

INTERACCION SUELO-ESTRUCTURA DE CIMENTACIONES PROFUNDAS EN EDIFICIOS ALTOS.



Leonardo Zeevaert*

SINOPSIS

En regiones sísmicas y sujetas a hundimiento regional de la superficie del suelo, se presenta la necesidad de soportar el peso de las construcciones sobre pilotes o pilas, apoyados en estratos profundos. Para justificar la acción de estos elementos que trabajan a la flexocompresión, es necesario llevar a cabo cálculos de interacción suelo-pilote como los que se indican en esta disertación. Sin embargo, la sismo-dinámica de cimentaciones se encuentra aún en embrión por lo que hay necesidad de ejercer mayor apoyo en el futuro a la investigación básica, así también en el campo por medio de la instrumentación y obtención de muestras inalteradas y finalmente perfeccionar en el laboratorio el equipo y la técnica de los ensayos con que se cuenta en la actualidad.

I INTRODUCCION.

El autor ha tenido la oportunidad de observar en varias cimentaciones piloteadas el daño motivado por las fuerzas sísmicas en estos elementos. La fotografía (1) muestra el desplazamiento de la junta en un pilote debido al refuerzo defectuoso en ésta. La fotografía (2) muestra un pilote de concreto reforzado, el cual falló debido a altos esfuerzos de cortante y flexión. La fotografía (3) muestra un pilote reforzado solamente al centro de la sección, que fue dañado por altos esfuerzos cíclicos de flexión en la cabeza del pilote los cuales originaron la rotura que se muestra en ambos lados de la sección del pilote. Finalmente, en la fotografía (4) se muestra un

* Profesor Emérito, División de estudios de Postgrado, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México.

pilote, cuya parte superior falló al extremo de que el concreto podía retirarse de ese lugar a mano sin dificultad.

El método de construcción de pilotes o pilas coladas en el lugar puede cambiar en cierto grado los parámetros de diseño. La experiencia de parte del contratista en la construcción de estos elementos es necesaria para prever desde un punto de vista estratigráfico, hidráulico y de las propiedades del suelo la forma más económica, segura y expedita del método de construcción que permita conservar las propiedades mecánicas del suelo utilizadas en el diseño de estos elementos, y en algunas ocasiones inclusive, tratar de mejorar para obtener su mejor comportamiento. El profesor Lymon C. Reese en su trabajo titulado "Construcción de Cimientos Profundos Colados en Sitio" (1) ha discutido ampliamente varios procedimientos convenientes que pueden usarse en diferentes condiciones estratigráficas; algunos de ellos pueden aplicarse al problema de pilas o pilotes de gran diámetro que atraviesan sedimentos blandos bajo el nivel del agua superficial.

En la URSS se han utilizado fundas de bentonita para disminuir la fricción lateral de fricción negativa en la construcción de grandes pilas (2). La inyección de cemento a alta presión ha sido utilizada con éxito en Argentina para mejorar la capacidad de carga en la base de pilas profundas (2). En otros países, como en Colombia, las pilas o pilotes colados en el lugar se ejecutan satisfactoriamente por la combinación de equipo mecánico y excavación a mano cuando el problema del agua no es muy crítico. Cuando el estrato soportante es arena fina bajo el nivel del agua, puede presentarse el fenómeno de licuación, este problema podrá resolverse bombeando de pozos profundos para crear un flujo descendente del agua bajo la base de la pila. En el caso de usar el método de desplazamiento bentonítico para la construcción de pilas bajo el agua, sería necesario inyectar a presión morteros de cemento para asegurar buen contacto entre la base de la pila y el estrato soportante (2), (3).

El ingeniero de cimentaciones debe prever el método de construcción y modificar convenientemente los parámetros del suelo para efectuar el diseño de las pilas o pilotes. Los parámetros deben considerarse a largo plazo después de que la cimentación ha sido construida y de acuerdo con las condiciones ambientales. Por ejemplo, en caso de fricción negativa en pilas profundas, la reducción de los niveles piezométricos del agua con el tiempo aumentan considerablemente esta fuerza. Este fenómeno no puede omitirse en el diseño de estos elementos de cimentación profunda. Así pues, las fuerzas ambientales no pueden estimarse de reglas prácticas obtenidas de la estadística de otros lugares. La acción de estas fuerzas en cimentaciones profundas dependen en gran parte de las condiciones estratigráficas e hidráulicas locales del sitio en cuestión y de las propiedades geotécnicas de los sedimentos del suelo a través de la profundidad. El método para la construcción de cada uno de estos elementos cuando son colados

sitio desempeña un papel muy importante en el comportamiento futuro de la cimentación. Más aún, un edificio queda soportado generalmente sobre varias pilas o pilotes cuyas cabezas quedan sujetas en alguna forma con la estructura de cimentación. Cuando se presentan fuerzas de arrastre lateral como las que aquí se discuten, siempre deben unirse estos elementos para que la cimentación trabaje como una unidad.

La cimentación con pilas es un método milenario de cimentación usado en todo el mundo y ha demostrado ser bueno cuando se aplica correctamente. En la actualidad la mecánica de suelos proporciona una poderosa herramienta para la interpretación, del comportamiento y construcción de estos elementos, por tanto, los ingenieros están tratando de entender cada vez mejor el comportamiento de las cimentaciones con pilas y los métodos de construcción más seguros y económicos en diferentes condiciones del subsuelo. Los métodos de construcción se están desarrollando rápidamente en todo el mundo, así también los medios para verificar la teoría con las observaciones, dejando siempre un amplio margen al ingeniero estudioso para futuras investigaciones e interpretaciones del comportamiento de las cimentaciones donde se usan pilas o pilotes.

Una pila es una columna de concreto armado o de acero generalmente de diámetro importante si se compara con un pilote hincado de diámetro pequeño. Por tanto, el perímetro y la rigidez que proporciona la sección transversal y el módulo de elasticidad del material usado, son factores importantes en la magnitud de las fuerzas de arrastre originadas en estas cimentaciones.

Los elementos mecánicos a los cuales queda sujeta una pila se muestra en la Fig. 1. En la cabeza queda aplicada una fuerza axial Q_0 que representa el peso de la estructura o edificio incluyendo cualquier incremento ocasionado por momentos de volteo producidos ya sea por viento o fuerzas sísmicas en la superestructura. La fuerza cortante V_0 y el momento M_0 representan las fuerzas que accionen en la cabeza de la pila que en conjunto con Q_0 mantienen a la estructura de la cimentación en equilibrio. Las fuerzas Q_b , V_b y momento M_b en la base de la pila son representativas de las condiciones de apoyo de la pila sujeta a las fuerzas de arrastre y cargas del edificio. Su valor es función de los siguientes factores: el número de pilas, del peso y geometría de la superestructura, rigidez de la cimentación, de la forma en que la pila se fije a la estructura de cimentación, de la sección transversal de la pila, de la profundidad al suelo firme, y finalmente, de las propiedades geotécnicas del suelo alrededor del vástago de la pila.

