módulo de reacción de la subrasante multiplicado por el ancho del pilote. De esta manera se tiene:

$$k_h d = E_s \qquad \text{IV.15}$$

IV.4 COMPORTAMIENTO NO LINEAL

Como se discutió anteriormente en la sección IV.1, realmente la relación entre presión y deflexión en cualquier punto a lo largo del pilote no es lineal. Se han propuesto varios procedimientos para tomar en cuenta esta no linealidad, sin embargo, parece que el que ha tenido mayor aceptación y se ha usado en forma más amplia, es el desarrollado por Reese y sus colaboradores (Ref. 12), conocido como "p-y" (donde: p= presión, y = deflexión). En este método se obtiene una solución por diferencias finitas de la siguiente ecuación:

$$\frac{\delta^4 y}{\delta x^4} + P_x \frac{\delta^2 y}{\delta x^2} + p = 0 \qquad \text{IV.16}$$

Esta ecuación es una forma más general de la ecuación III.6, en la cual se toman en consideración los efectos de la carga axial y la variación de la rigidez del pilote con la --

profundidad. Esta solución requiere de la construcción de -- las curvas "p-y", para varios puntos a lo largo del pilote -- (Fig. IV.6).

Las curvas mostradas en la figura IV.6, implican que el- comportamiento del suelo en una profundidad particular es in- dependiente del comportamiento del suelo en otras profundida- des. Aunque ésto no es realmente cierto, Reese dice que para propósitos prácticos es bastante aceptable.

La respuesta del suelo a cargas laterales, definida por- la relación "p-y", es dependiente de variables tales como el- tipo de suelo, parámetros de resistencia al esfuerzo cortante, condiciones de humedad, esfuerzos efectivos, historia de es-- fuerzos y condiciones de carga. Las curvas "p-y", serán dife rentes para períodos de carga estática sostenida, carga cícli ca y carga dinámica, de las cuales las dos primeras son las - que han sido estudiadas con mayor amplitud.

Los procedimientos para la construcción de curvas "p-y", se basan en resultados de pruebas en pilotes instrumentados a escala real. Estos procedimientos son de investigadores ta-- les como Reese, Matlock, Mc Clelland y Focht, y Sullivan. To dos estos procedimientos son similares y los más aceptados -- son los desarrollados por Matlock y Reese, debido a que los - otros son obtenidos de casos muy particulares.

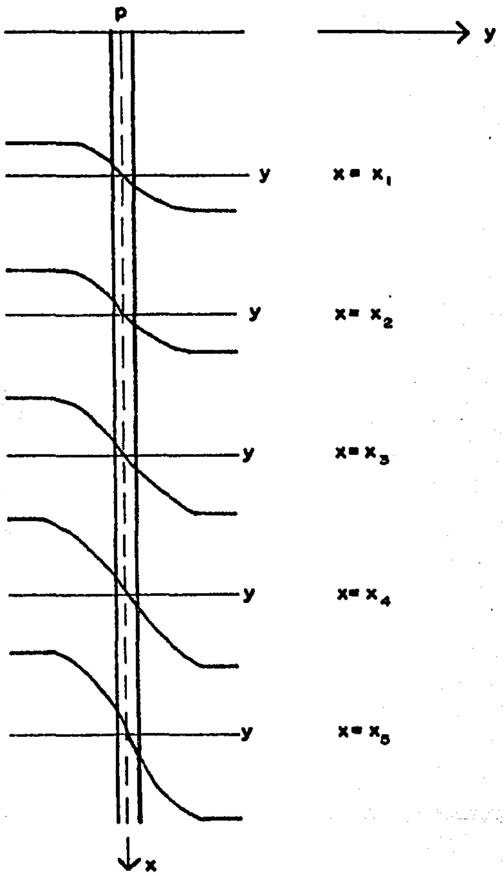


Fig. IV.6 Curvas "p-y"

A continuación presentaremos la construcción de las curvas "p-y", para los siguientes casos: arcillas blandas bajo el NAF, arcillas duras bajo el NAF, arcillas duras sobre el NAF y are--nas.

Curvas "p-y" para arcillas blandas bajo el NAF.

Matlock presenta procedimientos para la construcción de - curvas p-y para arcillas blandas bajo el NAF para dos condiciones de carga: estática en períodos cortos y cíclica. La carga estática en períodos cortos puede provocarse por la fuerza de- barcos en una plataforma marina, mientras que la carga cíclica puede ser provocada por fuerzas de oleaje durante tormentas.

a) Carga estática en períodos cortos.

1.- Obtener en la mejor forma posible la variación de la- resistencia al esfuerzo cortante y del peso específico efectivo del suelo con la profundidad. Estimar el valor de ε_{50} la- deformación correspondiente a un medio el máximo esfuerzo desviador (o la máxima diferencia de esfuerzos principales). Si- los valores de ε_{50} no se encuentran disponibles, pueden usarse los valores sugeridos por Skempton los cuales se muestran - en la tabla IV.6.

2.- Calcular la resistencia última del suelo por unidad - de longitud del pilote, p_u, usando el valor más pequeño proporcionado por las ecuaciones II.1 y II.2. El valor de M en la - ecuación II.1, corresponde a 0.5. El valor de p_u deberá ser - calculado en cada punto donde se requiera una curva p-y, en base a la resistencia al esfuerzo cortante en ese punto.

TABLA IV.6

Valores de ε_{50} en arcillas

Consistencia de la arcilla	ε_{50}
Suave	0.020
Media	0.010
Dura	0.005

3.- Calcular la deflexión, y_{50}, correspondiente a un medio la resistencia última del suelo mediante la siguiente ecuación:

$$y_{50} = 2.5 \; \varepsilon_{50} \; d \qquad \text{IV.17}$$

4.- Los puntos que describen la curva p-y, son calculados- de la siguiente relación:

$$\frac{p}{p_u} = 0.5 \left(\frac{y}{y_{50}}\right)^{1/3} \qquad \text{IV.18}$$

El valor de p permanece constante después de $y = 8y_{50}$.

La figura IV.7a muestra la construcción de las curvas p-y en arcillas blandas, bajo períodos cortos de carga estática.

b) Carga cíclica

1.- Construir las curvas p-y, en la misma manera que se - hizo para el caso de carga estática en períodos cortos para va lores de p menores que 0.72 p_u.

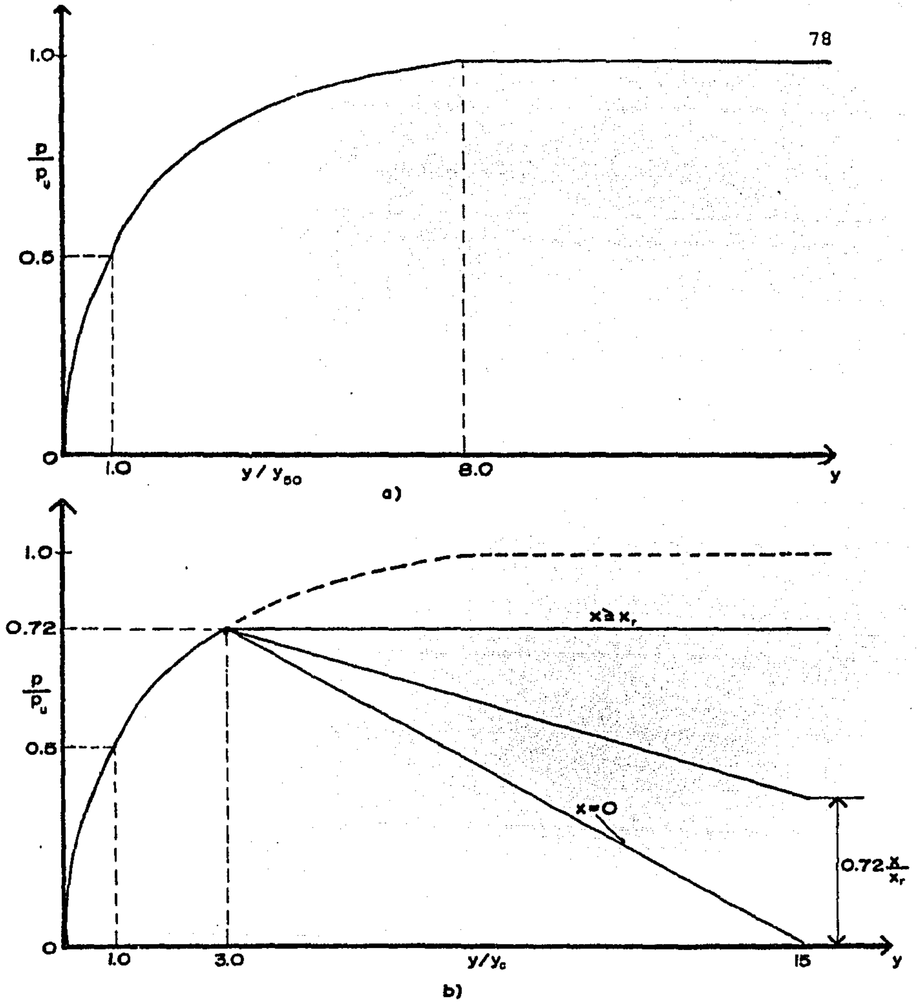


Fig. IV.7 Curvas p-y para arcillas blandas:
a) carga estática; b) carga cíclica.

2.- Resolver las ecuaciones II.1 y II.2 en forma simultánea para encontrar la profundidad de transición x_r. Si la resistencia al esfuerzo cortante y el peso específico son constantes en la parte superior, se tiene:

$$x_r = \frac{6cd}{d + 0.5c} \qquad \text{IV.19}$$

3.- Si la profundidad de la curva p-y es mayor o igual que la profundidad de transición x_r, entonces $p = 0.72\ p_u$, para todos los valores de y mayores que $3y_{50}$.

4.- Si la profundidad de la curva p-y es menor que x_r, entonces el valor de p decrece de $0.72\ p_u$ $y = 3y_{50}$ a el valor dado por la expresión siguiente en $y = 15y_{50}$.

$$p = 0.72\ p_u \quad \left(\frac{x}{x_r}\right) \qquad \text{IV.20}$$

El valor de p permanece constante después de $y = 15y_{50}$.

La figura IV.7b muestra la construcción de las curvas p-y, en arcillas blandas bajo carga cíclica.

Curvas p-y para arcillas duras sobre el NAF

Reese y Welch presentan procedimientos para la construcción de curvas p-y, para arcillas duras localizadas sobre el NAF (Ref. 2). Al igual que en el caso anterior para arcillas blandas, se presentan también dos regímenes de carga: carga estática en períodos cortos y carga cíclica.

a) Carga estática en períodos cortos.

1.- Obtener en la mejor forma posible la variación de la resistencia al esfuerzo cortante y del peso específico del suelo con la profundidad. Estimar el valor de ε_{50}, la deformación correspondiente a un medio el máximo esfuerzo desviador (o la máxima diferencia de esfuerzos principales). Si los valores de ε_{50} no se encuentran disponibles, pueden usarse los valores de la tabla IV.6, siendo los valores mayores más conservadores.

2.- Calcular la resistencia última del suelo por unidad de longitud del pilote, p_u, usando el valor más pequeño proporcionado por las ecuaciones II.1 y II.2 (al usar la ecuación II.1, la resistencia al esfuerzo cortante c, se toma como el promedio de la superficie del suelo a la profundidad considerada). El valor de M en la ecuación II.1 corresponde a 0.5.

3.- Calcular la deflexión y_{50}, correspondiente a un medio la resistencia última del suelo, por medio de la ecuación IV.17.

4.- Los puntos que describen la curva p-y, son calculados de la siguiente ecuación:

$$\frac{p}{p_u} = 0.5 \left(\frac{y}{y_{50}}\right)^{1/4} \qquad \text{IV.21}$$

5.- Después de $y = 16y_{50}$, p es igual a p_u para todos los-valores de y.

b) Carga Cíclica.

1.- Construir la curva p-y para períodos cortos de carga-estática por el procedimiento presentado anteriormente.

2.- Determinar el número de veces que se aplicará la su--puesta carga lateral al pilote.

3.- Obtener el valor de C (parámetro que describe el efecto de la repetición de cargas sobre la deformación) para va- -rios valores de $\frac{p}{p_u}$, de una relación desarrollada por prue--bas de laboratorio, o en la ausencia de estas pruebas de la siguiente ecuación:

$$C = 9.6\left(\frac{p}{p_u} \right)^4 \qquad \text{IV.22}$$

4.- En los valores de p, correspondiente a los valores de $\frac{p}{p_u}$ seleccionados en el paso 3, calcular nuevos valores de y-para la carga cíclica de la ecuación siguiente;

$$y_c = y_s + y_{50} \; C \log N \qquad \text{IV.23}$$

donde y_c = deflexión bajo N ciclos de carga.

y_s = deflexión bajo carga estática en períodos cortos.

y_{50} = deflexión bajo carga estática en períodos cor--tos para un medio la resistencia última.

N = número de ciclos de la carga aplicada.

5.- La curva p-y_c define la respuesta del suelo después de N ciclos de carga.

Curvas p-y para arcillas duras bajo NAF.

Las curvas para arcillas duras bajo el NAF, también son presentadas por Reese para carga estática en períodos cortos y para carga cíclica.

a) Carga estática en períodos cortos.

1.- Obtener los valores de resistencia al esfuerzo cortante del suelo en forma no drenada c, pero específico sumergido γ', y diámetro del pilote d desde la superficie del suelo hasta la profundidad en estudio.

2.- Calcular el promedio de resistencia al esfuerzo cortante no drenado del suelo, c , desde la superficie hasta la profundidad H, donde se requiere la construcción de la curva p-y.

3.- Usar las siguientes ecuaciones para calcular la resistencia del suelo en la profundidad H:

a. Resistencia última del suelo en la superficie.

$$p_{c1} = 2c_a d + \gamma' dH + 2.83\, c_a H \qquad \text{IV.24}$$

b. Resistencia última del suelo cerca de la superficie.

$$p_{c2} = 11c\, d \qquad \text{IV.25}$$

TABLA IV.7

Valores de k en Kg/cm^3 para arcillas duras.

(Reese)

*Promedio de resistencia al esfuerzo cortante no drenado (Kg/cm^2) c_u	0.49-0.98	0.98-1.96	1.96-3.91
k_s (carga estática)	13.87	27.74	55.48
k_c (carga cíclica)	5.55	11.10	22.19

*El promedio de resistencia al esfuerzo cortante deberá ser calculado de la resistencia al esfuerzo cortante del suelo a una-profundidad de 5 diámetros del pilote.

TABLA IV.8

Valores representativos se ε_{50} para arcillas duras

Promedio de resistencia al esfuerzo cortante no drenado (Kg/cm^2)

	0.49 - 0.98	0.98 -1.96	1.96 - 3.91
ε_{50}	0.007	0.005	0.004

TABLA IV.9

Valores de k para arenas (Kg/cm^3)

(Reese)

Descripción de la arena	suelta	media	compacta
n_h-arena seca o húmeda	0.6935	2.4964	6.2411
n_h-arena sumergida	0.5548	1.6643	3.4673

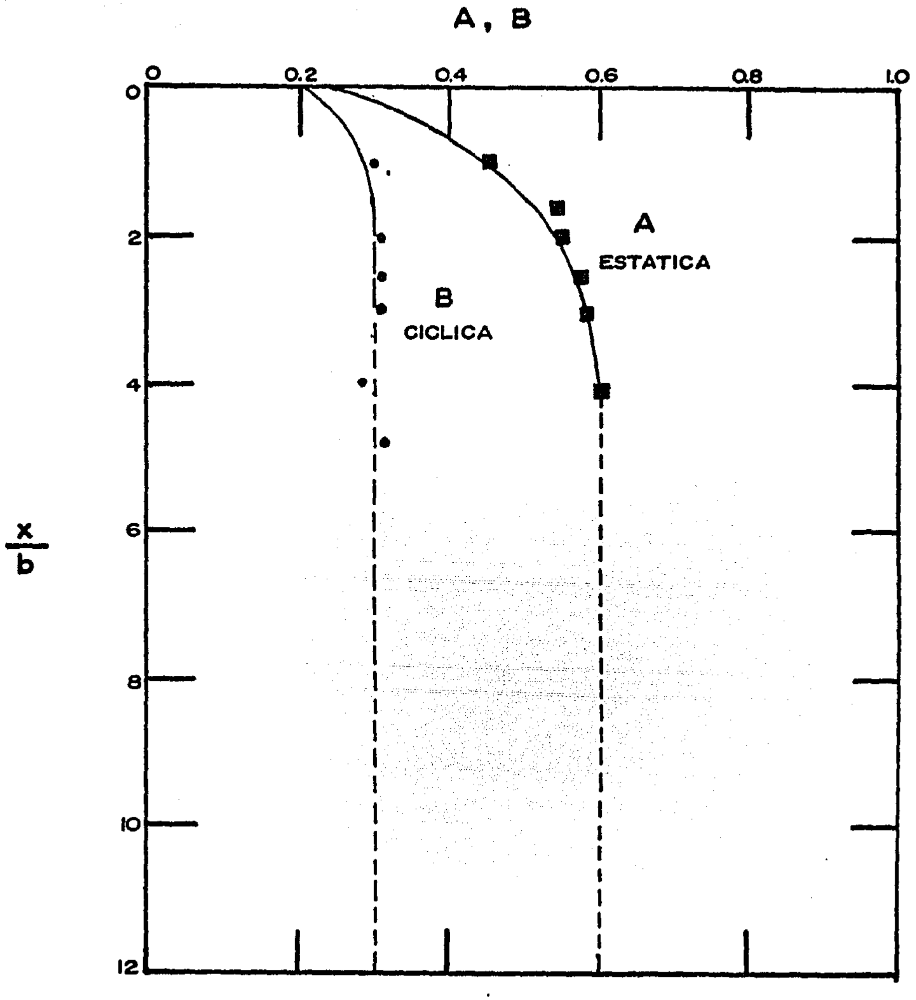


Fig.IV.8 Valores de las constantes A y B.

Se debe usar el valor de p_c más pequeño, proporcionado entre las ecuaciones IV.24 y IV.25.

4.- Escoger el valor apropiado de A de la figura IV.8 por medio de la profundidad particular en estudio en forma adimensional.

5.- Establecer la porción inicial de la curva p-y en base a la siguiente relación:

$$p = kxy$$

Usar el valor apropiado de k, obtenido de la tabla IV.7,- el cual es el módulo tangente inicial en la curva p-y.

6.- Calcular y_{50} por medio de la siguiente expresión:

$$y_{50} = \varepsilon_{50} d \qquad \text{IV.27}$$

Usar un valor apropiado de ε_{50} de la tabla IV.8.

7.- Proyectar la primera porción parabólica de la curva- p-y:

$$p = 0.5\ p_c \left(\frac{y}{y_{50}}\right)^{0.5} \qquad \text{IV.28}$$

El valor de y debe estar comprendido entre la ecuación - IV.26 y Ay_{50}, esto es:

Ecuación IV.26 $\leq$ y $\leq Ay_{50}$ (si no existe intersección rige la ecuación IV.28).

8.- Establecer la segunda porción parabólica de la curva:

$$p = 0.5\ p_c \left(\frac{y}{y_{50}} \right)^{0.5} - 0.055\ p_c \left(\frac{y - Ay_{50}}{Ay_{50}} \right)^{1.25} \qquad \text{IV.29}$$

$$Ay_{50} \leq y \leq 6\ Ay_{50}$$

9.- Construir la siguiente porción lineal de la curva p-y:

$$p = 0.5\ p_c\ (6\ A)^{0.5} - 0.411 p_c - \frac{0.0625}{y_{50}}\ p_c\ (y - 6\ A\ y_{50})$$

$$6Ay_{50} \leq y \leq 18Ay_{50} \qquad \text{IV.30}$$

10.- Establecer la porción final de la curva p-y

$$p = 0.5\ p_c\ (6\ A)^{0.5} - 0.411\ p_c - 0.75\ p_c A \qquad \text{IV.31}$$

$$18Ay_c \leq y$$

b) Carga Cíclica

1.- Los pasos 1, 2, 3, y 5 son los mismos que para el caso de carga estática en períodos cortos.

4.- Escoger el valor apropiado de B de la figura IV.8, - - en base a la profundidad deseada en forma adimensional.

6.- Calcular los siguientes valores:

$$y_{50} = \varepsilon_{50}\ d \qquad \text{IV.32}$$

$$y_p = 4.1\ A\ y_{50} \qquad \text{IV.33}$$

Usar un valor apropiado de ε_{50} de la tabla IV.9

7.- Establecer la porción parabólica de la curva p-y.

$$p = B\ p_c \left(1 - \left[\frac{y - 0.45\ y_p}{0.45\ y_p} \right]^{2.5} \right) \qquad \text{IV.34}$$

El valor de y, debe estar comprendido entre la ecuación-IV.26 y 0.6 y_p, esto es:

Ecuación 14 $\leq y \leq 0.6\ y_p$ (si no hay intersección rige-la ecuación IV.34).

8.- Construir la siguiente porción lineal de la curva --p-y:

$$p = 0.936\ B\ p_c - \frac{0.085}{y_{50}}\ p_c\ (y - 0.6\ y_p) \qquad \text{IV.35}$$

$$0.6\ y_p \leq y \leq 1.8\ y_p$$

9.- Establecer la porción final de la curva p-y:

$$p = 0.936\ B\ p_c - \left(\frac{0.102}{y_{50}} \right) p_c \qquad \text{IV.36}$$

$$1.8\ y_p \leq y$$

Curvas p-y para arenas

Reese y Cox presentan el siguiente procedimiento para la- construcción de las curvas p-y tanto para carga estática, como para carga cíclica (Ref. 12).

1.- Obtener el ángulo de fricción interna ϕ, peso específico γ', y el ancho del pilote desde la superficie del suelo - hasta la profundidad en estudio.

2.- Realizar los siguientes cálculos, los cuales serán -- usados para encontrar la resistencia del suelo:

$$\alpha = \frac{\phi}{2} \; ; \; \beta = 45° + \frac{\phi}{2}; \; K_o = 0.4 \; ; \; K_a = \tan^2 (45° - \frac{\phi}{2})$$

3.- Usar las ecuaciones II.3 y II.4 para calcular la re-- sistencia del suelo:

a) Resistencia última cerca de la superficie del suelo

$$p_{ct} = \gamma' H \left[\frac{K_o H \tan \phi \; \operatorname{sen} \beta}{\tan (\beta - \phi) \cos \alpha} + \frac{\tan \beta}{\tan (\beta - \phi)} (d + H \tan \beta \tan \alpha) \right.$$

$$\left. + K_o H \tan \beta (\tan \phi \operatorname{sen} \beta - \tan \alpha) - K_a d \right] \qquad \text{II.3}$$

b) Resistencia última del suelo a profundidades mayores

$$p_{cd} = K_a \; d \gamma' H (\tan^8 \beta - 1) + K_o \; d \gamma' H \tan \phi \; \tan^4 \beta \qquad \text{II.4}$$

4.- Por medio de la igualación de las ecuaciones II.3 y- II.4, encontrar la profundidad de transición x_t. A profundidades menores a x_t, usar la ecuación II.3 para encontrar la - resistencia última del suelo; mientras que para profundidades mayores a x_t, usar la ecuación II.4.

5.- Seleccionar la profundidad donde se requiera la curva p-y.

6.- Establecer y_u como 3d/80. Calcular p_u de la siguiente ecuación:

$$p_u = A\,p_c \qquad \text{IV.37}$$

Usar el valor apropiado de A, de la figura IV.9 en base a la profundidad en estudio, en forma adimensional ya sea para carga estática o carga cíclica. Usar el valor apropiado - de p_c, obtenido de la ecuación II.3 o II.4, de acuerdo a la - profundidad donde se requiera la construcción de la curva -- p-y.

7.- Establecer y_m como d/60. Calcular p_m de la siguiente ecuación:

$$p_m = Bp_c \qquad \text{IV.38}$$

Usar el valor apropiado de B de la figura IV.10 en base a la profundidad en estudio en forma adimensional, según sea el caso de carga estática o carga cíclica. Usar el valor - - apropiado de p_c.

8.- Establecer la porción inicial de la curva p-y, por -

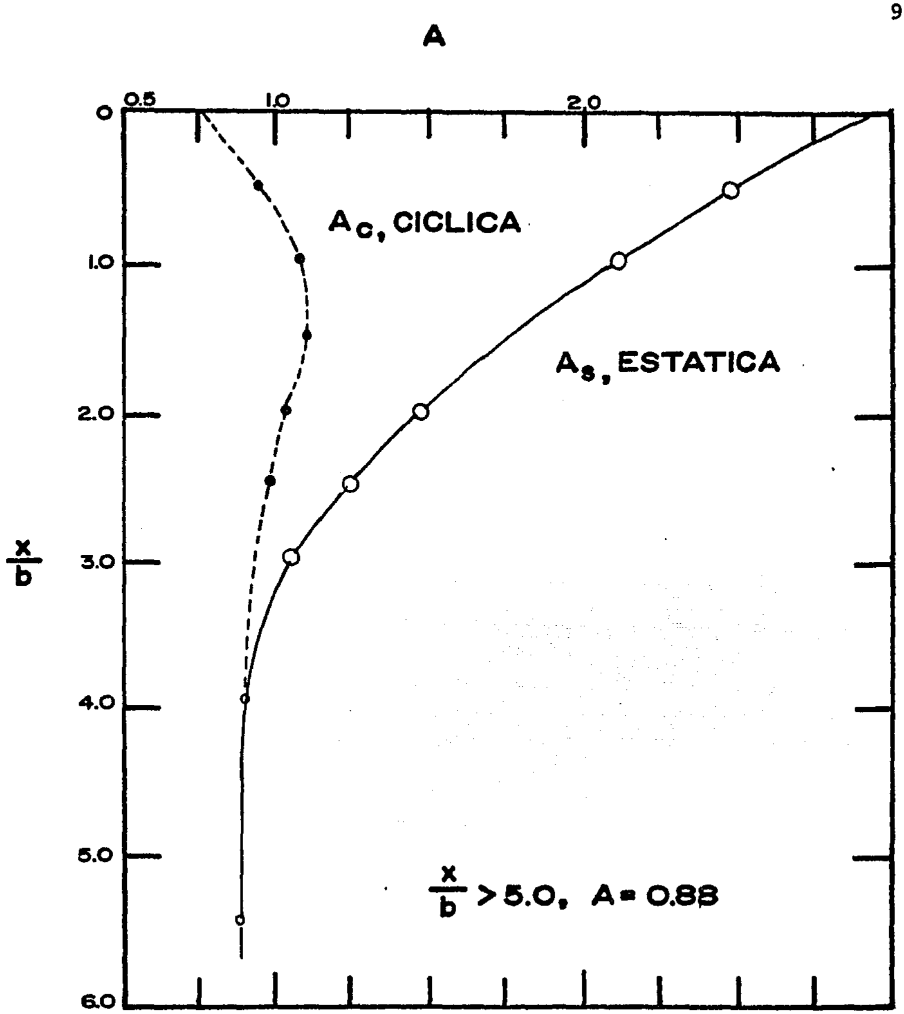


Fig. IV.9. Coeficiente adimensional A para encontrar la resistencia última contra profundidad.

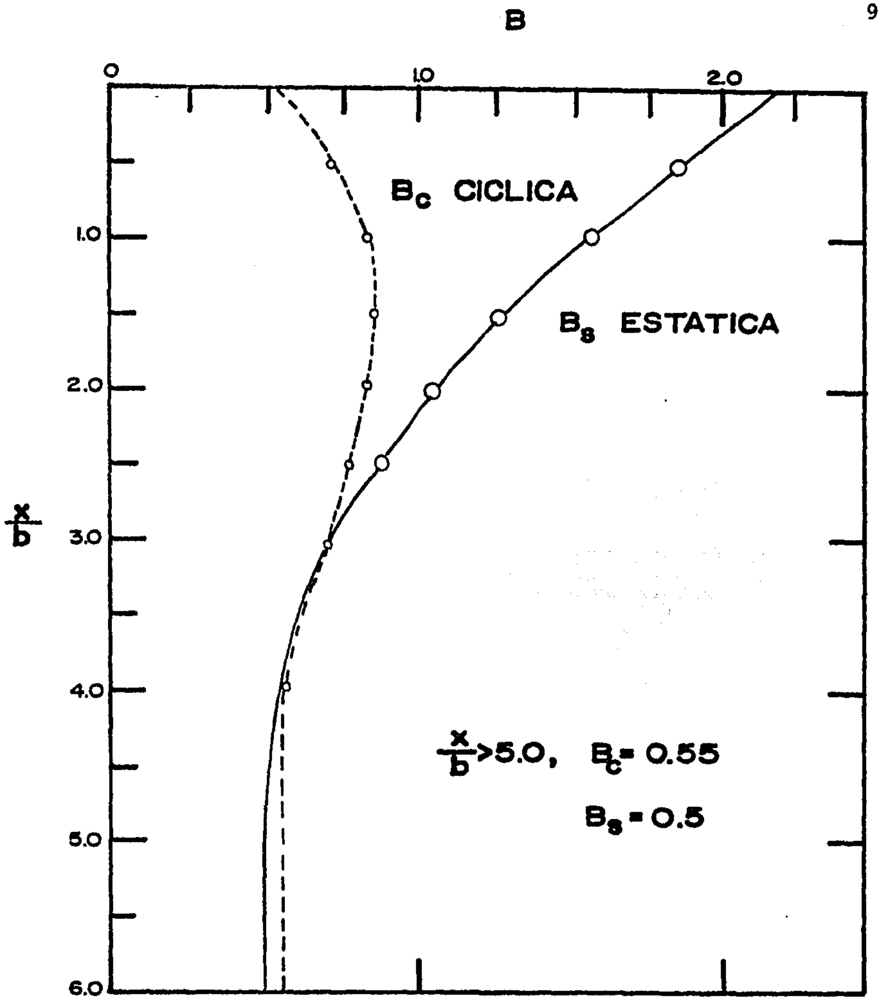


Fig. IV.10 Coeficiente adimensional B para encontrar la resistencia del -- suelo contra profundidad.

medio de la selección apropiada del valor de k de la tabla -- IV.9

$$p = k \times y \qquad \text{IV.39}$$

9.- Construir la primera porción parabólica entre los -- puntos "k" y "m", de acuerdo con la siguiente relación:

$$p = C\, y^{1/n} \qquad \text{IV.40}$$

Los puntos "k" y "m" pueden observarse en la figura IV.11

10.- Graficar la parábola entre los puntos "k" y "m", -- por medio de las siguientes relaciones.

a. Obtener la última porción lineal entre los puntos "m"- y "u", por medio de la siguiente relación:

$$m = \frac{p_u - p_m}{y_u - y_m} \qquad \text{IV.41}$$

La forma final de la curva p-y para arenas puede observarse en la figura IV.11.

b. Obtener el exponente n de la porción parabólica por- medio de la siguiente relación:

$$n = \frac{p_m}{m y_m} \qquad \text{IV.42}$$

c. Obtener el coeficiente C de la porción parabólica:

$$C = \frac{p_m}{(y_m)^{1/n}} \qquad \text{IV.43}$$

d. Determinar el punto k como:

$$y_k = \frac{C}{kx}^{(n/n-1)} \qquad \text{IV.44}$$

e. Calcular el número apropiado de puntos en la parábola por medio de la ecuación IV.40.

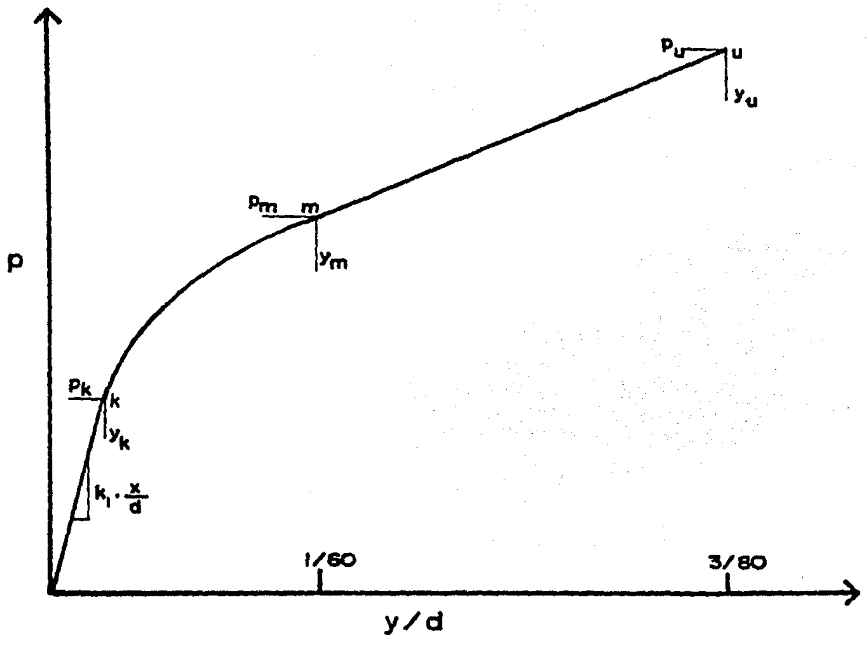


Fig. IV.11 Curva p-y para arenas.

CAPITULO V

SOLUCION AL COMPORTAMIENTO LINEAL

Los primeros análisis que se obtuvieron en pilotes cargados lateralmente, se hicieron suponiendo el módulo de reacción de la subrasante constante, o con un incremento lineal con la profundidad. Aunque en la realidad este incremento no es lineal, las soluciones que lo consideran lineal, se han usado frecuentemente y aún en la actualidad gozan de gran popularidad. Esto se debe a que tienen la ventaja de poder calcular las deflexiones y rotaciones del pilote con una mayor rapidez.

Estas soluciones son aplicables a pilotes que guardan una rigidez EI constante con la profundidad, asimismo, es importante señalar que al hacerse un análisis lineal del suelo, es necesario escoger valores apropiados de su módulo secante (Fig. IV.3), de acuerdo con las cargas de trabajo a que se someterá el pilote.

V.1 MODULO DE REACCION DE LA SUBRASANTE CONSTANTE CON LA PROFUNDIDAD.

El procedimiento analítico permite resolver la ecuación de la viga (aplicada a un pilote cargado lateralmente) por me dio de ecuaciones auxiliares, cuando el suelo tiene un módulo de reacción de la subrasante constante, o tiene un incremento lineal con la profundidad. Este procedimiento fué propuesto por Hetenyi, y de él se han derivado otras soluciones, las cuales obtienen las deflexiones y rotación del pilote con la ayuda de tablas y de gráficas.

Ecuaciones de Hetenyi

El planteamiento básico para la resolución de un pilote cargado lateralmente por medio de las ecuaciones auxiliares desarrolladas por Hetenyi (Ref. 6), fué presentado en la sección III.3.

El valor de las constantes C_1, C_2, C_3 y C_4, obtenidos por medio de las condiciones frontera (ecuaciones III.10 y III.11), son sustituidos en las ecuaciones III.9, obteniéndose de esta manera las expresiones que permiten calcular los valores de deflexión (y), curvatura (s), momento (M) y cortante (Q), que se desarrollan en el pilote.

Para un pilote de cabeza libre al giro, sujeto a una carga horizontal H en la superficie del suelo, estas expresiones son:

$$y = \frac{2\,H\beta}{k_h\,d}\left[\frac{\operatorname{sen} h\,\beta L \cos \beta\, x \cos h\,\beta\,(L-x) - \operatorname{sen}\beta L\, \cos h\,\beta x \cos \beta\,(L-x)}{\operatorname{sen} h^2\,\beta\,L - \operatorname{sen}^2 \beta\,L}\right]$$

V.1a

$$s = \frac{2\,H\,\beta^2}{k_h\,d}\left[\frac{1}{\text{sen } h^2\ \beta L - \text{sen}^2\ \beta L}\right] \times$$

$$\Big[\text{sen } h\beta L\ \left[\text{sen } \beta\ x \cos h\beta\,(L-x) + \cos \beta\ x\ \text{sen } h\beta\,(L-x)\right]$$

$$+\ \text{sen } \beta L\ \left[\text{sen } h\beta x \cos \beta\ (L-x) + \cos h\beta\ x\ \text{sen } \beta\,(L-x)\right]\Big]$$

V.1b

$$M = -\frac{H}{\beta}\left[\frac{\text{sen } h\ \beta L\ \text{sen } \beta x\ \text{sen } h\beta\ (L-x) - \text{sen } \beta\ L\ \text{sen } h\beta x\ \text{sen } \beta\ (L-x)}{\text{sen } h^2\ \beta L - \text{sen}^2\ \beta L}\right]$$

V.1c

$$Q = -\left[\frac{1}{\text{sen } h^2\ \beta L - \text{sen}^2\ \beta L}\right] \times$$

$$\Big[\text{sen } h\beta L\ \left[\cos\ x\ \text{sen } h\ \beta\,(L-x) - \text{sen } \beta\ x \cos h\ \beta\ (L-x)\right]$$

$$+\ \text{sen } \beta L\ \left[\cos h\beta\ x\ \text{sen}\beta\ (L-x) - \text{sen } h\beta\ x\ \cos \beta\ (L-x)\right]\Big]$$

V.1d

donde

H = carga horizontal al nivel de la superficie del suelo.

k_h = módulo de reacción de la subrasante (constante con la profundidad.

d = ancho del pilote

L = longitud del empotramiento

x = profundidad en estudio a partir de la superficie.

$$\beta = \left(\frac{k_h \quad d}{4 \quad E \ I} \right)^{1/4}$$

Las ecuaciones anteriormente expuestas, son reexpresadas en las ecuaciones V.2 por medio de coeficientes adimensionales, los cuales permiten obtener las soluciones en una forma más - rápida y menos laboriosa.

$$y = \frac{2 \ H \beta}{k_h d} \quad K_{y \ H} \qquad \text{V.2a}$$

$$s = \frac{2 \ H \beta^2}{k_h \ d} \quad K_{sH} \qquad \text{V.2b}$$

$$M = \frac{H}{\beta} \quad K_{MH} \qquad \text{V.2c}$$

$$Q = -H \quad K_{QH} \qquad \text{V.2d}$$

donde K_{yH}, K_{MH} y K_{QH} son coeficientes adimensionales que se lo calizan en la tabla V.1, en función de βL y de x/L.

