

## CIMENTACIONES PROFUNDAS

### CASO DE PILOTE AISLADO

#### 1. METODOS DE ANALISIS DE USO COMUN EN EL PAIS

##### 1.1 Cálculo de Carga Ultima.

##### 1.1.1 Suelos cohesivos, baja permeabilidad

##### Condicion no drenada.

El análisis se basa en la resistencia no drenada del suelo. Tal parámetro se obtiene a partir de:

a) Ensayos de compresión simple (o inconfiada). Generalmente se ejecutan sobre muestras recuperadas con tubo Shelby y en algunos sobre las tomadas con la cuchara partida. Sólo en contadas ocasiones se dispone de muestras de buena calidad, como las extraídas con tomamuestras de pistón.

b) Ensayos in-situ, usando la veleta de campo. El valor de resistencia debería corregirse para tener en cuenta la plasticidad del suelo (corrección de Bjerrum) o el efecto de la velocidad de aplicación del torque; como lo expresó Schmertmann en una conferencia de ensayos in-situ (Carolina del Norte, 1976), los resultados del ensayo de veleta parecen ser algo discutibles.

c) Sondeos con el cono estático (del cual sólo disponen unas pocas firmas en el país). El cálculo de la resistencia del suelo se basa en un parámetro empírico ( $N_k$ ). El autor no conoce de estudios (publicados) que hayan verificado los valores de  $N_k$  que aparecen en la literatura al caso de los depósitos locales (por ejemplo al de la arcilla/limo de la Sabana de Bogotá).

d) Determinaciones con penetrómetro o veleta de bolsillo, hechas sobre muestras como las descritas en el numeral (a).

e) Uso de correlaciones con el conteo de golpes del ensayo Estándar. Como es bien sabido, este tipo de enfoque es muy poco confiable, al menos en lo que atañe a suelos finos.

El valor de "resistencia al corte (Cu)" se usa para:

A) calcular fricción lateral última,  $f = \alpha * Cu$ ;  $\alpha$  es un factor que varía inversamente con la resistencia de la arcilla, y depende del método de instalación del pilote.  $\alpha$  es en general inferior a la unidad y es menor si se trata de pilotes pre-excavados (comparado con los hincados).

B) calcular capacidad portante neta última de punta,  $q_{bn} = Nc * Cu$ ;  $Nc$  = factor que depende del empotramiento dentro de la capa portante (guías provenientes de la teoría de la plasticidad, estudios de Skempton, Meyerhof).

El cálculo de la Capacidad Última de hace adicionando las dos componentes, esto es:

$$FRICCIÓN = \sum (f \cdot l \cdot \text{perímetro})$$

donde  $f$ ,  $l$  y  $\text{perímetro}$  dependerán del número de tramos en que se subdivide el fuste.

$$PUNTA = (q_{bu} + D) * \text{Área transversal de la punta}$$

$$\text{Capacidad Total Última} = \text{Fricción} + \text{Punta}$$

### 1.1.2 Suelos Granulares, permeables.

#### Esfuerzos efectivos

Para el análisis de este caso se requiere de los parámetros de resistencia. (comunmente sólo el ángulo de fricción) del suelo. En prácticamente la totalidad e las situaciones, el ángulo se halla con base en correlaciones con el conteo de golpes del ensayo estándar (las cuales muestran un amplio rango de variación de un autor a otro) o en correlaciones con los resultados de sondeos con cono. Una vez sabido el ángulo, se procede a evaluar valores últimos de Fricción y Capacidad en la Punta.

El valor de "resistencia al corte (Cu)" se usa para:

A) calcular fricción lateral última,  $f = \alpha * Cu$ ;  $\alpha$  es un factor que varía inversamente con la resistencia de la arcilla, y depende del método de instalación del pilote.  $\alpha$  es en general inferior a la unidad y es menor si se trata de pilotes pre-excavados (comparado con los hincados).

B) calcular capacidad portante neta última de punta,  $q_{bn} = Nc * Cu$ ;  $Nc$  = factor que depende del empotramiento dentro de la capa portante (guías provenientes de la teoría de la plasticidad, estudios de Skempton, Meyerhof).