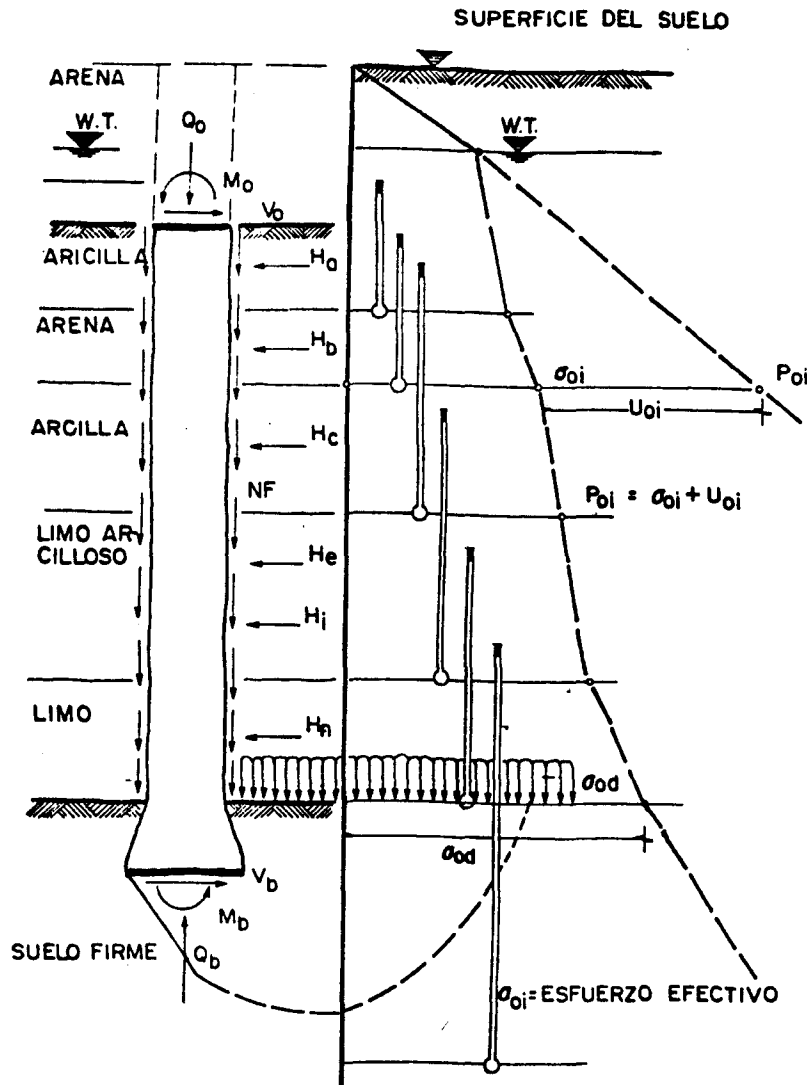


FIG. 1- FUERZAS SOBRE UNA PILA.

Las fuerzas de arrastre debidas a la fricción negativa y movimientos sísmicos fuertes deberán analizarse separadamente para investigar sus efectos máximos sobre el vástago de la pila y el apoyo sobre el suelo firme. Debe reconocerse, sin embargo, que la capacidad de carga de una pila cuando estas fuerzas ambientales se presentan depende de la resistencia al esfuerzo cortante y de la deformabilidad del suelo bajo la base de la pila, esto es, de las propiedades mecánicas, estáticas y dinámicas, del suelo y de su preservación durante la construcción.

En ambiente sísmico y con hundimiento regional, donde se encuentran suelos superficiales de baja resistencia y alta compresibilidad, se hace necesario cimentar usando pilotes o pilas. Generalmente, las pilas se diseñan a manera de columnas para tomar grandes cargas, por tanto, su apoyo deberá efectuarse en estratos resistentes de muy baja compresibilidad. Los pilotes de gran diámetro, siendo mas rígidos

que el subsuelo que atraviesan, oponen resistencia al desplazamiento horizontal de la masa del suelo, haciéndolos trabajar a la flexo-compresión y fuerza cortante, adicionada de la fuerza de arrastre vertical generada por la fricción negativa, y el peso del edificio. Finalmente, la respuesta sísmica de la cimentación depende también en forma importante del momento de volteo sísmico el cual puede aumentar en forma considerable la carga axial sobre los elementos extremos de la cimentación.

II FRICCIÓN NEGATIVA.

Los pilotes o pilas son usados para soportar cargas pesadas sobre suelos firmes a través de sedimentos suaves del subsuelo. Las fuerzas de arrastre son aquellas relacionadas con las condiciones ambientales del lugar en cuestión. La acción puede analizarse por separado para cada condición ambiental, y después estudiar la acción de los diferentes fenómenos para encontrar la respuesta máxima.

El procedimiento de construcción es importante para asignar los parámetros de resistencia al esfuerzo cortante a lo largo del vástago de la pila, cohesión y ángulo de fricción interna. Cuando se coloca concreto en una perforación no ademada, la resistencia al esfuerzo cortante aumenta en la interfase del vástago de la pila con el suelo por la inclusión de lechada de cemento en el suelo circundante. Cuando se origina el movimiento relativo entre pila y suelo debido a la consolidación de los sedimentos alrededor del vástago de la pila, la superficie potencial de deslizamiento puede quedar localizada a cierta distancia del vástago de la pila hasta una superficie vertical no afectada por la lechada de cemento del concreto utilizado. Esta distancia de la pila depende de la permeabilidad del suelo alrededor de la pila. Por otro lado, en el caso de pilotes hincados desde la superficie del suelo, el vástago queda rodeado de un anillo de suelo amasado por el desplazamiento del suelo al hincar el pilote (4).

Cuando los estratos del subsuelo se encuentran en estado de consolidación sobre el suelo firme donde se apoyan los pilotes, se desarrolla la fricción negativa debido al movimiento relativo entre suelo y pilotes, Fig. 2. Esta fuerza friccionante es función de los parámetros de esfuerzo cortante a largo plazo representativos de los sedimentos a diferentes profundidades y de los esfuerzos horizontales que actúan sobre el vástago de la pila (4). Sin embargo, el esfuerzo horizontal inmediatamente después de la construcción puede tomar valores imprevisibles que pueden ser en parte función del procedimiento de construcción. Sin embargo, a largo plazo y debido al relajamiento de las deformaciones horizontales durante el movimiento relativo entre suelo y pilotes, se puede estimar con seguridad el esfuerzo horizontal cerca del vástago en función del esfuerzo vertical, según la siguiente ecuación

$$\sigma_h = \frac{1 - \tan^2 \phi_r}{1 + \tan^2 \phi_r} \sigma_z \quad (1)$$

llamando

$$\bar{N}\phi = \frac{1 + \tan^2 \phi_r}{1 - \tan^2 \phi_r} \quad (2)$$

el esfuerzo horizontal que se ejerce sobre el vástago de la pila es

$$\sigma_h = \frac{1}{\bar{N}\phi_r} \sigma_z \quad (3)$$

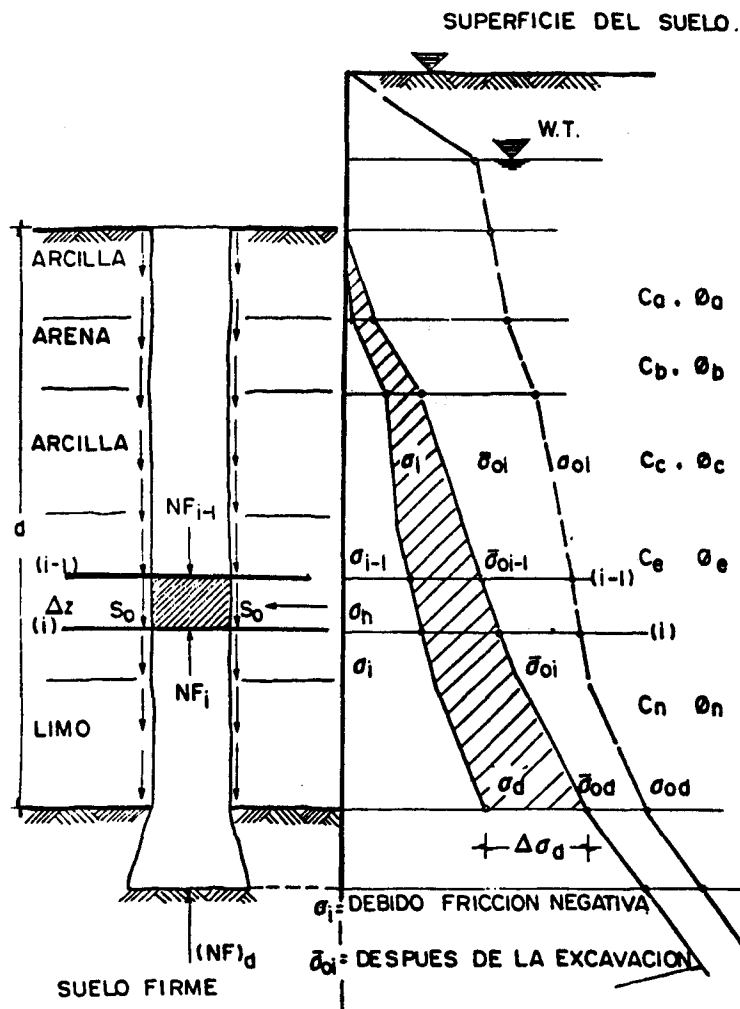


FIG. 2- FRICCION NEGATIVA SOBRE UNA PILA.

Donde σ_z es el esfuerzo vertical efectivo que actúa en un plano horizontal cerca del vástago de la pila a una profundidad z , durante la acción del fenómeno de la fricción negativa.

La integración de la resistencia al esfuerzo cortante totalmente movilizada a lo largo de la superficie potencial de deslizamiento dará la medida total de la fricción negativa transmitida a la base del pilote o pila.

$$(NF)_d = \bar{\omega} \sum_{i=1}^n \left(c_i + \sigma_i \frac{\tan \phi_r}{\bar{N}\phi_r} \right)_i \Delta z_i \quad (4)$$

en donde

$\bar{\omega}$ perímetro de la superficie potencial de deslizamiento.

c_i, ϕ_i parámetros medios de resistencia al esfuerzo cortante del suelo, representativos del estrato de espesor Δz_i , a la profundidad media z_i .