En un pilote al que se aplica un momento M_o, en la superficie del suelo, las expresiones generales que nos permiten -- calcular los valores de deflexión, curvatura, etc. son:

$$y = \frac{2M_o \ \beta^2}{k_h \ d} \left[\frac{1}{\text{sen } h^2 \ \beta L - \text{sen}^2 \beta L} \right] \times$$

$$\Big[\text{sen } h \beta L \ \left[\cos h \beta (L-x) \ \text{ sen} \beta x - \text{sen } h\beta (L-x) \ \cos \beta x \right]$$

$$+ \text{sen } \beta L \ \left[\text{sen } h \beta x \ \cos \beta (L-x) - \cos h \beta \ x \ \text{sen} \beta (x-L) \right] \Big] \qquad \text{V.3a}$$

$$s = \frac{4\ M_o\ \beta^3}{k_h\ d}\left[\frac{\operatorname{sen} h\beta L \cos h\beta(L-x)\ \cos\beta x + \operatorname{sen}\beta L \cos h\beta x\ \cos\beta(L-x)}{\operatorname{sen} h^2\beta L - \operatorname{sen}^2\beta L}\right]$$

V.3b

$$M = \left[\frac{M_o}{\operatorname{sen} h^2\beta L - \operatorname{sen}^2\beta L}\right] \times$$

$$\left[\operatorname{sen} h\beta L\ [\operatorname{sen}\beta h\ (L-x)\ \cos\beta x + \cos h\beta\ (L-x)\ \operatorname{sen}\beta x]\right.$$

$$\left.-\operatorname{sen}\beta L\ \ [\operatorname{sen} h\beta x\ \ \cos\beta\ (L-x) + \cos\ \ h\beta x\ \operatorname{sen}\beta\ (L-x)]\right]$$

V.3c

$$Q = \left[\frac{-2\ M_o}{\operatorname{sen} h^2\ \beta L - \operatorname{sen}^2\beta L}\right] \times$$

$$\left[\operatorname{sen}\beta L\ \operatorname{sen}\beta\ (L-x)\ \operatorname{sen}\beta x + \operatorname{sen}\beta L\ \operatorname{sen} h\beta x\ \operatorname{sen}\beta\ (L-x)\right]$$

V.3d

Las ecuaciones correspondientes a un momento M_o, aplicado al pilote en la superficie del suelo, son también reexpresadas por medio de coeficientes adimensionales en las ecuaciones V.4.

$$y = \frac{2\ M_o\ \beta^2}{k_d\ d}\ K_{yM} \qquad \text{V.4a}$$

$$s = \frac{4\ M_o\ \beta^3}{k_h d}\ K_{sM} \qquad \text{V.4b}$$

L	X/L	K_{yH}	K_{sH}	K_{MH}	K_{QH}	K_{yM}	K_{sM}	K_{MM}	K_{QM}
2.0	0.	1.1376	1.1341	0.	1.0000	-1.0762	1.0762	1.0000	0.
2.0	0.0625	0.9964	1.1200	0.1080	0.7333	-0.8307	0.9519	0.9836	0.1
2.0	0.1250	0.8586	1.0828	0.1848	0.5015	-0.6579	0.8314	0.9397	0.2
2.0	0.1875	0.7264	1.0298	0.2347	0.3035	-0.4645	0.7178	0.8751	0.2
2.0	0.2500	0.6015	0.9673	0.2620	0.1377	-0.2982	0.6133	0.7959	0.3
2.0	0.3125	0.4848	0.9004	0.2704	0.0021	-0.1569	0.5192	0.7073	0.3
2.0	0.3750	0.3764	0.8333	0.2637	-0.1054	-0.0376	0.4366	0.6138	0.3
2.0	0.4375	0.2763	0.7695	0.2452	-0.1868	0.0624	0.3658	0.5191	0.3
2.0	0.5000	0.1838	0.7115	0.2180	-0.2442	0.1463	0.3068	0.4262	0.3
2.0	0.5625	0.0981	0.6610	0.1851	-0.2793	0.2168	0.2591	0.3379	0.3
2.0	0.6250	0.0182	0.6192	0.1491	-0.2937	0.2767	0.2220	0.2564	0.3
2.0	0.6875	-0.0571	0.5865	0.1125	-0.2887	0.3286	0.1946	0.1834	0.2
2.0	0.7500	-0.1288	0.5628	0.0776	-0.2654	0.3747	0.1747	0.1208	0.2
2.0	0.8125	-0.1981	0.5474	0.0468	-0.2245	0.4171	0.1640	0.0698	0.1
2.0	0.8750	-0.2659	0.5389	0.0222	-0.1665	0.4572	0.1578	0.0318	0.1
2.0	0.9375	-0.3330	0.5356	0.0059	-0.0916	0.4963	0.1654	0.0082	0.0
2.0	1.0000	-0.3999	0.5351	0.	-0.0000	0.5351	0.1551	0.0000	0.
3.0	0.	1.0066	1.0004	0.	1.0000	-1.0004	1.0038	1.0000	0.
3.0	0.0625	0.8210	0.9695	0.1543	0.6575	-0.6589	0.8583	0.9690	0.1
3.0	0.1250	0.6459	0.8919	0.2508	0.3829	-0.3854	0.6433	0.8913	0.2
3.0	0.1875	0.4882	0.7870	0.3018	0.1709	-0.1743	0.4857	0.7862	0.3
3.0	0.2500	0.3515	0.6698	0.3184	0.0141	-0.0184	0.3493	0.6684	0.3
3.0	0.3125	0.2371	0.5514	0.3101	-0.0956	0.0905	0.2352	0.5491	0.3
3.0	0.3750	0.1444	0.4394	0.2850	-0.1664	0.1607	0.1429	0.4360	0.2
3.0	0.4357	0.0716	0.3389	0.2496	-0.2063	0.2002	0.0710	0.3339	0.2
3.0	0.5000	0.0164	0.2528	0.2091	-0.2223	0.2162	0.0168	0.2458	0.2
3.0	0.5625	-0.0242	0.1823	0.1673	-0.2205	0.2147	-0.0222	0.1728	0.1
3.0	0.6250	-0.0529	0.1271	0.1272	-0.2057	0.2011	-0.0489	0.1148	0.1
3.0	0.6875	-0.0727	0.0864	0.0908	-0.1819	0.1793	-0.0661	0.0709	0.0
3.0	0.7500	-0.0861	0.0584	0.0594	-0.1519	0.1524	-0.0763	0.0396	0.0
3.0	0.8125	-0.0953	0.0411	0.0340	-0.1178	0.1227	-0.0816	0.0189	0.0
3.0	0.8750	-0.1021	0.0321	0.0154	-0.0807	0.0916	-0.0839	0.0069	0.0
3.0	0.9375	-0.1077	0.0287	0.0039	-0.0414	0.0599	-0.0846	0.0014	0.0
3.0	1.0000	-0.1130	0.0282	0.	-0.0000	0.0282	-0.0847	0.0000	0.

TABLA V.I. Factores de influencia para una k_h constante (continua).

L	x/L	K_{yH}	K_{sH}	K_{MH}	K_{QH}	K_{yM}	K_{sM}	K_{MM}	K_{QM}
4.0	0.	1.0008	1.0015	0.	1.0000	-1.0015	1.0021	1.0000	0.
4.0	0.0625	0.7550	0.9498	0.1926	0.5616	-0.5624	0.7567	0.9472	0.1
4.0	0.1250	0.5323	0.8247	0.2907	0.2411	-0.2409	0.5344	0.8229	0.2
4.0	0.1875	0.3452	0.6693	0.3218	0.0234	-0.0220	0.3478	0.6673	0.3
4.0	0.2500	0.1979	0.5101	0.3093	-0.1108	0.1136	0.2010	0.5082	0.3
4.0	0.3125	0.0390	0.3641	0.2717	-0.1810	0.1855	0.0926	0.3626	0.2
4.0	0.3750	0.0140	0.2403	0.2226	-0.2055	0.2118	0.0178	0.2397	0.2
4.0	0.4375	-0.0332	0.1419	0.1715	-0.1996	0.2079	-0.0295	0.1430	0.1
4.0	0.5000	-0.0590	0.0682	0.1243	-0.1758	0.1858	-0.0558	0.0720	0.1
4.0	0.5625	-0.0692	0.0163	0.0843	-0.1432	0.1545	-0.0674	0.0242	0.0
4.0	0.6250	-0.0687	-0.0176	0.0529	-0.1084	0.1200	-0.0696	-0.0043	0.0
4.0	0.6875	-0.0615	-0.0379	0.0299	-0.0756	0.0858	-0.0665	-0.0178	0.0
4.0	0.7500	-0.0505	-0.0488	0.0147	-0.0475	0.0538	-0.0616	-0.0206	-0.0
4.0	0.8125	-0.0376	-0.0536	0.0057	-0.0255	0.0242	-0.0568	-0.0166	-0.0
4.0	0.8750	-0.0239	-0.0552	0.0014	-0.0101	-0.0033	-0.0535	-0.0096	-0.0
4.0	0.9375	-0.0101	-0.0555	0.0001	-0.0016	-0.0296	-0.0520	-0.0029	-0.0
4.0	1.0000	0.0038	-0.0555	-0.	0.0000	0.0555	-0.0517	-0.0000	-0.
5.0	0.	1.0003	1.0003	0.	1.0000	-1.0003	1.0002	1.0000	0.
5.0	0.0625	0.6964	0.9214	0.2249	0.4711	-0.4715	0.6964	0.9211	0.2
5.0	0.1250	0.4342	0.7476	0.3131	0.1206	-0.1210	0.4343	0.7472	0.3
5.0	0.1875	0.2317	0.5479	0.3155	-0.0842	0.0340	0.2320	0.5472	0.3
5.0	0.2500	0.0901	0.3628	0.2716	-0.1817	0.1818	0.0907	0.3620	0.2
5.0	0.3125	0.0013	0.2121	0.2093	-0.2079	0.2084	0.0022	0.2111	0.2
5.0	0.3750	-0.0466	0.1013	0.1461	-0.1919	0.1930	-0.0455	0.1002	0.1
5.0	0.4375	-0.0659	0.0277	0.0915	-0.1556	0.1575	-0.0644	0.0267	0.0
5.0	0.5000	-0.0671	-0.0157	0.0494	-0.1133	0.1163	-0.0654	-0.0161	0.0
5.0	0.5625	-0.0584	-0.0368	0.0203	-0.0738	0.0778	-0.0567	-0.0361	0.0
5.0	0.6250	-0.0456	-0.0465	0.0026	-0.0411	0.0461	-0.0444	-0.0409	-0.0
5.0	0.6875	-0.0321	-0.0419	-0.0063	-0.0169	0.0223	-0.0321	-0.0365	-0.0
5.0	0.7500	-0.0197	-0.0369	-0.0088	-0.0008	0.0055	-0.0221	-0.0276	-0.0
5.0	0.8125	-0.0090	-0.0317	-0.0075	0.0081	-0.0059	-0.0150	-0.0175	-0.0
5.0	0.8750	0.0002	-0.0279	-0.0044	0.0108	-0.0139	-0.0110	-0.0086	-0.0
5.0	0.9375	0.0086	-0.0261	-0.0014	0.0079	-0.0201	-0.0094	-0.0023	-0.0
5.0	1.0000	0.0167	-0.0259	-0.	0.0000	-0.0259	-0.0091	-0.0000	-0.

TABLA V.1 Factores de influencia para un k_h constante.

$$M = M_o \; K_{MM} \qquad \text{V.4c}$$

$$Q = -2 M_o \beta \; K_{QM} \qquad \text{V.4d}$$

Los valores de los coeficientes adimensionales K_{yM}, K_{sM},- K_{MM}, y K_{QM} son obtenidos también de la tabla V.1 en función- de βL y χ/L.

Los valores de deflexión, curvatura, momento y cortante- de un pilote de cabeza restringida al giro, pueden ser calculados a partir de las soluciones anteriores para un pilote de cabeza libre. Estos valores se obtienen sumando las soluciones debidas a una carga horizontal H, con las proporcionadas- por un momento aplicado en la cabeza del pilote igual a:

$$M_o = -\left(\frac{H}{2}\right)\left(\frac{K_{sH} \quad (x = 0)}{K_{sM} \quad (x = 0)}\right) \qquad \text{V.5}$$

Donde M_o es el momento que debe ser aplicado en la cabeza del pilote, para producir una rotación igual a cero al nivel - de la superficie del suelo.

Método de Barber

En la práctica, el diseño de pilotes sometidos a cargas - ales regularmente es dependiente de un desplazamiento lateral limitado por las características funcionales de la es- - tructura sustentada por los pilotes. Barber (Ref. 4) presenta soluciones que permiten encontrar el desplazamiento y la rotación del pilote al nivel de la superficie del suelo. Estas soluciones se presentan en forma de gráficas y han sido desarrolladas a partir de las ecuaciones de Hetenyii. En un pilote - de cabeza libre al giro y módulo de reacción de la subrasante- constante con la profundidad, las soluciones presentadas por - Barber son:

$$y = \left(\frac{H}{k_h\ d\ L}\right) I_{yH} + \left(\frac{M}{k_h\ d\ L^2}\right) I_{yM} \qquad V.6$$

$$s = \left(\frac{H}{k_h\ d\ L^2}\right) I_{sH} + \left(\frac{M}{k_h\ d\ L^3}\right) I_{sM} \qquad V.7$$

donde:

H = carga horizontal aplicada en la cabeza del pilote

M = momento aplicado en la cabeza del pilote

d = diámetro o ancho del pilote

k_h = módulo de reacción de la subrasante (constante).

L = longitud empotrada del pilote.

I_{yH}, I_{yM}, I_{sH} y I_{sM} son factores de influencia en la rotación y la curvatura. Estos factores se encuentran graficados en la figura V.1, en función de $k_h\ d\ L^4/\ E\ I$.

En un pilote de cabeza restringida al giro, el cual puede desplazarse pero no girar en la superficie del suelo, la expresión para calcular el desplazamiento es:

$$y = \left(\frac{H}{k_h \, d \, L} \right) I_{yF} \qquad V.8$$

El factor de influencia I_{yF}, también se encuentra localizado en la figura V.1.

Es importante señalar que las soluciones presentadas por Barber, tienen mayor relevancia cuando son aplicadas a pilotes rígidos y, deben usarse preferentemente en ese caso.

Método de Broms.

A partir también de las ecuaciones dadas por Hetenyi, Broms (Ref. 4) propone soluciones basadas en una relación de rigideces entre el suelo y el pilote. Estas soluciones permiten calcular en forma aproximada el desplazamiento y la rotación del pilote en la superficie del suelo. En un pilote de cabeza libre al giro, al cual se aplica una carga horizontal H con una excentricidad e sobre la superficie del suelo y donde k_h es constante con la profundidad, Broms presenta las siguientes ecuaciones:

1. Pilote corto ($\beta L < 1.5$)

donde
$$\beta = \left(\frac{k_h \; d}{4 \, E \, I} \right)^{1/4}$$

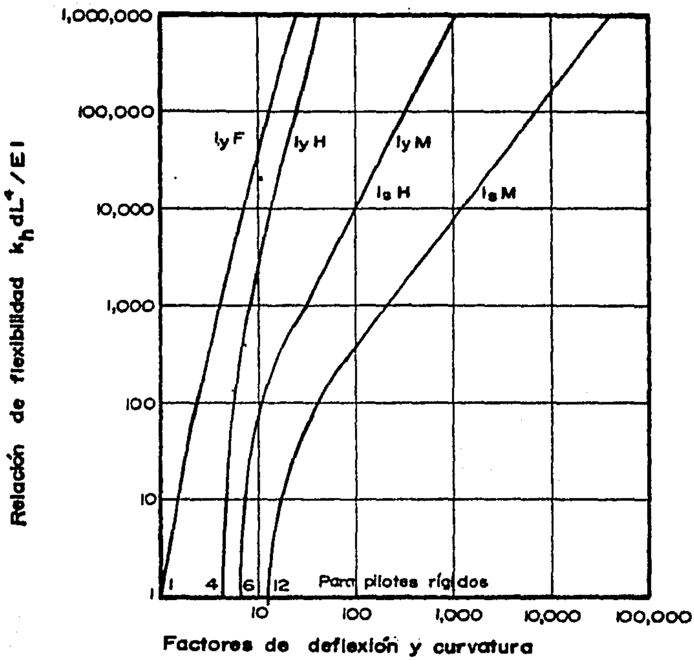


Fig. V.1. Factores de influencia en la deflexión y rotación para un k_h constante con la profundidad.

$$y = \frac{4\ H\ (1 + 1.5\ e/L)}{k_h\ d\ L} \qquad V.9$$

$$s = \frac{6\ H\ (1 + 2\ e/L)}{k_h\ d\ L^2} \qquad V.10$$

2. Pilote largo $(\beta L > 2.5)$

$$y = \frac{2\ H\ \beta (e\ \beta + 1)}{k_h d} \qquad V.11$$

$$y = \frac{2\ H\ \beta\,(e\,\beta + 1)}{k_h\ d} \qquad V.11$$

$$s = \frac{2\ H\ \beta^2\ (1 + 2\ e\,\beta)}{k_h\ d} \qquad V.12$$

En un pilote de cabeza restringida al giro, las expresiones presentadas por Broms para calcular el desplazamiento en la superficie del suelo son:

1. Pilote corto ($\beta L < 0.5$)

$$y = \frac{H}{k_h\ d\ L} \qquad V.13$$

2. Pilote largo ($\beta L > 1.5$)

$$y = \frac{H\beta}{k_h\ d} \qquad V.14$$

En el caso de que se tenga un pilote con una relación βL, mayor que la de un pilote corto pero menor que la de uno largo, es necesario hacer una interpolación directa entre ambas soluciones.

V.2 MODULO DE REACCION DE LA SUBRASANTE INCREMENTANDOSE LINEALMENTE CON LA PROFUNDIDAD.

En un suelo con módulo de reacción de la subrasante que se incrementa linealmente con la profundidad, la solución de un pi lote cargado lateralmente por medio de las ecuaciones de Hetenyi, presenta un mayor grado de complejidad matemática por lo que, en ese trabajo sólo se presentarán las soluciones -- que permiten calcular los desplazamientos y rotación del pilote en la superficie del suelo.

Método de Barber

Barber presenta también soluciones a pilotes cargados - lateralmente, cuando el módulo de reacción de la subrasante del suelo tiene un incremento lineal con la profundidad (Ref. 2). Las soluciones que presenta son las mismas que para un k_h constante (ecuaciones V.6, V.7 y V.8), pero en este caso, $k_h d$ se encuentra sustituido por $n_h L$ en el denominador de estas ecuaciones. Asimismo, el valor de los factores de influencia debe ser localizado en otra gráfica.

En un pilote de cabeza libre al giro, Barber propone -- las siguientes expresiones para calcular el desplazamiento y la rotación en la superficie del suelo:

$$y = \left(\frac{H}{n_h\ L^2}\right) I_{yH} + \left(\frac{H}{n_h\ L^3}\right) I_{yM} \qquad \text{V.15}$$

$$s = \left(\frac{H}{n_h\ L^3}\right) I_{sH} + \left(\frac{H}{n_h\ L^4}\right) I_{sM} \qquad \text{V.16}$$

Para un pilote de cabeza restringida al giro, el despla zamiento en la superficie del suelo es:

$$y = \left(\frac{H}{n_h \; L^2} \right) \; I_{yF} \qquad \text{V.17}$$

El valor de los factores de influencia I_{yH}, I_{yM}, etc., se encuentra graficando en la figura V.2, en función de $n_h L^5/EI$.

El método de Barber para un k_h incrementándose linealmente con la profundidad, debe ser usado preferentemente en pilotes rígidos.

Método de Broms

Al igual que las soluciones presentadas por Broms para un k_h constante, las soluciones que propone para un pilote cargado lateralmente en un suelo con módulo de reacción de la subrasante que se incrementa linealmente, se hacen en base a una relación de rigideces entre el suelo y el pilote. Esta relación se encuentra definida por un factor de rigidez relativa T, y de un coeficiente de profundidad máxima Z_{max}, cuyo valor se muestra a continuación:

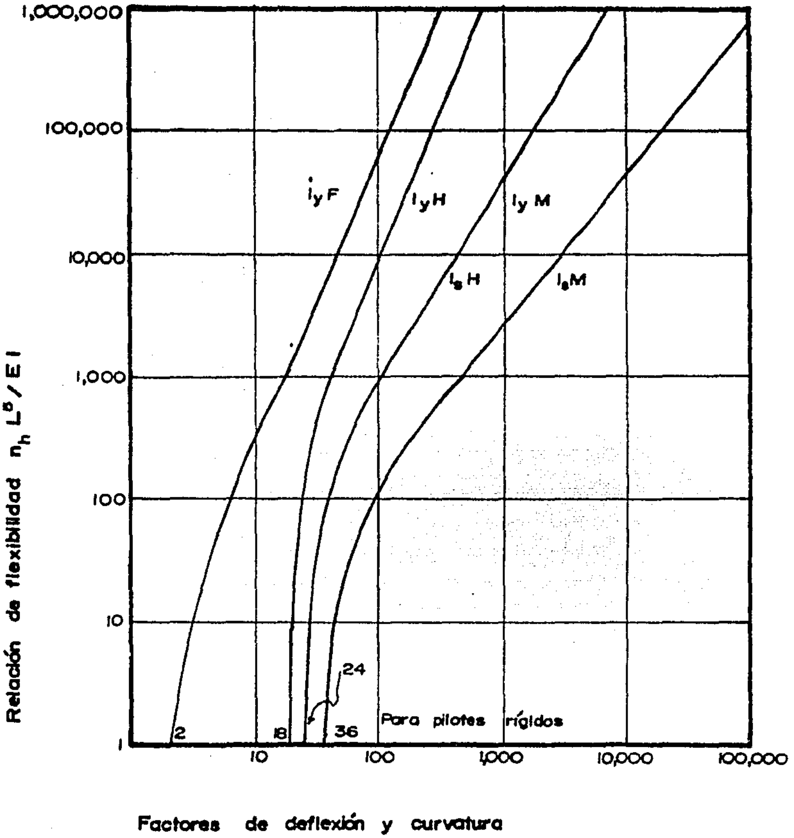


Fig. V.2 Factores de influencia en la deflexión y rotación para un k_h incrementándose linealmente.

$$z_{max} = \frac{L}{T}$$

donde

$$T = \left(\frac{EI}{n_h} \right)^{1/5}$$

Para un pilote de cabeza libre al giro, las ecuaciones-que permiten calcular el desplazamiento y la rotación del pi lote en la superficie del suelo son:

1. Pilote corto ($Z_{max} < 2.0$)

$$y = \frac{18\ H\ (1 + 1.33\ e/L)}{L^2\ n_h} \qquad V.18$$

$$s = \frac{24\ H\ (1 + 1.5\ e/L)}{L^3\ n_n} \qquad V.19$$

2. Pilote largo ($Z_{max} > 4.0$)

$$y = \frac{2.4\ H}{(n_h)^{3/5}\ (\ EI\ )^{2/5}} + \frac{1.6\ H\ e}{(n_h)^{2/5}\ (\ EI\ )^{3/5}} \qquad V.20$$

$$s = \frac{1.6\ H}{(n_h)^{2/5}\ (\ EI\ )^{3/5}} + \frac{1.74\ H\ e}{(n_h)^{1/5}\ (\ EI\ )^{4/5}} \qquad V.21$$

En un pilote de cabeza restringida al giro, las ecuacio nes propuestas por Broms para calcular el desplazamiento en- la superficie del suelo son:

1. Pilote corto ($Z_{max} < 2.0$)

$$y = \frac{2\ H}{L^2\ n_h} \qquad V.22$$

2. Pilote largo ($Z_{max} > 4.0$)

$$y = \frac{0.93\ H}{(n_h)^{3/5}\ (EI)^{2/5}} \qquad V.23$$

V.3 SUELOS ESTRATIFICA..

La influencia de la estratificación de los suelos en el diseño de pilotes sometidos a cargas laterales ha sido estudiado por Davidson y Gill (Ref. 13). El resultado de sus investigaciones en un sistema de dos estratos puede ser resumidos en tres puntos básicos:

1. El suelo desde la superficie hasta profundidades de 0.2 R a 0.4 R, ejerce una influencia determinante en el comportamiento del pilote. El valor de R es:

$$R = \left(\frac{E \cdot I}{k \; d}\right)^{1/4} \qquad \text{V.24}$$

Debido a lo expuesto anteriormente, las investigaciones para determinar k_h deben ser realizadas en forma más extensa en esta área. Se debe tener en cuenta las variaciones temporales del NAF, ya que puede afectar la parte superior del perfil del suelo y de este modo influenciar en el comportamiento del pilote.

2.- Con el propósito de reducir la deflexión en la superficie y los momentos máximos, es poco el beneficio que se obtiene al empotrar el pilote en un estrato más duro que comienza a profundidades mayores de 0.4 R.

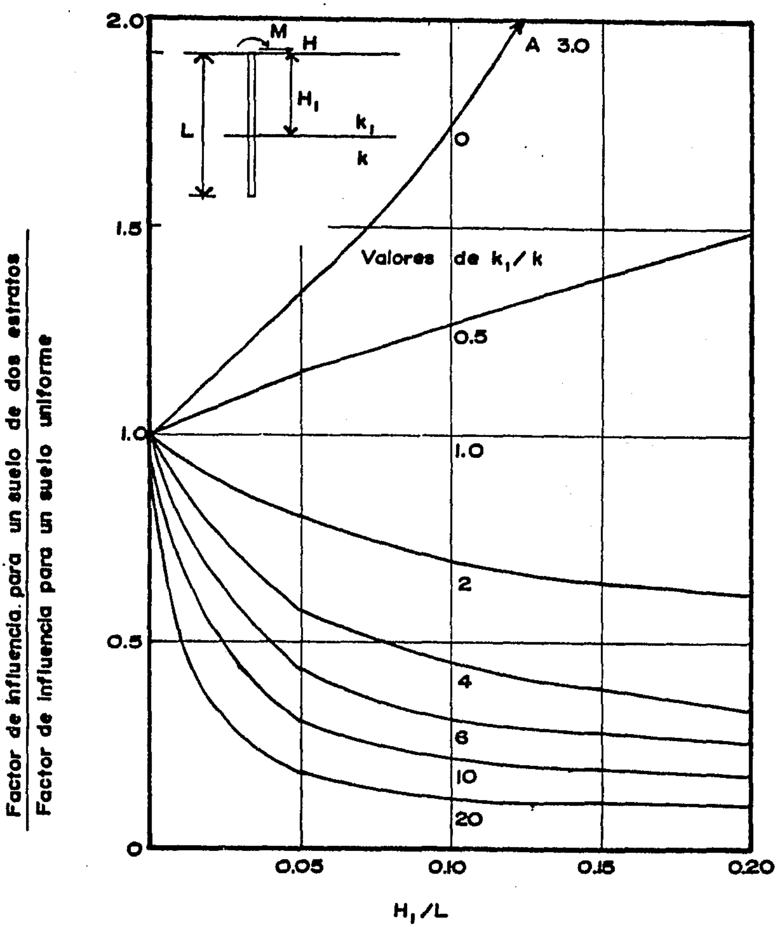


Fig. V.3 Efecto de la estratificación de suelos en el factor de influencia I_{YH}.

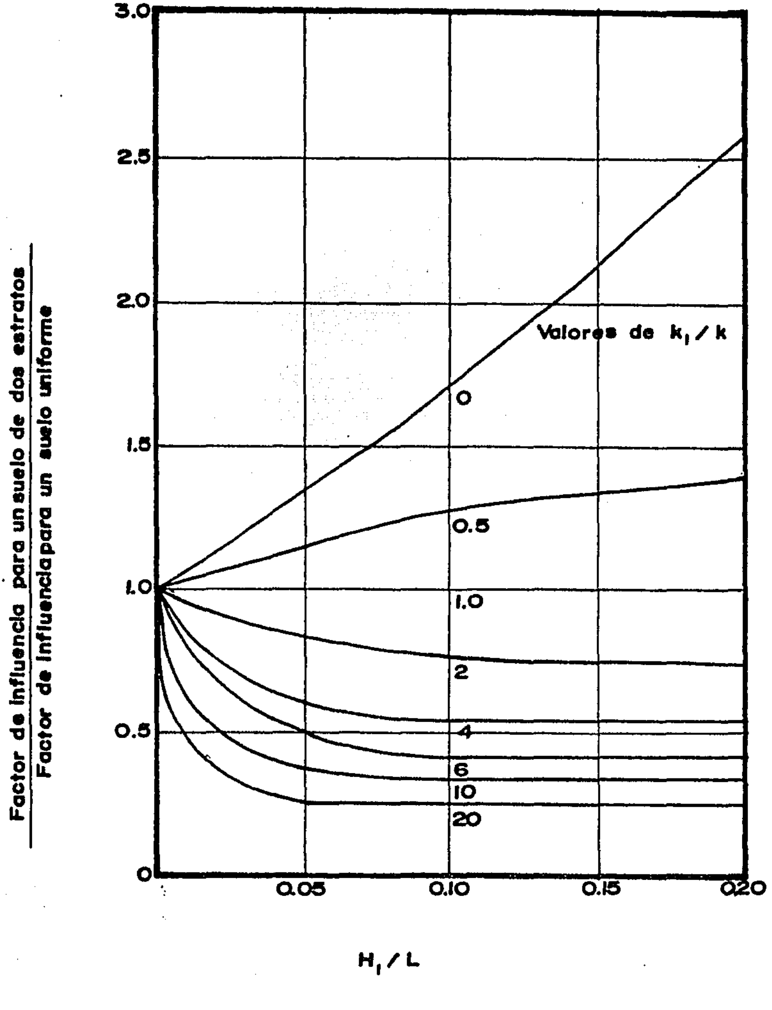


Fig. V.4 Efecto de la estratificación de suelos en el factor de influencia I_{y_M}.

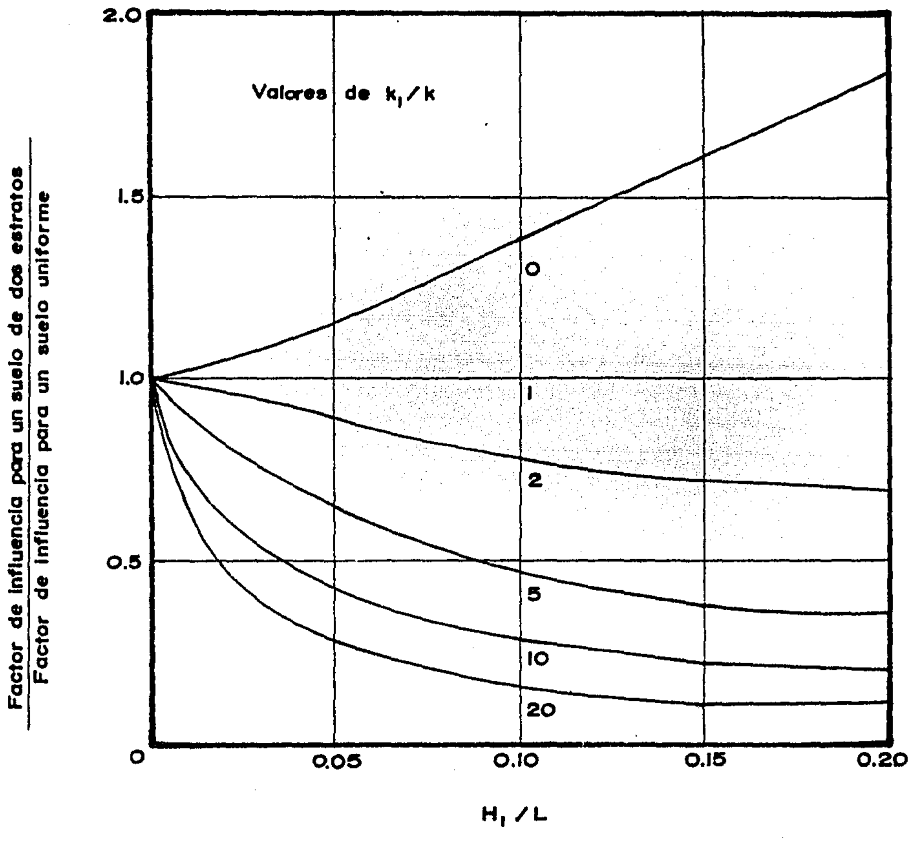


Fig. V.5 Efecto de la estratificación de suelos en el factor de influencia I_{yF}.

3.- El uso de resultados analíticos en un k_h - constante con la profundidad, puede llevar a subestimaciones de la deflexión y de los momentos hasta por un factor de 2.

Davisson y Gill, presentan la influencia del estrato superior en los factores de deflexión y rotación I_{yH}, I_{yM} y I_{yF}. Para un k constante, los valores de los factores de influencia se encuentran graficados en la figura V.3, V.4 y V.5 como una función de la relación de espesor del estrato superior h_1, a la longitud L, y de la relación del módulo de reacción de la subrasante del estrato superior k, a la del estrato inferior k_1.

Estos resultados provienen de pruebas en pilotes a escala real, y se aplican a pilotes de flexibilidad intermedia ($k\ d\ L^4 / E\ I = 256$). Estos factores se usan para corregir los factores presentados en la figura V.1.

V.4. ANALISIS ELASTICO.

Diversos autores han desarrollado varios análisis en los cuales el suelo ha sido considerado como un medio continuo (Douglas y Davis, en 1964; Lenci, Maurice y Madignier, en 1968; Banerjee, en 1978; Banerjee y Davis, en 1978; y Poulos, en 1971). Estos análisis son similares entre sí, y las diferencias existentes provienen de detalles en consideraciones a la acción del pilote.

En los análisis elásticos, se hace uso de la teoría del medio continuo, la cual idealiza al suelo como un medio elás tico semiinfinito, isótropo y homogéneo. Asimismo, se considera que el suelo tiene un módulo de Young, E_s, y una relación de Poisson, ν_s los cuales no se encuentran afectados por la presencia del pilote. Los análisis se desarrollan a través de la integración apropiada de la ecuación de Mindlin (Ref. 11) para el desplazamiento horizontal de un punto dentro de un medio semiinfinito, producido por una carga puntual horizontal dentro de la masa.

En esta sección se presentará el análisis de Poulos para un pilote de punta flotante y para un pilote de punta empotrada (Ref. 4). Se considera a un pilote de punta flotante, cuando la punta se encuentra localizada en un estrato que guarda características similares de resistencia a los estratos que comprenden la mayor parte del pilote (Fig. V.6). Esto es, aún cuando se presenta estratificación, la diferencia de los módulos de Young entre los estratos que comprenden la profundidad de empotramiento del pilote, no es grande. Un pilote de punta empotrada es aquel que en la punta se encuentra incrustada en un estrato de resistencia mucho mayor que aquellos en que se localiza la parte restante del pilote. El pilote de punta empotrada puede presentar una punta fija o una punta articulada (Fig. V.7) dependiendo de la profundidad de empotramiento en el estrato duro y de la resistencia que éste tenga. El pilote de punta fija no permite rotación en la punta. En el caso contrario, el pilote de punta arti-

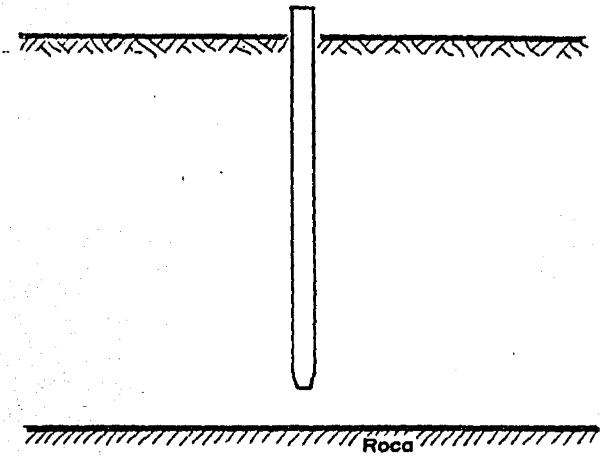


Fig. V.6 Pilote de punta flotante.

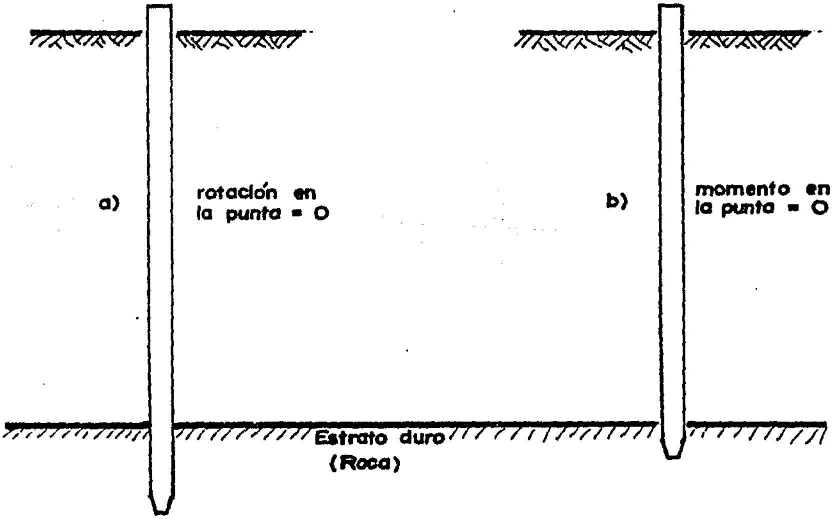


Fig. V.7 Pilote de punta empotrada en estrato duro.
a) Punta fija; b) Punta articulada

cülada puede girar en la punta.

Poulos en su análisis considera al pilote como un elemento esbelto, vertical, rectangular de ancho d, longitud L y -- con una rigidez EI constante con la profundidad.

El pilote es dividido en n + 1 elementos (Fig. V.8), endonde todos son de longitud h, excepto aquellos en la cabeza y en la punta del pilote, los cuales tienen una longitud igual a h/2. Cada elemento está sujeto a un esfuerzo horizontal -- uniforme p, el cual es considerado constante en todo lo ancho del pilote.

Para simplificar el análisis inicial, los esfuerzos cortantes desarrollados entre el suelo y los lados del pilote -- perpendiculares al desplazamiento, no son tomados en cuenta.- También se supone que el suelo situado atrás del pilote se -- adhiere a éste. De esta manera, se generan esfuerzos entre - el suelo y el pilote debido a las fuerzas externas, siendo de compresión de un lado y de tensión en el otro.