El cálculo de la Capacidad Última de hace adicionando las dos componentes, esto es:

$$FRICCIÓN = \sum (f \cdot l \cdot \text{perímetro})$$

donde  $f$ ,  $l$  y  $\text{perímetro}$  dependerán del número de tramos en que se subdivide el fuste.

$$PUNTA = (q_{bu} + D) * \text{Área transversal de la punta}$$

$$\text{Capacidad Total Última} = \text{Fricción} + \text{Punta}$$

### 1.1.2 Suelos Granulares, permeables.

#### Esfuerzos efectivos

Para el análisis de este caso se requiere de los parámetros de resistencia. (comunmente sólo el ángulo de fricción) del suelo. En prácticamente la totalidad e las situaciones, el ángulo se halla con base en correlaciones con el conteo de golpes del ensayo estándar (las cuales muestran un amplio rango de variación de un autor a otro) o en correlaciones con los resultados de sondeos con cono. Una vez sabido el ángulo, se procede a evaluar valores últimos de Fricción y Capacidad en la Punta.

La fricción se puede expresar como:

$$\text{FRICCIÓN} = K_s \cdot \sigma_v \cdot \tan(\phi)$$

donde  $K_s$  es un coeficiente de presión lateral (relacionado con la densidad del suelo, el conteo de golpes, el ángulo  $\phi$ , el método de instalación del pilote) y  $\sigma_v$  es el esfuerzo vertical **efectivo** a la profundidad que se esté considerando.

La capacidad portante de punta se puede expresar en función del esfuerzo vertical **efectivo** a la profundidad correspondiente, multiplicado por los factores de capacidad portante (que dependen del ángulo  $\phi$  y del método de instalación); los parámetros de capacidad portante son en general de carácter teórico (teoría plástica en medio rígido) o empírico (como ejemplo, las guías dadas por la escuela de Tejas -Reese, O'Neill y su grupo-).

De nuevo, la suma de la fricción (adicionando los efectos de los tramos en que se haya partido el pilote) y de la punta, dan la Capacidad Total.

Es claro que el concepto de **magnitud de movimiento** relacionado con las carga de falla (o última) no aparece dentro del panorama.

### 1.2 Cálculo de la Carga de Trabajo

La carga de trabajo se evalúa -en general- dividiendo la **Carga Última** por un Factor de Seguridad. El valor típico de dicho factor es de tres (3). Algunos practicantes acuden al uso de **Factores de seguridad parciales**: La fricción se divide por 2 y la capacidad de punta por 3.

### 1.3 Cálculo de Asentamientos

El estimativo de asentamiento (condición de trabajo) se basa -casi exclusivamente- en el uso de soluciones de teoría elástica.

el estimativo del módulo elástico del suelo se hace, con muy contadas excepciones, basándose en correlaciones muy crudas (con el conteo de golpes, la resistencia no drenada, la densidad del material).

## 2. PRUEBAS DE CARGA

### 2.1 Necesidad

La realización de pruebas de carga aparece como algo necesario por las siguientes razones:

a) Los modelos matemáticos disponibles son elegantes pero corresponden a un material idealizado (rígido, plástico, homogéneo, isótropo). Nótese que al concepto de falla no va asociado un movimiento específico: se dice que las deformaciones son muy grandes o se presentan guías apenas generales al respecto (fricción se moviliza con movimientos de unos pocos milímetros, en tanto que la punta los requiere del orden del 10% del valor del diámetro, etc.)

b) Aún en el caso de que el modelo y el suelo real se considerasen similares (por ejemplo depósitos homogéneos de arena o de arcillas), queda el problema de determinar los parámetros de resistencia y deformabilidad del material. Tal determinación debería involucrar el proceso asociado a la instalación del pilote (hincado, con o sin vibración, excavación del agujero en el caso de los pre-excavados). El uso de pruebas de laboratorio (triaxiales, por ejemplo) es ciertamente escaso (costos, disponibilidad de buenas muestras que justifiquen el esfuerzo). Como ya se vió, la utilización de técnicas in-situ, que, como en el caso del cono simulan el proceso de inserción, es restringida.

El uso de teoría elástica (cálculo de asentamientos) parece justificado (en general se esperan asentamientos pequeños); la determinación del módulo elástico del suelo presenta, sin embargo, un obstáculo que rara vez se salva como se debiera. Por otra parte, el "efecto de escala" viene a complicar aún más el panorama.

c) Los métodos empíricos son estrictamente válidos *para el sitio y las condiciones en que fueron desarrollados*. La extrapolación indiscriminada *puede ser riesgosa*. Si se pretende usarlos, al menos se los debería "calibrar".

El lector debe saber que las "guías de diseño", esto es las curvas o fórmulas preparadas por los diferentes autores o agencias, conllevan un cierto grado de dispersión que el practicante rara vez conoce. Las recetas pueden ser útiles para un pre-diseño o como algo más definitivo si la obra es de relativa poca magnitud. En desarrollos mayores, una receta "mejor afinada" puede salvar dinero y sorpresas indeseables.

d) Existen situaciones para las cuales la aplicación de los modelos analíticos o de las recetas empíricas resulta *inapropiada*. Tal sería el caso de depósitos aluviales con cantos grandes, coluviones, depósitos glaciales, o rocas fracturadas (máxime si presentan un patrón de meteorización complejo).