σ_i esfuerzo efectivo vertical residual cercano al vástago de la pila, obtenido por la transferencia del esfuerzo inicial $\bar{\sigma}_{oi}$ sobre la pila, fig. 2.

La fuerza total $(NF)_d$ de arrastre o fricción negativa sobre el vástago de la pila a la profundidad d está dada por la ecuación (4), la que representa la transferencia de esfuerzos de la masa del suelo al vástago de la pila durante el hundimiento del suelo circundante (4).

Supongamos, Fig. 2, un elemento de pila cortado por dos planos horizontales a las profundidades $(i-1)$ e i , respectivamente. Debido a la transferencia del peso del suelo al vástago de la pila, el esfuerzo vertical efectivo inicial $\bar{\sigma}_{oi-1}$ sobre el plano $(i-1)$ se reduce a (σ_{i-1}) y el plano horizontal i se reduce de $\bar{\sigma}_{oi}$ a σ_i , respectivamente. Por consiguiente, la resistencia media última por unidad de longitud es

$$s_{oi} = \bar{\omega} \left\{ c_i + 1/2 (\sigma_i + \sigma_{i-1}) \frac{\tan \phi_i}{\bar{N}\phi_i} \right\} \quad (5)$$

o bien

$$s_{oi} = c_i \bar{\omega}_i + m_i \sigma_i + m_i \sigma_{i-1} \quad (6)$$

donde

$$m_i = \frac{\bar{\omega}_i \tan \phi_i}{2 \bar{N}_{\phi i}} \quad (7)$$

El equilibrio de un segmento de pila en términos de la fricción negativa y resistencia al esfuerzo cortante del suelo cercano al vástago de la pila, Fig. 3, se lee como sigue:

$$(NF)_i - (NF)_{i-1} = s_{oi} \Delta z_i \quad (8)$$

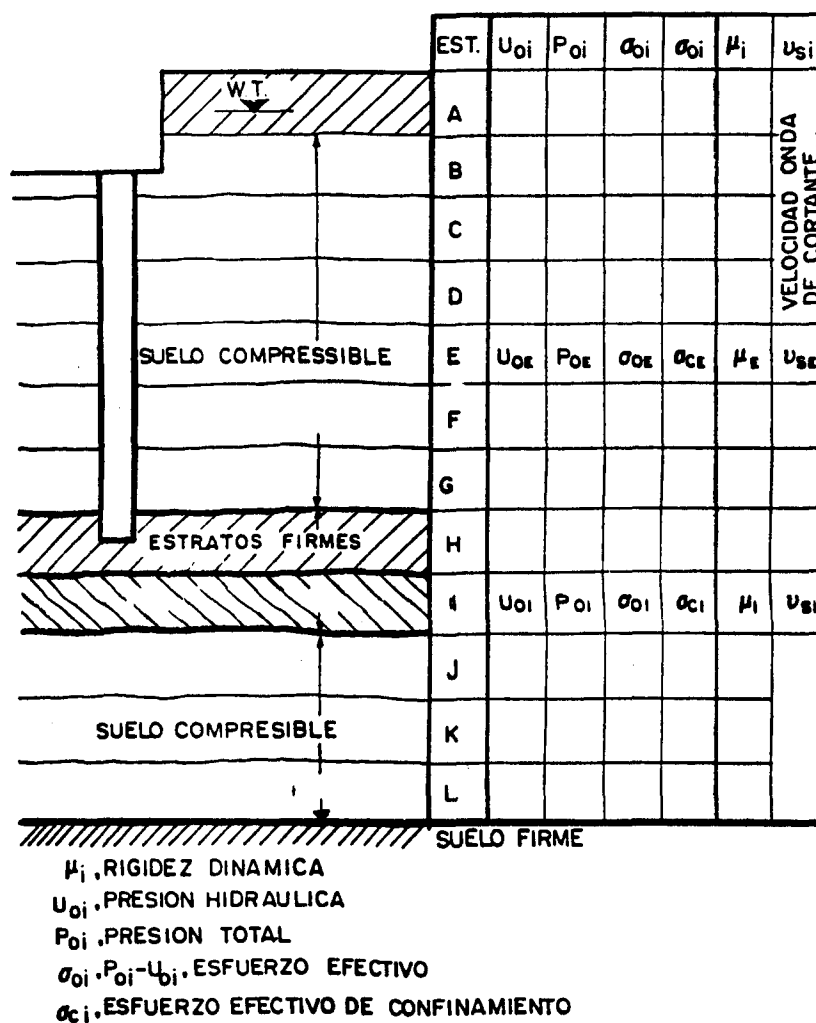


FIG.3- PROPIEDADES ESTRATIGRAFICAS Y DINAMICAS

Así también la transferencia total del esfuerzo vertical $(\bar{\sigma}_{oi-1} - \sigma_{i-1})$ a la profundidad $z = (i-1)$ es proporcional a la carga de fricción negativa sobre la pila $(NF)_{i-1}$. Llamando \bar{a}_i el área tributaria equivalente cerca del vástago de la pila donde se efectúa la transferencia del esfuerzo podemos escribir (4)

$$(NF)_{i-1} = (\bar{\sigma}_{oi-1} - \sigma_{i-1}) \bar{a}_{i-1} \quad (9)$$

y en forma semejante para la profundidad $z = i$

$$(NF)_i = (\bar{\sigma}_{oi} - \sigma_i) \bar{a}_i \quad (10)$$

combinando las ecuaciones 6, 8 y 9 se obtiene el esfuerzo vertical residual debido a la transferencia en carga

$$\sigma_i = A_i \bar{\sigma}_{oi} - B_i \sigma_{i-1} - C_i (NF)_{i-1} - D_i \quad (11)$$

donde los coeficientes son

$$A = \frac{\bar{a}_i}{\bar{a}_i + m_i \Delta z_i} \quad (12)$$

$$B = \frac{m_i \Delta z_i}{\bar{a}_i + m_i \Delta z_i}$$

$$C = \frac{1}{\bar{a}_i + m_i \Delta z_i}$$

$$D = \frac{\bar{\omega}_i \cdot c_i}{\bar{a}_i + m_i \Delta z_i}$$

Los coeficientes A_i , B_i , C_i , y D_i representan los valores medios del estrato del suelo de espesor Δz_i y pueden calcularse de las propiedades mecánicas del suelo. Las condiciones de frontera en la cabeza de la pila son generalmente $\sigma_{i-1} = 0$ y $(NF)_{i-1} = 0$. Por lo tanto la transferencia de esfuerzos en la base del primer estrato puede calcularse por medio de la (11), esto es $(\sigma_{oi} - \sigma_i)$. Con este valor se obtiene la fuerza de fricción negativa al mismo nivel i , según la ecuación (10), tenemos

$$(NF)_i = (\bar{\sigma}_{oi} - \sigma_i) \bar{a}_i \quad (13)$$

Los nuevos valores de σ_i y $(NF)_i$ se usan en la ecuación (11) para obtener σ_{i+1} y en la ecuación (13) para el valor de $(NF)_{i+1}$. La integración se hace paso a paso hasta alcanzar la longitud total de la pila expuesta a las fuerzas verticales de arrastre, obteniéndose así la fricción negativa total $(NF)_d$ a la profundidad requerida d . La reducción del esfuerzo de confinamiento vertical a la elevación de la base de la pila se estima de la transferencia de esfuerzos $(\sigma_{od} - \sigma_d)$ y se revisa la capacidad de carga estática.

La distribución de esfuerzos bajo la base de la pila debido a la carga axial en conjunto con la fricción negativa puede utilizarse para estimar los desplazamientos verticales estáticos de la pila. Sin embargo se hace notar que cuando las pilas o pilotes se encuentran muy separadas y las áreas tributarias equivalentes no se interfieren, la reducción del esfuerzo vertical medio de confinamiento sobre el estrato firme de apoyo deberá investigarse para fines de capacidad de carga, como se indica en Ref. (4), capítulo VIII p. 361, sección 3.2.