Si las condiciones elásticas prevalecen dentro del suelo, los desplazamientos horizontales del suelo y del pilote deben ser iguales. Estos desplazamientos son igualados en el centro de los elementos en que se ha dividido el pilote, excepto para los dos elementos extremos, en los cuales los desplazamientos son calculados en la cabeza y en la punta del pilote, resultando así todos los puntos donde se calcula el desplaza-

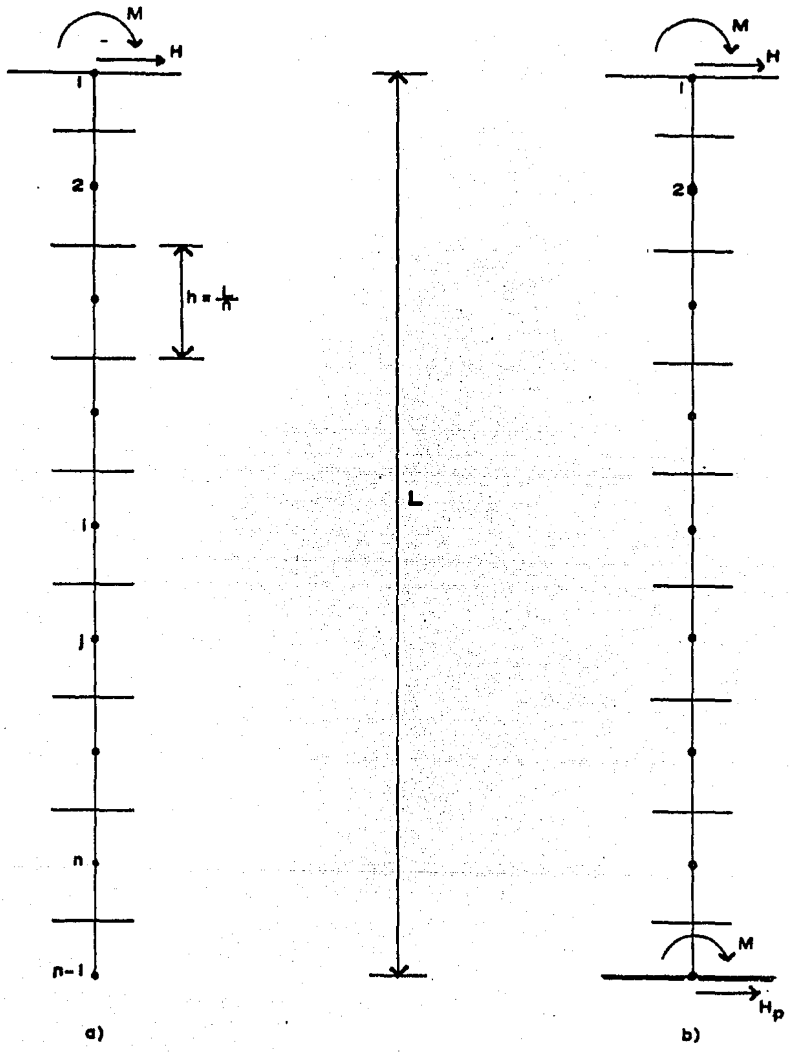


Fig. V.8 División del pilote en elementos.
a) Punta flotante; b) Punta empotrada.

miento de igual distancia. Los desplazamientos del suelo para todos estos puntos, localizados a lo largo del pilote, pueden ser expresados como:

$$\{Y_s\} = \frac{d}{E_s} \left[I_s\right] \{P\} \qquad V.24$$

donde:

$\{Y_s\}$ = es un vector columna n + 1 que representa el desplazamiento horizontal del suelo.

$\{P\}$ = es un vector columna n + 1 que representa la reacción del suelo (los esfuerzos generados entre el suelo y el pilote debido a cargas externas sobre el pilote son de p/2 a compresión en un lado y de p/2 a tensión en el otro).

E_s = Módulo de elasticidad del suelo.

d = ancho del pilote

$\left[I_s\right]$ = es una matriz de n + 1 por n + 1 de los factores de influencia del desplazamiento del suelo.

La matriz $\left[I_s\right]$ contiene elementos I_{ij}, los cuales son evaluados por integración de un área rectangular por la ecuación de Mindlin para el desplazamiento horizontal de un punto dentro de una masa semiinfinita.

Para determinar los desplazamientos del pilote se hace uso de la ecuación diferencial para flexión de vigas (Ec.III.6). Esta ecuación puede ser escrita en forma de diferencias finitas de los puntos 2 al n, y por medio del uso apropiado de las condiciones frontera, se eliminan desplazamientos ficticios en puntos localizados fuera del pilote. Las condiciones frontera varían el desplazamiento final de esta ecuación, dependiendo si se trata de un pilote de cabeza libre o restringida, y si es de punta flotante o empotrada. La forma final de la ecuación III.6 se iguala a la ecuación V.24 y se prosigue un desarrollo en forma matricial.

La solución matricial presentada por Poulos, es aun más complicada que la presentada por Hetenyi , y para profundizar en su estudio es conveniente consultar la referencia (6). Poulos ha obtenido soluciones en forma de gráficas a partir del desarrollo matricial, las cuales son presentadas a continuación.

1.- <u>Soluciones para un pilote flotante con módulo E_s constante con la profundidad</u>.

Las soluciones de Poulos por medio de gráficas (Ref. 4), permiten calcular desplazamientos y rotaciones del pilote en la superficie del suelo. Para llegar a la solución por medio de gráficas, se ha escogido un valor de ν_s igual a 0.5, considerando que éste tiene poca influencia en el resultado final.

El primer caso, es el de un pilote flotante y cabeza libre al giro, al cual se le aplica una fuerza horizontal H, con una excentricidad e, a partir de la superficie del suelo. Se idealiza el suelo con un módulo E_s constante con la profundidad (arcillas preconsolidadas) y con una resistencia límite p_y. El desplazamiento y la rotación al nivel de la superficie del suelo, son calculadas por medio de las siguientes ecuaciones:

$$y = \frac{H}{E_s L} \left(I_{yH} + \frac{e}{L} I_{yM} \right) / F_y \qquad V.25$$

$$s = \frac{H}{E_s L^2} \left(I_{sH} + \frac{e}{L} I_{sM} \right) / F_s \qquad V.26$$

donde:

H = carga horizontal aplicada

e = excentricidad de la carga = M/H

I_{yH}, I_{yM} = factores elásticos de influencia para el desplazamiento producido por la carga horizontal y el momento, en un suelo con E_s constante (Figs. V.9 y V.10)

I_{sH}, I_{sM} = factores elásticos de influencia para la rotación producida por la carga horizontal y el momento, en un suelo con E_s constante (Figs. V.10 y V.11).

F_y = factor de desplazamiento con falla = relación del desplazamiento del pilote en un suelo elástico al desplazamiento en un suelo con falla (Fig. V.12).

F_s = factor de rotación con falla = relación de la rotación del pilote en un suelo elástico a la rotación en un suelo con falla (Fig. V.13).

p_y = resistencia límite del suelo, también llamada resistencia lateral última del suelo.

Los factores de falla F_y y F_s están en función de la excentricidad relativa de la carga e/L, del nivel de carga aplicado y del factor de flexibilidad del pilote. El nivel de carga es expresado en forma adimensional como H/H_u, donde H_u es la capacidad a la carga lateral última del pilote si la falla ocurre por falla del suelo. El factor de flexibilidad del pi-

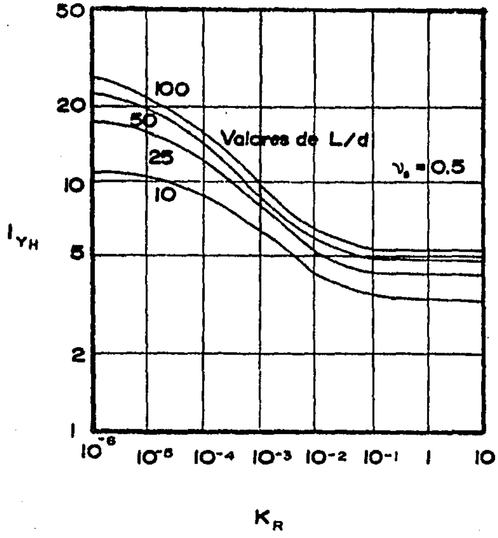


Fig. V.9 Valores de I_{yH} para un pilote flotante de cabeza libre en un suelo con módulo E_s -- constante.

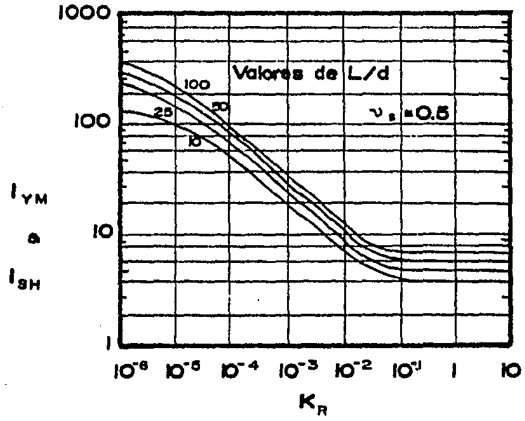


Fig.V.10 Valores de I_{yM} y I_{sH} para un pilote flotante de cabeza libre, en un suelo con - módulo E_s constante.

lote, K_R, está dado por la siguiente relación:

$$K_R = \frac{E\ I}{E_s L^4} \qquad V.27$$

Los valores de F_y y F_s, se encuentran mostrados en las figuras V.12 y V.13, en función de e/L, K_R, y H/H_u para L/d = 50. Ambos valores, F_y y F_s, decrecen (esto es, el efecto de la falla del suelo se incrementa) conforme aumenta la relación H/H_u o disminuye K_R. Sin embargo, para pilotes relativamente rígidos ($K_R > 10^{-2}$), el efecto de la falla del suelo no es grande -

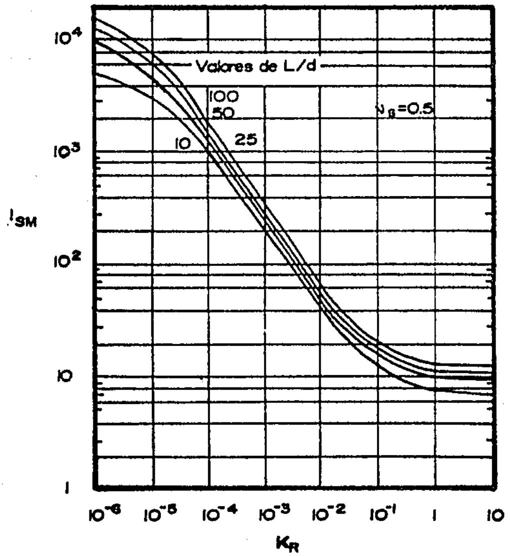


Fig. V.11 Valores de I_{SM}, para un pilote flotante de cabeza libre, en un suelo con módulo E_s -- constante.

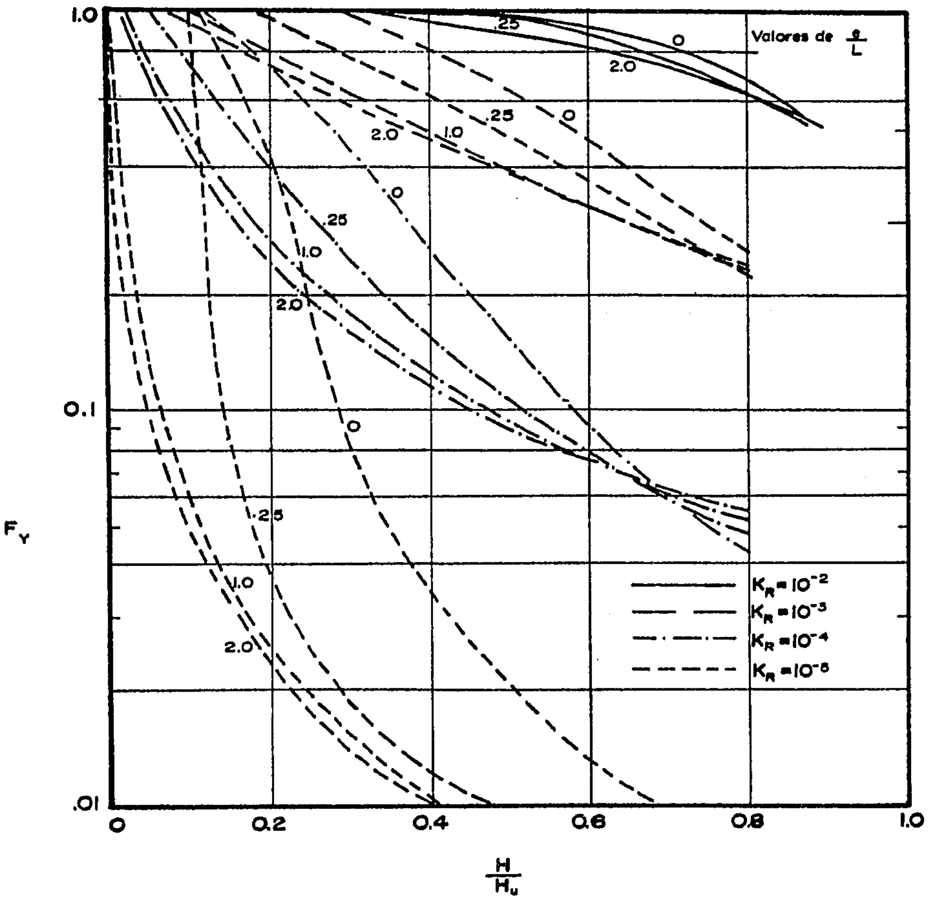


Fig. V.12. Factor de falla y desplazamiento F_y, de un pilote flotante de cabeza libre en - un suelo con E_s y p_y constantes.

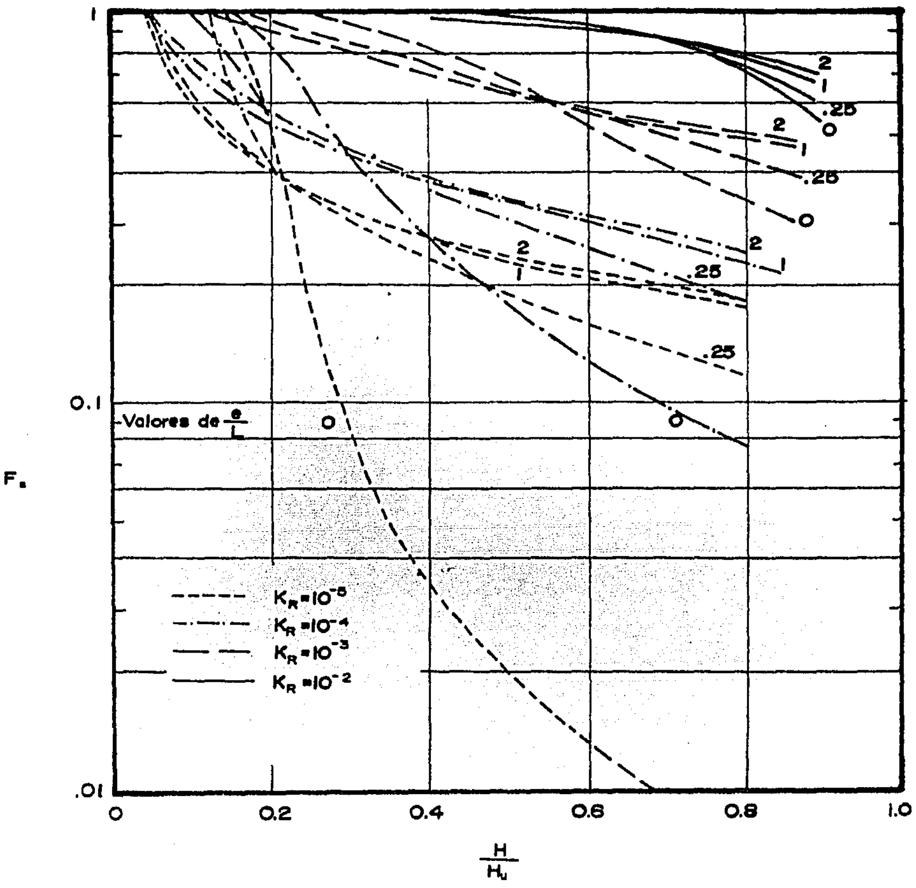


Fig. V.13 Factor de falla y rotación F_s, de un pilote flotante de cabeza libre en un suelo con E_s y p_y constantes.

en cargas de trabajo ordinarias. En la figura V.14, se aprecia el efecto de la relación L/d para un valor de K_R y para $e/L = 0$. Ahí se puede observar como F_y decrece conforme el valor de L/d disminuye.

El valor de H_u puede ser obtenido del Análisis Estático Convencional, presentado en la sección II.3, considerando una excentricidad como la presentada en la figura II.5. Se debe recordar que los resultados teóricos de H_u, de esta forma obtenidos, no necesariamente implican que la carga real última llegará a H_u, ya que en pilotes muy flexibles (valores pequeños de K_R), se puede presentar la falla en el pilote mismo, antes que presentarse la falla en el mismo.

En un suelo con condiciones puramente elásticas, el desplazamiento y rotación en la superficie del suelo, pueden ser obtenidos de las siguientes expresiones:

$$y = I_{yH}\left(\frac{H}{E_s\ L}\right) + I_{yM}\left(\frac{M}{E_s\ L^2}\right) \qquad \text{V.28}$$

$$s = I_{sH}\left(\frac{H}{E_s\ L^2}\right) + I_{sM}\left(\frac{M}{E_s\ L^3}\right) \qquad \text{V.29}$$

donde M, es el momento aplicado al nivel de la superficie del suelo.

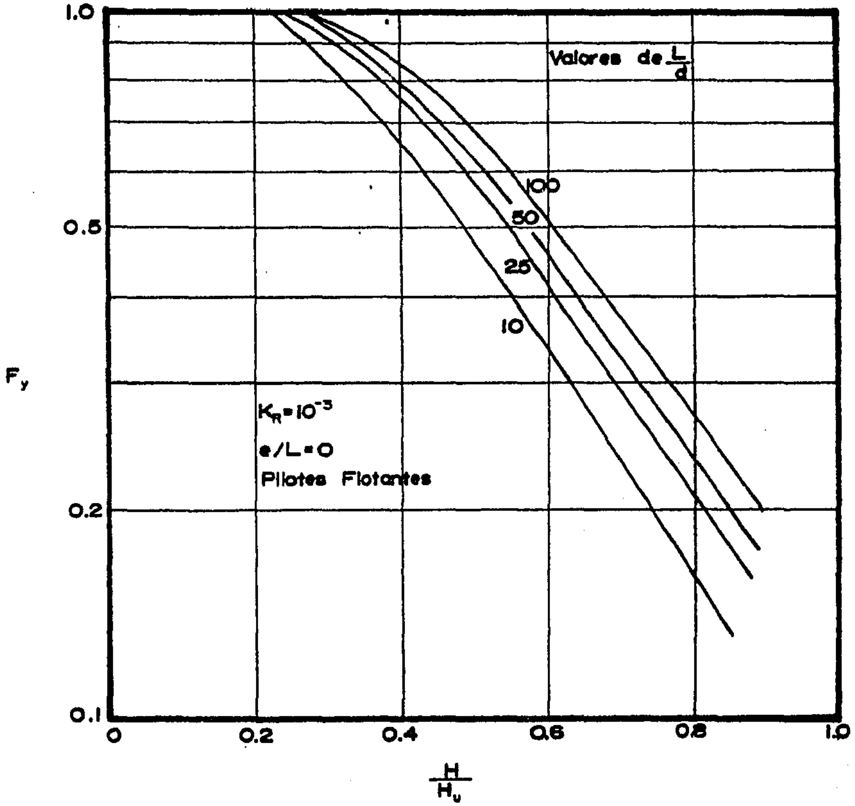


Fig. V.14 Efecto de L/d en el factor de desplazamiento F_y

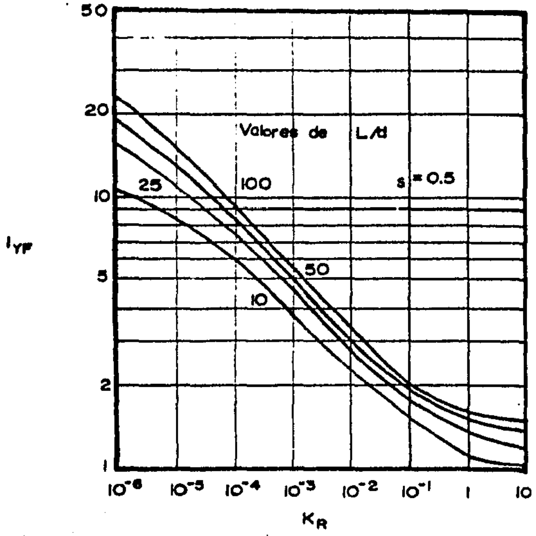


Fig. V.15 Factor de influencia I_{yF} para un pilote flotante y cabeza restringida en un suelo con E_s y p_y constantes.

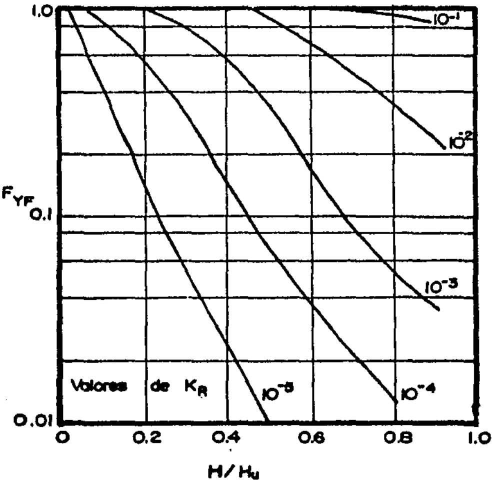


Fig. V.16 Factor de falla y deflexión F_{yF}, para un pilote de cabeza restringida en un suelo con E_s y p_y constantes.

Las ecuaciones V.28 y V.29, toman en cuenta los efectos de la falla del suelo en una forma menor que las ecuaciones V.26 y V.27. En estas ecuaciones (V.28 y V.29), debe obtenerse el valor del módulo de elasticidad del suelo, E_s, de un valor apropiado de la secante de acuerdo con el nivel de carga aplicado. En el caso de usarse las ecuaciones V.26 y V.27, el valor de E_s se obtiene de un solo valor de la tangente, el cual es independiente del nivel de carga aplicado.

Para un pilote flotante de cabeza restringida al giro, el cual se encuentra sujeto a una carga lateral H, el desplazamiento en la superficie del suelo se obtiene de:

$$y = I_{yF}\left(\frac{H}{E_s\ L}\right) / \ F_{yF} \qquad \text{V.30}$$

donde

I_{yF} = factor de influencia en el desplazamiento de un pilote de cabeza restringida (Fig. V.15)

F_{yF} = factor de falla en la deflexión de un pilote de cabeza restringida (Fig. V. 16).

Para encontrar el valor de F_{yF} en la figura V.16, es necesario conocer el valor de la carga última H_u, el cual puede ser calculado por el procedimiento estático convencional (sección II.3) usando la ecuación siguiente:

$$H_u = p_y dL \qquad \text{V.31}$$

2.- <u>Soluciones para un pilote flotante con módulo de elasticidad del suelo</u>, E_s, <u>incrementándose linealmente</u>.

Cuando el suelo tiene un módulo de elasticidad que se incrementa linealmente con la profundidad (arcillas suaves y arenas), la ecuación de Mindlin puede ser usada, sin embargo, las soluciones sólo serán aproximadas, y tenderán a sobreestimar las deflexiones y rotaciones en la superficie del suelo.

Las soluciones presentadas por Poulos en este caso, consideran que el módulo de elasticidad del suelo E_s, se incrementa linealmente con la profundidad, desde cero en la superficie del suelo, hasta el valor encontrado en la profundidad x.

De acuerdo con lo expuesto, el valor de E_s puede expresarse como:

$$E_s = N_h \, x \qquad \text{V.32}$$

donde N_h = rango de incremento de E_s con la profundidad.

N_h es análogo a n_h (ecuación IV.3) en la teoría de reacción de la subrasante. De esta manera, si E_s y k_h se incrementan con la profundidad en el mismo rango, entonces:

$$N_h = n_h \qquad \text{V.33}$$

Cuando el módulo de elasticidad se incrementa con la profundidad, el factor de flexibilidad del pilote se define como:

$$K_N = \frac{E\ I}{N_h\ L^5} \qquad \text{V.34}$$

La resistencia del suelo en la falla, p_y, también se considera que varía linealmente con la profundidad, desde cero en la superficie del suelo a un valor de p_L en la punta del pilote.

El desplazamiento y la rotación de un pilote flotante y cabeza libre en la superficie del suelo se obtiene de las siguientes ecuaciones:

$$y = \frac{H}{N_h\ L^2} \quad (I'_{yH} + \frac{e}{L} \quad I'_{ym}) \ /\ F'_y \qquad \text{V.35}$$

$$s = \frac{H}{N_h L^3} \quad (I'_{sH} + \frac{e}{L} \quad I'_{sM}) \ /\ F'_s \qquad \text{V.36}$$

donde:

I'_{yH}, I'_{yM} = factores elásticos de influencia para los desplazamientos producidos por la carga horizontal y el momento, en un suelo con E_s variando linealmente. I'_{sH} e I'_{sM} son similares, pero en rotación. (Figs. V.17. V.18 y V.19)

F'_y = factor de desplazamiento y falla = relación del desplazamiento del pilote en un suelo elástico al desplazamiento en un suelo con falla, para un

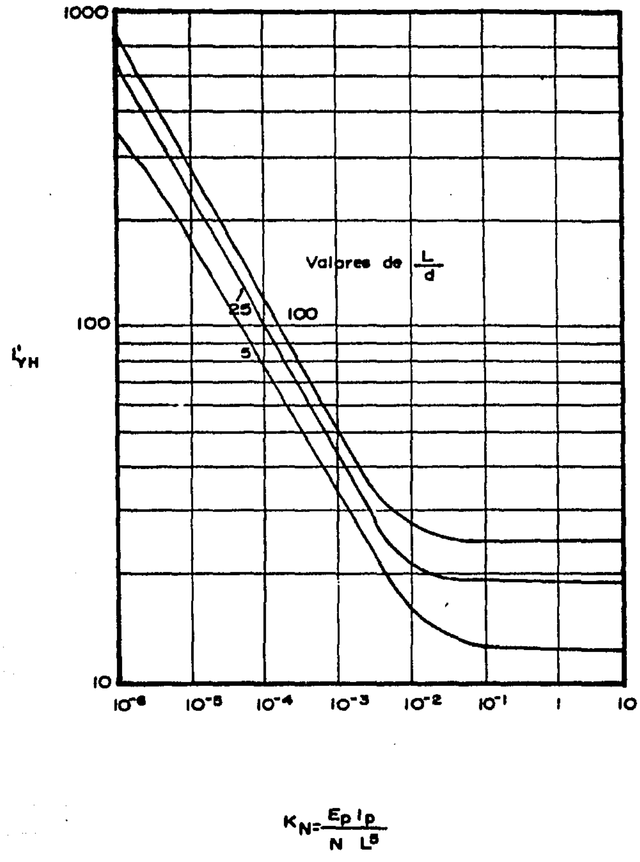


Fig. V.17 Valores de I'_{yH} para un pilote flotante de cabeza libre, en un suelo con módulo E_s variando linealmente.

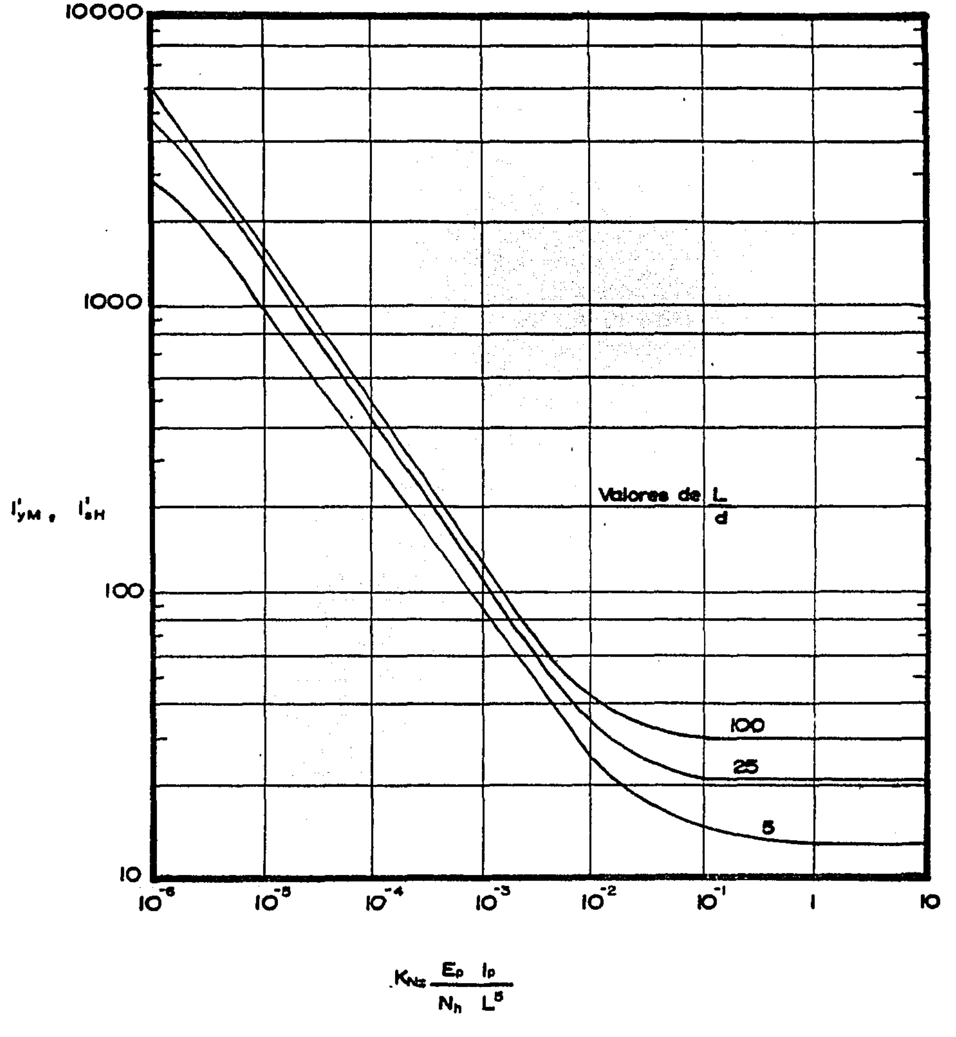


Fig. V.18 Valores de I'_{yM} e I'_{sH} para un pilote flotante y cabeza libre, en un suelo con módulo E_s variando linealmente.

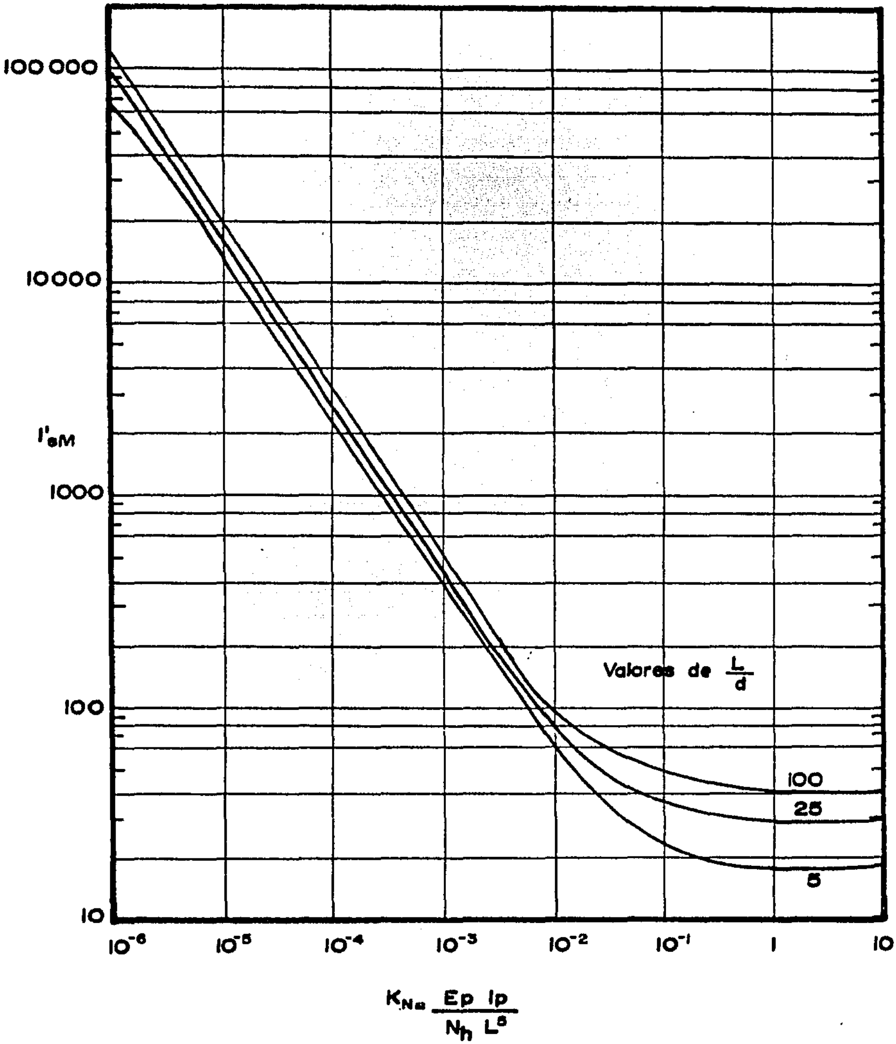


Fig. V.19 Valores de I'_{sM} para un pilote flotante de cabeza libre, en un suelo con módulo E_s - variando linealmente.

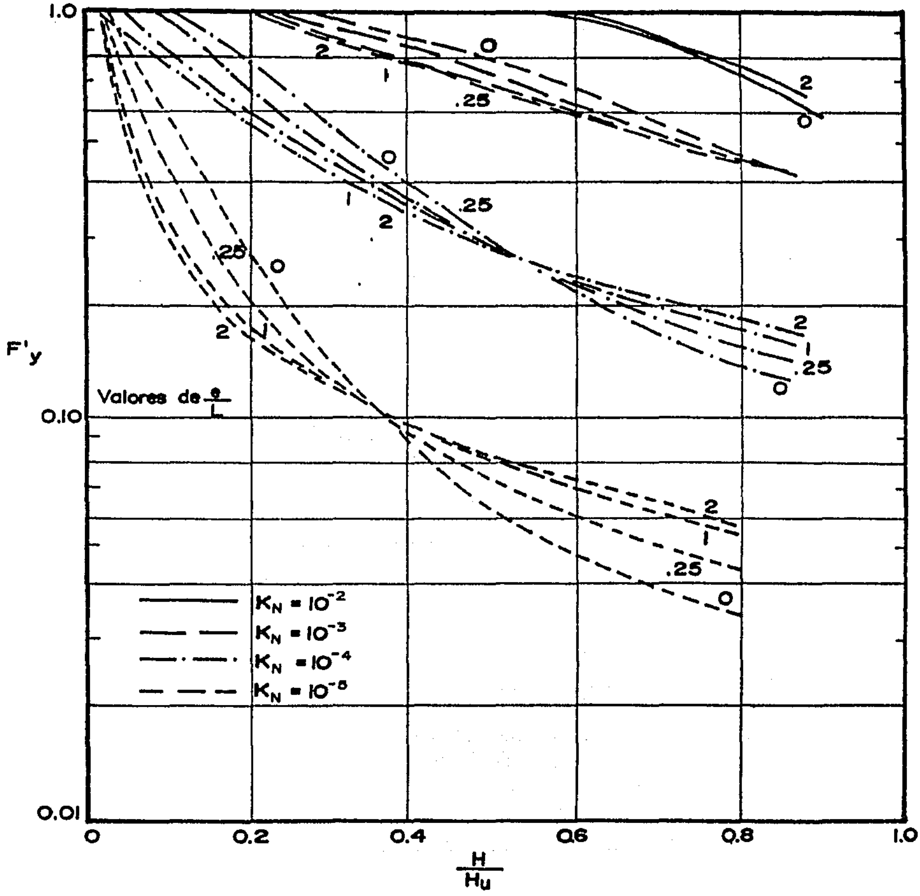


Fig. V.20 Factor de desplazamiento y falla F_y, para un pilote flotante y cabeza libre, en un suelo con variación lineal de E_s y p_y.

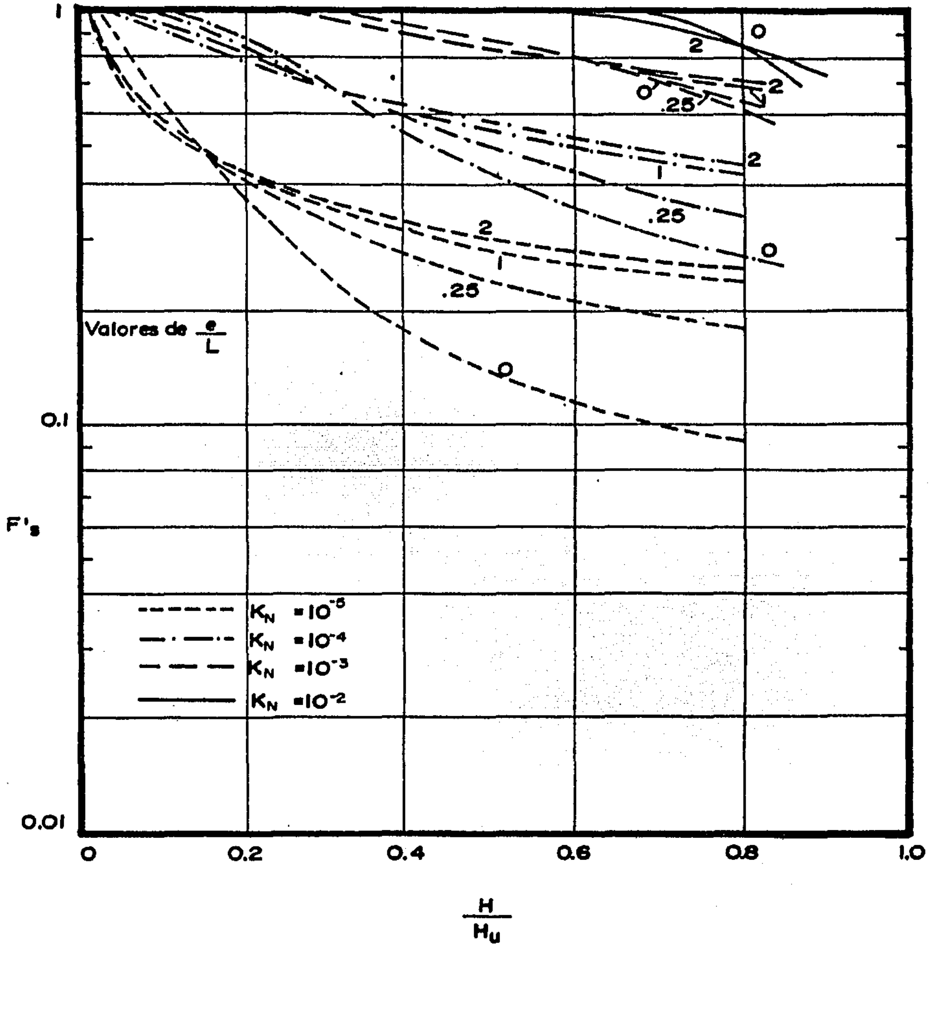


Fig. V.21 Factor de rotación y falla F'_s para un pilote flotante y cabeza libre, en un suelo con variación lineal de E_s y p_y.