## 2.2 Métodos Usados en el País

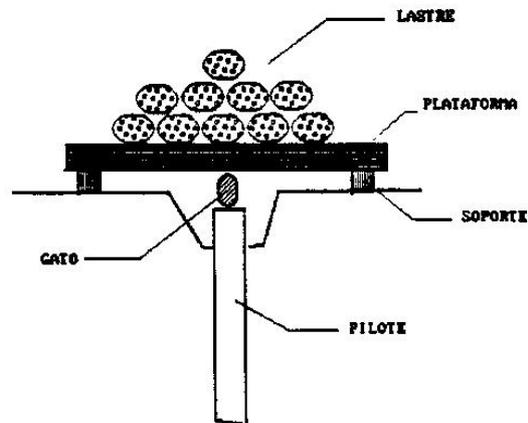
En Colombia, las pruebas de carga se realizan siguiendo métodos convencionales (ver la siguiente figura):

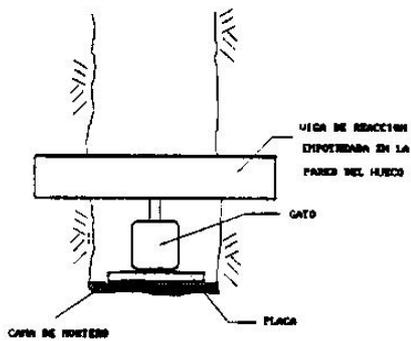
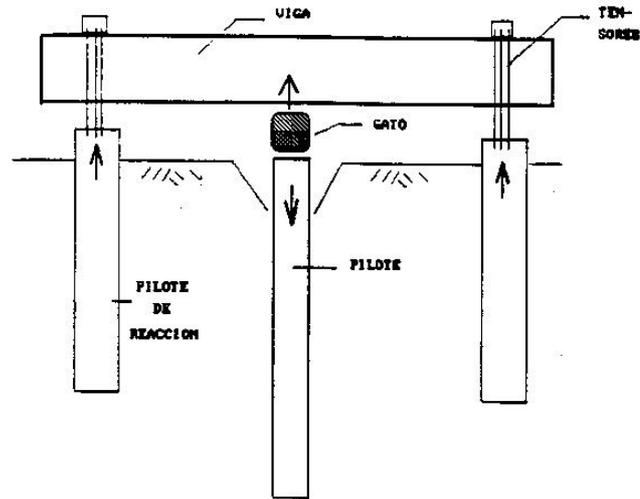
a) Usando un gran peso como elemento de reacción.

b) Utilizando pilotes aledaños, los cuales se ven sometidos a tracción.

c) El autor conoce acerca de ensayos de placa efectuados a diferentes profundidades (a medida que se excava el caisson); este tipo de prueba parece ser de escasa ocurrencia en el medio.

En algunos casos, el esquema involucra mediciones de acortamiento del pilote, mediante el uso de varillas testigo (llamadas teltales).





### Métodos usados en el país

Hasta donde es del conocimiento del autor, el uso de mediciones durante hincada, no se practica en el país. Apparently, the forecasts are based -in some cases- on the use of well-known programs, such as the WEAP. It should be understood that such a tool serves to provide guidance in the selection of the equipment, but the model of the soil and the profile are certainly simplified,

## 2.3 Mejoras en los Métodos Tradicionales. Métodos más recientes

### 2.3.1 Métodos Dinámicos

#### 2.3.1.1 Uso de la Teoría de la Ecuación del Onda

##### Mediciones durante la hinca.

El origen de la metodología se remonta hacia los años 50. Smith<sup>1</sup> propuso la utilización de la ecuación de onda, usando un modelo matemático en el cual el pilote se representaba como una serie de masas discretas, unidas por resortes (para incluir la deformabilidad). El suelo ejercía una serie de fuerzas (fricción y punta) cada una con dos componentes: la estática (esfuerzo de corte y de punta, proporcionales al movimiento relativo suelo-pilote, hasta llegar a los valores máximos correspondientes) y la dinámica (esfuerzos proporcionales a la velocidad). La solución de la ecuación diferencial se marchaba -pilote abajo- desde el momento en que el martillo hacía contacto con el sistema (amortiguadores y casco de defensa del pilote) hasta el momento en que el criterio de suspensión del proceso se cumpliera (por ejemplo que la punta del pilote tratase de rebotar, después de haber penetrado a resultas del golpe). El método representó sin dudas un real avance sobre las técnicas existentes (fórmulas de hinca) ya que se ajustaba al proceso físico, y permitía tener en cuenta las rigideces y amortiguamientos de los componentes del sistema de hinca (hallados mediante experimentación). El suelo se describía mediante un modelo relativamente simplificado.