III COMPORTAMIENTO SISMICO DEL SUBSUELO

La valorización de la respuesta sísmica de la cimentación se efectúa por un análisis cuantitativo del comportamiento sísmico del subsuelo. Para lograr lo anterior será necesario conocer las propiedades estratigráficas, hidráulicas y dinámicas del subsuelo. Consideremos que las características estratigráficas del subsuelo son como se muestra en la Fig. 3. Para el análisis dinámico es indispensable conocer la rigidez dinámica del suelo μ , representativa de cada uno de los estratos que lo forman. Este parámetro dinámico del suelo puede determinarse por medio del "Péndulo de Torsión Libre" diseñado por el autor para este objeto, (8) Foto 5.

La definición del módulo dinámico de rigidez del suelo es

$$(14)$$

$$\mu = \tau / \gamma$$

en donde τ es el esfuerzo cortante y γ la distorsión angular inducida en el suelo por las ondas sísmicas equivolumétricas o de cortante que viajan del suelo firme hacia la superficie. Las ondas sísmicas tienen diferentes velocidades v_s según los valores de μ para cada estrato. La velocidad de la onda está dada por $v_s = \sqrt{\mu/\rho_i}$, donde ρ_i es la masa unitaria. Así pues, el tiempo que toma la onda para recorrer el estrato i de espesor d_i es d_i/v_{si} , y para recorrer todos los estratos del suelo suave tomará un tiempo igual a 1/4 del periodo fundamental del depósito del suelo, esto es:

(15)

$$T_s = \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{v_{si}}$$

El valor de T_s representa el mayor periodo libre de vibración del suelo, el cual genera esfuerzos cortantes y desplazamientos máximos en la masa del suelo. Por consiguiente, cualquier elemento rígido que se construya en el subsuelo quedará sujeto a los desplazamientos horizontales originados por el empuje dinámico de la masa del suelo (5).

Consideremos, Fig. 4, el desplazamiento relativo de la masa del suelo apoyada sobre la base firme. Se observa que un estrato a cierta profundidad se distorsiona por las ondas sísmicas que producen esfuerzos cortantes en planos horizontales. El equilibrio dinámico de un elemento de espesor d_i requiere:

1) por distorsión (16)

$$\frac{\delta_i - \delta_{i+1}}{d_i} = \frac{\tau_i + \tau_{i+1}}{2\mu}$$

2) por la fuerza de inercia (17)

$$\tau_{i+1} - \tau_i = (\rho d)_i p_n^2 \frac{1}{2} (\delta_i + \delta_{i+1})$$


$$\delta_{i+1} = A_i \delta_i - B_i \tau_i \quad (18)$$

$$\tau_{i+1} = C_i (\delta_i + \delta_{i+1}) + \tau_i \quad (19)$$

en donde

$$A_i = \frac{1 - N_i}{1 + N_i}, \quad B_i = \frac{1}{1 + N_i} \frac{d_i}{\mu_i} \quad (20)$$

$$C_i = \frac{1}{2} (\rho d_i) p_n^2, \quad N_i = \frac{\rho p_i^2 \cdot p_n^2}{4\mu_i}$$

Con las ecuaciones (18) y (19) y conociendo la aceleración asignada a la superficie del suelo se puede encontrar la configuración de la masa del subsuelo durante el movimiento. La aceleración máxima de la superficie del suelo se designa por a_m y p_n la frecuencia circular, por consiguiente el desplazamiento en la superficie será $\delta_{so} = a_m / p_n^2$, con esta información se efectúa la integración paso a paso por medio de las ecuaciones (18) y (19) hasta encontrar que el desplazamiento relativo del suelo sea nulo en la base firme donde se generan las ondas sísmicas, obteniéndose así la verificación de la frecuencia circular libre de la masa del suelo, la configuración de desplazamientos y los esfuerzos cortantes generados por la aceleración asignada en la superficie.

IV PERIODO EQUIVALENTE ESTRUCTURA-CIMENTACION

La respuesta sísmica de la cimentación depende del conocimiento de las propiedades estratigráficas y dinámicas del subsuelo, así como del espectro de respuesta sísmico de la región.

Con el objeto de fijar los conceptos para el diseño sísmico de una cimentación con pilas, supongamos que la Fig. 5 representa la cimentación de un edificio alto cuyo centro de masa se encuentra localizado a una altura h_m del desplante de la cimentación. Se considera que la cimentación es rígida de tipo cajón que alberga un sótano formando una estructura rígida de cimentación. Las descargas se efectúan directamente sobre las pilas de gran capacidad apoyadas a cierta profundidad sobre un estrato resistente.

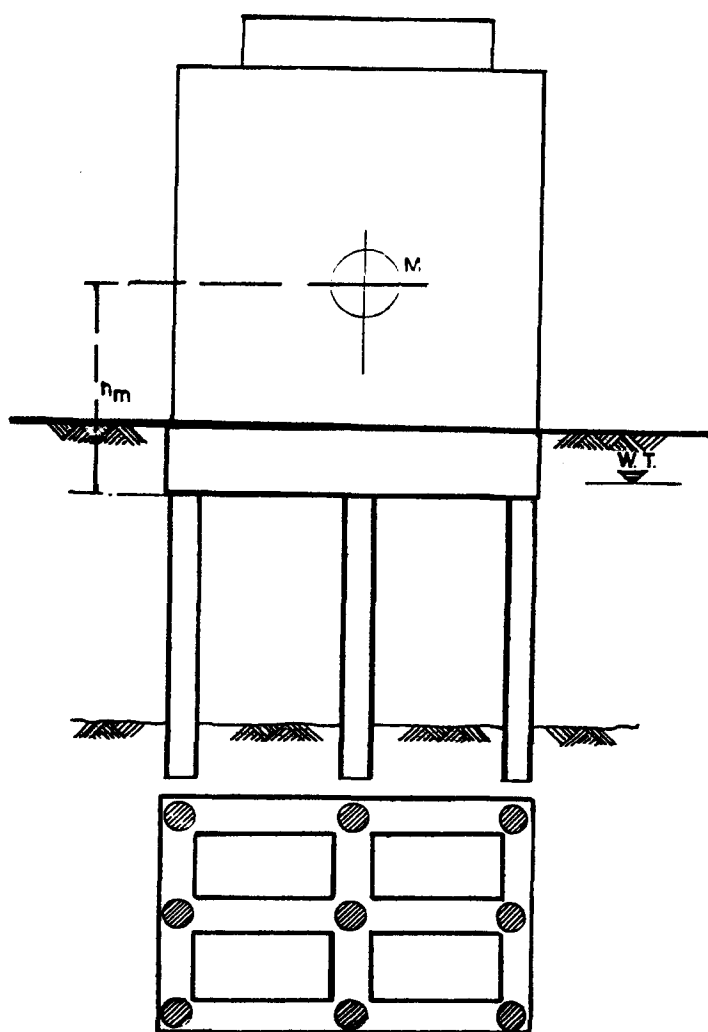


FIG.5 CIMENTACION RIGIDA DE UN EDIFICIO SOBRE PILAS

Para determinar la respuesta sísmica de la cimentación se hace necesario conocer el espectro envolvente de diseño sísmico de la zona en cuestión, Fig. 6, en términos del factor de amplificación f_a , de la relación T_0/T_s y de la fracción del amortiguamiento crítico equivalente δ_0 de la estructura y cimentación. En donde T_0 es el periodo acoplado de la estructura y su cimentación y T_s el periodo dominante del suelo. Este último se investiga como se ha descrito en la sección anterior. El periodo acoplado T_0 puede obtenerse como sigue con apoyos de la Fig. 7.