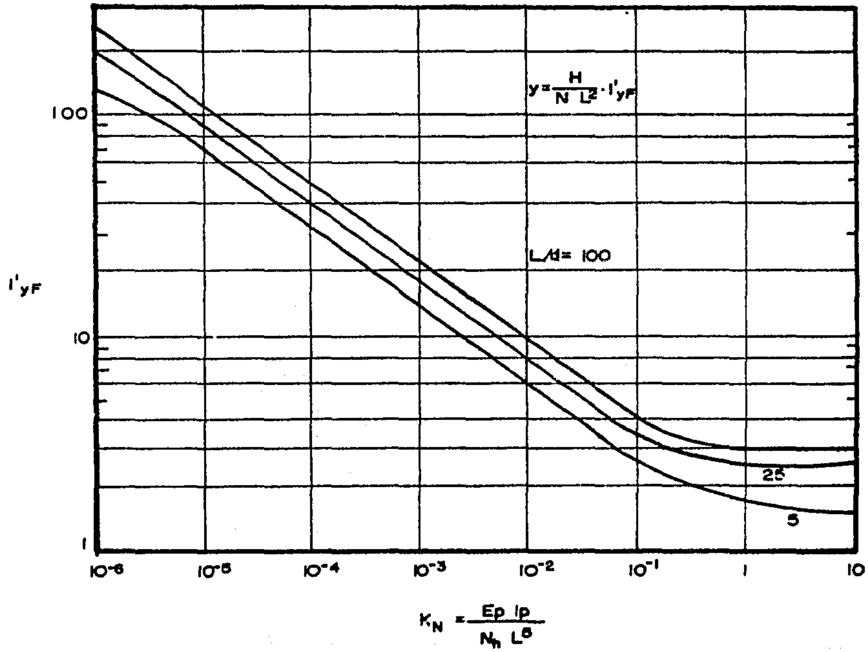


Fig. V.22 Valores de I'_{yF}, para un pilote flotante y cabeza restringida en un suelo con módulo de -- elasticidad incrementándose linealmente.

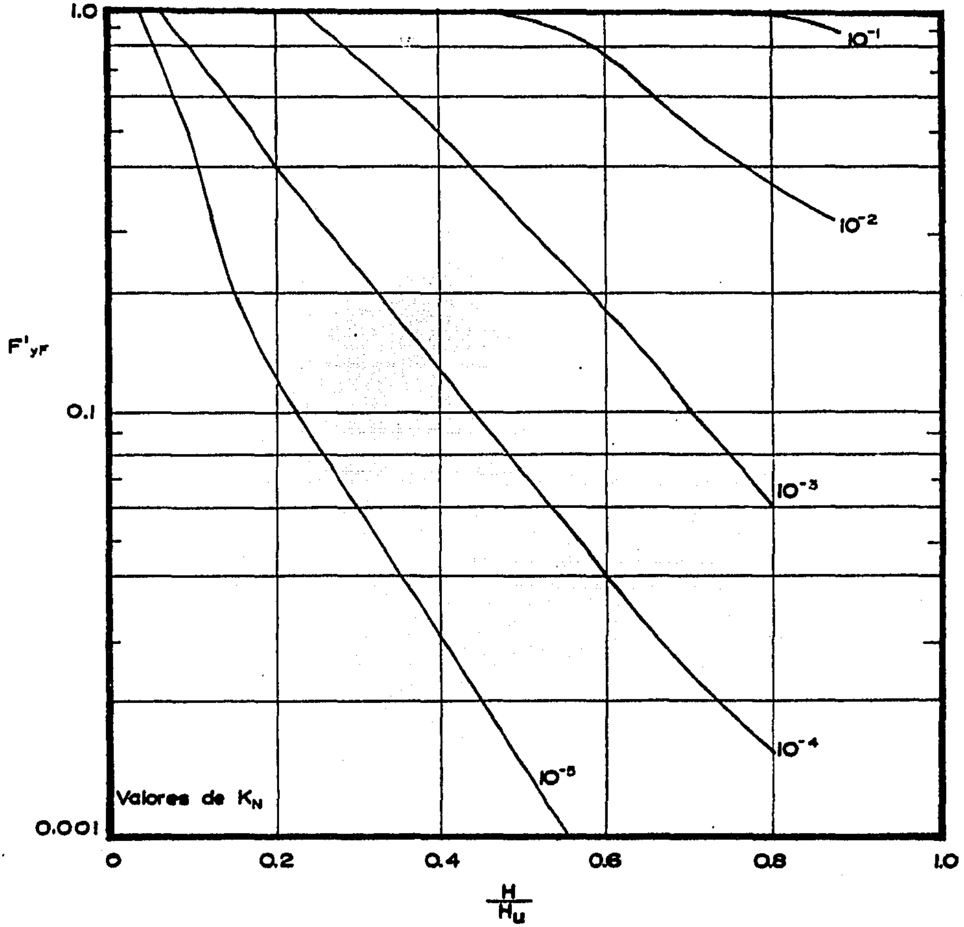


Fig. V.23 Factor de desplazamiento y falla F'_{yF}, para un pilote flotante y cabeza restringida, en un suelo donde E_s y p_y varían linealmente.

incremento lineal de E_s y p_y. El valor de F'_s es- similar pero en rotación. (Figs. V.20 y V.21)

Para un pilote flotante de cabeza restringida al giro, la deflexión en la superficie del suelo está dada por:

$$y = \frac{H}{N_h\ L^2} \quad I'_{yF} \ / \ F'_{yF} \qquad V.37$$

El factor elástico de influencia I'_{yF}, está graficado en la figura V.22, mientras que el factor de desplazamiento y falla - se encuentra graficado en la figura V.23.

3.- <u>Soluciones para un pilote de punta empotrada</u>.

Las soluciones presentadas por Poulos (Ref. 4) para un pilote- cuya punta se encuentra incrustada en un estrato duro son simi- lares a las presentadas anteriormente para un pilote flotante.

En un pilote de cabeza libre y punta flotante, donde la -- parte restante del pilote se encuentra en un suelo con un módu- lo de elasticidad constante con la profundidad, el desplazamiento y la rotación pueden ser calculados de las mismas expresio-- nes que para un pilote flotante (ecuaciones V.25, V.26, V.28 y- V.29), pero considerándose ahora distintos factores elásticos - de influencia I_{yH}, I_{yM}, I_{sH} e I_{sM}.

Como se había mencionado anteriormente, los pilotes de punta empotrada pueden presentar una punta fija o una punta articu lada. Los factores elásticos de influencia de ambos casos, - se encuentran graficados en las figuras V.24, V.25 y V.26. -- Sin embargo, las condiciones de trabajo en la punta no tienen realmente influencia a menos que el pilote sea relativamente- rígido ($K_R > 10^{-2}$). Para valores pequeños de K_R, los factores de influencia en el desplazamiento y rotación son casi -- los mismos que para un pilote de punta flotante.

Los valores de los factores de falla F_y y F_s de un pilote de punta flotante pueden ser aplicados a pilotes de punta- empotrada si el valor de K_R es menor que 10^{-2}. Para valores- mayores de K_R, los valores de F_y y F_s pueden ser tomados como la unidad.

Para un pilote de cabeza restringida y punta empotrada,- el desplazamiento en la superficie del suelo puede ser calculado por la ecuación V.30. El factor elástico de influencia- para este caso, se obtiene de la figura V.27.

En pilotes de punta empotrada en un estrato duro, en donde la parte restante del pilote se encuentra en un suelo cuyo módulo de elasticidad se incrementa linealmente con la profundidad, el desplazamiento y la rotación pueden ser calculados- de las ecuaciones V.35, V.36 y V.37, las cuales son las mis-- mas que para un pilote de punta flotante. Los factores elásticos de influencia que se aplicarán en estas ecuaciones, están graficados de las figuras V. 28 a V.31.

Los factores de falla F'_y, F'_s y $F'_{\dot{y}F}$ (Figs. V.20, V.21 y V.23) de un pilote de punta flotante, son los mismos que se aplican a un pilote de punta empotrada cuando el factor de flexibilidad K_N, es menor que 10^{-2}.

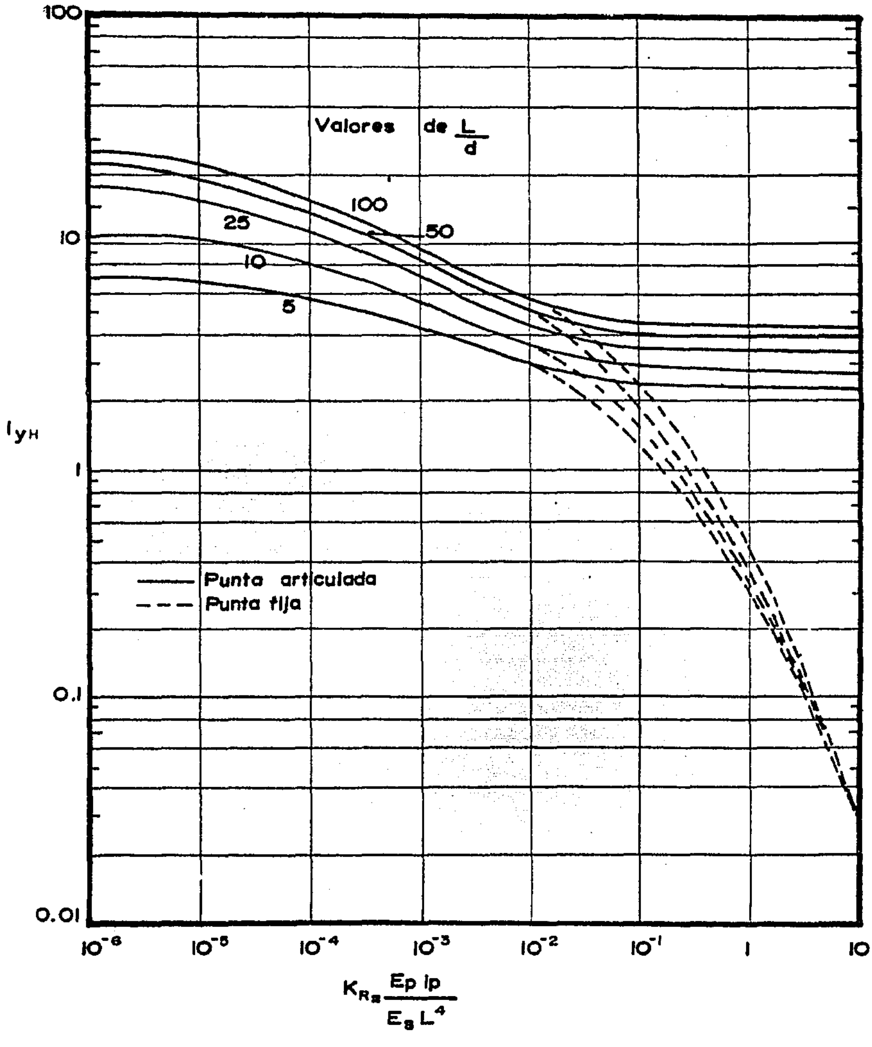


Fig. V.24 Factores de influencia I_{yH} para pilotes de cabeza libre y punta empotrada en un estrato duro, donde la parte restante se encuentra en un suelo con E_s constante.

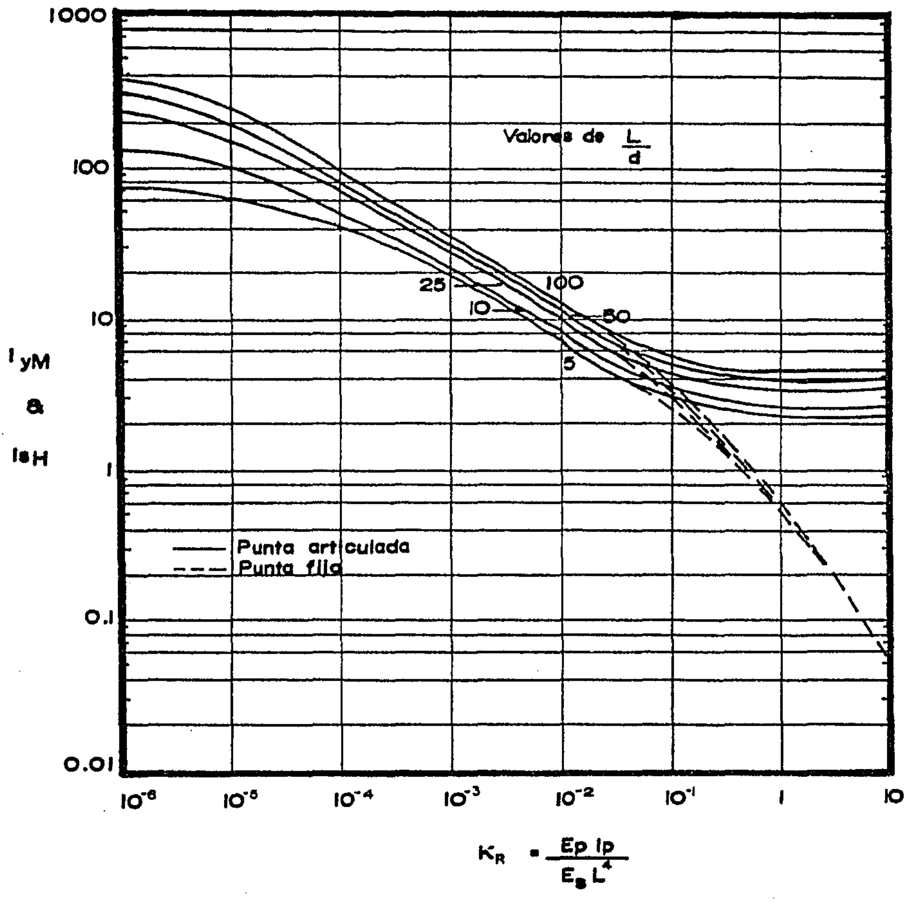


Fig. V.25 Factores de influencia I_{yM} e I_{sH} para pilotes de cabeza libre y punta empotrada. E_s constante.

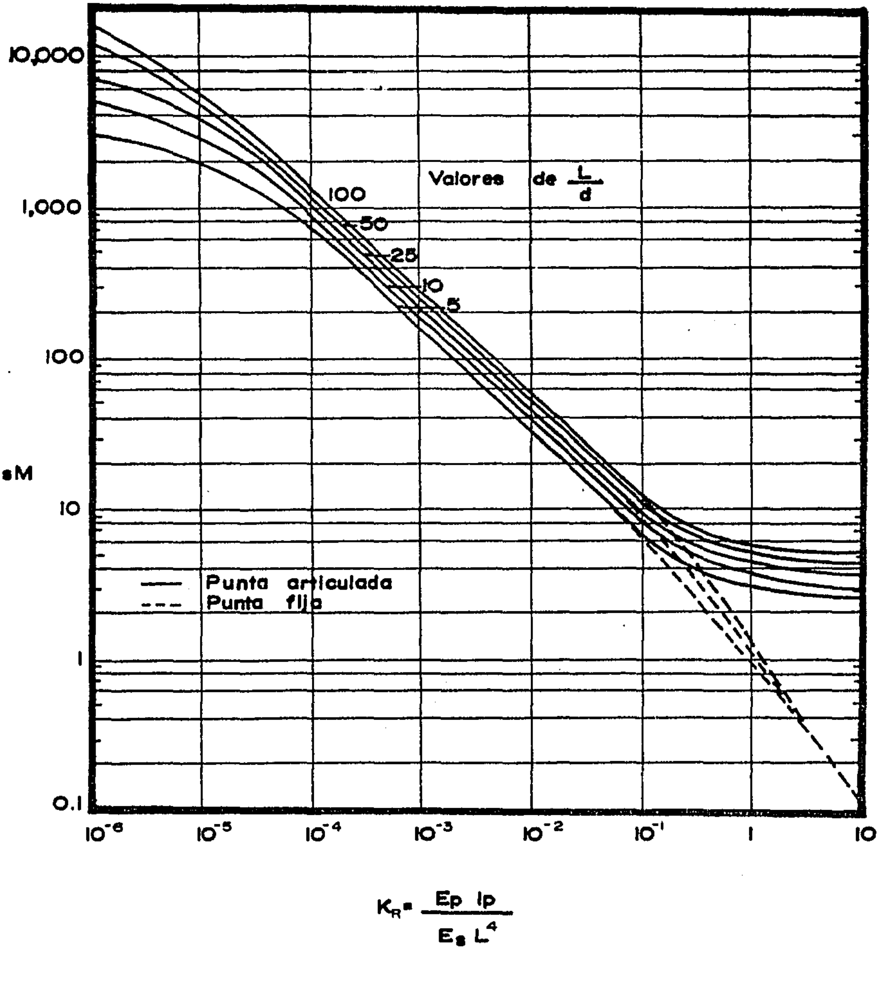


Fig. V.26 Factores de influencia I_{sM} para pilotes de cabeza libre y punta empotrada. E_s constante.

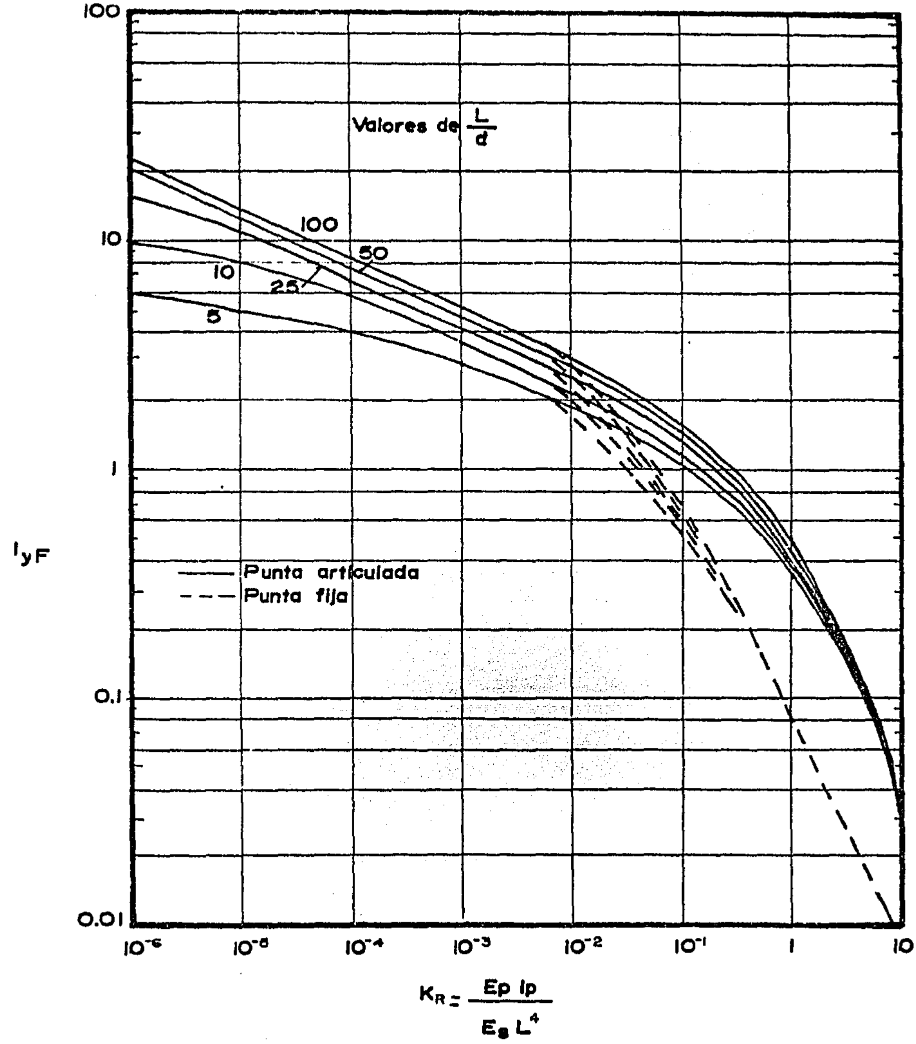


Fig.V.27 Factores de influencia I_{yF} para pilotes de cabeza restringida y punta empotrada. E_s- constante.

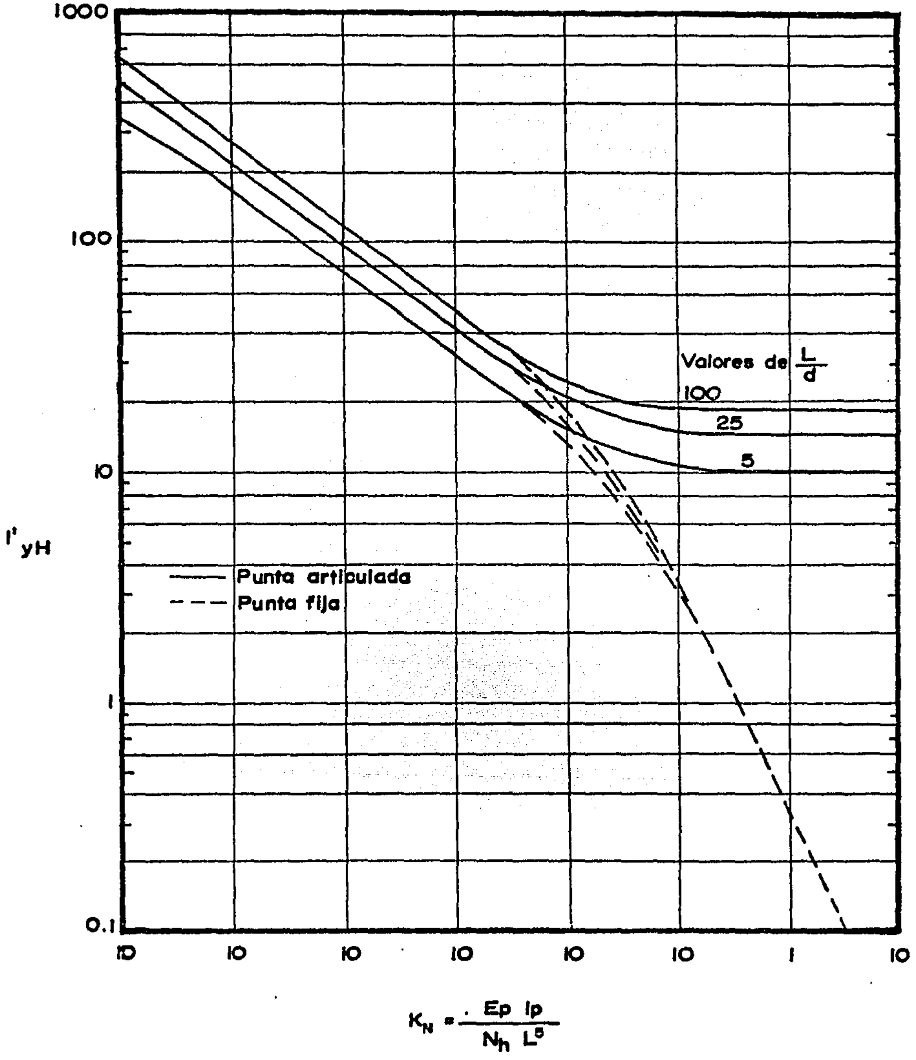


Fig. V.28 Valores de I'_{yH} para pilotes de cabeza libre y punta empotrada. E_s varía linealmente.

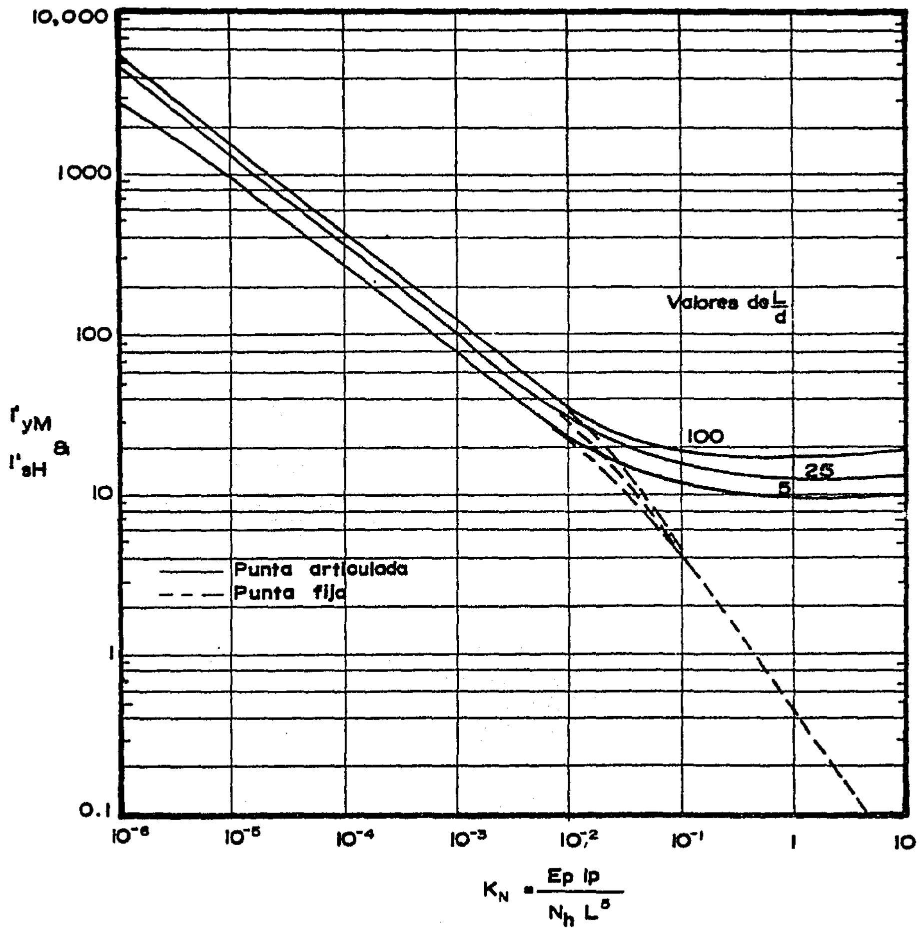


Fig.V. 29 Valores de I'_{yM} e I'_{sH} para pilotes de cabeza libre y punta empotrada. E_s varía lineal-- mente.

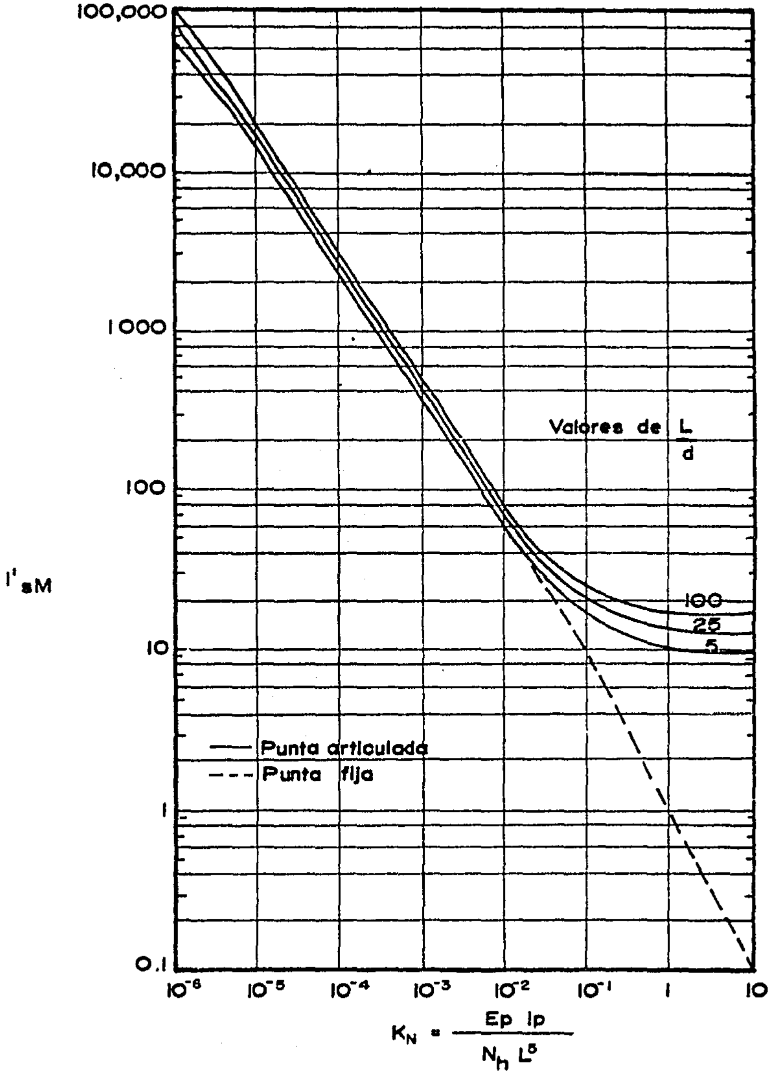


Fig. V.30 Valores de I'_{sH} para pilotes de cabeza libre y punta empotrada. E_s varía linealmente.

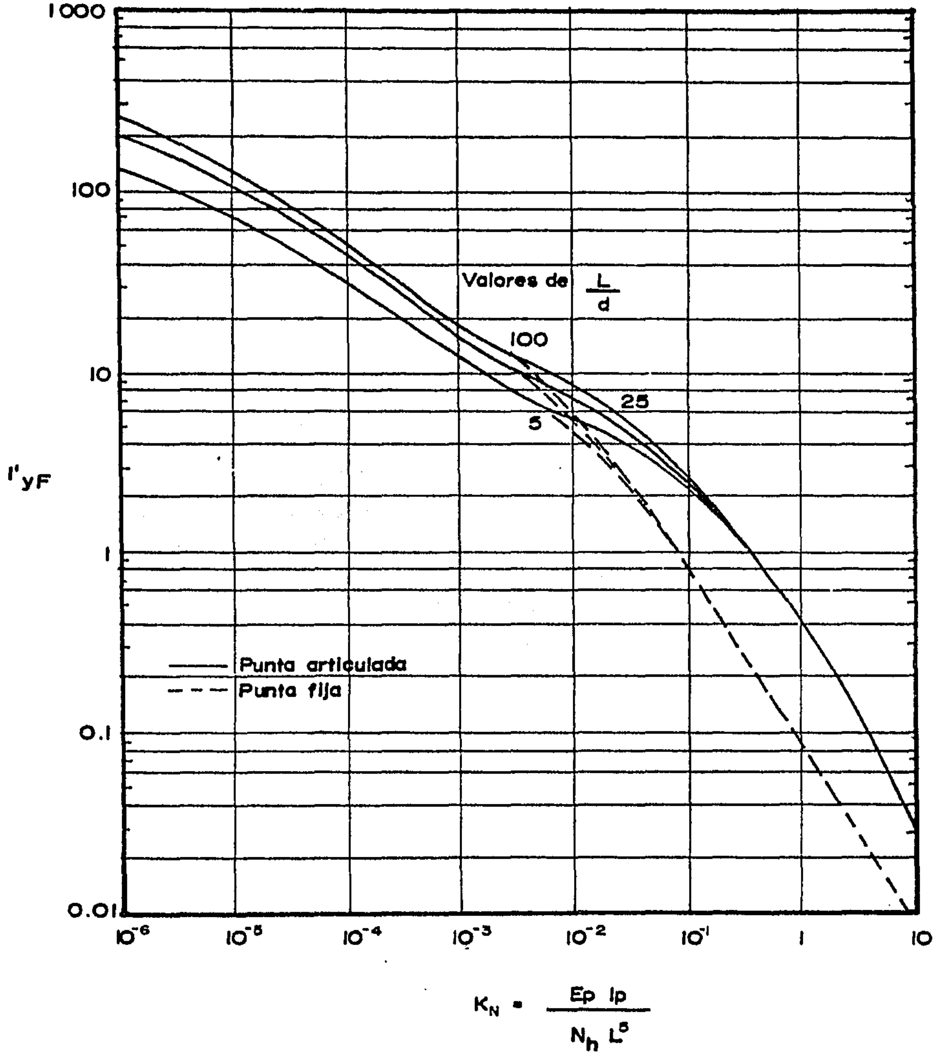


Fig. V.31 Valores de I'_{yF} para pilotes de cabeza restringida y punta empotrada. E_s varía linealmente.

CAPITULO VI

SOLUCION AL COMPORTAMIENTO NO LINEAL

Como se ha discutido anteriormente, en un pilote sometido a cargas laterales, la respuesta del suelo generalmente no es lineal, debido a que el valor del módulo de reacción de la subrasante puede variar con la deflexión y con la profundidad, por lo que se han desarrollado algunos procedimientos para el diseño de pilotes sometidos a cargas laterales cuando la respuesta del suelo no es lineal. Entre éstos se cuenta con el de Madhav, quien usa un modelo elasto-plástico derivado del modelo original de Winkler. También se tiene el procedimiento de Kubo, el cual se basa en una relación no lineal entre la deflexión "y", reacción del suelo "p" y la profundidad "x", siendo esta relación de la forma:

$$p = k\, x^{m}\, y^{n} \qquad \text{VI.1}$$

donde k, m, n, son coeficientes determinados experimentalmente.

Sin embargo, uno de los que se usa con mayor frecuencia en la actualidad es el desarrollado por Reese y sus colaboradores. Este procedimiento permite analizar un pilote al cual se le aplican cargas axiales y laterales simultáneamente, siendo en este caso la ecuación III.6 reescrita como:

$$E\,I\,\frac{\delta^4 y}{\delta x^4} + P_x\,\frac{\delta^2 y}{\delta x^2} + p = 0 \qquad \text{VI.2}$$

donde P_x es la carga axial.

La ecuación VI.2 es resuelta por medio de la técnica de diferencias finitas (sección III.3) y su desarrollo requiere de la ayuda de una computadora. No obstante, Reese junto con Matlock presenta también un procedimiento basado en coeficientes adimensionales, el cual permite obtener una solución aceptable en el diseño de pilotes cargados lateralmente, siendo necesario en ambos métodos la construcción de las curvas p - y presentadas en la sección IV.4.

Ambos procedimientos tienen algunas ventajas sobre los análisis lineales expuestos en el capítulo anterior. Entre éstas se encuentra el de poder considerar la estratificación del suelo con mayor facilidad y el de obtener los valores de desplazamiento, curvatura, momento, cortante y reacción del suelo en la profundidad que se requiera. Además la solución por medio de diferencias permite introducir cambios en la rigidez del pilote y los efectos de la carga axial.

A continuación se presenta el procedimiento de coeficientes adimensionales y posteriormente el de diferencias finitas.

VI.1 SOLUCION POR MEDIO DE COEFICIENTES ADIMENSIONALES.

Matlock y Reese desarrollaron un procedimiento en base a coeficientes adimensionales, el cual permite obtener una solución fácil si la variación del módulo de reacción de la subrasante puede ser estimada en forma aproximada (Ref. 2).

Este procedimiento es aplicable cuando la rigidez del pilote es constante con la profundidad y no se consideran los efectos de la carga axial.

Los coeficientes adimensionales son desarrollados a partir del análisis dimensional de la sección VI.2.

La solución se obtiene por medio de un proceso iterativo en el cual los valores del módulo de reacción de la subrasante son ajustados hasta que los valores de reacción del suelo "p" y deflexión "y" sean compatibles con las propiedades reales esfuerzo-deformación del suelo.

El método de coeficientes adimensionales considera tres grados de restricción en la cabeza del pilote y una solución para cada uno de ellos. A continuación se presentan las soluciones desarrolladas por Matlock y Reese para cada caso.

a) Pilote de cabeza libre al giro (Fig. VI.1a)

En este caso se considera que el pilote puede girar y --

desplazarse libremente al nivel de la superficie del suelo. - La solución será presentada en varios pasos.

1.- Se construyen las'curvas "p-y" en varias profundidades por medio de los procedimientos recomendados en la sec- - ción IV.4, debiendo ser menor al espaciamiento entre las curvas cercanas a la superficie del suelo.

2.- Suponer un valor de rigidez relativa T, el que se encuentra dado por la siguiente expresión:

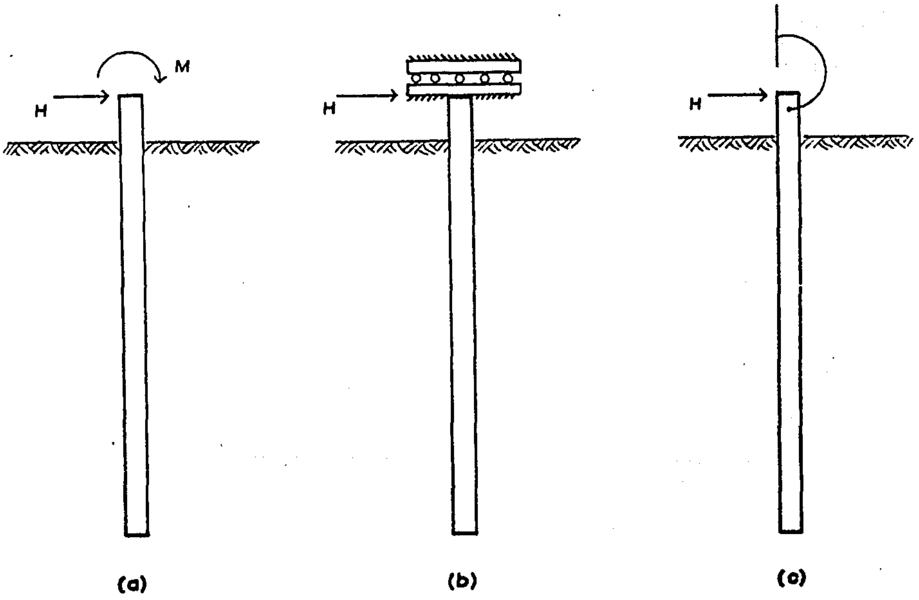


Fig. VI.1 Grados de restricción en la cabeza del pilote. (a) cabeza libre al giro; (b) cabeza fija al- giro; (c) cabeza restringida al giro.

$$T = (E\ I/\ n_h)^{1/5} \qquad \text{VI.3}$$

donde

$E\ I$ = rigidez del pilote

n_h = coeficiente de reacción de la subrasante = constante que relaciona el módulo secante de reacción de la subrasante a la profundidad x: $(k = n_h x)$.

3.- Calcular el coeficiente de profundidad, Z_{max}, definido como:

$$Z_{max} = \frac{x_{max}}{T} \qquad \text{VI.4}$$

4.- Calcular la deflexión en cada punto a lo largo del pilote donde se haya construido una curva p-y por medio de la siguiente ecuación:

$$y = A_y \frac{H_t\ T^3}{E\ I} + B_y \frac{M_t\ T^2}{E\ I} \qquad \text{VI.5}$$

donde

A_y = coeficiente de deflexión debido a la carga lateral y que se encuentra graficado en la figura VI.2.

H_t = carga lateral en la cabeza del pilote.

T = factor de rigidez relativa.

B_y = coeficiente de deflexión debido al momento. Se encuentra graficado en la figura VI.3.