La técnica ha venido sufriendo una serie de mejoras y ajustes, especialmente en la Universidad Case. El grupo de investigación creó una compañía enteramente dedicada a actualizar, divulgar y recopilar información relacionada con el tópico<sup>2</sup>. La firma diseñó el llamado sistema PDA (Pile Driver Analyzer), el cual permite

---

<sup>1</sup> Smith, E.A.L., "Pile driving analysis by the wave equation", ASCE Journal of soil Mech., Found. Engr. Vol. 86 SM4, 1960, pág. 35-61

<sup>2</sup> GRL (Goble, Rausche y Linkins)

llevar un recuento de todo el proceso de hinca. El sistema -sin dudas algo complicado desde el punto de vista de la electrónica- se compone de las siguientes partes:

a) Los instrumentos, que se colocan en la cabeza del pilote: Deformímetros y acelerómetros.

b) La unidad que recibe la información generada por los instrumentos en cada golpe, y la procesa para computar algunos parámetros de interés como son:

- \* Los esfuerzos que actúan en el pilote.
- \* La energía entregada por el martillo.
- \* El estimativo de la capacidad estática del pilote.

c) Otros componentes periféricos, como son el osciloscopio, una grabadora de cassette de precisión y un microcomputador. El osciloscopio permite ver -golpe por golpe- como son las trazas de velocidad y de fuerza en la cabeza del pilote. La inspección de las curvas permite definir si el sistema de instrumentación está funcionando apropiadamente o no. Los registros de cada impacto son guardados en un cartucho de audio (cassette), para posterior estudio y análisis (método **CAPWAP**, como se indicará luego). El computador se usa para recibir la señal digitalizada de unos cuantos golpes críticos, como por ejemplo al final de un período de hinca, o después de una suspensión premeditada -para ver efectos de "congelamiento" o de "relajación"- . Los registros digitales se usan como dato para el análisis **CAPWAP**.

El método **CAPWAP** o los similares que fueron desarrollados independientemente por otras instituciones (por ejemplo, Fugro-McClelland en Estados Unidos, o algunas universidades en el Brazil), consiste en encontrar la distribución de resistencias (en el fuste y la punta), los movimientos requeridos para alcanzarlas (llamados quakes) y los parámetros dinámicos (coeficientes de amortiguamiento del suelo) tales que se logre que, ante una excitación dada

(Velocidad "medida" por ejemplo), la fuerza "calculada" (que se halla solucionando la ecuación de onda) se acerque tanto como pueda a la fuerza "medida". El proceso es iterativo, requiere de experiencia y de una buena dosis de paciencia. Un ajuste burdo puede llevar a errores apreciables en la estimación de la capacidad estática del pilote. Es por ello que se han creado agrupaciones que promueven cursos y seminarios de actualización; además las firmas que patrocinan la técnica (GRL, por ejemplo) prestan un excelente servicio de apoyo técnico y de actualización de los programas de computador.

El procedimiento puede resumirse como sigue:

a) Se toman las trazas de aceleración (que integrada da **velocidad**) y de deformación unitaria (que multiplicada por el área del pilote y por su módulo elástico da **fuerza**). Las trazas son procesadas para tener registros digitales (parejas Variable-Tiempo). Los registros son sometidos a un ajuste para garantizar que:

\* La velocidad tienda a cero después de que el efecto del impacto haya pasado.

\* Velocidad (V) y fuerza (F) sean proporcionales, esto es,  $F = Z * V$ , donde Z = Impedancia, que depende de la geometría y de la velocidad de propagación de las ondas en el pilote. Tal igualdad debe existir en la parte inicial de los registros.

b) Se procede a un primer ciclo, enteramente automatizado por el programa.

c) Se revisa el primer intento, para ver si los parámetros del suelo caen dentro de los rangos esperables para el perfil a mano. De no ser así, se procede a un ajuste manual.

d) El "pulido" continua en forma "manual", hasta lograr la "coincidencia" de la curvas "calculada" y "medida". El proceso puede tomar hasta unas 5 a 6 horas y en algunos casos aún más.

De acuerdo con lo reportado por GRL, los resultados de capacidad del pilote obtenidos mediante CAPWAP, son bastantes similares a los obtenidos en ensayos de carga; las diferencias son del orden del 5% al 10%.