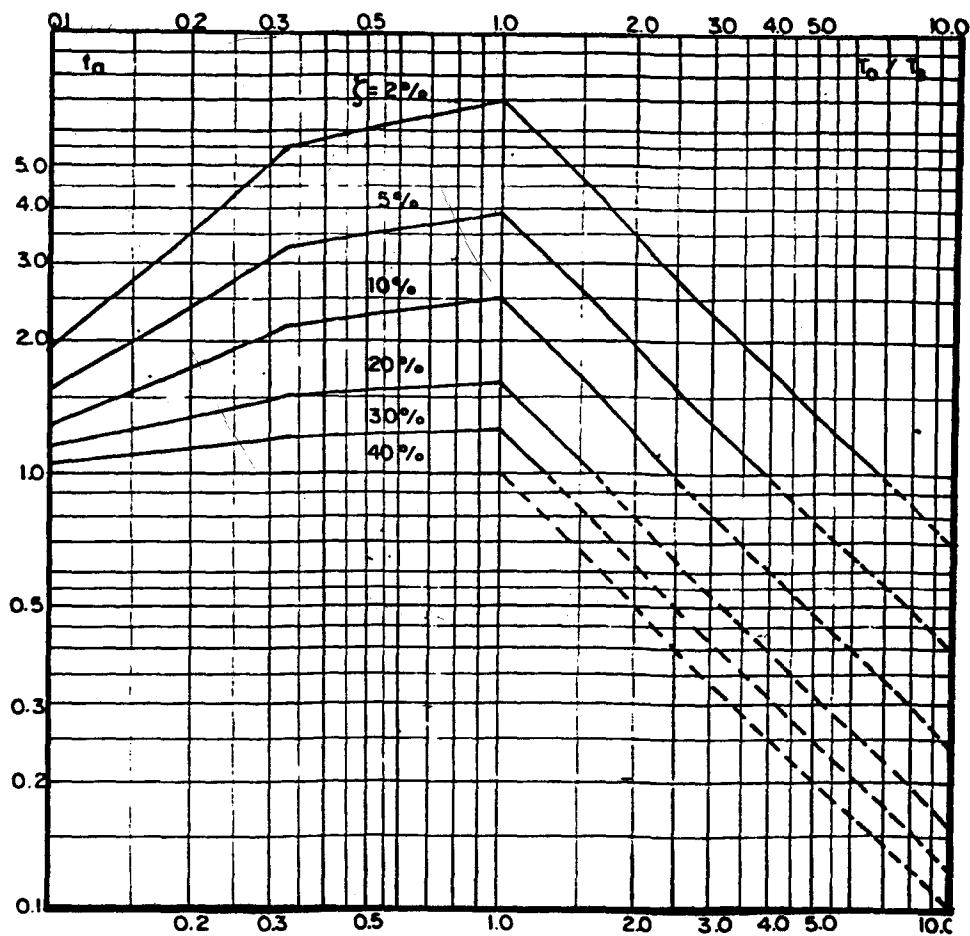
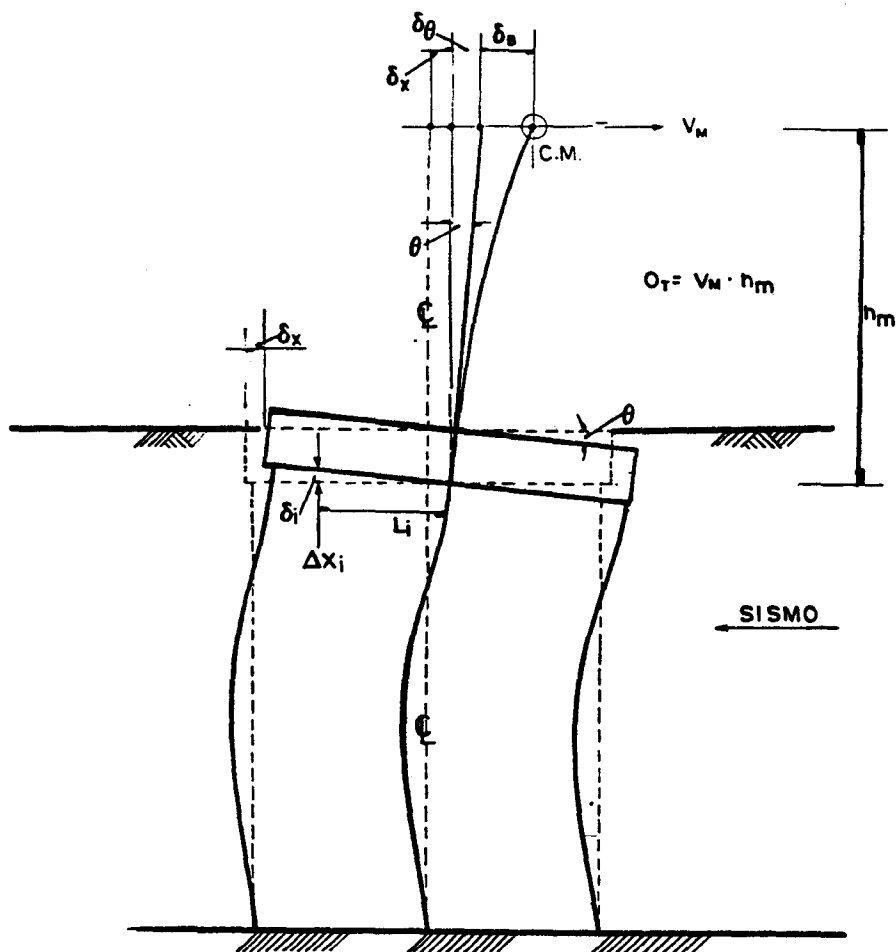


FIG.6- ESPECTRO ENVOLVENTE DE DISEÑO SISMICO.



Al venir el empuje sísmico sobre los pilotes se ocasiona un desplazamiento de la cimentación δ_x en el sentido opuesto al empuje sísmico, por la inercia de la masa del edificio, así también, un desplazamiento δ_θ por giro de la cimentación δ_B por flexión de la estructura del edificio, por consiguiente el desplazamiento relativo total en el centro de masa es

$$\delta_o = \delta_B + \delta_\theta + \delta_x \quad (21)$$

Llamando ω_o a la frecuencia libre equivalente del sistema estructura-cimentación se encuentra que la inercia de la masa M del sistema producirá un momento de volteo

$$O_t = M \delta_o \omega_o^2 \cdot h_m \quad (22)$$

Por otro lado, la fuerza de restitución de la cimentación por el giro es $O_T = K_\theta$ es el módulo dinámico por balanceo de la cimentación y es la amplitud del giro, así pues

$$M \omega_o^2 (\delta_B + \delta_\theta + \delta_x) \cdot h_m = K_\theta \frac{\delta_\theta}{h_m} \quad (23)$$

Además, designan por K la rigidez de la estructura y K la del suelo para el desplazamiento horizontal de la cimentación se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} K_B \delta_B \cdot h_m &= K_\theta \frac{\delta_\theta}{h_m}, & \frac{\delta_B}{\delta_\theta} &= \frac{K_\theta}{K_B} \frac{1}{h_m^2} \\ K_x \delta_x &= K_\theta \frac{\delta_\theta}{h_m^2}, & \frac{\delta_x}{\delta_\theta} &= \frac{K_\theta}{K_x} \frac{1}{h_m^2} \end{aligned} \quad (24)$$

La Ec. (23) puede escribirse en forma conveniente

$$\frac{1}{\omega_o^2} = \frac{M}{K_\theta} \cdot h_m^2 \left\{ \frac{\delta_B}{\delta_\theta} + 1 - \frac{\delta_x}{\delta_\theta} \right\} \quad (25)$$

Sustituyendo en (25) los valores de (24) y arreglando términos se obtiene

$$\frac{1}{\omega_o^2} = \frac{M}{K_B} + \frac{M}{K_\theta} h_m^2 + \frac{M}{K_x} \quad (26)$$

de la expresión (26) se puede observar que

$$\frac{M}{K_B} = \frac{1}{\omega_B^2}, \quad \text{donde } \omega_B \text{ es la frecuencia circular de la estructura el edificio}$$

$$\frac{M}{K_\theta} h_m^2 = \frac{1}{\omega_\theta^2}, \quad \text{donde } \omega_\theta \text{ es la frecuencia circular por rotación de la cimentación}$$

$$\frac{M}{K_x} = \frac{1}{\omega_x^2}, \quad \text{donde } \omega_x \text{ es la frecuencia circular por desplazamiento horizontal de la cimentación}$$

De lo anterior la expresión (26) toma la forma

$$\frac{1}{\omega_o^2} = \frac{1}{\omega_B^2} + \frac{1}{\omega_\theta^2} + \frac{1}{\omega_x^2}$$

pero como $\omega = 2\pi / T$, se tiene

$$T_o^2 = T_B^2 + T_\theta^2 + T_x^2 \quad (27)$$

Así pues, conociendo el periodo acoplado T_o estructura-cimentación y el dominante del suelo T_s se encuentra la relación T_o / T_s y se encuentra al espectro envolvente de diseño sísmico, con el amortiguamiento equivalente ζ_o , Fig. 6, de donde se encuentra el factor de amplificación f_a . La fuerza cortante en el centro de masa es