M_t = momento aplicado en la cabeza del pilote.

$E\ I$ = rigidez del pilote.

Los coeficientes de deflexión A_y, y B_y se obtienen de -- las gráficas en función del coeficiente de profundidad '- - ($Z = x/T$) y del valor del coeficiente de profundidad máxima,- calculado en el paso anterior.

5.- De una curva p-y, seleccionar el valor de resisten-- cia del suelo p, que corresponda al valor de la deflexión del pilote y en la profundidad de la curva p - y. Se repite el - procedimiento para cada curva p-y que haya sido construida.

6.- Calcular un módulo secante de la reacción de la sub- rasante en cada curva, usando la siguiente ecuación:

$$k = p/y \qquad \text{VI.6}$$

Graficar los valores de k contra la profundidad

7.- De la gráfica obtenida en el paso anterior, calcular el coeficiente n_h, el cual relaciona k con la profundidad - - ($n_h = k/x$). Debe darse mayor importancia a los valores de k- que se encuentran cerca de la superficie del suelo.

8.- Con el valor de n_h encontrado en el paso anterior, - calcular un nuevo valor del factor de rigidez relativa (ecua— ción IV.3). Comparar este nuevo valor con el que se supuso - en el paso 2. Se repiten los pasos del 2 al 8, usando los -- nuevos valores de T hasta que el valor supuesto de T en el pa so 2, sea igual al valor calculado de T en el paso 8.

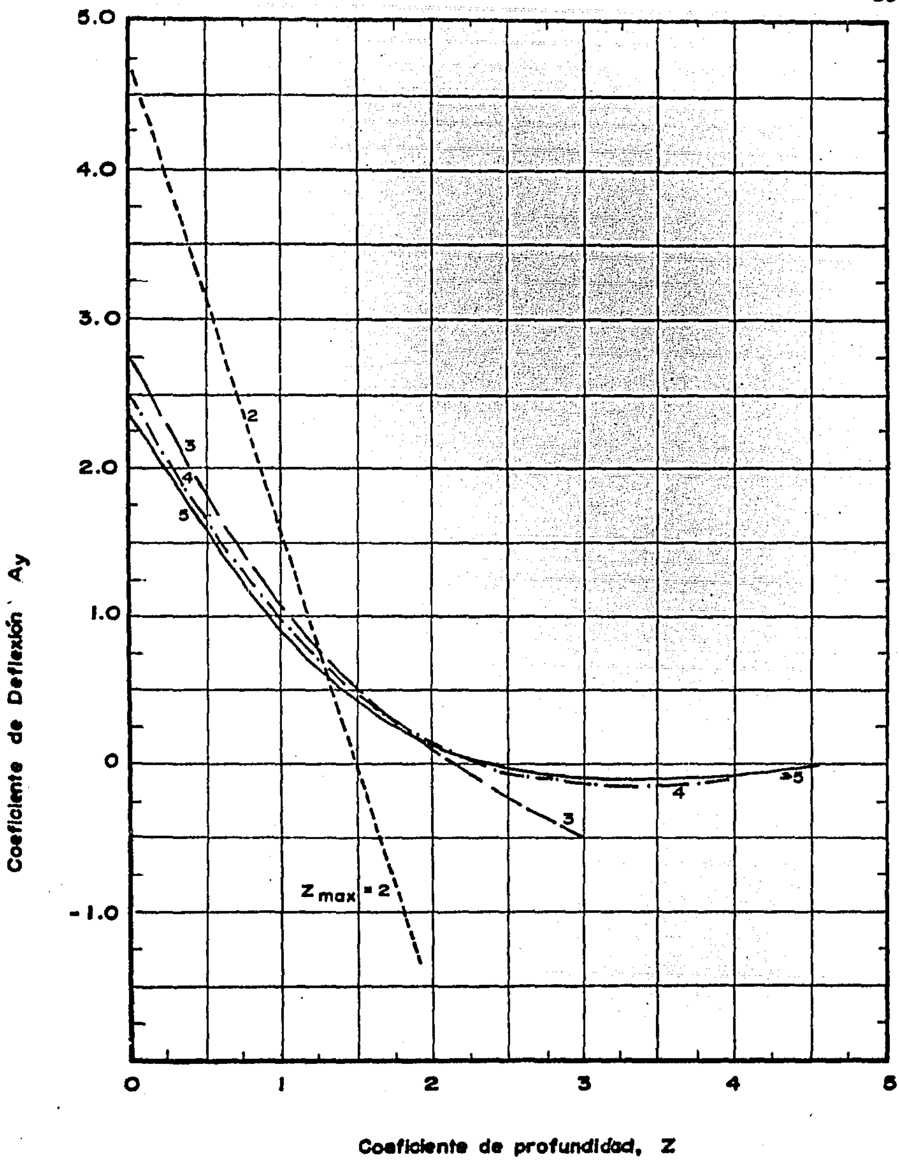


Fig. VI.2 Deflexión del pilote producido por la carga lateral.

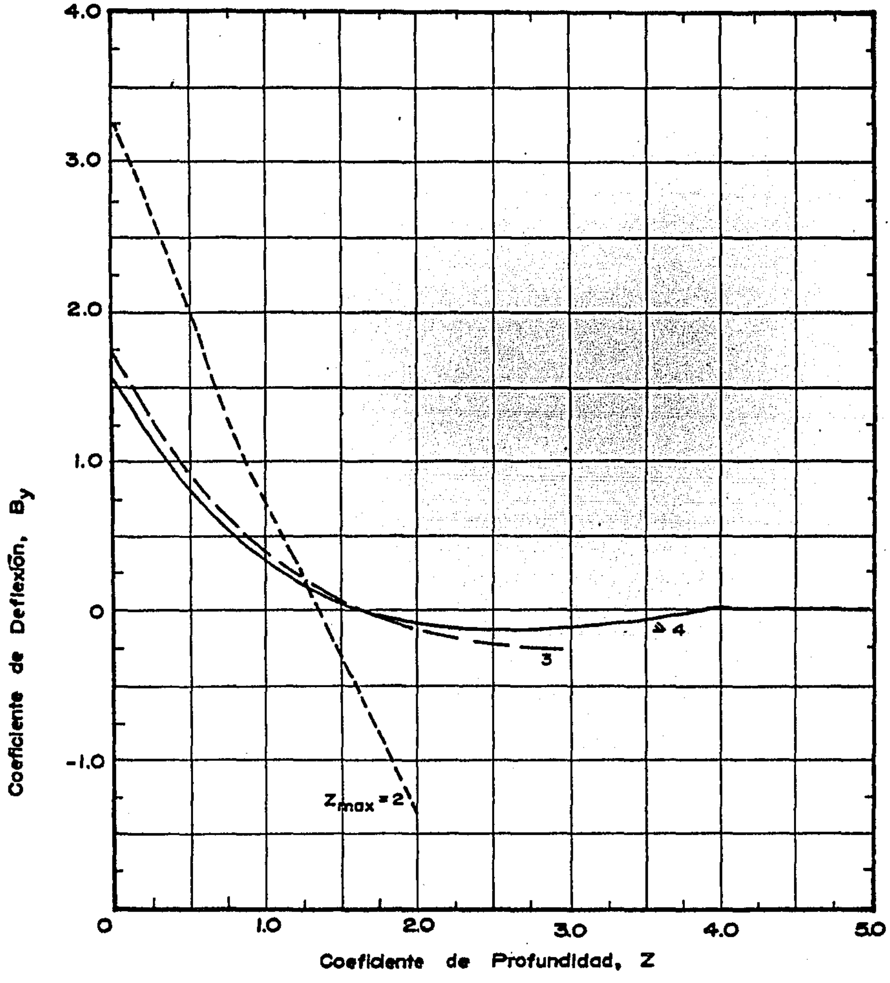


Fig. VI.3 Deflexión del pilote producida por el momento aplicado en la superficie del suelo.

9.- Cuando el proceso iterativo ha sido terminado (T calculado = T supuesto), los valores de deflexión a lo largo del pilote son conocidos del paso 4 en la última iteración. Los valores de reacción del suelo pueden calcularse de la expresión VI.6. Los valores de curvatura, momento y esfuerzo cortante pueden ser encontrados de las siguientes expresiones:

$$s = A_s \frac{H_t \; T^2}{E \; I} + B_s \frac{M_t \; T}{E \; I} \qquad \text{VI.7}$$

$$M = A_m H_t \; T + B_m \; M_t \qquad \text{VI.8}$$

$$Q = A_q \; H_t + B_q \; \frac{M_t}{T} \qquad \text{VI.9}$$

Los coeficientes de curvatura, momento y cortante, se encuentran graficados en las figuras VI.4 a la VI.9, en función de los coeficientes de profundidad.

b) Pilote de cabeza fija al giro (Fig. VI.1b)

En este caso se considera que la estructura sustentada por el pilote, presenta una rigidez mucho mayor que la de éste. No se presenta rotación, pero sí desplazamiento en la cabeza del pilote.

1.- Se efectúan los pasos 1, 2, y 3 de un pilote de cabeza libre al giro.

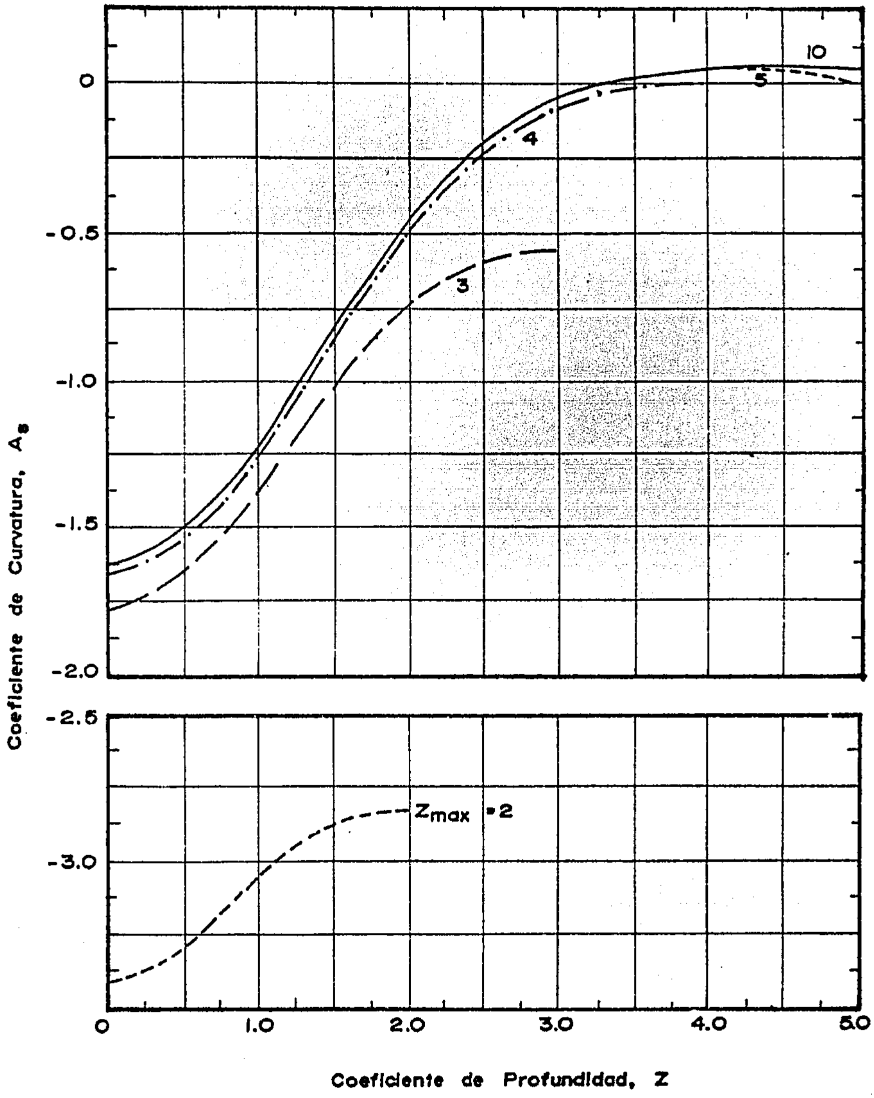


Fig. VI.4 Curvatura del pilote producida por la carga lateral aplicada en la superficie del suelo.

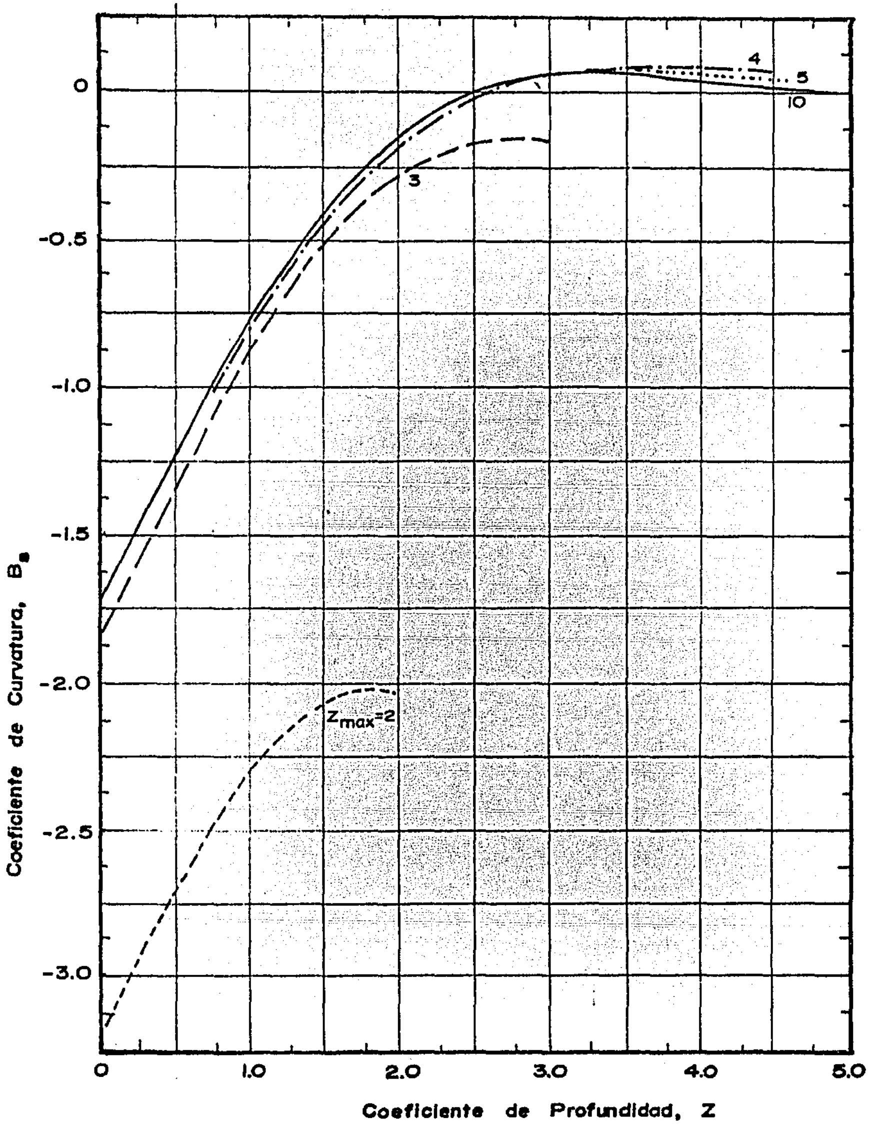


Fig. VI.5 Curvatura del pilote producida por el momento aplicado en la superficie del suelo.

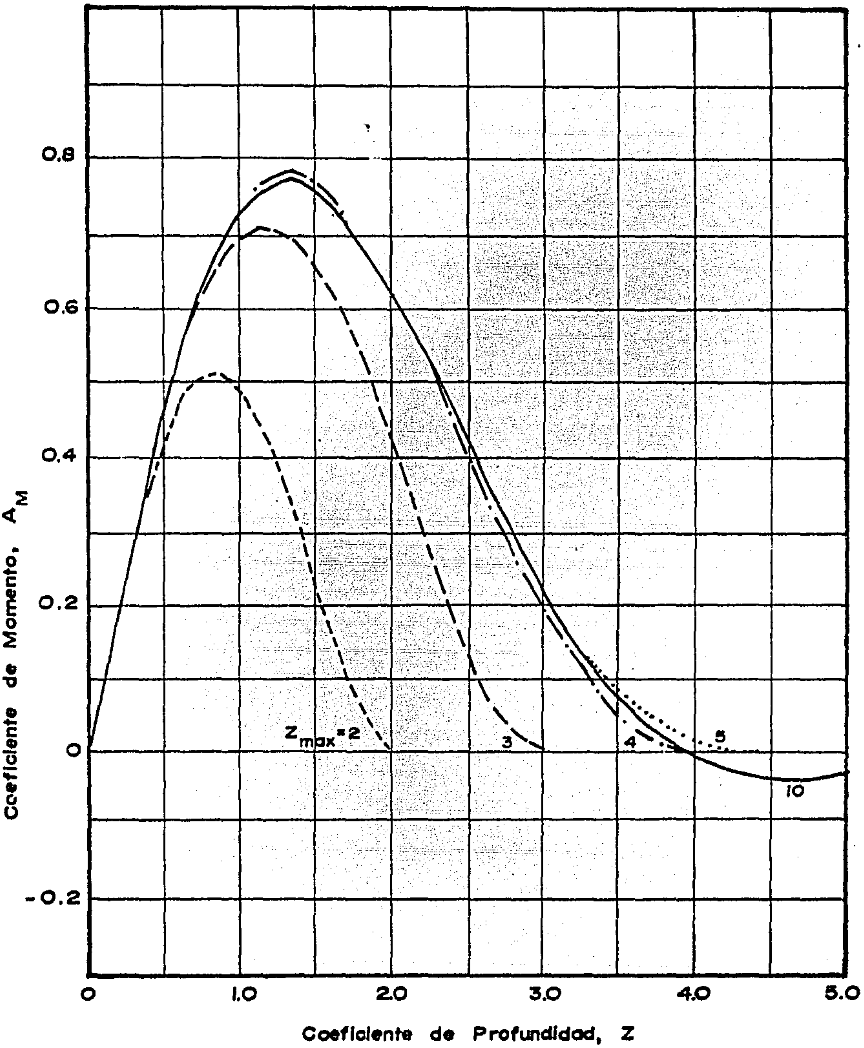


Fig. VI.6 Momento flexionante producido por la carga lateral aplicada en la superficie del suelo.

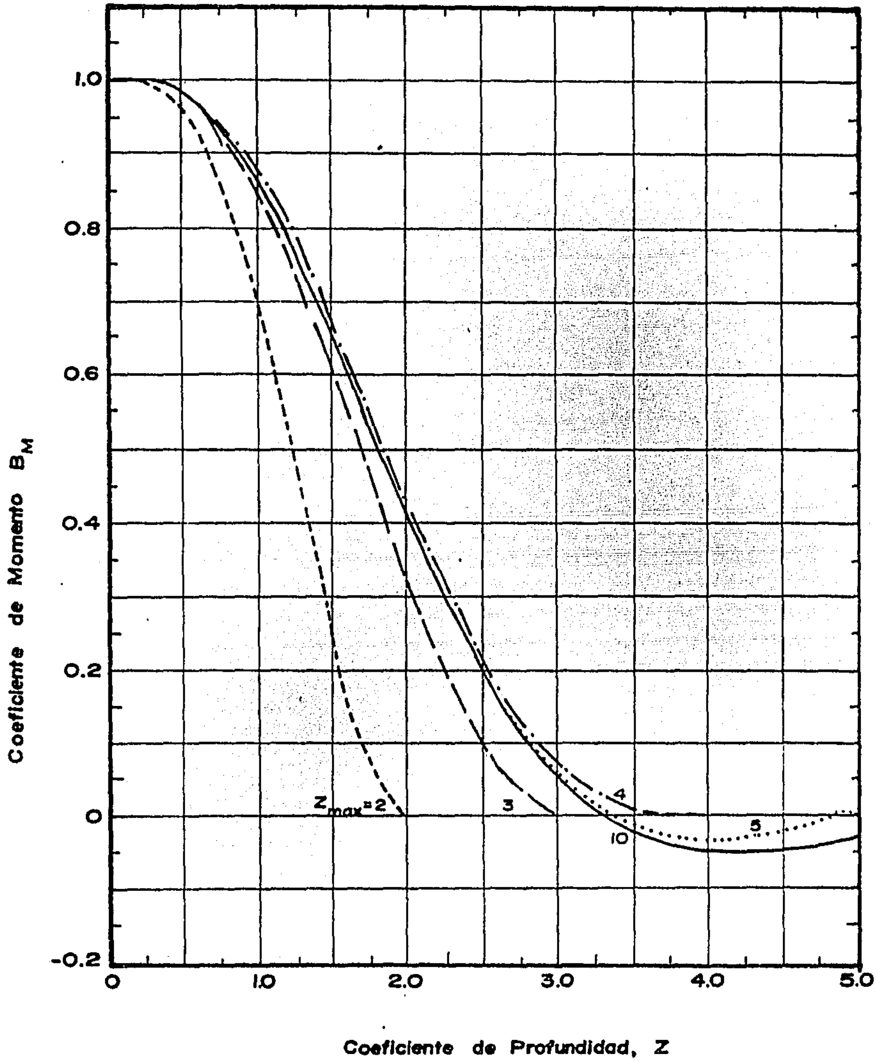


Fig. VI.7 Momento flexionante producido por el momento aplicado en la superficie del suelo.

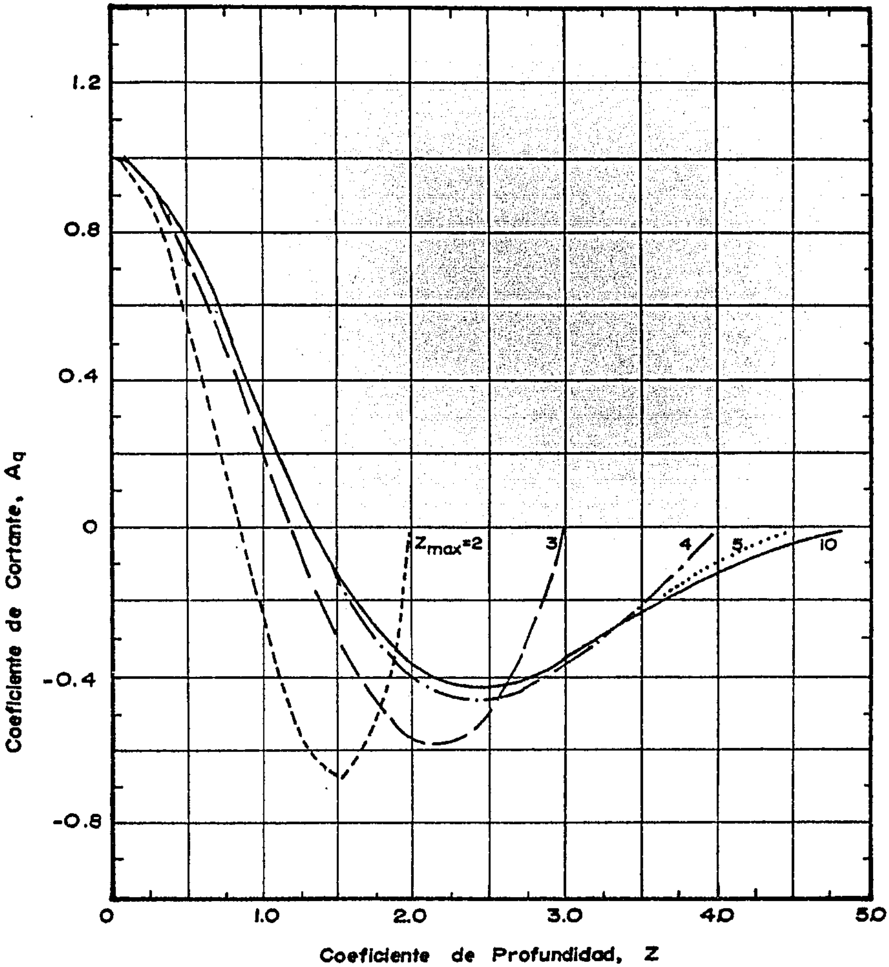


Fig. VI.8 Cortante producido por la carga lateral aplicado en la superficie del suelo.

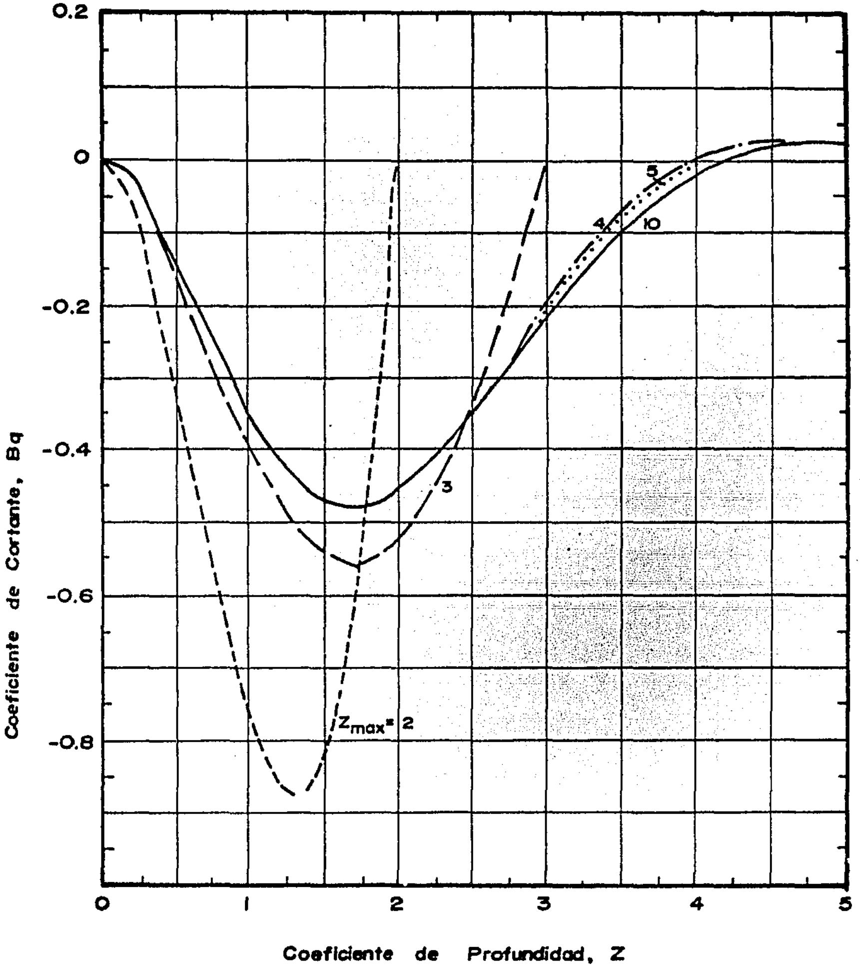


Fig. VI.9 Cortante producido por el momento aplicado en la superficie del suelo.

2.- Calcular la deflexión "y" en cada punto a lo largo - del pilote donde se haya construido una curva p - y, por me-- dio de la siguiente ecuación:

$$y_F = F_y \frac{H_t \; T^3}{E \; I} \qquad \text{VI.10}$$

Los coeficientes de deflexión F_y, pueden ser encontrados en la figura VI.10, por medio de los valores apropiados de -- los coeficientes de profundidad.

3.- Se realizan los pasos 5, 6, 7 y 8 de un pilote de ca beza libre al giro.

4.- Calcular el momento en la cabeza del pilote mediante la siguiente ecuación:

$$M_t = F_{Mt} \; H_t \; T \qquad \text{VI.11}$$

El valor de F_{Mt}, puede ser encontrado en la tabla VI.1 - usando los valores apropiados de los coeficientes de profundi dad.

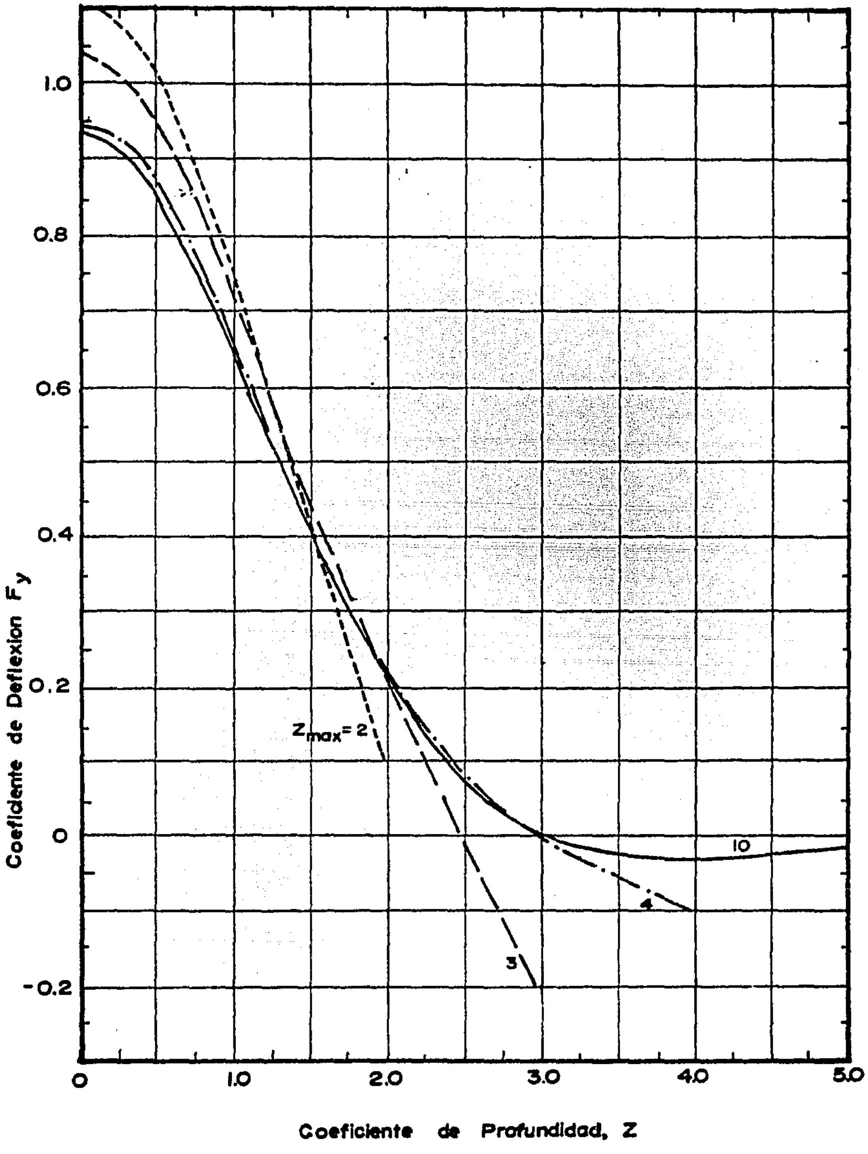


Fig. VI.10 Deflexión de un pilote de cabeza fija al giro.

TABLA VI.1

Coeficientes de momento en la superficie del suelo para un pilote de cabeza fija.

Z_{max}	F_{Mt}
2	-1.06
3	-0.97
4	-0.93
5	-0.93

5.- Calcular los valores de curvatura, momento, cortante y reacción del suelo con las mismas ecuaciones y figuras que se usaron en el caso de un pilote de cabeza libre al giro.

c) Pilote de cabeza restringida al giro (fig.VI.1c)

En este caso se considera que existe desplazamiento pero no rotación en la cabeza del pilote.

1.- Se efectúan los pasos 1, 2, y 3 de un pilote de cabeza libre al giro.

2.- Obtener un valor de la rigidez al giro k_θ, en función del sistema pilote-superestructura. La rigidez al giro se define como:

$$k_\theta = \frac{M_t}{S_t} \qquad \text{VI.12}$$

donde M_t = momento en la cabeza del pilote.

s_t = curvatura en la cabeza del pilote.

3.- Calcular la curvatura en la cabeza del pilote s_t, - por medio de la siguiente expresión:

$$s_t = A_{st} \frac{H_t T^2}{E I} + B_{st} \frac{M_t T}{E I} \qquad \text{VI.13}$$

donde A_{st}, B_{st} = Coeficientes de curvatura, los cuales se - encuentran graficados en las figuras VI.4- y VI.5.

4.- Resolver las ecuaciones VI.12 y VI.13 n forma simultánea para obtener el valor del momento en la cabeza del pilote, M_t.

5.- Realizar los pasos 4 a 9 de un pilote de cabeza li-- bre al giro.

VI.2 SOLUCION POR MEDIO DE DIFERENCIAS FINITAS

Aunque el método adimensional presentado en la sección - anterior, permite resolver el problema de un pilote cargado - lateralmente, éste puede ser analizado en forma más aproximada empleando la técnica de di^erencias finitas (Ref. 7).

Este procedimiento presenta varias ventajas sobre los ex puestos en el comportamiento lineal y aún,,sobre el de coeficientes adimensionales. Algunas de estas ventajas son:

a) Permite la inclusión de cambios en la rigidez del pilote con la profundidad. En la práctica, algunas veces se proyecta una ampliación de la sección del pilote cerca de la superficie del pilote, con el fin de obtener una mayor capacidad en la carga lateral. Esta ampliación se proyecta cerca de la superficie del suelo debido a que es ahí donde se generan mayores valores del momento y cortante en el pilote.

b) Puede ser considerada la carga axial.

c) Permite considerar la estratificación en una forma más fácil.

La solución por medio de diferencias finitas, se basa en una aplicación iterativa de los valores del módulo de reacción de la subrasante, los cuales son ajustados hasta que los valores de reacción del suelo "p" y deflexión "y", sean compatibles con las propiedades reales esfuerzo-deformación del suelo. Este proceso requiere de la ayuda de una computadora para su desarrollo.

De acuerdo con lo mencionado en la sección III.3 (soluciones numéricas), el pilote se divide en n secciones de igual longitud y a los puntos que marcan la separación entre las secciones se les denomina puntos nodales (Fig. VI.11) Se considera además la existencia de cuatro puntos nodales ficti-

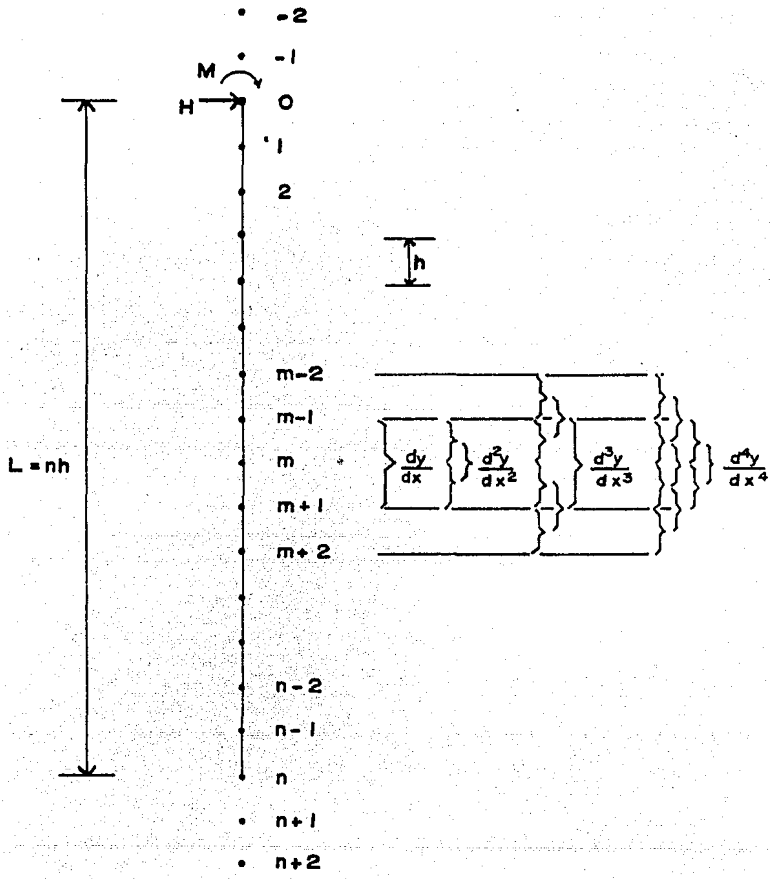


Fig. VI.11 División del pilote en el método de diferencias finitas.

cios los cuales se localizan fuera del pilote. Entre mayor - sea la cantidad de elementos en que se divide el pilote, ma-- yor será el grado de aproximación al comportamiento real.

Para el análisis por diferencias finitas, se requiere de la construcción de las curvas p-y, en cada uno de los puntos- nodales localizados a lo largo del pilote. En función de un- módulo secante se suponen valores del módulo de reacción de - la subrasante (k en FL^{-2}), denominándose a estos valores como k_0, k_1 , k_2, hasta k_n de acuerdo con la profundidad a que co- rrespondan.

Si el pilote presenta una variación de su rigidez con la profundidad, ésta deberá ser señalada como $(E\ I)_0$, $(E\ I)_1$, -- hasta $(E\ I)_n$.

Primero se presentarán las soluciones de un pilote de ca beza libre al giro y a continuación las de uno de cabeza res- tringida.

<u>Pilote de cabeza libre al giro</u>

Las ecuaciones generales de un pilote cargado lateralmen te expresadas en forma de diferencias finitas para un punto m son:

$$\frac{s_m}{(E\ I)_m} = \frac{y_{m+1} - y_{m-1}}{2\ h} \qquad \text{VI.14}$$

$$\frac{M_m}{(E\ I)_m} = \frac{y_{m+1} - 2y_m + y_{m-1}}{h^2} \qquad \text{VI.15}$$

$$\frac{Q_m}{(E\ I)_m} = \frac{y_{m+2} - 2y_{m+1} + 2y_{m-1} - y_{m-2}}{2\ h^3} \qquad \text{VI.16}$$

$$\frac{-p_m}{(E\ I)_m} = \frac{y_{m+2} - 4y_{m+1} + 6\,y_m - 4y_{m-1} + y_{m-2}}{h^4} \qquad \text{VI.17}$$

Por conveniencia en el desarrollo de las ecuaciones se supondrá $R_m = (E\ I)_m$

Las condiciones frontera en un pilote de cabeza libre al giro, están dadas por las ecuaciones III.18 y III.19. Expresadas éstas en forma de diferencias finitas para el punto 0 (cabeza -- del pilote), se tiene:

$$\frac{M_o h^2}{R_o} = y_1 - 2y_o + y_{-1} \qquad \text{VI.18}$$

$$\frac{2H_o h^3}{R_o} = y_2 - 2y_1 + 2y_{-1} - y_{-2} \qquad \text{VI.19}$$

De la ecuación III.2, se sabe que $p_m = k_m y_m$. Sustituyendo en la ecuación VI.17:

$$- \frac{k_m \, y_m \, h^4}{R_m} = y_{m+2} - 4y_{m+1} + 6_{ym} - 4y_{m-1} + y_{m-2} \qquad \text{VI.20}$$

Reexpresando la ecuación VI.20

$$y_{m+2} - 4y_{m+1} + W_m y_m - 4y_{m-1} + y_{m-2} = 0 \qquad \text{VI.21}$$

donde

$$W_m = 6 + \frac{k_m \, h^4}{R_m} \qquad \text{VI.22}$$

La ecuación VI.19 se aplica de los puntos 0 a n contenidos en el pilote, lo que nos proporciona n+1 ecuaciones.

En un pilote de punta flotante, se tiene que el momento y el esfuerzo cortante son iguales a cero en el nodo n (ecuaciones III.21 y III.22). Expresando estas condiciones en forma de diferencias finitas:

$$y_{n-1} - 2y_n + y_{n+1} = 0 \qquad \text{VI.23}$$

$$y_{n-2} - 2y_{n-1} + 2y_{n+1} - y_{n+2} = 0 \qquad \text{VI.23}$$

Las ecuaciones VI.18, VI.19, VI.23, VI.24 y las proporcionadas por la ecuación VI.21, forman un sistema de n+ 5 ecuaciones con n+ 5 incógnitas (matriz VI.1).

nodo	y_{-2}	y_{-1}	y_0	y_1	y_2	y_3	y_4	...	y_{m-2}	y_{m-1}	y_m	y_{m+1}	y_{m+2}	...	y_{n-4}	y_{n-3}	y_{n-2}	y_{n-1}	y_n	y_{n+1}	y_{n+2}	
0	-1	2		-2	1	.	.		.	.	.	.	.		.	.	.	.	.	.	.	$2\ H\ h^3/R_o$
0	.	1	-2	1	.	.	.		.	.	.	.	.		.	.	.	.	.	.	.	$M\ h^2/R_o$
0	1	-4	W_o	-4	1	.	.		.	.	.	.	.		.	.	.	.	.	.	.	0
1	.	1	-4	W_1	-4	.	.		.	.	.	.	.		.	.	.	.	.	.	.	0
2	.	.	1	-4	W_2	-4	1		.	.	.	.	.		.	.	.	.	.	.	.	0
⋮																						
m	.	.	.	.	.	.	.		1	-4	W_m	-4	1		.	.	.	.	.	.	.	0
⋮																						
n-2	.	.	.	.	.	.	.		.	.	.	.	.		1	-4	W_{n-2}	-4	1	.	.	0
n-1	.	.	.	.	.	.	.		.	.	.	.	.		.	1	-4	W_{n-1}	-4	.	.	0
n	.	.	.	.	.	.	.		.	.	.	.	.		.	.	1	-4	W_n	-4	1	0
n+1	.	.	.	.	.	.	.		.	.	.	.	.		.	.	-1	2	.	-2	1	0
n+2	.	.	.	.	.	.	.		.	.	.	.	.		.	.	.	1	-2	1	.	0

Para un pilote de cabeza restringida al giro, se usa $y_{+1} - y_{-1} = 0$ en el segundo renglón.

MATRIZ VI.1

Los valores supuestos de k_m a partir de las curvas p - y, son introducidos en la ecuación VI.22, siendo ahora posible resolver el sistema de ecuaciones.

Una vez resuelto el sistema con los desplazamientos de "y" obtenidos, se entra a las curvas p-y para obtener valores de "p". Usando un módulo secante, se obtienen nuevos valores del módulo de reacción de la subrasante k_m para cada punto nodal. Estos nuevos valores de k_m, son sustituidos en la ecuación VI.22, lo que nos da nuevos valores de W_m, los cuales reemplazan a los anteriores valores en el sistema de ecuaciones (matriz VI.1).

De esta manera se obtienen nuevos desplazamientos, los cuales serán usados en una nueva iteración. El procedimiento se aplica nuevamente hasta obtener la aproximación deseada.

<u>Pilote de cabeza restringida al giro</u>

En un pilote de cabeza restringida al giro, se considera que la rotación del pilote en la superficie del suelo es igual a cero. Expresando esta condición en forma de diferencias finitas, se tiene:

$$y_1 - y_{-1} = 0 \qquad \text{VI.25}$$

Esta expresión sustituye a la VI.18 en el Sistema de ecuaciones (matriz VI.1). El procedimiento que se sigue para obtener la solución final es análogo al presentado para un pilote de cabeza libre.

CAPITULO VII

APLICACION DE LOS DIVERSOS METODOS A UN CASO PARTICULAR.

CALCULO DE PILOTES SOMETIDOS A CARGAS LATERALES.

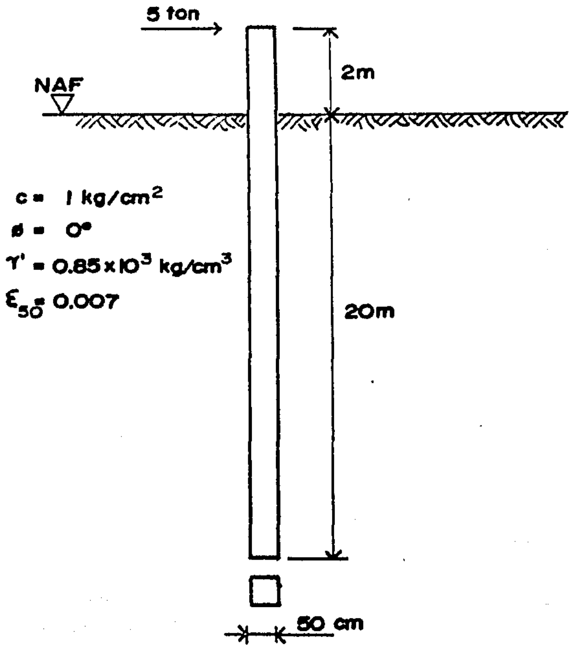
Con el fin de aclarar los conceptos y mostrar la aplicación de los diversos métodos, se analizarán en este capítulo dos pilotes sometidos a cargas laterales en distintas condiciones de trabajo.

El primer caso se trata de un pilote de cabeza libre al giro, el cual es sometido sólo a la acción de una carga lateral aplicada con cierta excentricidad sobre la superficie del suelo. El empotramiento del pilote se tiene en un solo estrato, constituido por arcilla preconsolidada. Por las características de estratigrafía y condiciones de trabajo, es posible la resolución de este caso por la mayoría de los métodos presentados, con excepción del análisis estático, esto es debido a que este método sólo es aplicable a pilotes muy cortos (infinitamente rígidos).

En el segundo caso, se tiene una pila de cabeza libre al giro la cual además de resistir la carga lateral, también se encuentra sujeta a una carga axial. Regularmente el análisis de pilotes sometidos a cargas laterales y cargas axiales se ha hecho por separado, no obstante, en este caso en la solución - por diferencias finitas se incluirán los efectos de la carga - axial. Para este caso, se ha considerado la presencia de dos- estratos en la longitud de empotramiento de la pila; el estrato superior corresponde a una arcilla blanda, mientras que el- segundo estrato corresponde a una arena. Debido a estas condiciones estratigráficas y a las condiciones de trabajo, no es - factible obtener una solución por los análisis lineales, por - lo que se resolverá solamente por el método de coeficientes -- adimensionales y por medio del análisis de diferencias finitas.

CASO 1

Se tiene un pilote que sirve como duque de alba. El pilote que se propone usar es de concreto reforzado y sección transversal cuadrada con 50 cm. por lado. Su rigidez es de EI = 1.094×10^{11} kg cm^2, y presenta una longitud de empotramiento de 20 m. Se considera que la carga lateral a la cual se encuentra sometido el pilote es de 5 ton, aplicada 2 m sobre la superficie del suelo. El suelo en el cual se encuentra es una arcilla preconsolidada con una resistencia al esfuerzo cortante de c = 10 ton/m^2, peso específico de 1.85 ton/m^3 y un valor de ε_{50} = 0.007. El nivel freático se encuentra localizado al nivel de la superficie del suelo.



Datos de carga

$H = 5 \times 10^3$ kg
$e = 200$ cm
$M = 1 \times 10^6$ kg cm

Datos del pilote:
$b = 50$ cm
$L = 2000$ cm
$EI = 1.094 \times 10^{11}$ kg cm^2

a) Obtención de la capacidad de carga última por el método de Broms.

Se obtiene la relación L/d

$$\frac{2000}{50} = 40$$

De la relación L/d y de la figura II.8a, se considera al pilote como elemento largo, por lo que, la solución de la carga última se obtiene de la figura II.8b en función de e/d y de $M_y/c\ d^3$.

De acuerdo con la sección y el material del pilote, se encontró que su momento de falla es de 1.78×10^6 Kg-cm, por lo que:

$$\frac{M_y}{c\ d^3} = \frac{1.78 \times 10^6 \text{ Kg cm}}{1 \text{ Kg/cm}^2\ (50 \text{ cm})^3} = 14.23$$

De la figura II.8b, se obtiene $H_u/c\ d^2 = 3.1$

$$H_u = 3.1\ (1 \text{ Kg/cm}^2)/(50 \text{ cm})^2 = 7750 \text{ Kg}$$

El valor de la carga última es de 7750 Kg, lo cual es mayor que la carga a que se someterá el pilote. El factor de seguridad que se obtiene es:

$$F_s = \frac{7750 \text{ kg}}{5000 \text{ kg}} = 1.55$$

b) Obtención del desplazamiento y rotación del pilote en la superficie del suelo por el método de Broms.

Se obtiene el valor de β definido en la ecuación V.1

$$\beta = \left(\frac{1.97\ (50)}{4\ (1.094 \times 10^{11})} \right)^{0.25} = 0.0038736$$

De la relación βL se puede apreciar si el pilote se comporta como largo o como corto

$$\beta L = 7.74 \quad \therefore \text{ es un pilote largo.}$$

Como es un pilote largo se aplicarán las ecuaciones V.11- y V.12, para encontrar el valor del desplazamiento y la rotación del pilote.

$$y = \frac{[2(5000)\ 0.0038736]\ [2(0.0038736) + 1]}{1.97\ (50)}$$

$$y = 0.6979 \text{ cm}$$

$$s = \frac{[2(5000)\ (0.0038736)^2]\ [1 + 2(200)\ 0.0038736)]}{1.97\ (50)}$$

$$y = 0.0038836 \qquad \theta = 0°13'\ 21''$$

c) Obtención del desplazamiento y la rotación del pilote- en la superficie del suelo por el método de Barber.

De acuerdo con las características del suelo, de la tabla IV.2 se obtiene $k_{s1} = 148\ Kg/cm^3$, el cual será aplicado en la- ecuación IV.6, para obtener el valor del módulo de reacción de la subrasante.

$$k_h = \frac{148\ Kg/cm^3}{1.5\ (50)} = 1.97\ Kg/cm^3$$

Se obtiene una relación de rigideces, la que será usada - para obtener de la figura V.1 los factores de influencia.

$$\frac{k_h D L^4}{E\ I} = \frac{1.97\ Kg/cm^3\ (50\ cm)\ (2000\ cm)^4}{1.094 \times 10^{11}\ Kg\ cm^2} = 14409.143$$

Factor de desplazamiento	Factores de rotación
$I_{yH} = 16$	$I_{sH} = 100$
$I_{yM} = 100$	$I_{sM} = 1800$

Aplicando los valores de influencia apropiadamente en -- las ecuaciones V.6 y V.7, se obtiene:

$$y = \left(\frac{5000}{1.97\ (50)\ (2000)} \right) 16 \ + \ \left(\frac{1 \times 10^{6}}{1.97\ (50)\ (2000)^{2}} \right) 100$$

$$y = \ 0.6599 \text{ cm}$$

$$s = \left(\frac{5000}{1.97\ (50)\ (2000)^{2}} \right) 100 \ + \ \left(\frac{1 \times 10^{6}}{1.97\ (50)\ (2000)^{3}} \right) 1800$$

$s = 0.0035533$ $\qquad\qquad$ $\theta = 0°12'13''$

d) Obtención del desplazamiento y la rotación del pilote al nivel de la superficie del suelo por medio del análisis -- elástico.

De la ecuación V.27 se obtiene el factor de flexibilidad del pilote K_R.

$$K_R = \frac{1.094 \times 10^{11}}{98\ (2000)^{4}} = 0.00006975$$

Con el valor de K_R y la relación L/d se obtienen los factores elásticos de influencia de las figuras V.9, V.10 y V.11.

$L/d = 40$

Factores elásticos de desplazamiento	Factores elásticos de rotación
$I_{yH} = 13$	$I_{sH} = 90$
$I_{yM} = 90$	$I_{sM} = 1500$

Aplicando las ecuaciones V.28 y V.29 se obtiene el desplazamiento y la rotación respectivamente.

$$y = 13\left(\frac{5000}{98\ (2000)}\right) + 90\left(\frac{1 \times 10^6}{98\ (2000)^2}\right)$$

$$y = 0.5612 \text{ cm}$$

$$s = 90\left(\frac{5000}{98\ (2000)^2}\right) + 1500\left(\frac{1 \times 10^6}{98\ (2000)^3}\right)$$

$$s = 0.003061 \qquad \theta = 0°10'\ 31''$$

e) Solución por el procedimiento de coeficientes adimensionales.

En este caso se siguen los pasos enumerados en la sección VI.1, para un pilote de cabeza libre al giro.

1.- Se construyen las curvas p-y a cada 50 cm por el procedimiento recomendado en la sección IV.4, para arcillas duras bajo el NAF sometidas a carga estática.

A continuación se presenta la construcción de la curva p-y en un punto localizado a 100 cm bajo la superficie del suelo. - Las demás curvas son construidas en forma similar y los resultados de éstas serán presentadas en forma de tabla y de gráficas.

Curva p - y en x = 100

A) Se aplican las ecuaciones IV.24 y IV.25 para obtener el valor de la resistencia última del suelo.

$$p_{c1} = 2(1)\ 50 + 0.85 \times 10^{-3}\ (50)\ 100 + 2.83\ (1)\ 100$$

$$p_{c1} = 387.25 \text{ Kg/cm}$$

$$p_{c2} = 11\ (1)\ (50)$$

$$p_{c2} = 550 \text{ Kg/cm}$$

$$p_{c1} < p_{c2} \quad \therefore \quad \text{rige } p_{c1} = 387.25 \text{ Kg/cm}$$

B) Se obtiene la relación x/b para encontrar el valor de la constante A.

$$\frac{x}{b} = \frac{100}{50} = 2$$

de la figura IV.8 se tiene:

$$A = 0.55$$

C) De la tabla IV.7, en base a la resistencia al esfuerzo cortante no drenado se considera $k = 20.76$ Kg/cm^2. Se --

aplica la ecuación IV.26, la cual nos define la primera porción lineal de la curva p-y

$$p = 20.76\ Kg/cm^3\ (100\ cm)\ y$$

$$p = 2076\ Kg/cm^2\ (y)$$

D) De la ecuación IV.27 se obtiene el valor de y_{50}.

$$y_{50} = 0.007\ (50\ cm) = 0.35\ cm$$

E) La segunda porción de la curva, la cual es parabólica se encuentra definida por la ecuación IV.28.

$$p = 0.5\ (387.25) \left(\frac{y}{0.35}\right)^{0.5}$$

Al igualar las ecuaciones IV.26 y IV.28, se obtiene la - intersección de la porción lineal con la porción parabólica.

$$2076\ y = 193.63 \left(\frac{y}{0.35}\right)^{0.5}$$

$$y_1 = 0.02485\ cm$$

Para valores menores de y = 0.02485 cm se aplica

$$p = 2076\ (y)$$

El valor de Ay_{50} nos limita el valor de y, hasta donde - puede aplicarse la ecuación IV.28.

$$Ay_{50} = (0.55)\ (0.35) = 0.1925$$

$$y_2 = 0.1925 \text{ cm}$$

Para valores de y comprendidos entre "y_1" y "y_2", se - - aplica

$$p = 193.63 \left(\frac{y}{0.35}\right)^{0.5}$$

F) Se define la segunda porción parabólica de la curva - por medio de la ecuación IV.29.

$$p = 193.63 \left(\frac{y}{0.35}\right)^{0.5} - 21.30 \left(\frac{y - 0.1925}{0.1925}\right)^{1.25}$$

El valor de $6Ay_{50}$ limita el valor de aplicación de esta- ecuación.

$$6\ Ay_{50} = 1.155 \text{ cm.} \qquad y_3 = 1.155 \text{ cm}$$

G) Se construye la siguiente porción lineal de la curva- mediante la ecuación IV.30, la cual rige hasta 18 Ay_{50}.

$$18\ Ay_{50} = 18\ (0.55)\ (0.35) = 3.465 \text{ cm}$$

$$p = 192.58 - 69.15\ (y - 1.55)$$

x (cm)	0	50	100	150	200	250	300	≥350
y (cm)	p (Kg/cm)							
0.005	5.98	5.19	10.38	15.57	20,76	25.95	31.14	32.87
0.01	8.45	10.38	20.76	31.14	41.52	46.48	46.48	46.48
0.02	11.95	20.76	41.52	62.28	65.74	65.74	65.74	65.74
0.04	16.90	41.18	65.46	89.73	92.97	92.97	92.97	92.97
0.06	20.76	50.44	80.17	109.90	113.86	113.86	113.86	113.86
0.08	23.42	58.24	92.57	126.90	131.48	131.48	131.48	131.48
0.10	24.82	65.11	103.50	141.88	146.99	146.99	146.99	146.99
0.15	26.23	79.75	126.76	173.77	180.03	180.03	180.03	180.03
0.20	25.87	89.48	146.00	200.65	207.88	207.88	207.88	207.88
0.25	24.35	96.06	158.94	219.65	228.61	228.61	228.61	228.61
0.30	21.96	100.95	168.98	234.15	244.11	244.11	244.11	244.11
0.40	15.25	107.24	183.60	255.64	267.29	267.29	267.29	267.29
0.50	12.24	110.21	193.18	270.28	283.40	283.40	283.40	283.40
0.75	7.78	108.11	202.97	287.76	304.06	304.06	304.06	304.06
1.00	3.32	97.64	199.42	287.31	306.35	306.35	306.35	306.35
1.50	0.0	75.89	168.72	250.24	272.15	272.15	272.15	272.15
2.00	0.0	54.13	134.14	202.84	223.05	223.05	223.05	223.05
2.50	0.0	32.38	99.57	155.45	173.94	173.94	173.94	173.94
3.00	0.0	17.81	64.99	108.05	124.83	124.83	124.83	124.83
3.50	0.0	17.81	32.84	60.65	75.73	75.73	75.73	75.73
3.78	0.0	17.81	32.84	46.05	48.23	48.23	48.23	48.23
4.00	0.0	17.81	32.84	46.05	48.23	48.23	48.23	48.23

TABLA VII.1 Curvas p-y (1er. caso)

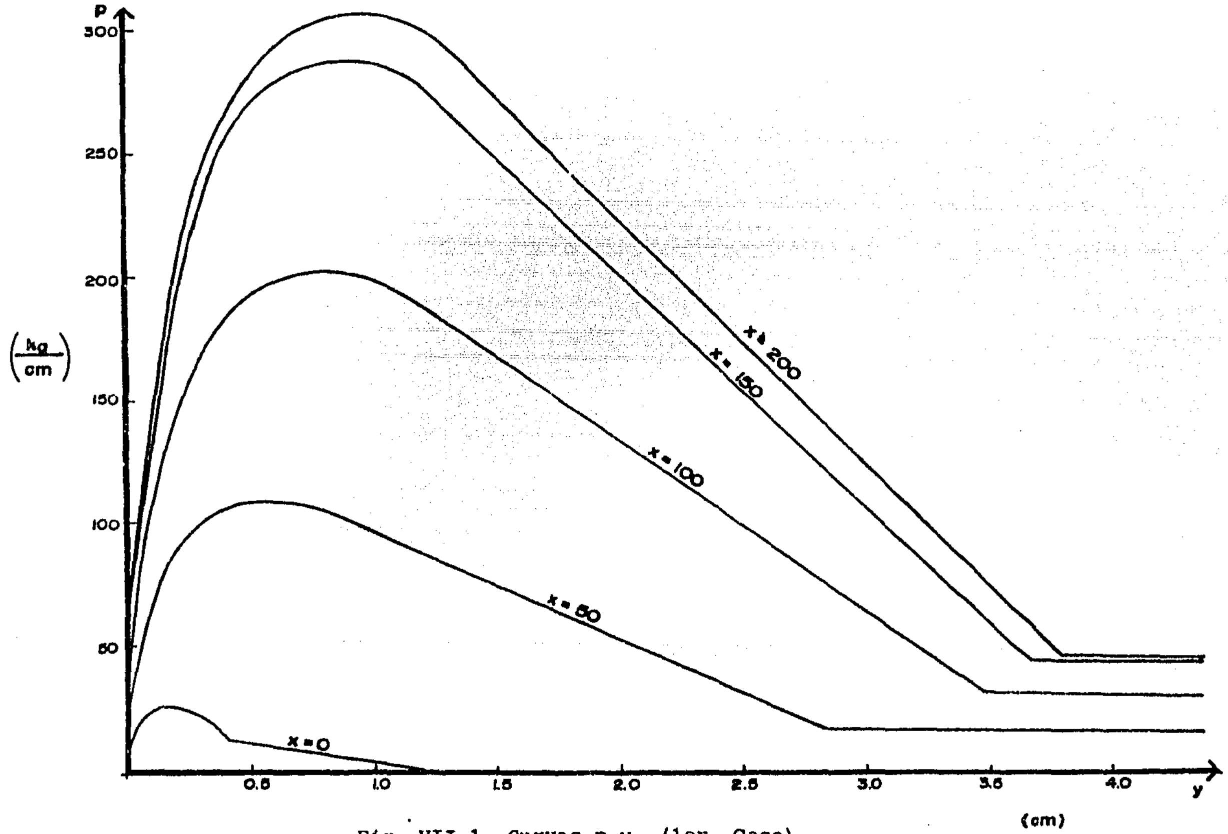


Fig. VII.1 Curvas p-y (1er. Caso)

H) La porción final de la curva se encuentra definida por la ecuación IV.31.

$$p = 32.837 \text{ Kg/cm}$$

Este valor rige para todos los valores mayores de $y = 3.465$ cm.

Se calculan varios puntos de la curva, los cuales están colocados en la tabla VII.1. Se hace el mismo procedimiento en el cálculo de las demás y los resultados se encuentran en la tabla VII.1 y en la figura VII.1.

2.- Se supondrá un valor de $n_h = 5$, para calcular el valor de rigidez relativa T definido por la ecuación VI.3.

$$T = \left(\frac{1.09375 \times 10^{11}}{5} \right)^{0.2}$$

$$T = 116.95$$

3.- Se obtiene Z_{max}

$$Z_{max} = \frac{2000}{116.95} = 17.10$$

4.- En base a los coeficientes de profundidad, se localizan los coeficientes de deflexión de las figuras VI.2 y VI.3, los cuales serán usados en la ecuación VI.5 para obtener el desplazamiento en distintas profundidades. Los resultados es tán contenidos en la tabla VII.2.

TABLA VII.2.

x (cm)	Z=x/T	Ay	y_A (cm)	B_y	y_B (cm)	y (cm)
0	0.0	2.40	0.176	1.60	0.200	0.376
50	0.43	1.70	0.124	0.95	0.119	0.243
100	0.86	1.12	0.082	0.47	0.059	0.141
150	1.28	0.63	0.046	0.15	0.019	0.065
200	1.71	0.25	0.018	0.00	0.000	0.018
250	2.14	0.07	0.005	-0.08	-0.010	-0.005
300	2.57	-0.04	-0.003	-0.10	-0.013	-0.015
350	2.99	-0.06	-0.004	-0.09	-0.011	-0.016
400	3.42	-0.07	-0.005	-0.06	-0.008	-0.013
500	4.28	-0.03	-0.002	0.0	0.0	-0.002
750	6.41	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2000	17.10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

5.- Con los valores de "y" obtenidos, se recurre a las curvas p-y para encontrar los valores de reacción del suelo y módulo de reacción de la subrasante. Los resultados se encuentran en la tabla VII.3.

TABLA VII.3

x (cm)	y (cm)	p (kg/cm)	k (kg/cm^2)
0	0.376	16.88	44.96
50	0.243	95.15	391.41
100	0.141	122.76	872.53
150	0.065	113.98	1758.95
200	0.018	61.62	3367.36
250	-0.005	- 25.43	5190.00
300	-0.015	- 56.88	3693.53
350	-0.016	- 58.06	3670.87
400	-0.013	- 52.18	4141.08
500	-0.002	- 20.79	9449.11
750	0.0	- -	- -
2000	0.0		

6.- Se grafican los valores del módulo de reacción de la subrasante contra la profundidad (Fig. VII.2). De esta figura se obtuvo un nuevo valor de n_h ($n_h = k/x$), dando mayor importancia a los valores de k que se encuentran cerca de la superficie del suelo. Este valor de n_h fue de:

$$n_h = \frac{3000}{295} = 10.2$$

Sustituyendo el valor de 10.2 en la ecuación VI.3 para obtener un nuevo valor de T, se obtiene:

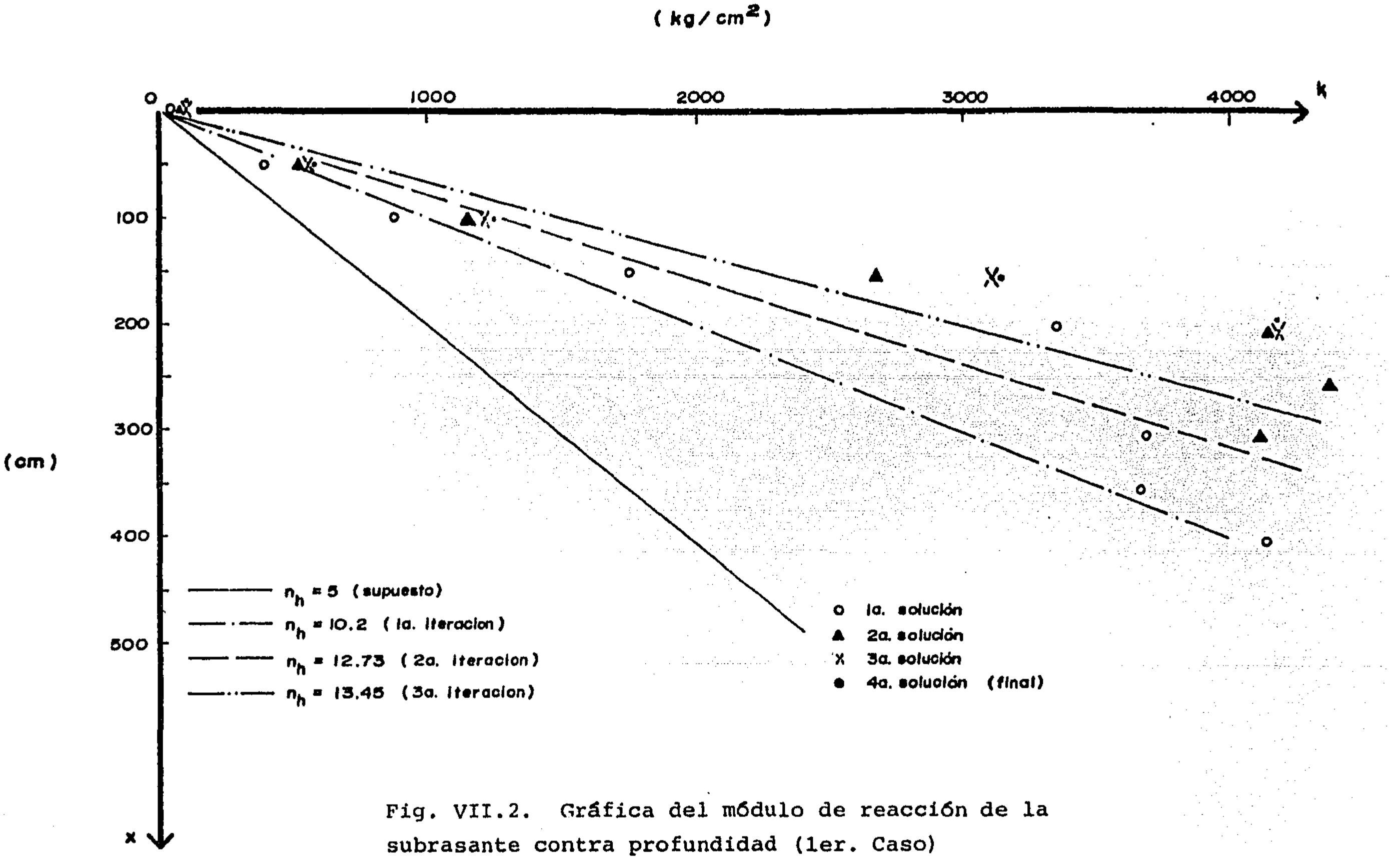


Fig. VII.2. Gráfica del módulo de reacción de la subrasante contra profundidad (1er. Caso)

$$T = \left(\frac{1.094 \times 10^{11}}{10.2} \right)^{0.2} = 101.41$$

Como $T_{calculado} \neq T_{supuesto}$, entonces se realiza una -- nueva iteración con el valor de T calculado. Los valores de- la siguiente iteración se encuentran en la tabla VII.4.

TABLA VII.4

n_h = 10.2 T = 101.41

x (cm)	Z	A_y	B_y	y (cm)	p (kg/cm)	k (kg/cm^2)
0	0.0	2.40	1.60	0.2648	23.72	89.58
50	0.49	1.64	0.87	0.1600	82.32	514.53
100	0.99	0.95	0.39	0.0820	93.72	1142.93
150	1.48	0.47	0.06	0.0280	75.08	2681.32
200	1.97	0.11	-0.06	-0.0004	- 1.66	4152.00
250	2.47	-0.02	-0.11	-0.0113	-49.41	4372.80
300	2.96	-0.06	-0.10	-0.0123	-51.10	4121.16
350	3.45	-0.07	-0.06	-0.0090	-44.03	4838.48
400	3.94	-0.05	-0.01	-0.0033	-27.10	7971.85
500	4.93	-0.01	0.0	-0.0005	- 5.19	10380.00
1000	9.86	0.0	0.0	0.0	- -	- - -
2000	19.72	0.0	0.0	0.0	- -	- - -

De la gráfica de los valores de k en la figura VII.2, se obtuvo un valor de n_h = 12.73. El nuevo valor de n_h se sustituye en la ecuación VI.3 para obtener un nuevo valor de T.

$$T = \left(\frac{1.094\ 10^{11}}{12.073} \right)^{0.2} = 97.01$$

El nuevo valor de T será usado en una nueva iteración, y los resultados se encuentran en la tabla VII.5.

TABLA VII.5

n_h = 12.73 T = 97.01

x (cm)	Z	A_y	B_y	y (cm)	p (kg/cm)	k (kg/cm^2)
0	0.0	2.40	1.60	0.2378	24.81	104.32
50	0.51	1.60	0.84	0.1391	76.79	552.08
100	1.03	0.90	0.42	0.0746	89.39	1198.27
150	1.55	0.38	0.04	0.0193	60.72	3114.00
200	2.06	0.10	-0.07	-0.0018	- 7.47	4152.00
250	2.58	-0.04	-0.10	-0.0103	-47.40	4558.08
300	3.09	-0.06	-0.08	-0.0094	-45.31	4769.10
350	3.59	-0.06	-0.06	-0.0077	-40.79	5297.28
400	4.12	-0.04	0.0	-0.0017	-14.12	8304.00
500	5.15	0.0	0.0	0.0	- -	- -
2000	20.62	0.0	0.0	0.0	- -	- -

Los valores de k obtenidos, se grafican en la figura -- VII.2. De ahí se obtiene un nuevo valor de n_h y de T. El - valor de n_h es igual a 13.45, el cual al ser sustituído en - la ecuación VI.3 proporciona un valor de T = 95.95.

Como 95.95 es semejante al valor de 97.01 obtenido en -

la iteración anterior, se considera que T converge en 95.95, por lo que este valor será usado para obtener la solución final.

Aplicando T = 95.95 en la ecuación VI.5 para obtener -- los valores de desplazamiento, se llega a la tabla VII.6.

TABLA VII.6

$n_h = 13.45$ T = 95.95

x (cm)	y (cm)	A_y	y_A (cm)	B_y	y_B (cm)	y (cm)
0	0.0	2.40	0.097	1.60	0.135	0.2315
50	0.52	1.60	0.065	0.85	0.072	0.1361
100	1.04	0.87	0.035	0.33	0.028	0.0629
150	1.56	0.37	0.015	0.03	0.003	0.0175
200	2.08	0.08	0.003	-0.08	-0.007	-0.0035
250	2.61	-0.05	-0.002	-0.10	-0.008	-0.0104
300	3.13	-0.07	-0.003	-0.08	-0.007	-0.0096
350	3.65	-0.06	-0.002	-0.04	-0.003	-0.0058
400	4.17	-0.04	-0.002	0.02	0.002	0.0001
500	5.21	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2 000	20.85	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Con los valores de desplazamiento obtenidos se entra a - las curvas p-y para obtener los valores del módulo de reac- - ción de la subrasante los cuales se encuentran anotados en la tabla VII.7.

TABLA VII.7

x (cm)	y (cm)	p (kg/cm)	k (kg/cm^2)
0	0.2315	25.03	108.10
50	0.1361	75.96	558.13
100	0.0629	82.08	1304.97
150	0.0175	54.50	3114.00
200	-0.0035	-14.53	4152.00
250	-0.0104	-47.40	4558.08
300	-0.0096	-45.64	4744.20
350	-0.0058	-35.40	6103.58
400	0.0001	0.83	8304.00
500	0.0	- -	- - -
2000	0.0	- -	- - -

Mediante las ecuaciones VI.7, VI.8 y VI.9 se calculan -- los valores de la curvatura, momento y cortante en distintas- profundidades. El valor de los coeficientes adimensionales - están localizados en las tablas VI.4 a la VI.9. El resultado obtenido se encuentra en las tablas VII.8, VII.9 y VII.10.

TABLA VII.8 VALORES DE CURVATURA

x (cm)	Z	A_s	S_A	B_s	S_B (Radianes $x10^{-3}$)	S
0	0.0	1.625	0.683	1.75	1.535	2.219
50	0.52	1.500	0.631	1.25	1.096	1.728
100	1.04	1.175	0.495	0.80	0.702	1.196
150	1.56	0.775	0.326	0.39	0.342	0.668
200	2.08	0.425	0.179	0.13	0.110	0.289
250	3.61	0.170	0.072	-0.12	-0.105	-0.037
300	3.13	0.025	0.011	-0.05	-0.044	-0.033
350	3.65	-0.040	-0.017	-0.05	-0.044	-0.061
400	4.17	-0.060	-0.025	-0.05	-0.044	-0.069
500	5.21	-0.020	-0.008	0.0	0.0	-0.008
2000	20.85	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

TABLA VII.9 VALORES DE MOMENTO

x (cm)	Z	A_m	M_A (kg cm) (x 10^6)	B_m	M_B (kg cm) (x 10^6)	M (kg cm) (x10^6)
0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0	1.0
50	0.52	0.46	0.221	0.98	0.975	1.196
100	1.04	0.74	0.355	0.83	0.830	1.185
150	1.56	0.75	0.360	0.52	0.520	0.880
200	2.08	0.60	0.288	0.36	0.360	0.648
250	2.61	0.38	0.182	0.17	0.170	0.352
300	3.13	0.18	0.086	0.03	0.030	0.116
350	3.65	0.05	0.024	-0.03	-0.030	-0.006
400	4.17	-0.01	-0.005	-0.04	-0.040	-0.045
500	5.21	-0.02	-0.010	-0.02	-0.020	-0.030
2000	20.85	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

TABLA VII.10. VALORES DE CORTANTE

x (cm)	Z	Aq	Q_A (kg)	B_q	Q_B (kg)	Q (kg)
0	0.0	1.0	5000	0.0	0	5000
50	0.52	0.72	3600	-0.14	-1459	2141
100	1.04	0.24	1200	-0.37	-3856	-2656
150	1.56	-0.16	-800	-0.47	-4899	-5698
200	2.08	-0.39	-1950	-0.44	-4586	-6536
250	2.61	-0.41	-2050	-0.32	-3335	-5385
300	3.13	-0.32	-1600	-0.18	-1876	-3476
350	3.65	-0.18	- 900	-0.07	- 730	-1630
400	4.17	-0.07	- 350	0.02	208	- 142
500	5.21	0.02	100	0.02	208	308
2000	20.85	0.0	0	0.0	0	0

f) Solución por medio del análisis de diferencias finitas.