(28)

$$V_m = (f_a a_m) \cdot M$$

y el momento de volteo

(29)

$$O_T = (f_a a_m) \cdot M \cdot h_m$$

Aquí a representa la aceleración máxima que se le asigna a la superficie m del suelo. De los cálculos antes expuestos se puede reconocer que para valorizar la respuesta del edificio y su cimentación será necesario determinar los valores de los periodos

individuales de la cimentación T_θ , T_x y el de la estructura T_B , así como el amortiguamiento crítico equivalente ζ_o el cual se puede obtener por medio de la siguiente ecuación

$$\zeta_o^2 = \frac{\zeta_\theta^2 T_\theta^2 + \zeta_x^2 T_x^2 + \zeta_B^2 T_B^2}{(1 - \zeta_x^2 - \zeta_n^2) T_\theta^2 + (1 - \zeta_\theta^2 - \zeta_n^2) T_x^2 + (1 - \zeta_\theta^2 - \zeta_x^2) T_B^2} \quad (30)$$

en donde, ζ_B es la fracción de amortiguamiento crítico del edificio, que puede tener valores del orden de 2% a 10% o más, dependiendo de la estructuración del edificio y elementos de relleno. Por otro lado ζ_θ y ζ_x son las fracciones de amortiguamiento crítico del suelo, que puede alcanzar los siguientes valores:

SUELOS	% AMORTIGUAMIENTO
Muy blandos	40 % o mayor
Blandos	30 %
Semi-blandos	20 %
Rígidos	15 %
Muy rígidos	10 %
Duros	5 % o menor

V INTERACCION SUELO-CIMENTACION POR BALANCEO

Para determinar el periodo T_θ y las recargas axiales sobre las pilas durante el sismo por momento de volteo $O_T = \theta K_\theta$, será necesario formar la matriz de flexibilidad de las pilas y del suelo donde éstas apoyan. Para lograr esta acción es necesario conocer el módulo dinámico de rigidez del suelo y del material de las pilas. La matriz tiene la forma (6)

$$[\bar{\delta}_{ji}] + [1/k_p]_D \quad (31)$$

en donde $[\bar{\delta}_{ji}]$ representa la matriz de flexibilidad unitaria del suelo bajo las pilas y $[1/k_p]_D$ es la matriz diagonal que representa la deformabilidad axial unitaria de las pilas. Si llamamos X_i las reacciones incógnitas axiales sobre las pilas por el momento de volteo, entonces se puede escribir

$$\{ [\bar{\epsilon}_{ji}]_{\mu}^T + [1/K]_D \} |x_1| = |\delta_i| \quad (32)$$

aquí $|\delta_i|$ representa el vector, el desplazamiento vertical de las pilas. El momento de volteo de la cimentación rígida queda representado por una rotación simétrica, Fig. 7, por tanto se puede escribir para el desplazamiento vertical en un punto i ; $\delta_i = \theta L_i$ sustituyendo en la expresión (32) se tiene

$$\{ [\bar{\delta}_{ji}]_{\mu}^T + [1/K_p]_D \} |(\frac{x_i}{\theta})| = |L_i| \quad (33)$$

resolviendo la ec. (33) se obtienen los valores de $(\frac{x_i}{\theta})$, de donde el momento de volteo es

$$O_T = \sum_1^n (\frac{x_i}{\theta}) \cdot L_i \cdot \theta$$

El módulo de cimentación por balanceo por definición es $K_\theta = O_T / \theta$, por consiguiente

$$K_\theta = \sum (\frac{x_i}{\theta}) \cdot L_i \quad (34)$$

y el periodo de balanceo

$$T_\theta = 2\pi h_m \sqrt{\frac{m}{K_\theta}} \quad (35)$$

El valor de K_x se obtiene como se indica más adelante.

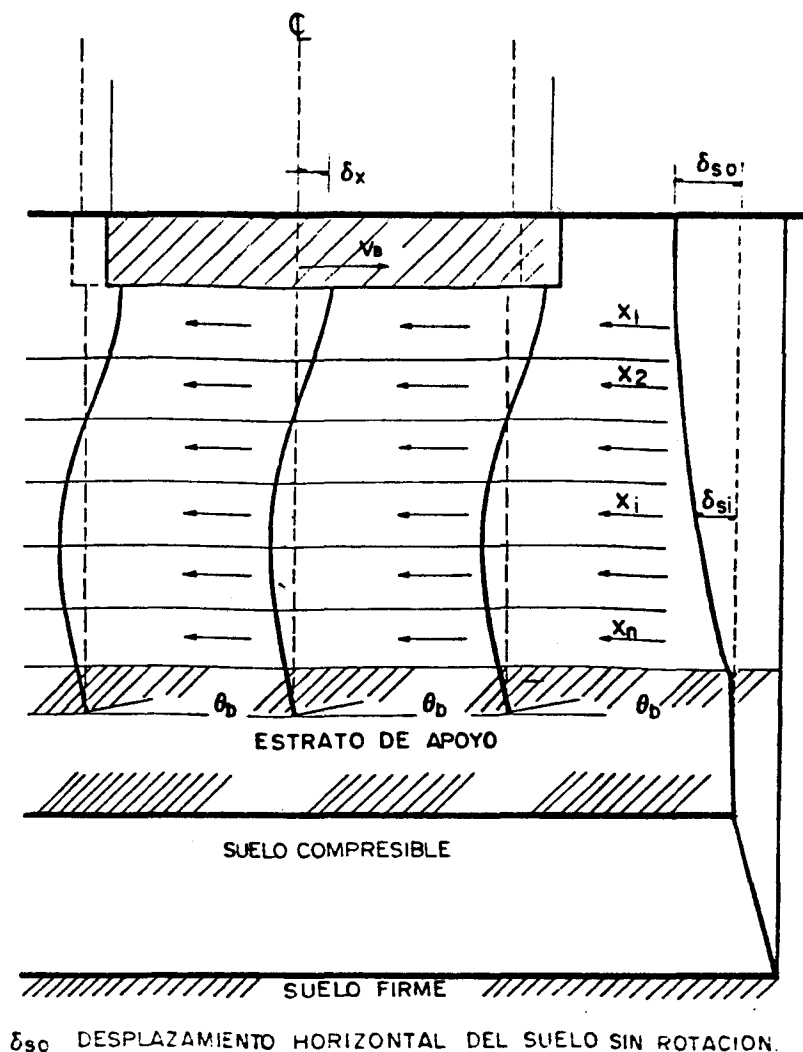
VI ARRASTRE HORIZONTAL SISMICO SOBRE LA CIMENTACION

El arrastre horizontal sísmico sobre la cimentación se origina por el empuje que la masa del suelo ejerce sobre las pilas y en el cajón de la cimentación, Fig. 8. Consideremos que las pilas se encuentran empotradas en la estructura de la cimentación y en el estrato resistente donde la base puede girar de acuerdo con la rigidez dinámica del suelo donde apoya. Consideremos que el empuje del suelo sobre las pilas queda representado por las fuerzas horizontales incógnitas X_i aplicadas en tantas secciones de la pila como sea necesario para obtener la precisión requerida. Haciendo $X_i = 0$ se obtendrá el desplazamiento libre de la pila y del suelo. Llamamos a

Esta acción la condición $X = 0$, Fig. 9. El desplazamiento libre del suelo y de la pila en un punto cualquiera i será $(A_{i0} + \delta_{si})$ y en el apoyo (b) el giro es θ_{b0} (7), (8).

Los desplazamientos anteriores deben ser compatibles con las acciones que en el punto i producen las fuerzas o reacciones incógnitas X_i . Por tanto, la acción de una fuerza unitaria aplicada en el punto (i) es la condición $X_i = +1$, Fig. 10, que induce los desplazamientos $(\bar{S}_{ii} + \bar{\delta}_{ii})$ en el punto i y en la base un giro $\bar{\theta}_{bi}$. En un punto (j) es $(\bar{S}_{ji} + \bar{\delta}_{ji})$. Así también al aplicar la condición unitaria en (j), para $X_j = +1$ se obtiene en el punto (i); $(\bar{S}_{ij} + \bar{\delta}_{ij})$, y en (j); $(\bar{S}_{jj} + \bar{\delta}_{jj})$, en la base el giro es $\bar{\theta}_{bj}$. Por otro lado al aplicar un momento unitario en la base, condición $X_b = +1$ se tiene en (i) \bar{S}_{ib} , en (j) \bar{S}_{jb} y en (b) un giro $(\bar{\theta}_{bb} + \bar{\theta}_{sb})$, en donde $\bar{\theta}_{bb}$ representa el giro unitario en la base de pila, y $\bar{\theta}_{sb} = 1/k_b$ en el suelo.

El valor de K_b es la rigidez del suelo al giro, por el momento unitario $X_b = +1$ aplicado al suelo.



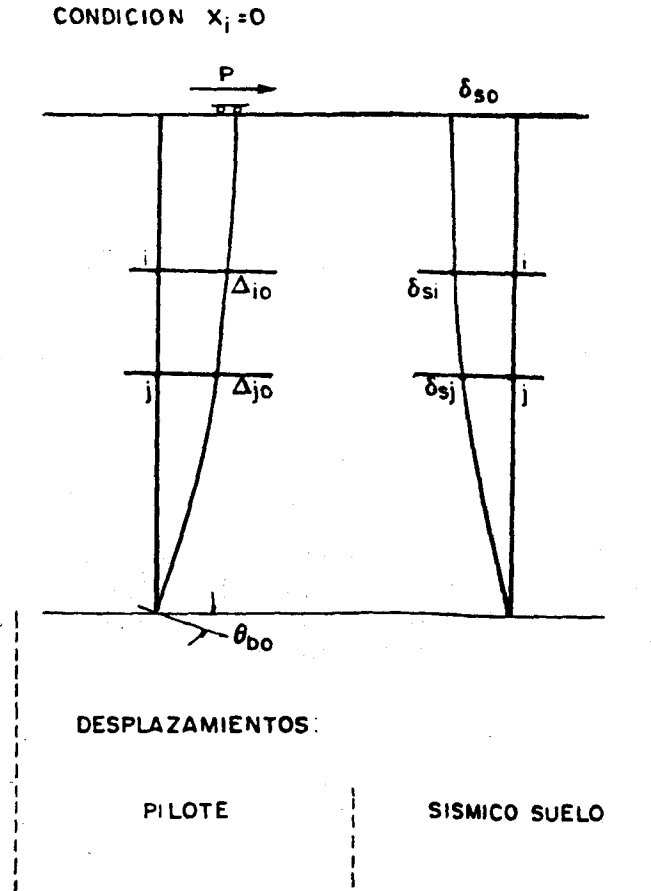


FIG. 9 - DESPLAZAMIENTOS HORIZONTALES.

Por el método anterior se pueden escribir las condiciones de compatibilidad para todos los puntos (i) y (j), y para la base de la pila (b) respectivamente.

$$\text{Pts. } i ; (\bar{s}_{ii} + \bar{\delta}_{ii}) x_i + (\bar{s}_{ij} + \bar{\delta}_{ij}) x_j + \bar{s}_{ib} x_b = \Delta_{io} + \delta_{si}$$

$$\text{Pts. } j ; (\bar{s}_{ji} + \bar{\delta}_{ji}) x_i + (\bar{s}_{jj} + \bar{\delta}_{jj}) x_j + \bar{s}_{jb} x_b = \Delta_{jo} + \delta_{sj}$$

$$\text{Base } b ; \bar{\theta}_{bi} x_i + \bar{\theta}_{bj} x_j + (\bar{\theta}_{bb} + \frac{1}{K_b}) x_b = \theta_{bo}$$

en forma matricial

$$\begin{bmatrix} (s_{ii} + \delta_{ii}) & (s_{ij} + \delta_{ij}) & s_{ib} \\ (s_{ji} + \delta_{ji}) & (s_{jj} + \delta_{jj}) & s_{jb} \\ \theta_{bi} & \theta_{bj} & \theta_{bb} + \frac{1}{K_b} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_i \\ x_j \\ x_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta_{io} + \delta_{si} \\ \Delta_{jo} + \delta_{sj} \\ \theta_{bo} \end{bmatrix} \quad (36)$$

Resolviendo la ecuación matricial (36) para las reacciones horizontales X_i , se podrán calcular los elementos mecánicos de la pila, así también los desplazamientos horizontales por medio de la matriz de flexibilidad unitaria del suelo

$$\begin{bmatrix} \delta_{ii} & \delta_{ij} & 0 \\ \delta_{ji} & \delta_{jj} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{K_b} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_i \\ x_j \\ x_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_i \\ \delta_j \\ \theta_b \end{bmatrix} \quad (37)$$

Así pues, de la Ec. (37) se encuentra el desplazamiento horizontal δ_x de la pila en el apoyo con la estructura de la cimentación. Llamando V_B la fuerza cortante sísmica que actúa en la cabeza de la pila se obtiene el valor

$$K_x = \frac{V_B}{\delta_x} \quad (38)$$

de la Ec. (38) se puede calcular el periodo por desplazamiento horizontal de estructura de la cimentación

$$T_x = 2\pi \sqrt{\frac{M}{K_x}} \quad (39)$$

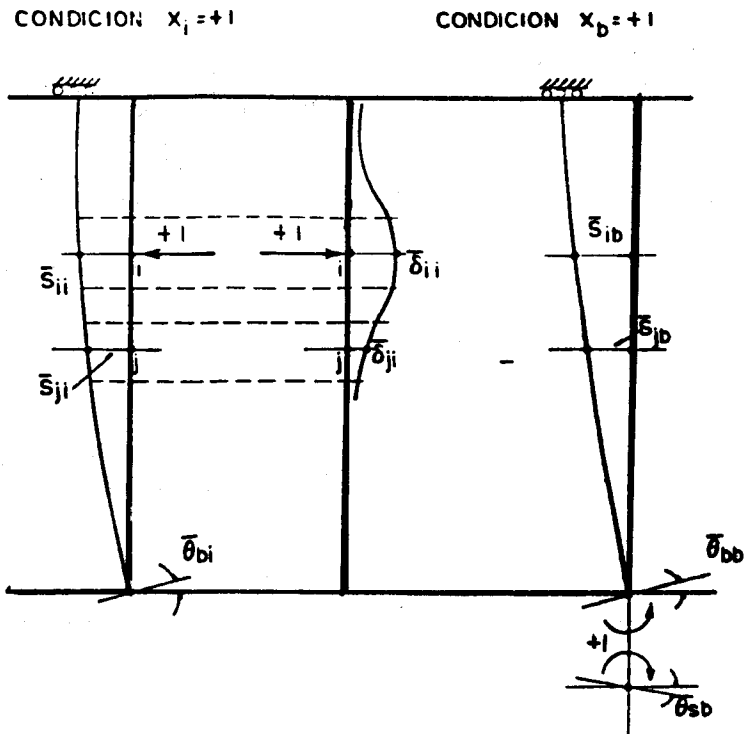


FIG.10- INTERACCION PILOTE-SUELO

VII RESPUESTA SISMICA

Por medio de los procedimientos de cálculos antes indicados se encuentran los valores de T_θ y T_x . El valor T_B se conoce del análisis estructural sísmico del edificio, por consiguiente

$$T_o = \sqrt{T_B^2 + T_\theta^2 + T_x^2} \quad (40)$$

de la Ec. (40) conociendo T_0/T_s y δ_0 se obtiene del espectro de diseño sísmico el factor de amplificación f , Fig. 6.

Con la aceleración máxima a asignada a la superficie del suelo se encuentra la fuerza cortante en la base $V_B = f_a(a_m M)$, y el momento de volteo $O_T = V_B \cdot h_m$, donde la amplitud del giro de la cimentación es $= O_T/K$ y los incrementos en carga axial sobre las pilas por sismo son

$$|\Delta Q_s| = \left| \left(\frac{x_i}{\theta} \right) \right| \left| \frac{O_T}{K_\theta} \right| \quad (41)$$

Por medio de la interacción sísmica suelo-pilote, Ec. 36, se podrá ajustar al valor K_x y por interacción determinar el ajuste para la aceleración asignada.

Incluyendo la carga en las pilas por el momento de volteo sísmico, las pilas extremas quedan sujetas a una carga axial máxima de

$$Q = Q_a + (NF) + \Delta Q_{sis} \quad (42)$$

A la acción axial sobre las pilas deberán incluirse los momentos flexionantes y fuerzas cortantes generadas en las pilas por el desplazamiento sísmico del subsuelo, los que se obtienen con los resultados finales de las fuerzas horizontales de interacción ocasionadas por el empuje sísmico de la masa del suelo, Ec. (36).