Para obtener la solución por medio de diferencias fini-- tas en este ejemplo se ha dividido el pilote en 40 secciones- de 50 cm. cada una. La tolerancia de iteración que se propo- ne es de 2.5 x 10^{-3}cm. El proceso que se sigue es el expues- to en la sección VI.2 y los resultados finales se presentan a continuación.

```
EJEMPLO 1, TESIS JOSE ANTONIO GARCIA ESCOTO, ENEP ARAGON
 *** CARGA APLICADA: E S T A T I C A.


 NIVEL FREATICO:  0.


 *** NUMERO DE ESTRATOS:     1


 * ARCILLA DURA:
 ESF. CTNTE. (TON/M2) =  10.0  PESO (TON/M3) = 0.85  E50 (M/M) =.0070
           K (S O C) TON/M3 =   20.8
          TERMINA EN (MTS):20.00

  ITERATION INFORMATION

     ITER. NO.           YT,CM.
         1          0.10488E+00
         2          0.18846E+00
         3          0.22868E+00
         4          0.24430E+00
         5          0.24928E+00
         6          0.25102E+00

                              LATERALLY LOADED PILE PROGRAM


 INPUT INFORMATION

    PT,KG.          BC2      BC CASE   DIAMETER,CM   INCREMENT LENGTH,CM
  0.5000D+04    0.10000D+07     1      0.50000D+02       0.50000D+02

    NUMBER OF SEGMENTS:      40


 AXIAL COMPRESSION AT PILE TOP=                            0.0
 LENGTH OF PILE,CM                ITERATION TOLERANCE,CM
   0.20000E+04                               0.25000D-02

   DEPTH TO P-Y CURVE,CM.         Y,CM.           P,KG/CM.
        0.0                  0.0             0.0
                             0.20125E-01     0.11990E+02
                             0.40250E-01     0.16956E+02
                             0.60375E-01     0.20767E+02
                             0.80500E-01     0.23979E+02
                             0.16100E+00     0.28412E+02
                             0.24150E+00     0.28452E+02
                             0.32200E+00     0.26243E+02
                             0.40250E+00     0.22506E+02
                             0.48300E+00     0.17615E+02
                             0.14490E+01     0.38672E+00
                             0.24150E+01     0.38672E+00
        0.15666E+03          0.0             0.0
                             0.20429E-01     0.66438E+02
                             0.80896E-01     0.13221E+03
```

	0.14136E+00	0.17477E+03
	0.20183E+00	0.20883E+03
	0.40366E+00	0.26508E+03
	0.60549E+00	0.28976E+03
	0.80733E+00	0.29823E+03
	0.10092E+01	0.29584E+03
	0.12110E+01	0.28536E+03
	0.36330E+01	0.47604E+02
	0.60549E+01	0.47604E+02
0.50000E+03	0.0	0.0
	0.20054E-02	0.20816E+02
	0.71337E-01	0.12415E+03
	0.14067E+00	0.17434E+03
	0.21000E+00	0.21301E+03
	0.42000E+00	0.27100E+03
	0.63000E+00	0.29700E+03
	0.84000E+00	0.30659E+03
	0.10500E+01	0.30519E+03
	0.12600E+01	0.29560E+03
	0.37800E+01	0.48226E+02
	0.63000E+01	0.48226E+02
0.99999E+03	0.0	0.0
	0.50136E-03	0.10408E+02
	0.70334E-01	0.12328E+03
	0.14017E+00	0.17403E+03
	0.21000E+00	0.21301E+03
	0.42000E+00	0.27100E+03
	0.63000E+00	0.29700E+03
	0.84000E+00	0.30659E+03
	0.10500E+01	0.30519E+03
	0.12600E+01	0.29560E+03
	0.37800E+01	0.48226E+02
	0.63000E+01	0.48226E+02
0.15000E+04	0.0	0.0
	0.22283E-03	0.69387E+01
	0.70148E-01	0.12311E+03
	0.14007E+00	0.17397E+03
	0.21000E+00	0.21301E+03
	0.42000E+00	0.27100E+03
	0.63000E+00	0.29700E+03
	0.84000E+00	0.30659E+03
	0.10500E+01	0.30519E+03
	0.12600E+01	0.29560E+03
	0.37800E+01	0.48226E+02
	0.63000E+01	0.48226E+02
0.20000E+04	0.0	0.0
	0.12534E-03	0.52041E+01
	0.70083E-01	0.12306E+03
	0.14004E+00	0.17395E+03
	0.21000E+00	0.21301E+03
	0.42000E+00	0.27100E+03
	0.63000E+00	0.29700E+03
	0.84000E+00	0.30659E+03
	0.10500E+01	0.30519E+03
	0.12600E+01	0.29560E+03
	0.37800E+01	0.48226E+02
	0.63000E+01	0.48226E+02

OUTPUT INFORMATION

X,CM.	Y,CM.	M,CM-KG	ES,KG/CM2	P,KG/CM.	EI,KG-CM2
0.0	0.2510D+00	0.1000E+07	0.1133D+03	-0.2844E+02	0.1094D+12
0.5000E+02	0.1464D+00	0.1214E+07	0.5181D+03	-0.7588E+02	0.1094D+12
0.1000E+03	0.6963D-01	0.1239E+07	0.1221D+04	-0.8500E+02	0.1094D+12
0.1500E+03	0.2114D-01	0.1051E+07	0.3112D+04	-0.6578E+02	0.1094D+12
0.2000E+03	-0.3317D-02	0.6993E+06	0.3678D+04	0.1220E+02	0.1094D+12
0.2500E+03	-0.1179D-01	0.3776E+06	0.3185D+04	0.3755E+02	0.1094D+12
0.3000E+03	-0.1162D-01	0.1498E+06	0.3164D+04	0.3678E+02	0.1094D+12
0.3500E+03	-0.8038D-02	0.1394E+05	0.3536D+04	0.2842E+02	0.1094D+12
0.4000E+03	-0.4133D-02	-0.5087E+05	0.5172D+04	0.2138E+02	0.1094D+12
0.4500E+03	-0.1390D-02	-0.6223E+05	0.9342D+04	0.1299E+02	0.1094D+12
0.5000E+03	-0.7032D-04	-0.4114E+05	0.1038D+05	0.7299E+00	0.1094D+12
0.5500E+03	0.3093D-03	-0.1821E+05	0.1142D+05	-0.3532E+01	0.1094D+12
0.6000E+03	0.2727D-03	-0.4115E+04	0.1246D+05	-0.3397E+01	0.1094D+12
0.6500E+03	0.1421D-03	0.1487E+04	0.1349D+05	-0.1917E+01	0.1094D+12
0.7000E+03	0.4539D-04	0.2297E+04	0.1453D+05	-0.6596E+00	0.1094D+12
0.7500E+03	0.1208D-05	0.1457E+04	0.1557D+05	-0.1880E-01	0.1094D+12
0.8000E+03	-0.9657D-05	0.5712E+03	0.1661D+05	0.1604E+00	0.1094D+12
0.8500E+03	-0.7465D-05	0.8599E+02	0.1765D+05	0.1317E+00	0.1094D+12
0.9000E+03	-0.3307D-05	-0.6995E+02	0.1868D+05	0.6178E-01	0.1094D+12
0.9500E+03	-0.7475D-06	-0.7143E+02	0.1972D+05	0.1474E-01	0.1094D+12
0.1000E+04	0.1790D-06	-0.3605E+02	0.2076D+05	-0.3716E-02	0.1094D+12
0.1050E+04	0.2813D-06	-0.9970E+01	0.2180D+05	-0.6132E-02	0.1094D+12
0.1100E+04	0.1558D-06	0.7850E+00	0.2284D+05	-0.3557E-02	0.1094D+12
0.1150E+04	0.4817D-07	0.2647E+01	0.2387D+05	-0.1150E-02	0.1094D+12
0.1200E+04	0.1066D-08	0.1633E+01	0.2491D+05	-0.2656E-04	0.1094D+12
0.1250E+04	-0.8706D-08	0.5535E+00	0.2595D+05	0.2259E-03	0.1094D+12
0.1300E+04	-0.5825D-08	0.3848E-01	0.2699D+05	0.1572E-03	0.1094D+12
0.1350E+04	-0.2065D-08	-0.8353E-01	0.2803D+05	0.5788E-04	0.1094D+12
0.1400E+04	-0.2147D-09	-0.6085E-01	0.2906D+05	0.6241E-05	0.1094D+12
0.1450E+04	0.2448D-09	-0.2257E-01	0.3010D+05	-0.7369E-05	0.1094D+12
0.1500E+04	0.1886D-09	-0.2704E-02	0.3114D+05	-0.5872E-05	0.1094D+12
0.1550E+04	0.7048D-10	0.2479E-02	0.3218D+05	-0.2268E-05	0.1094D+12
0.1600E+04	0.9069D-11	0.1992E-02	0.3322D+05	-0.3012E-06	0.1094D+12
0.1650E+04	-0.6816D-11	0.7518E-03	0.3425D+05	0.2335E-06	0.1094D+12
0.1700E+04	-0.5516D-11	0.9552E-04	0.3529D+05	0.1947E-06	0.1094D+12
0.1750E+04	-0.2033D-11	-0.7408E-04	0.3633D+05	0.7386E-07	0.1094D+12
0.1800E+04	-0.2430D-12	-0.5903E-04	0.3737D+05	0.9082E-08	0.1094D+12
0.1850E+04	0.1977D-12	-0.2127E-04	0.3841D+05	-0.7594E-08	0.1094D+12
0.1900E+04	0.1522D-12	-0.2500E-05	0.3944D+05	-0.6005E-08	0.1094D+12
0.1950E+04	0.4959D-13	0.1259E-05	0.4048D+05	-0.2008E-08	0.1094D+12
0.2000E+04	-0.2426D-13	0.0	0.4152D+05	0.1007E-08	0.1094D+12

ANALISIS DE RESULTADOS

Con el fin de hacer un análisis comparativo, en la figura VII.3 se presentan los valores de los desplazamientos obtenidos por cada uno de los métodos aplicados al problema planteado.

De los resultados obtenidos podemos concluir que con los análisis lineales se obtienen mayores desplazamientos que los calculados por los análisis no lineales (Método de coeficientes adimensionales y método de diferencias finitas).

De la configuración de desplazamientos contra la profundidad (Fig. VII.3) obtenida por los métodos de coeficientes - adimensionales y el de diferencias finitas, puede observarse- que los desplazamientos se hacen muy pequeños a profundidades mayores de 5m; de acuerdo con esta observación, sería recomendable hacer un nuevo análisis del problema reduciendo la longitud de empotramiento del pilote. Esta es una de las ventajas de los análisis no lineales, ya que puede observarse cuál es el comportamiento del pilote con la profundidad.

En la figura VII.4 se presentan en forma gráfica los valores de momento y cortante, obtenidos por los análisis no lineales. Esto es con el fin de tener una idea de la variación que se presenta con la profundidad.

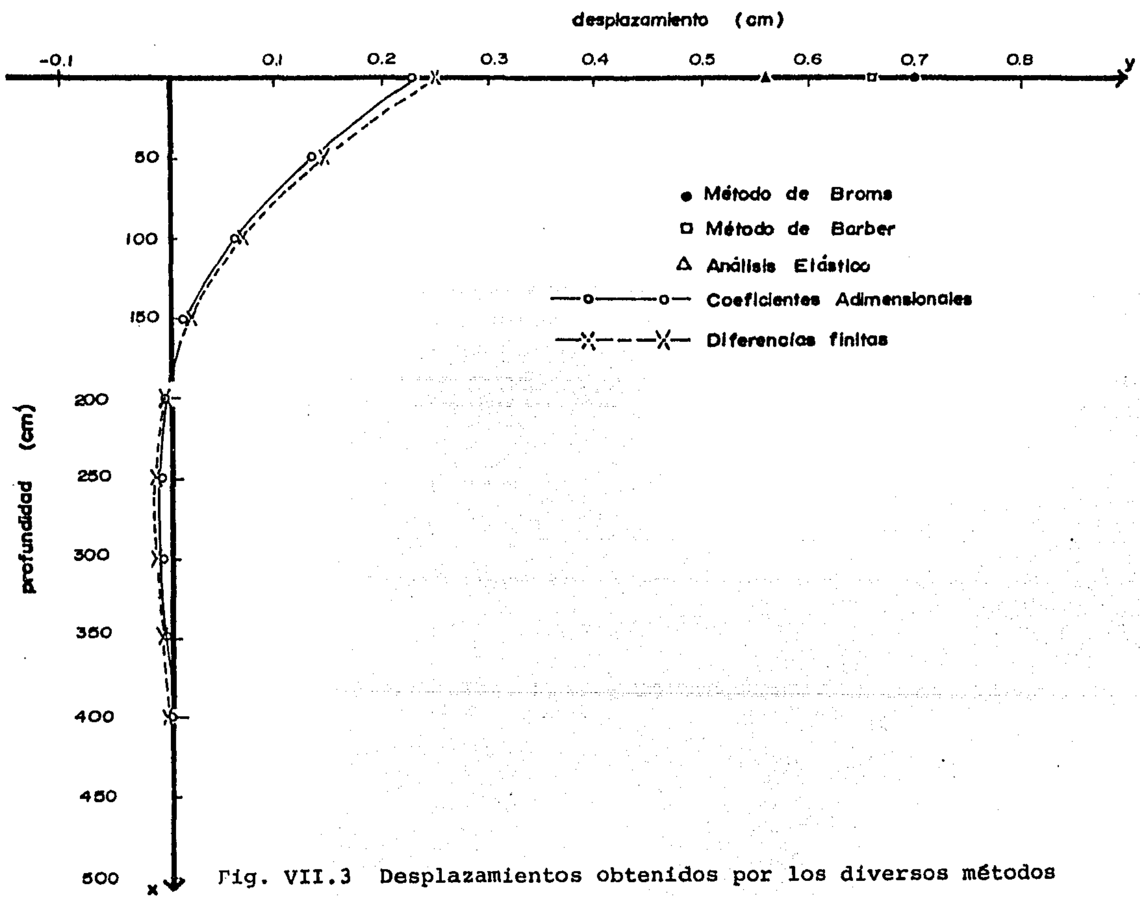


Fig. VII.3 Desplazamientos obtenidos por los diversos métodos (1er. Caso)

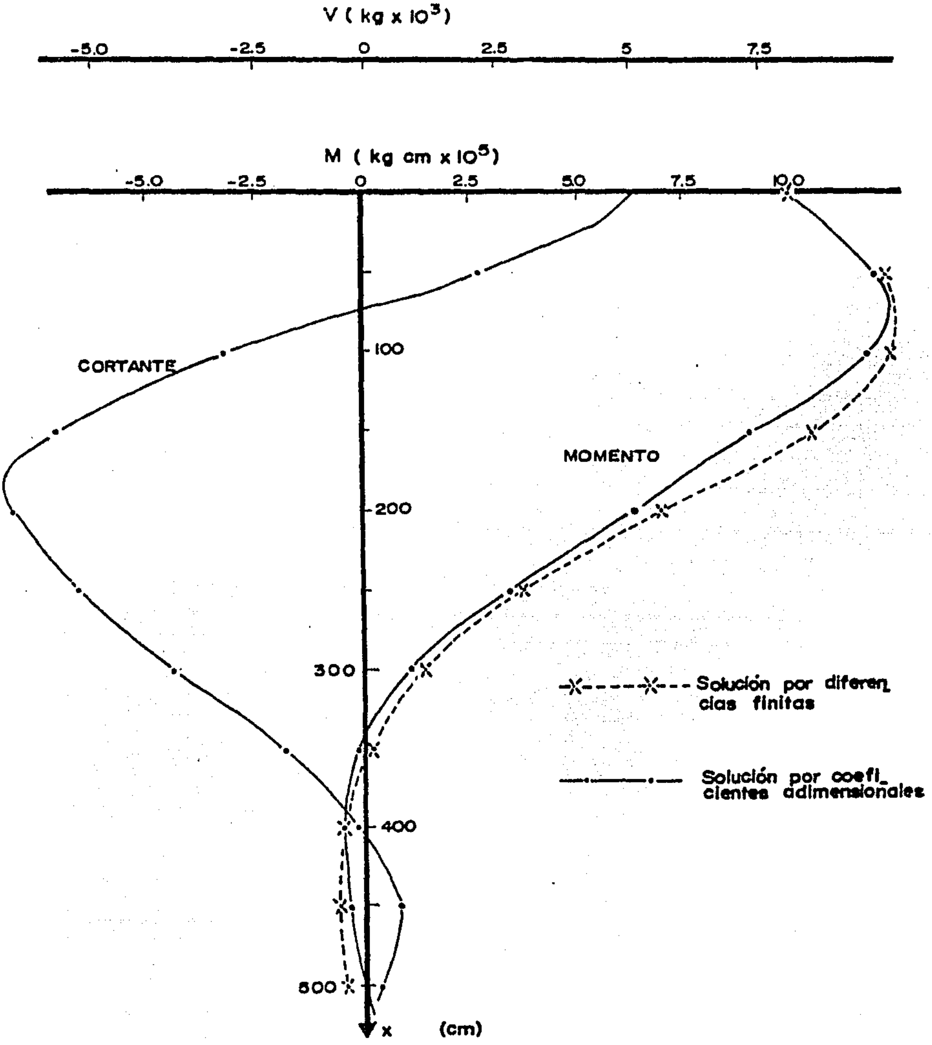


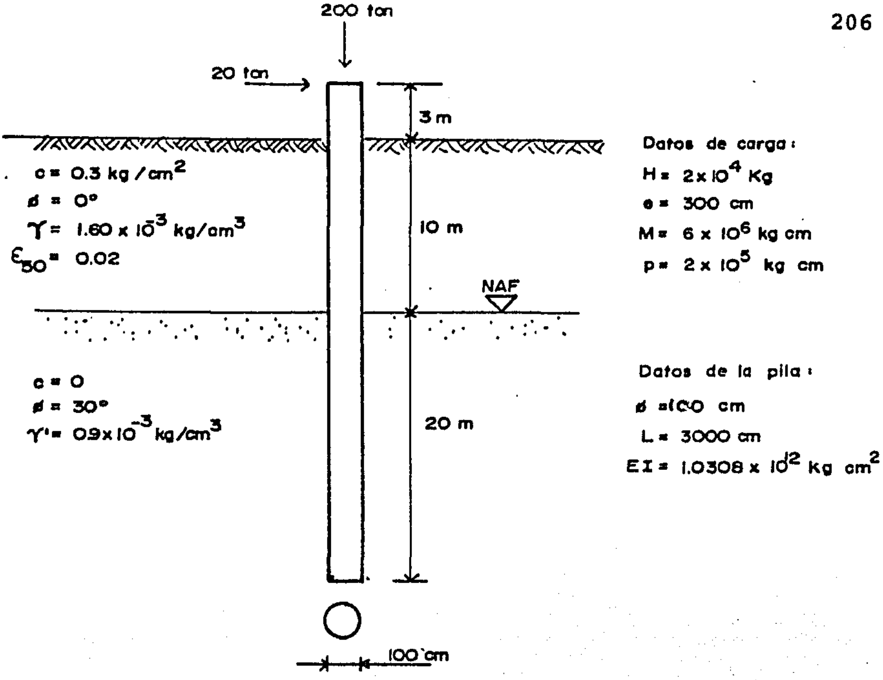
Fig. VII.4 Variación del momento y cortante con la profundidad. (1er. Caso)

CASO 2

En este caso se tiene una pila de sección transversal -- circular y cabeza libre al giro, la cual además de encontrarse sujeta a una carga lateral de 20 ton. aplicada con una - - excentricidad de 3 m., está afectada por una carga axial de - 200 ton. La profundidad de empotramiento de la pila es de -- 30 m., presentándose dos estratos dentro de esta longitud; el primero corresponde a una arcilla blanda, la cual se localiza desde la superficie del suelo hasta una profundidad de 10 m.- Esta arcilla tiene un valor de resistencia al esfuerzo cortante no drenado c = 3 ton/m^2, un peso específico de - - - - - $\gamma = 1.60$ ton/m^3, y un valor de $\varepsilon_{50} = 0.02$.

El segundo estrato abarca la parte restante de la pila y consiste en una arena con un ángulo de fricción interna de -- $\phi = 30°$ y un peso específico de $\gamma = 1.90$ ton/m^3. El nivel -- freático se encuentra localizado a 10 m. bajo la superficie - del suelo.

La pila es de concreto reforzado con un diámetro de 100- cm. y un valor de rigidez de $EI = 1.0308 \times 10^{12}$ kg cm^2



a) Solución por el procedimiento de coeficientes adimensionales.

Se siguen los mismos pasos que se enumeran en la sección VI.1 para un pilote de cabeza libre al giro.

1.- Se construyen las curvas p-y por los procedimientos recomendados en la sección IV.4. La construcción de curvas en el estrato de arcillas blandas se hará a cada 50 cm., mientras que en el correspondiente a arenas será a cada 100 cm. Los resultados de los cálculos de la construcción de curvas se encuentran en las tablas VII.11 y VII.12 y en las figuras VII.5 y VII.6.

2.- Para este caso se supone un valor de $n_h = 1$, el cual

P_u	90	105.5	121	136.5	152	167.5	183	198.5	214	229.5	245.	260.5	270
x	0	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600 a 1000
y						P (kg/cm)							
.0125	6.11	7.16	8.21	9.26	10.31	11.37	12.42	13.47	14.42	15.57	16.63	17.68	18.32
.025	7.69	9.02	10.35	11.67	13.00	14.32	15.55	16.97	18.30	19.62	20.95	22.27	23.08
.050	9.69	11.36	13.03	14.70	16.37	18.04	19.71	21.38	23.05	24.72	26.39	28.06	29.05
.075	11.10	13.01	14.92	16.83	18.74	20.65	22.57	24.48	26.38	28.30	30.21	32.12	33.29
.100	12.21	14.32	16.42	18.53	20.63	22.73	24.84	26.94	29.04	31.15	33.25	35.36	36.64
.150	13.98	16.39	18.80	21.21	23.61	26.02	28.43	30.84	33.25	35.66	38.06	40.47	41.95
.200	15.39	18.04	20.69	23.34	25.99	28.64	31.29	33.94	36.59	39.24	41.89	44.54	46.17
.300	17.62	20.65	23.68	26.72	29.75	32.79	35.82	38.86	41.89	44.92	47.96	50.99	52.85
.400	19.39	22.73	26.07	29.41	32.75	36.09	39.43	42.77	46.10	49.44	52.78	56.12	58.17
.500	20.89	24.48	28.08	31.68	35.28	38.87	42.47	46.07	49.67	53.26	56.86	60.46	62.66
.750	23.91	28.03	32.15	36.26	40.38	44.50	48.62	52.73	56.85	60.97	65.09	69.21	71.73
1.00	26.32	30.85	35.38	39.91	44.45	48.98	53.51	58.04	62.57	67.11	71.64	76.17	78.95
1.50	30.12	35.31	40.50	45.69	50.88	56.07	61.25	66.44	71.63	76.82	82.01	87.19	90.37
2.00	33.16	38.87	44.58	50.29	56.00	61.71	67.42	73.13	78.48	84.55	90.26	95.97	99.47
2.50	35.72	41.87	48.02	54.17	60.32	66.47	72.62	78.77	84.93	91.08	97.23	103.38	107.15
3.00	37.95	44.49	51.03	57.56	64.10	70.64	77.17	83.71	90.25	96.78	103.32	109.86	113.86
5.00	45.00	52.75	60.50	68.25	76.00	83.75	91.50	99.25	107.00	114.75	122.50	130.25	135.00
10.00	56.70	66.46	76.23	85.99	95.75	105.52	115.28	125.05	134.81	144.58	154.34	164.10	170.09
15.00	64.90	76.08	87.26	89.43	109.61	120.79	131.97	143.14	154.32	165.50	176.68	187.85	194.70
20.00	71.43	83.74	96.04	108.34	120.64	132.94	145.25	157.55	169.85	182.15	194.46	206.76	214.30
25.00	76.95	90.20	103.45	116.71	129.96	143.21	156.45	169.72	182.97	196.22	209.47	222.72	230.85
30.00	81.77	95.85	109.94	124.02	138.10	152.18	166.27	180.35	194.43	208.51	222.60	236.68	245.31
35.00	86.08	100.91	115.73	130.56	145.38	160.21	175.03	189.86	204.68	219.51	234.33	249.16	258.25
40.00	90.00	105.50	121.00	136.50	152.00	167.50	183.00	108.50	214.00	229.50	245.00	260.50	270.00

TABLA VII.II Curvas p-y. Arcilla blanda (2o. Caso)

x(cm)	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900	2000
y(cm)					P (Kg/cm)						
0.01	16.60	18.26	19.92	21.58	23.24	26.56	28.56	28.22	28.88	31.54	33.20
0.02	32.2	36.52	39.84	43.16	46.48	49.80	53.12	56.44	59.76	63.08	66.4
0.04	66.4	73.04	79.68	86.32	92.96	99.60	106.24	112.88	119.52	126.16	132.8
0.06	99.6	109.56	119.52	129.48	139.44	149.40	159.36	169.32	179.28	189.24	199.2
0.08	132.8	146.08	159.36	172.64	185.92	199.2	212.48	225.76	239.04	252.32	265.60
0.1	166.0	182.60	199.20	215.80	232.40	249.00	265.60	282.20	298.80	315.40	332.00
0.15	249.0	273.90	298.80	323.70	348.60	373.50	398.40	423.30	448.20	473.10	498.00
0.20	332.0	365.20	398.40	431.60	464.80	498.00	531.20	564.40	597.60	630.80	664.00
0.25	415.0	456.50	498.00	539.50	581.00	622.50	664.00	705.50	747.00	788.50	830.00
0.30	498.0	547.80	597.60	647.40	697.20	747.00	796.80	846.60	896.40	946.20	996.00
0.40	664.0	730.40	796.90	863.20	929.60	996.00	1062.40	1128.80	1195.20	1261.60	1328.00
0.50	830.0	913.00	996.00	1079.00	1162.00	1245.00	1328.00	1411.00	1494.00	1577.00	1660.00
0.75	1072.44	1235.09	1408.80	1596.12	1743.00	1830.87	1924.63	1999.81	2085.60	2167.86	2264.27
1.0	1277.43	1471.17	1678.08	1901.20	2079.68	2180.82	2292.50	2382.05	2484.24	2582.22	2697.06
1.5	1634.56	1882.46	2147.22	2432.72	2661.09	2709.51	2933.41	3948.00	3178.77	3304.13	3451.07
2.0	1954.61	2251.05	2567.66	2909.04	3182.15	3336.89	3507.77	3644.80	3801.16	3951.08	4126.79
2.5	2272.48	2617.13	2985.22	3382.12	3699.64	3879.55	4078.22	4237.53	4419.33	4593.63	4797.91
3.0	2590.35	2983.20	3402.79	3855.20	4217.14	4422.21	4648.67	4830.27	5037.49	5236.17	5469.09
3.5	2908.22	3349.28	3820.35	4328.28	4734.63	4964.87	5219.12	5423.00	5655.66	5878.72	6140.17
3.75	3067.14	3523.23	4029.13	4564.82	4993.38	5236.20	5504.35	5719.36	5964.74	6199.98	6475.71

TABLA VII.12 Curvas p-y. Arena (Continúa)

x	2100	2200	2300	2400	2500	2600	2700	2800	2900	3000
y (cm)					p (Kg/cm)					
0.01	34.86	36.52	38.18	39.84	41.50	43.16	44.82	46.48	48.14	49.80
0.02	69.72	73.04	76.36	79.68	83.00	86.32	89.64	92.96	96.28	99.60
0.04	139.44	146.08	152.72	159.36	166.00	172.64	179.28	185.92	192.56	199.20
0.06	209.16	219.12	229.08	239.04	249.00	258.96	268.92	278.88	288.84	298.80
0.08	278.88	292.16	305.44	318.72	332.00	345.28	358.56	371.84	385.12	398.40
0.10	348.60	365.20	381.80	398.14	415.00	431.60	448.20	464.80	481.40	498.00
0.15	522.90	457.80	572.70	597.60	622.50	647.40	672.30	697.20	722.10	747.00
0.20	697.20	730.40	763.60	796.80	830.00	863.20	896.40	929.60	962.80	996.00
0.25	871.50	913.00	954.50	995.00	1037.50	1079.00	1120.50	1162.00	1203.50	1245.00
0.30	1045.80	1095.60	1145.40	1195.20	1245.00	1294.80	1344.60	1394.40	1444.20	1494.00
0.40	1394.40	1460.80	1527.20	1593.60	1660.00	1726.40	1792.80	1859.20	1925.60	1992.00
0.50	1743.00	1826.00	1909.00	1992.00	2075.00	2156.65	2220.93	2283.83	2345.35	2426.23
0.75	2340.33	2432.32	2502.19	2589.75	2675.55	2759.58	2841.83	2922.32	3001.03	3104.52
1.00	2787.66	2897.23	2980.46	3084.76	3186.95	3287.04	3385.02	3480.89	3574.65	3697.92
1.50	3567.00	3707.20	3813.70	3947.16	4077.92	4205.99	4331.36	4454.04	4574.01	4731.74
2.00	4265.42	4433.08	4560.43	4720.02	4876.38	5029.52	5179.45	5326.13	5469.61	5658.21
2.50	4959.09	5154.01	5302.07	5487.61	5669.40	5847.45	6021.75	6192.29	6359.10	6578.35
3.00	5652.75	5874.94	6043.71	6255.20	6462.42	6665.37	6864.06	7058.45	7248.60	7498.54
3.50	6346.42	6595.87	6785.35	7022.79	7255.44	7483.30	7706.36	7924.61	8138.09	8418.71
3.75	6693.25	6956.34	7156.16	7406.58	7651.95	7892.26	8127.51	8357.69	8582.84	8878.79

TABLA VII.12 Curvas p-y. Arena (2o.Caso)

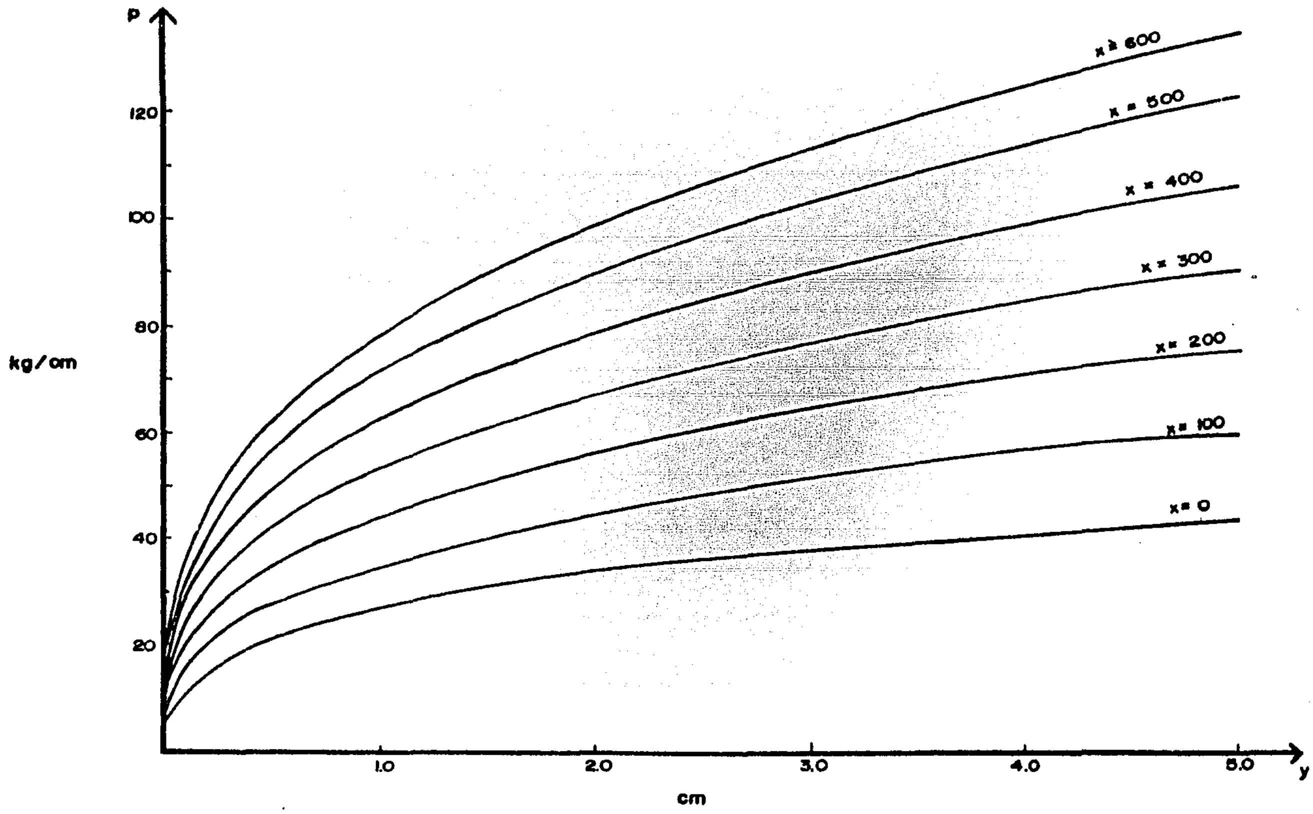


Fig. VII.5 Curvas p-y en arcilla blanda ($y \leqslant 5$ cm)

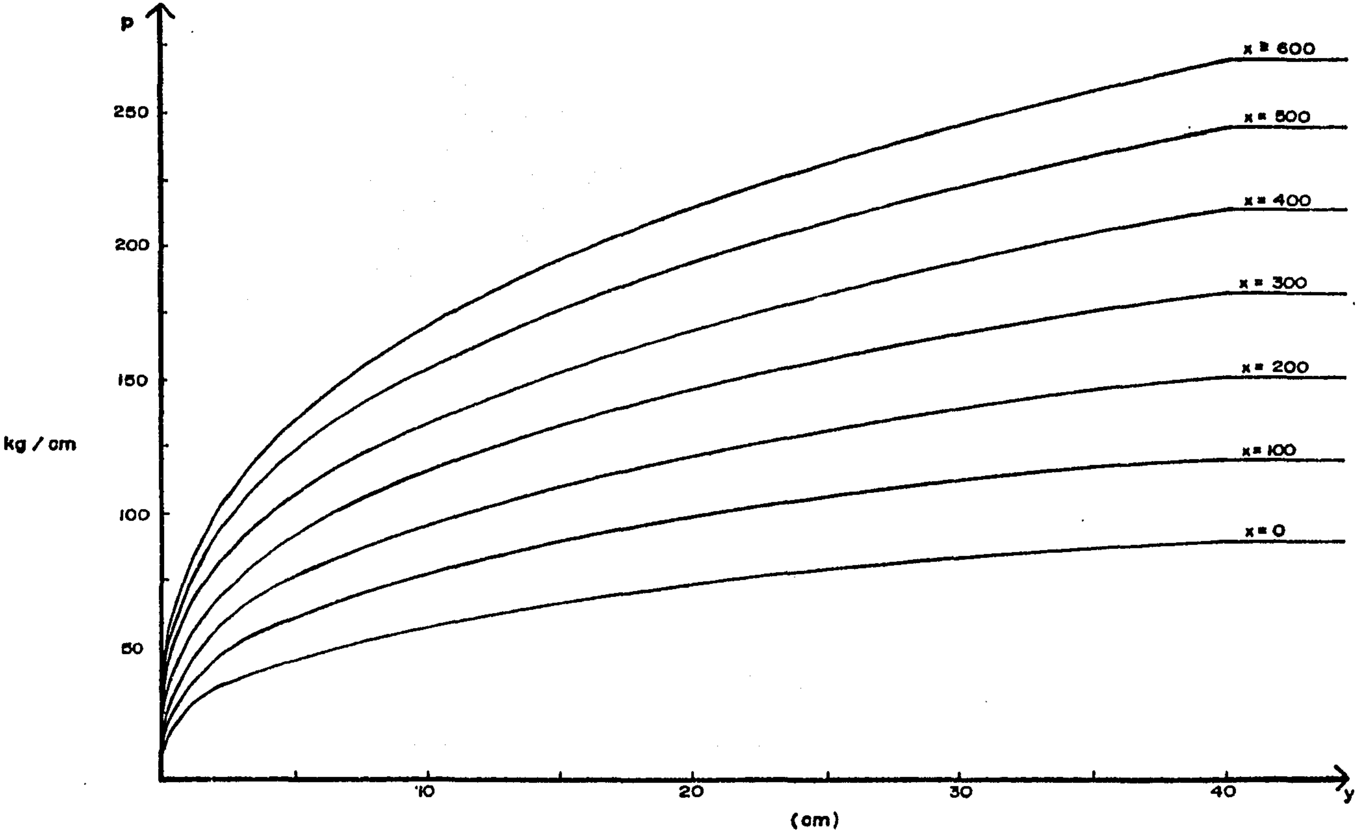


Fig. VII.5 Curvas p-y en arcilla blanda. (2o. Caso)

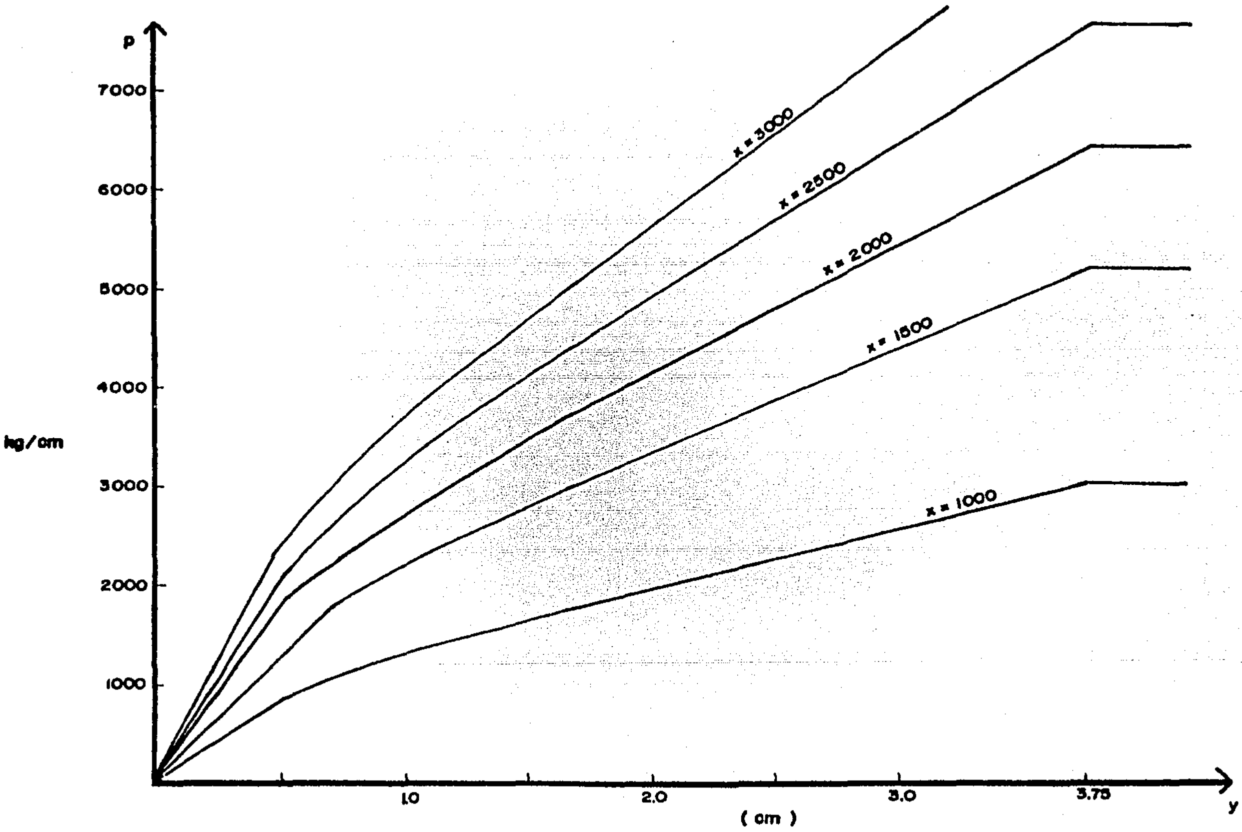


Fig. VII.6 Curvas p-y en arena. (2o. Caso) se aplica en la ecuación VI.3 para obtener la rigides relativa T.

$$T = \left(\frac{1.0308 \times 10^{12} \text{ Kg cm}^2}{1 \text{ Kg/cm}^3} \right)^{0.2} = 252.72 \text{ cm}$$

3.- Se calcula el coeficiente de profundidad en base a la ecuación VI.4.

$$Z_{máx} = \frac{3000 \text{ cm.}}{252.75 \text{ cm.}} = 11.87$$

4.- Se encuentran los desplazamientos en distintas profundidades por medio de la ecuación VI.5 y las figuras VI.2 - VI.3. Los resultados están contenidos en la tabla VII.13.