VIII CONCLUSIONES

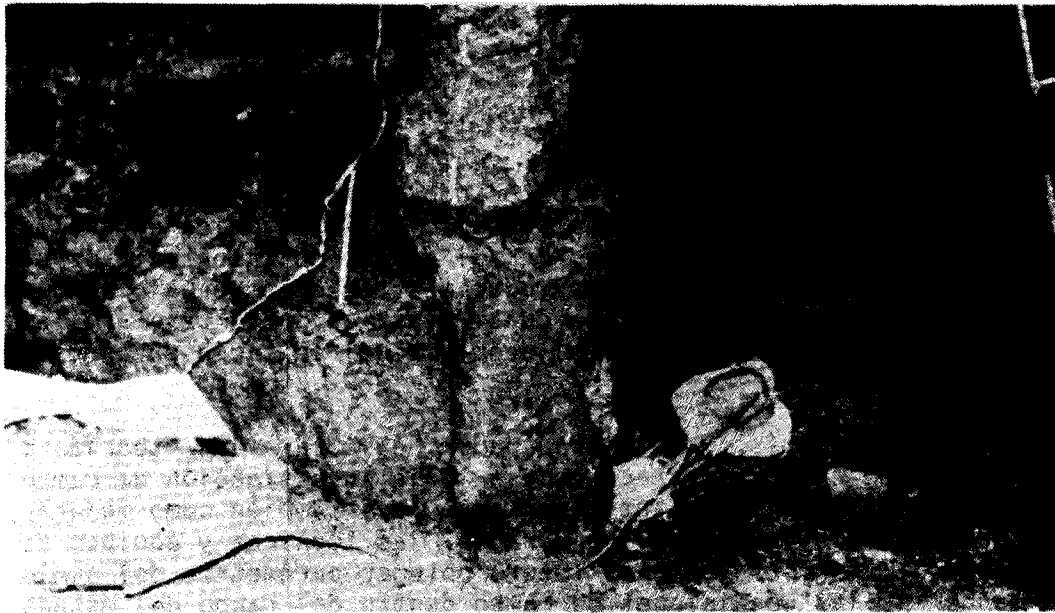
Del análisis aquí presentado para obtener la respuesta sísmica de una cimentación con pilotes o pilas; de las acciones sísmicas axiales sobre éstas, el arrastre horizontal sísmico, y la fricción negativa, se reconoce la necesidad de obtener con precisión razonable las condiciones estratigráficas y geotécnicas del subsuelo y en especial las propiedades dinámicas; o sea, el módulo dinámico de rigidez μ representativo de todos y cada uno de los estratos hasta la base firme. Este parámetro dinámico del suelo puede ser obtenido con precisión práctica haciendo uso del "Péndulo de Torsión Libre" diseñado por el autor (9) para este objeto. La precisión de las matrices de flexibilidad se encuentra dentro de la precisión con que puedan conocerse los parámetros del suelo y el módulo de deformación elástico $1/E_c$ del material de las pilas. La flexibilidad del suelo tanto en sentido vertical como horizontal tiene una precisión que

queda dentro de los procedimientos ortodoxos para la determinación de esfuerzos en la masa del suelo usados en la mecánica de suelos convencional. Se hace notar que en el diseño de cimentaciones se deberá lograr que los esfuerzos inducidos en el subsuelo por la acción sísmica sean del orden cuasi-elástico para evitar las deformaciones permanentes y así el desplome del edificio durante el sismo.

Se concluye, además, que para poder calibrar las teorías y procedimientos de cálculo se hace necesario la investigación de campo a escala natural en pilotes instrumentados, así también como mejorar los procedimientos de muestreo inalterados, las técnicas y equipos de laboratorio que permitan en el futuro obtener parámetros del suelo más cercanos a las condiciones de campo dentro del rango del estado de esfuerzos sísmicos esperados.

REFERENCIAS

- (1) Zeevaert, L. (1976) "Dragging Forces on Pier Foundations" ("Fuerzas de arrastre en cimentaciones con pilas"), Memorias de la reunión conjunta Cimientos Profundos Colados en Sitio, SMMS-Association of Drilled Shaft Contractors (ADSC), pp. 38-75, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, México, D. F., junio (English and Spanish)
- (2) Zeevaert, L. (1973) "Deep Foundations, Including Pile Foundations (Design and New Methods of Construction)": Section 1, 2 and 3. Proc. VIII Inter. Conf. Soil Mech. and Foundation Engineering, Session 3, Moscow, USSR.
- (3) Reese, C. L. (1973) "Bored Piles Installed by Slurry Displacement", Proceedings of the VIII Inter. Conf. Soil Mech. and Foundation Engineering, Vol. 3, pp. 203-209, Moscow.
- (4) Zeevaert, L. (1982) "Foundation Engineering for Difficult Subsoil Conditions", Second Edition, Van Nostrand - Reinhold Co., New York, U.S.A., Chapter VIII, pp. 352-370.
- (5) Referencia (4), chapter XII, pp. 511-522.
- (6) Zeevaert, L. (1980) "Interacción Suelo-Estructura de Cimentaciones Superficiales y Profundas Sujetas a Cargas Estáticas y Sísmicas", Editorial LIMUSA, México, D. F., parte 3, pp. 122-125.
- (7) Referencia (4), Chapter XII.6, pp. 567-577.
- (8) Referencia (6), parte 3, pp. 122-125.
- (9) Zeevaert, L. (1982) "Teoría y Práctica del Péndulo de Torsión (FTP)" ("Theory and Practice of the Torsion Pendulum"), División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería, UNAM, México, D. F., Febrero (Spanish and English).



1 DESPLAZAMIENTO DE JUNTA POR FALTA DE REFUERZO
JOINT DISPLACEMENT DUE TO LACK OF REINFORCEMENT



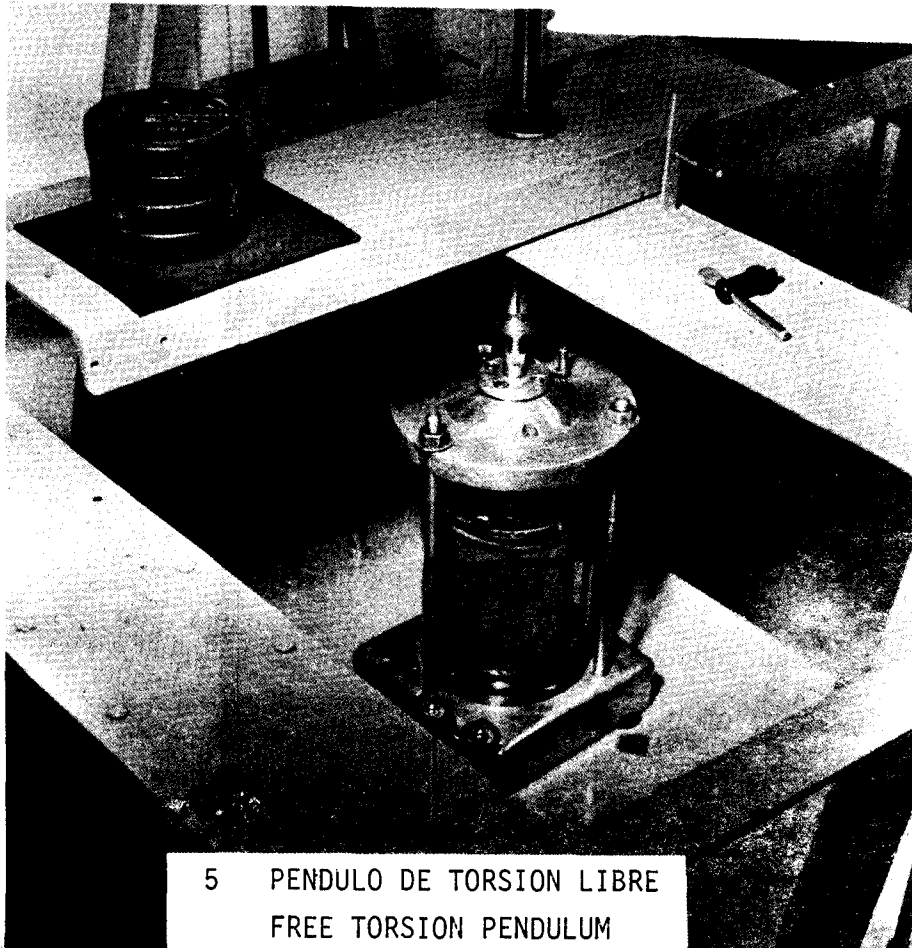
2 ROTURA POR FLEXION Y CORTANTE
FAILURE DUE TO HIGH BENDING AND SHEAR



3 FORMACION DE JUNTA POR ESFUERZOS ALTOS DE FLEXION
JOINT FORMATION DUE TO HIGH BENDING STRESSES



4 ROTURA TOTAL DEL APOYO POR ESFUERZOS EXCESIVOS
TOTAL FAILURE OF SUPPORT DUE TO HIGH STRESSES



5 PENDULO DE TORSION LIBRE
FREE TORSION PENDULUM