TABLA VII.13.

x (cm)	$Z = \frac{x}{T}$	A_y	y_A (cm)	B_y	y_B (cm)	y (cm)
0	0.0	2.40	0.75	1.60	0.59	1.346
50	0.20	2.10	0.66	1.25	0.47	1.122
100	0.40	1.76	0.55	0.98	0.36	0.915
150	0.59	1.50	0.47	0.75	0.28	0.749
200	0.79	1.20	0.38	0.54	0.20	0.577
250	0.99	0.93	0.29	0.36	0.13	0.425
300	1.19	0.70	0.22	0.21	0.08	0.293
400	1.58	0.35	0.11	0.03	0.01	0.121
500	1.98	0.08	0.03	-0.06	-0.02	0.003
750	2.97	-0.09	-0.03	-0.09	-0.03	0.062
1000	3.96	-0.04	-0.01	0.0	0.0	-0.013
1500	5.94	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3000	11.87	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

5.- Con los valores de "y" obtenidos se recurre a las curvas p-y obtenidas en el primer paso, para obtener los valores - de reacción del suelo "p" (Tabla VII.14).

6.- Se calcula el valor del módulo de reacción de la subrasante por medio de la ecuación VI.6. Los resultados se localizan en la tabla VII.14.

7.- Se grafican los valores del módulo de reacción de la - subrasante (Fig. VII.7). De esta gráfica se obtiene un nuevo - valor de n_h igual a 0.36.

$$n_h = \frac{k}{x} = \frac{90\ Kg/cm^2}{250\ cm} = 0.36\ Kg/cm^3$$

TABLA VII.14

x (cm)	y (cm)	p Kg/cm	k Kg/cm^2
0	1.346	29.06	21.59
50	1.122	32.06	28.57
100	0.915	34.35	37.54
150	0.749	36.25	48.39
200	0.577	37.00	64.13
250	0.425	36.82	86.64
300	0.293	35.54	121.30
400	0.121	30.95	255.78
500	0.003	10.33	3444.02
750	0.062	31.25	503.98
1000	-0.013	-21.58	1660.00
1500	0.0	- -	- - -
3000	0.0	- -	- - -

8.- El valor de $n_h = 0.36$ es sustituido en la ecuación -- VI.3 para obtener un nuevo valor de rigidez relativa.

$$T = \left(\frac{EI}{0.36}\right)^{0.2} = 310.01$$

Como

T (supuesto) $\neq$ T (calculado)

se repetirá el procedimiento presentado.

Los resultados de tres nuevas iteraciones son presentados en las tablas VII.15 a VII.17.

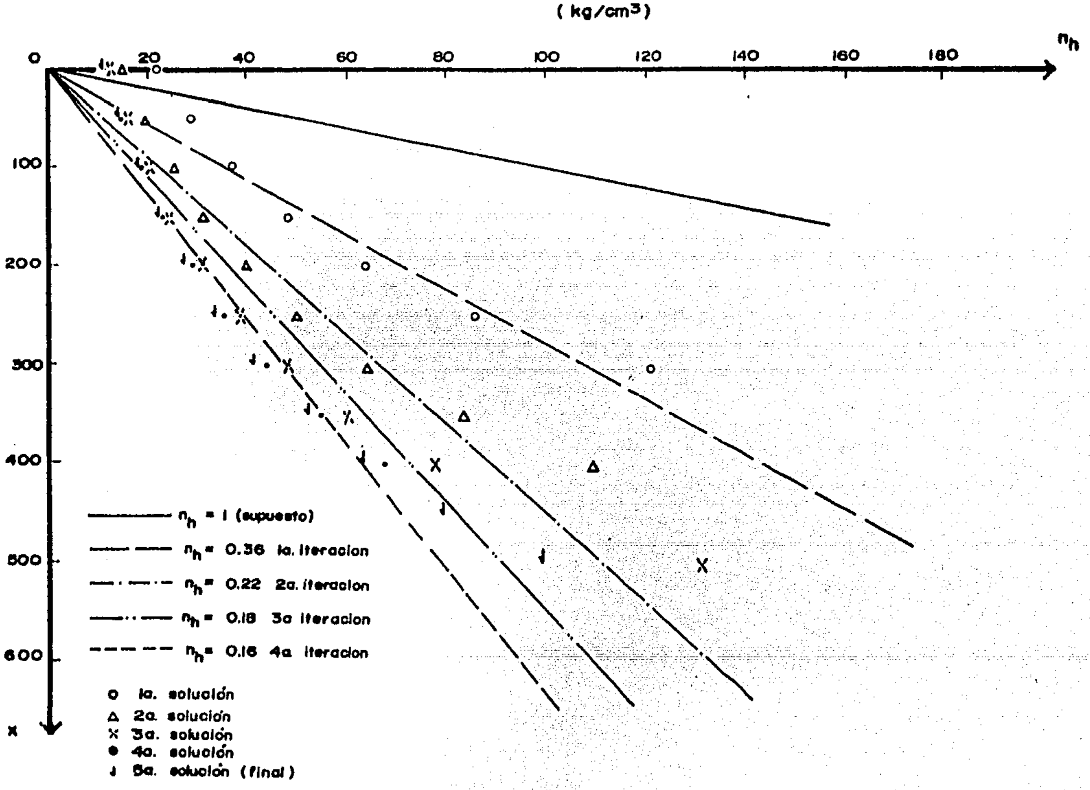


Fig. VII.7 Coeficiente de variación n_h (2o. Caso)

T = 310.01 cm n_h = 0.36 Z_{max} = 9.68

TABLA VII.15

x (cm)	$Z = \frac{x}{T}$	Ay	By	y (cm)	p (kg/cm)	k (kg/cm^2)
0	0.0	2.4	1.6	2.282	34.65	15.18
50	0.16	2.14	1.35	1.992	38.81	19.49
100	0.32	1.87	1.10	1.696	42.19	24.88
150	0.48	1.65	0.88	1.446	45.13	31.21
200	0.65	1.40	0.68	1.190	47.10	39.58
250	0.81	1.18	0.52	0.973	48.53	49.88
300	0.97	0.95	0.37	0.756	48.75	64.48
350	1.13	0.75	0.25	0.573	48.21	84.13
400	1.29	0.60	0.15	0.431	47.27	109.67
500	1.61	0.35	0.02	0.214	42.85	200.23
750	2.42	0.0	-0.10	-0.056	-30.20	539.37
1000	3.23	-0.07	-0.08	-0.085	-34.71	408.38
2000	6.45	0.0	0.0	0.0	- -	- -

n_h = 0.22

TABLA VII.16

T = 342.10 n_h = 0.22 Z_{max} = 8.77

x (cm)	$Z = \frac{x}{T}$	A_y	B_y	y (cm)	p (kg/cm)	k (kg/cm^2)
0	0.0	2.4	1.6	2.954	37.76	12.78
50	0.15	2.17	1.36	2.612	42.48	16.26
100	0.29	1.93	1.14	2.276	46.54	20.45
150	0.44	1.87	0.93	2.086	51.00	24.45
200	0.58	1.53	0.75	1.699	53.03	31.21
250	0.73	1.28	0.60	1.403	54.83	39.08
300	0.88	1.10	0.45	1.161	56.24	48.44
350	1.02	0.90	0.35	0.938	56.82	60.57
400	1.17	0.72	0.23	0.716	55.98	78.18
500	1.46	0.45	0.07	0.397	52.65	132.62
750	2.19	0.05	-0.09	-0.022	-22.12	1005.53

TABLA VII.17

$T = 356.11$ $n_h = 0.18$ $Z_{max} = 8.42$

x	$Z = \frac{x}{T}$	A_y	B_y	y (cm)	p (kg cm)	k (kg cm^2)
0	0	2.4	1.6	3.284	39.12	11.91
50	0.14	2.17	1.27	2.839	43.68	15.39
100	0.28	1.95	1.15	2.557	48.38	18.92
150	0.42	1.70	0.95	2.191	51.84	23.66
200	0.56	1.54	0.74	1.896	55.01	29.01
250	0.70	1.33	0.63	1.630	57.64	35.36
300	0.84	1.13	0.48	1.344	59.05	43.94
350	0.98	0.93	0.37	1.088	59.70	54.87
400	1.12	0.78	0.27	0.883	60.03	67.99
500	1.40	0.52	0.12	0.544	58.48	107.5
750	2.11	0.08	-0.08	0.011	-17.56	1596.18
1000	2.81	-0.06	-0.09	-0.119	-38.83	326.32
2000	5.62	0.0	0.0	0.0	- -	- -

$n_h = 0.16$

La forma en que se converge al valor de $n_h = 0.16$ se encuentra en la figura VII.7 y es éste el valor usado para obtener la última iteración. Los resultados del desplazamiento están contenidos en la tabla VII.18.

Los valores del módulo de reacción de la subrasante en distintas profundidades se obtienen por medio de las curvas "p-y" (Figs. VII.5 y VII.6), localizándose los resultados en la tabla VII.19.

Los valores de curvatura, momento y cortante, son calculados en base al uso apropiado de las ecuaciones VI.7 a la VI.9, siendo presentados los resultados en las tablas VII.20 a VII.22.

TABLA VII.18

$T = 364.60$ $n_h = 0.16$ $z_{max} = 8.23$

x (cm)	$z = \frac{x}{T}$	A_y	y_A (cm)	B_y	y_B (cm)	y (cm)
0	0.0	2.4	2.26	1.6	1.24	3.495
50	0.14	2.17	2.04	1.27	0.98	3.023
100	0.27	1.95	1.83	1.15	0.89	2.723
150	0.41	1.72	1.62	0.96	0.74	2.360
200	0.55	1.54	1.45	0.80	0.62	2.077
250	0.69	1.34	1.26	0.63	0.49	1.747
300	0.82	1.15	1.08	0.50	0.39	1.468
350	0.96	0.92	0.87	0.38	0.29	1.159
400	1.10	0.82	0.77	0.27	0.21	0.980
450	1.23	0.65	0.61	0.18	0.14	0.750
500	1.37	0.53	0.50	0.10	0.08	0.576
600	1.65	0.30	0.28	0.0	0.0	0.282
700	1.92	0.15	0.14	-0.05	-0.04	0.102
800	2.19	0.05	0.05	-0.09	-0.07	-0.023
900	2.47	-0.02	-0.02	-0.10	-0.08	-0.096
1000	2.74	-0.06	-0.06	-0.09	-0.07	-0.126
1200	3.29	-0.07	-0.07	-0.07	-0.05	-0.120
1500	4.11	-0.04	-0.04	0.0	0.0	-0.041
2000	5.49	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3000	8.23	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

TABLA VII.19

x (cm)	y (cm)	p (kg/cm)	k (kg/cm^2)
0	3.495	39.94	11.43
50	3.023	44.60	14.76
100	2.723	49.41	18.14
150	2.360	53.14	22.52
200	2.067	56.62	27.39
250	1.747	58.99	33.76
300	1.468	60.91	41.43
350	1.159	60.97	52.60
400	0.980	62.15	63.42
450	0.750	60.97	81.29
500	0.576	59.61	103.48
600	0.282	51.77	183.59
700	0.102	36.89	361.64
800	-0.023	-22.45	976.17
900	-0.096	-36.15	373.56
1000	-0.126	-39.58	314.12
1200	-0.120	-239.04	1992.00
1500	-0.041	-102.09	2490.00
2000	0.0	- -	- -
3000	0.0	- -	- -

TABLA VII.20

x (cm)	Z	A_s	S_A	B_s	S_B	S (Radianes)
0	0.0	1.625	0.0042	1.75	0.0016	0.005783
50	0.14	1.605	0.0041	1.58	0.0034	0.007492
100	0.27	1.575	0.0041	1.475	0.0031	0.007192
150	0.41	1.540	0.0040	1.275	0.0027	0.006678
200	0.55	1.475	0.0038	1.200	0.0025	0.006351
250	0.69	1.400	0.0036	1.050	0.0022	0.005839
300	0.82	1.325	0.0034	0.950	0.0020	0.005433
350	0.96	1.225	0.0032	0.825	0.0018	0.004910
400	1.10	1.130	0.0029	0.700	0.0015	0.004400
450	1.23	1.035	0.0027	0.600	0.0013	0.003943
500	1.37	0.925	0.0024	0.500	0.0011	0.003447
600	1.65	0.675	0.0017	0.315	0.0007	0.002409
700	1.92	0.500	0.0013	0.175	0.0004	0.001661
800	2.19	0.400	0.0010	0.075	0.0002	0.001191
900	2.47	0.223	0.0006	0.015	0.0003	0.000893
1000	2.74	0.100	-0.0003	0.030	-0.0001	-0.000190
1200	3.29	-0.025	-0.0001	-0.060	-0.0001	-0.000192
1500	4.11	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

TABLA VII.21

x	Z	A_m	M_A $(x10^6)$	B_m	M_B $(x10^6)$	M (Kg cm) $(x10^6)$
0	0	0	0	1	0	6.0
50	0.14	0.14	1.021	0.995	5.970	6.991
100	0.27	0.27	1.969	0.99	5.940	7.909
150	0.41	0.38	2.771	0.985	5.910	8.681
200	0.55	0.49	3.573	0.975	5.850	9.423
250	0.69	0.60	4.375	0.94	5.640	10.015
300	0.82	0.66	4.813	0.91	5.460	10.273
350	0.96	0.72	5.250	0.86	5.160	10.410
400	1.10	0.75	5.469	0.83	4.980	10.449
450	1.25	0.77	5.615	0.76	4.560	10.175
500	1.37	0.77	5.615	0.71	4.260	9.875
600	1.65	0.73	5.323	0.55	3.300	8.623
700	1.92	0.64	4.667	0.44	2.640	7.307
800	2.19	0.53	3.865	0.31	1.860	5.725
900	2.47	0.42	3.063	0.21	1.260	4.323
1000	2.74	0.30	2.188	0.12	0.720	2.908
1200	3.29	0.10	0.729	0.01	0.060	0.789
1500	4.11	-0.02	0.145	-0.04	-0.240	- 0.386

TABLA VII.22

x	Z	A_1	Q_A	B_q	Q_B	Q (ton)
0	0	1	20.0	0	0	20 000
50	0.14	0.97	19.40	-0.018	-296.22	19.104
100	0.27	0.92	18.40	-0.045	-740.54	17.659
150	0.41	0.83	16.60	-0.10	-1645.6	14.954
200	0.55	0.73	14.60	-0.16	-2633.00	11.967
250	0.69	0.59	11.80	-0.23	-3785.00	8.015
300	0.82	0.48	9.60	-0.275	-4525.50	5.075
350	0.96	0.32	6.40	-0.34	-5595.20	0.805
400	1.10	0.20	4.00	-0.385	-6335.80	-2.336
450	1.23	0.07	1.40	-0.42	-6911.70	-5.512
500	1.37	-0.04	- 0.80	-0.45	-7405.40	-8.205
600	1.65	-0.24	- 4.80	-0.48	-7899.10	-12.699
700	1.92	-0.34	- 6.80	-0.465	-7652.30	-14.452
800	2.19	-0.41	- 8.20	-0.42	-6911.70	-15.112
900	2.47	-0.42	- 8.40	-0.36	-5924.30	-14.324
1000	2.74	-0.40	- 8.00	-0.285	-4690.10	-12.690
1200	3.29	-0.27	- 5.40	-0.14	-2303.90	- 7.704
1500	4.11	-0.08	- 1.60	-0.0	0.0	- 1.600

b) Solución por medio del análisis de diferencias finitas.

En este caso, para obtener la solución por medio de diferencias finitas se ha dividido la pila en 30 secciones de 1m cada una. La tolerancia que se propone es al igual que en el caso anterior de 2.5×10^{-3} cm. El proceso que se sigue es el expuesto en el capítulo VI. Los resultados finales serán presentados a continuación.

EJEMPLO 2,TESIS JOSE ANTONIO GARCIA ESCOTO,ENEP ARAGON.

*** CARGA APLICADA: E S T A T I C A.

NIVEL FREATICO:10 MTS

*** NUMERO DE ESTRATOS: 2

* ARCILLA SUAVE:
ESF. CTNTE. (TON/M2) = 3.00 PESO (TON/M3) = 1.60 E50 (M/M) =.0200
TERMINA EN (MTS):10.00

* ARENA:
PHI (GRADOS) =30.00 PESO (TON/M3) = 0.90 K (S O C) (KG/CM3)= 1.7
TERMINA EN (MTS):30.00

ITERATION INFORMATION

ITER. NO.	YT,CM.
1	0.18461E+00
2	0.92189E+00
3	0.17676E+01
4	0.24144E+01
5	0.28327E+01
6	0.30811E+01
7	0.32261E+01
8	0.33084E+01
9	0.33541E+01
10	0.33793E+01
11	0.33926E+01
12	0.33994E+01
13	0.34028E+01
14	0.34046E+01

LATERALLY LOADED PILE PROGRAM

INPUT INFORMATION

PT,KG.	BC2	BC CASE	DIAMETER,CM	INCREMENT LENGTH,CM
0.20000D+05	0.60000D+07	1	0.10000D+03	0.10000D+03

NUMBER OF SEGMENTS: 30

AXIAL COMPRESSION AT PILE TOP= 0.20000D+06

LENGTH OF PILE,CM	ITERATION TOLERANCE,CM
0.30000E+04	0.25000D-02

DEPTH TO P-Y CURVE,CM.	Y,CM.	P,KG/CM.
0.0	0.0	0.0
	0.40000E-01	0.90000E+01
	0.32000E+00	0.18000E+02

	0.10800E+01	0.27000E+02
	0.25600E+01	0.36000E+02
	0.50000E+01	0.45000E+02
	0.86400E+01	0.54000E+02
	0.13720E+02	0.63000E+02
	0.20480E+02	0.72000E+02
	0.29160E+02	0.81000E+02
	0.40000E+02	0.90000E+02
	0.10000E+03	0.90000E+02
0.29032E+03	0.0	0.0
	0.40000E-01	0.18000E+02
	0.32000E+00	0.36000E+02
	0.10800E+01	0.54000E+02
	0.25600E+01	0.72000E+02
	0.50000E+01	0.90000E+02
	0.86400E+01	0.10800E+03
	0.13720E+02	0.12600E+03
	0.20480E+02	0.14400E+03
	0.29160E+02	0.16200E+03
	0.40000E+02	0.18000E+03
	0.10000E+03	0.18000E+03
0.58065E+03	0.0	0.0
	0.40000E-01	0.27000E+02
	0.32000E+00	0.54000E+02
	0.10800E+01	0.81000E+02
	0.25600E+01	0.10800E+03
	0.50000E+01	0.13500E+03
	0.86400E+01	0.16200E+03
	0.13720E+02	0.18900E+03
	0.20480E+02	0.21600E+03
	0.29160E+02	0.24300E+03
	0.40000E+02	0.27000E+03
	0.10000E+03	0.27000E+03
0.10000E+04	0.0	0.0
	0.40000E-01	0.27000E+02
	0.32000E+00	0.54000E+02
	0.10800E+01	0.81000E+02
	0.25600E+01	0.10800E+03
	0.50000E+01	0.13500E+03
	0.86400E+01	0.16200E+03
	0.13720E+02	0.18900E+03
	0.20480E+02	0.21600E+03
	0.29160E+02	0.24300E+03
	0.40000E+02	0.27000E+03
	0.10000E+03	0.27000E+03
0.10000E+04	0.0	0.0
	0.51259E+00	0.85090E+03
	0.65685E+00	0.98936E+03
	0.80111E+00	0.11163E+04
	0.94537E+00	0.12345E+04
	0.10896E+01	0.13459E+04
	0.12339E+01	0.14516E+04
	0.13781E+01	0.15525E+04
	0.15224E+01	0.16494E+04
	0.16667E+01	0.17427E+04
	0.37500E+01	0.30671E+04
	0.56250E+01	0.30671E+04
0.15195E+04	0.0	0.0
	0.68784E+00	0.17350E+04
	0.81019E+00	0.19166E+04

	0.93255E+00	0.20877E+04
	0.10549E+01	0.22502E+04
	0.11773E+01	0.24054E+04
	0.12996E+01	0.25545E+04
	0.14220E+01	0.26981E+04
	0.15443E+01	0.28370E+04
	0.16667E+01	0.29716E+04
	0.37500E+01	0.52300E+04
	0.56250E+01	0.52300E+04
0.16667E+04	0.0	0.0
	0.63660E+00	0.17612E+04
	0.76535E+00	0.19700E+04
	0.89411E+00	0.21653E+04
	0.10229E+01	0.23499E+04
	0.11516E+01	0.25255E+04
	0.12804E+01	0.26936E+04
	0.14091E+01	0.28552E+04
	0.15379E+01	0.30111E+04
	0.16667E+01	0.31619E+04
	0.37500E+01	0.55650E+04
	0.56250E+01	0.55650E+04
0.23333E+04	0.0	0.0
	0.49920E+00	0.19335E+04
	0.64513E+00	0.22598E+04
	0.79106E+00	0.25581E+04
	0.93700E+00	0.28355E+04
	0.10829E+01	0.30963E+04
	0.12289E+01	0.33437E+04
	0.13748E+01	0.35798E+04
	0.15207E+01	0.38062E+04
	0.16667E+01	0.40243E+04
	0.37500E+01	0.70827E+04
	0.56250E+01	0.70827E+04
0.30000E+04	0.0	0.0
	0.43146E+00	0.21487E+04
	0.58586E+00	0.25879E+04
	0.74026E+00	0.29834E+04
	0.89467E+00	0.33476E+04
	0.10491E+01	0.36879E+04
	0.12035E+01	0.40089E+04
	0.13579E+01	0.43142E+04
	0.15123E+01	0.46062E+04
	0.16667E+01	0.48866E+04
	0.37500E+01	0.86005E+04
	0.56250E+01	0.86005E+04

OUTPUT INFORMATION

X,CM.	Y,CM.	M,CM-KG	ES,KG/CM2	P,KG/CM.	EI,KG-CM2
0.0	0.3405D+01	0.6000E+07	0.1149D+02	-0.3913E+02	0.1030D+13
0.1000E+03	0.2663D+01	0.7953E+07	0.1838D+02	-0.4893E+02	0.1030D+13
0.2000E+03	0.1998D+01	0.9401E+07	0.2755D+02	-0.5505E+02	0.1030D+13
0.3000E+03	0.1424D+01	0.1028E+08	0.4156D+02	-0.5919E+02	0.1030D+13
0.4000E+03	0.9505D+00	0.1055E+08	0.6374D+02	-0.6058E+02	0.1030D+13
0.5000E+03	0.5792D+00	0.1019E+08	0.9910D+02	-0.5740E+02	0.1030D+13
0.6000E+03	0.3068D+00	0.9236E+07	0.1720D+03	-0.5276E+02	0.1030D+13
0.7000E+03	0.1241D+00	0.7738E+07	0.2834D+03	-0.3517E+02	0.1030D+13
0.8000E+03	0.1646D-01	0.5873E+07	0.6750D+03	-0.1111E+02	0.1030D+13
0.9000E+03	-0.3412D-01	0.3885E+07	0.6750D+03	0.2303E+02	0.1030D+13

0.1000E+04	-0.4698D-01	0.2121E+07	0.5887D+03	0.2766E+02	0.1030D+13
0.1100E+04	-0.3926D-01	0.6286E+06	0.1826D+04	0.7168E+02	0.1030D+13
0.1200E+04	-0.2542D-01	-0.1480E+06	0.1992D+04	0.5065E+02	0.1030D+13
0.1300E+04	-0.1303D-01	-0.4179E+06	0.2158D+04	0.2812E+02	0.1030D+13
0.1400E+04	-0.4694D-02	-0.4058E+06	0.2324D+04	0.1091E+02	0.1030D+13
0.1500E+04	-0.2977D-03	-0.2838E+06	0.2490D+04	0.7412E+00	0.1030D+13
0.1600E+04	0.1344D-02	-0.1538E+06	0.2656D+04	-0.3569E+01	0.1030D+13
0.1700E+04	0.1492D-02	-0.5923E+05	0.2822D+04	-0.4210E+01	0.1030D+13
0.1800E+04	0.1065D-02	-0.6634E+04	0.2988D+04	-0.3181E+01	0.1030D+13
0.1900E+04	0.5734D-03	0.1416E+05	0.3154D+04	-0.1808E+01	0.1030D+13
0.2000E+04	0.2195D-03	0.1685E+05	0.3320D+04	-0.7286E+00	0.1030D+13
0.2100E+04	0.2914D-04	0.1222E+05	0.3486D+04	-0.1016E+00	0.1030D+13
0.2200E+04	-0.4256D-04	0.6547E+04	0.3652D+04	0.1554E+00	0.1030D+13
0.2300E+04	-0.5069D-04	0.2417E+04	0.3818D+04	0.1935E+00	0.1030D+13
0.2400E+04	-0.3536D-04	0.2180E+03	0.3984D+04	0.1409E+00	0.1030D+13
0.2500E+04	-0.1791D-04	-0.5728E+03	0.4150D+04	0.7433E-01	0.1030D+13
0.2600E+04	-0.6024D-05	-0.6192E+03	0.4316D+04	0.2600E-01	0.1030D+13
0.2700E+04	-0.1476D-06	-0.4044E+03	0.4482D+04	0.6616E-03	0.1030D+13
0.2800E+04	0.1802D-05	-0.1822E+03	0.4648D+04	-0.8376E-02	0.1030D+13
0.2900E+04	0.1983D-05	-0.4342E+02	0.4814D+04	-0.9545E-02	0.1030D+13
0.3000E+04	0.1742D-05	0.0	0.4980D+04	-0.8675E-02	0.1030D+13

ANALISIS DE RESULTADOS

Al igual que en el caso anterior, los desplazamientos - obtenidos por el método de coeficientes adimensionales y el- de diferencias finitas presentan soluciones bastante simila res, como puede observarse en la figura VII.8. De esta misma figura puede apreciarse que los desplazamientos son bas-- tante pequeños para profundidades mayores a 7m; sin embargo, debido a la existencia de la carga axial, se considera necesario el empotramiento de la pila hasta la profundidad de -- 30 m.

En la figura VII.9 se presenta en forma gráfica la va-- riación del momento y del cortante con la profundidad obteni da por ambos métodos. En esta figura puede observarse como- a profundidades mayores de 10 m los valores de momento y cor tante son relativamente pequeños de tal manera que podría -- proponerse una rigidez distinta a la empleada hasta esta pro fundidad.

Los resultados obtenidos por ambos métodos son bastante similares, aun cuando se han incluido los efectos de la carga axial en el método de diferencias finitas. De esto se -- concluye que son relativamente pequeños los efectos de la -- carga axial en los desplazamientos obtenidos en pilotes cargados lateralmente.

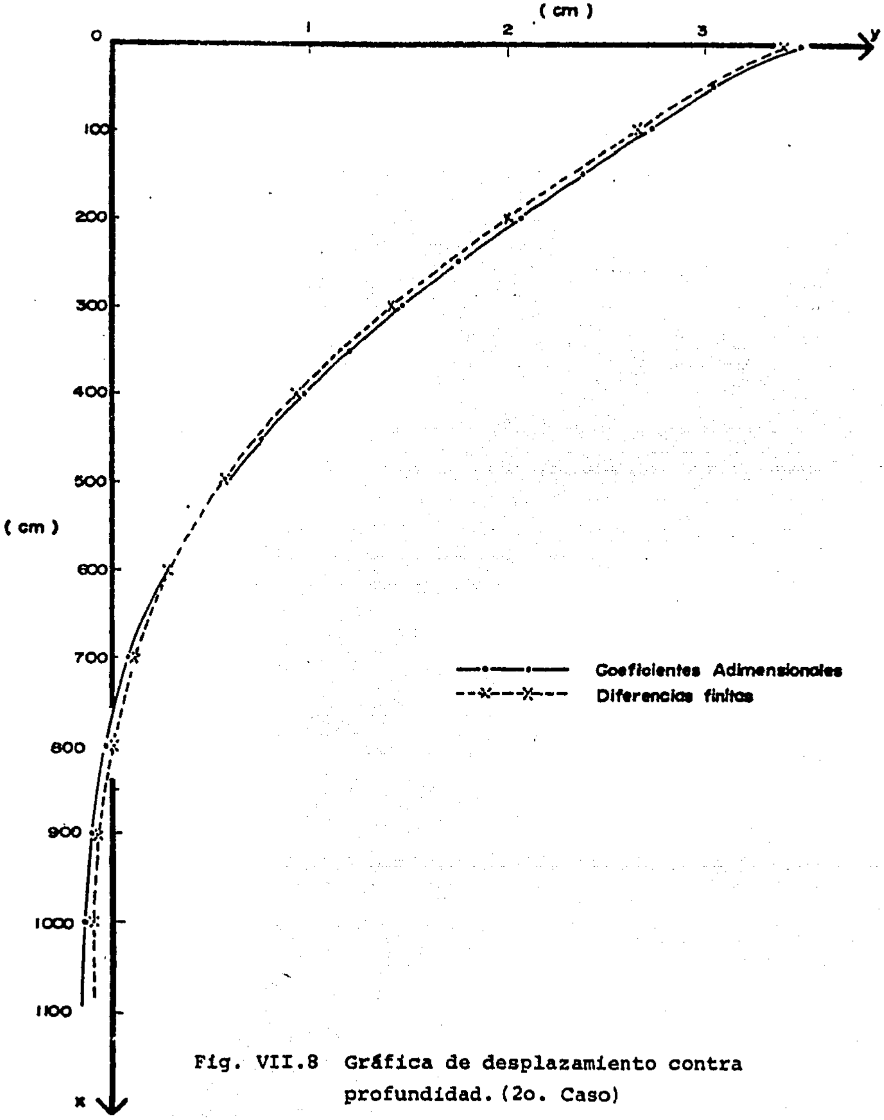


Fig. VII.8 Gráfica de desplazamiento contra profundidad. (2o. Caso)

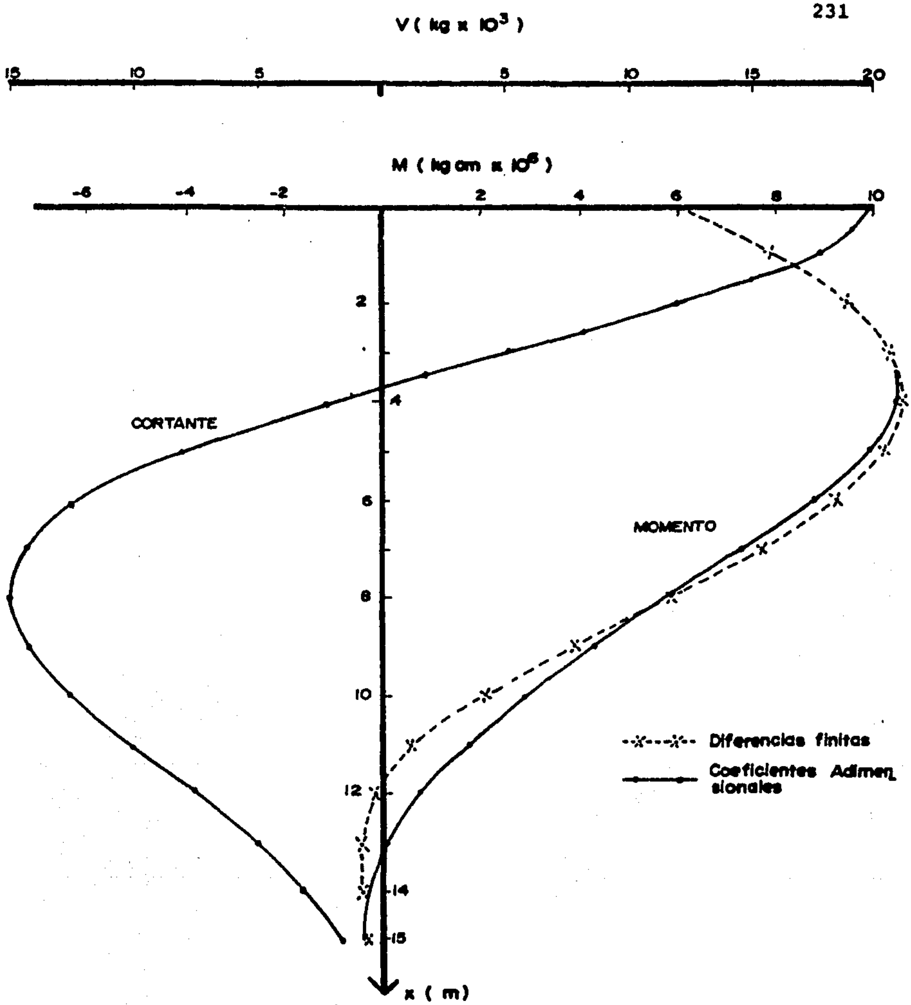


Fig. VII.9 Gráfica de momento y cortante contra profundidad. (2o. Caso)

CAPITULO VIII

CONCLUSIONES

1.- El análisis estático para encontrar la capacidad de carga última, presenta muchas deficiencias en su concepción teórica. Sólo es aplicable a pilotes infinitivamente rígidos (muy cortos), ya que no son tomados en cuenta las características estructurales de la sección transversal del pilote. También es posible usarlo, sólo cuando el pilote se encuentra situado en un solo estrato.

El análisis de Broms presupone ciertas ventajas sobre el análisis estático para encontrar la capacidad de carga y es más recomendable su uso que el del análisis estático.

2.- Se ha propuesto una gran variedad de soluciones de pilotes cargados lateralmente por medio de gráficas apoyadas en el análisis lineal, siendo muy difícil presentar en este trabajo todas las existentes, sin embargo, como se ha visto, estos métodos presentan muchas limitaciones. Difícilmente pueden ser considerados los análisis lineales en suelos que presentan diversos estratos, tampoco es posible trabajar con cambios en la rigidez del pilote.

3.- Aún el análisis de diferencias finitas presenta limitaciones en su aplicación, ya que es improbable usarlo en-caso de tener un pilote corto, en donde es difícil conocer - los valores de las condiciones frontera en la punta del pilo te. También cuando se considera carga axial, es difícil establecer un criterio en el cual se defina como disminuye la- carga axial con la profundidad.

Las curvas p - y, usadas en los análisis no lineales -- presentan limitación en cuanto a su construcción. Sólo pueden ser realizadas en suelos puramente cohesivos o puramente friccionantes a menos que sean desarrolladas a través de - - pruebas de pilotes instrumentados, lo cual incrementa los -- costos.

4.- Los valores existentes del módulo de reacción de la subrasante sólo se presentan en forma separada para suelos - cohesivos o suelos friccionantes, siendo difícil elegir un - valor del módulo de reacción adecuado para un suelo cohesi-- vo-friccionante.

5.- Cuando se hacen análisis de grupos de pilotes sometidos a cargas laterales, se hacen correcciones en los valores del módulo de la reacción de la subrasante, siendo estas propuestas en base a conocimientos empíricos. Las correccio nes recomendadas se han realizado en base al ancho y al distanciamiento de los pilotes. Es difícil asegurar que se ten drá un comportamiento similar al que se ha obtenido de pruebas.

6.- Los procedimientos recomendados para la construcción de curvas p-y, son resultados de pruebas en pilotes tubulares de 30 cm de diámetro. No se han hecho estudios en relación al aumento de ancho del elemento de cimentación, así como de la influencia del tipo de sección transversal usada.

7.- De los análisis de los resultados, efectuados al final de cada uno de los dos casos presentados en el capítulo VII, pueden observarse algunas de las ventajas que presentan los análisis de coeficientes adimensionales y de diferencias finitas sobre los análisis lineales. Entre éstas podemos observar un comportamiento bien definido de los valores de desplazamiento, momento y cortante con la profundidad, permitiendo de esta manera alterar los valores de longitud, rigidez o sección del pilote, de acuerdo como se considere necesario para obtener un diseño más aceptable.

8.- En la práctica existe influencia en cuanto al método de colocación del elemento profundo de cimiento. En los diversos estudios no se ha hecho mención a la variación que pueda existir por tal efecto.

9.- Realmente es poca la investigación que se ha llevado a cabo en el comportamiento de cimientos profundos cargados lateralmente, y todavía menor, es la información que se encuentra disponible. Los métodos no lineales, que son presumiblemente los que proporcionan un comportamiento más cercano a la realidad, fueron desarrollados apenas en la década anterior y aún se siguen proponiendo y realizando una gran variedad de modificaciones. Se puede concluir que todavía es mucho lo que falta por realizar en el estudio de cimentaciones profundas ante cargas laterales.

REFERENCIAS

1.- Matlock, H. and Reese, Lymon C. 1960: "Generalized Solutions for Laterally Loaded Piles". J.S.M.F.D. Proc. - - ASCE, Vol. 86, SM5

2.- Welch, Robert C. and Reese, Lymon C. 1972 : "Lateral - - Load Behaviour of Drilled Shafts" C.F.H.R. 3-5-65-89 - Center for Highway Research. The University of Texas at Austin

3.- Brinch Hansen J. 1961 : "The Ultimate Resistante of Rigid Piles Against Transversal Forces" Geoteknisk Institut. - Bull. No. 12, Copenhagen.

4.- Poulos, H.G. and Davis E. H. 1980. "Pile Foundation - - Analysis and Design" The University of Sidney, John -- Wiley and Sons. 147-149.

5.- Scott, Ronald F. 1981: "Foundation Analysis" California Institute of Technology, Prentice Hall, Inc., Englewood-Cliffs, NJ07632, 119-201

6.- Hetenyi, Miklos I. 1946: "Beams of Elastic Foundations". Ann Arbor, Mich. University of Mich. Press.

7.- Reese, Lymon C. and Manoliu I. 1973 "Analysis of Lateraly Loaded Piles by Computer" Buletinul Stiintific, Al - Institutului De Constructii Bucaresti, Anul XVI, NR. 1,- 35-70

8.- Vlasov, V.Z. and Leontive N. N. 1966: "Beams, Plates, -- and Shells on Elastic Foundations" NTIS No. N67-14238

9.- Murthy, V.N.S. 1974: "Soil Mechanics and Foundation - - Engineering" Dhanpat Rai and Sons. 1682, Nai Sarak, - - Delhi-110006

10.- Reese, Lymou C. and Matlock, H. 1956: "Non-Dimensional - Solutions for Laterally Loaded Piles with Soil Modulus - Assumed Proportional to Depth" Proc. 8th Texas Conf. -- S.M. and F.E., Univ. of Texas at Austin.

11.- Bowles, Joseph E. 1968 "Foundation Analysis and Design" McGraw-Hill, Inc.

12.- Reese Lymon C. 1975: "Design, Construction, and Performance of Deep Foundations" Lectures delivered March 20, 1975 at the University of California at Berleyey as a -- part of a seminar series.

13.- Davisson M.T & Gill. H.L. 1963 "Laterally Loaded Piles - in a Layered Soil System" J.S.M.F.D., ASCE, vol. 89. SM3.