El método se usa *esencialmente en pilotes hincados*. En unas pocas ocasiones se lo ha empleado en pilotes pre-excavados de diámetro apreciable (del orden de 1,2m). El andamiaje de prueba consiste de una pesa (martillo) apreciable (del orden de las 2 Ton) que se deja caer sobre la cabeza del pilote desde alturas del orden de los 2m, un estructura metálica para guiar la caída, el sistema de amortiguamiento para proteger la cabeza del pilote, y una grúa que levanta el martillo. El proceso de captura de datos y de interpretación de los resultados es completamente análogo al visto antes.

#### 2.3.1.2 Determinación de Integridad del pilote

El método descrito arriba trata de determinar la capacidad del pilote; el martillo debe impartir una energía tal que induzca movimientos del pilote suficientes par movilizar la fricción y capacidad de punta.

Existe otra modalidad (llamada de baja deformación), en la cual la magnitud del impacto es muy modesta. Se usa un pequeño martillo con el cual se golpea la cabeza del pilote (hincado, pre-excavado o de cualquier otro tipo) y se registra como la onda va recorriendo el pilote. Dependiendo de la forma de la onda, se puede inferir si el elemento presenta una sección uniforme, si existen juntas frías, o si hay grietas. El sistema -gracias al avance de la electrónica- ha llegado a un notable grado de refinamiento. De otra

parte, inspeccionar un pilote tan solo toma unos pocos minutos (del orden de 45, incluyendo la instalación de los instrumentos y las instalaciones electrónicas).

#### 2.3.1.3 Método Statnamic

Se trata de una técnica bastante reciente e ingeniosa, desarrollada en el Canadá. En esencia, el pilote es sometido a un pulso que lo obliga a penetrar un poco dentro del suelo. El pulso es producido por la detonación de un explosivo en la cabeza del pilote. La reacción se obtiene mediante un sistema cuya masa deberá ser tal que, al ser multiplicada por la aceleración inducida, produzca una fuerza igual a la capacidad estimada del pilote.

Como en el caso anterior, la aceleración y la fuerza que actúan en el pilote durante el proceso, son registradas por una serie de deformímetros y de acelerómetros instalados en la cabeza del primero.

El método de ensayo es, según lo manifiestan sus creadores, pseudo-estático: la velocidad a la que se mueve el pilote es baja. Para lograrlo, se recurre a un diseño muy cuidadoso del sistema que genera la explosión.

#### 2.3.2 Métodos Estáticos

El método estático ha sufrido una mejora importante en los últimos diez años (aproximadamente). Los cambios están asociados al sistema de instrumentación (usufructuando de los avances de la electrónica "amigable") y al sistema mismo de ensayo.

##### 2.3.2.1 Instrumentación Moderna

Dentro de las mejoras vale la pena destacar dos:

- a) El uso de deformímetros del tipo "cable vibrante". Los aparatos van montados sobre varillas de acero corrugado,

y estas a su vez se colocan pegadas a las de la parrilla principal (usando alambrón). De ahí el nombre de "sister bars" (o varillas "hermanas"). Los deformímetros miden la deformación unitaria en el nivel (o niveles) en que están instalados; su funcionamiento es confiable y repetible - aún por largos períodos de tiempo- y la toma de datos es simple. Como es de esperarse, su costo es algo elevado.

b) Utilización de Transformadores Diferenciales de Voltaje (sigla LVDT en inglés) para medir desplazamientos. El sistema es preciso y la toma de lecturas quizá más simple que la de los sistemas análogos tradicionales. De nuevo, el costo es más elevado.

#### 2.3.2.2 Nuevos Métodos de Ensayo

Los métodos tradicionales tratan, en esencia, de ensayar la totalidad del pilote, bien sea aplicando una carga de compresión (empujando el pilote) o una de tracción (sacándolo del suelo). En cualquiera de los casos, se requiere de un sistema de reacción sometido a tracción o a compresión, respectivamente, del cual forma parte una estructura metálica (vigas) que sirve para transmitir la carga del pilote de ensayo a los de reacción. Algunos esquemas simplificados fueron presentados en el Numeral 2.2.

El sistema tiene tres grandes ventajas a su favor:

a) Las incertidumbres asociadas a los efectos constructivos (instalación) y de escala quedan eliminadas.

b) Se logra información acerca del comportamiento Carga-Asentamiento. Como ya se vió, el pronóstico teórico en este campo puede ser apenas aproximado.

c) El método de aplicación de carga se adapta a la condición real; el ensayo puede hacerse a compresión.

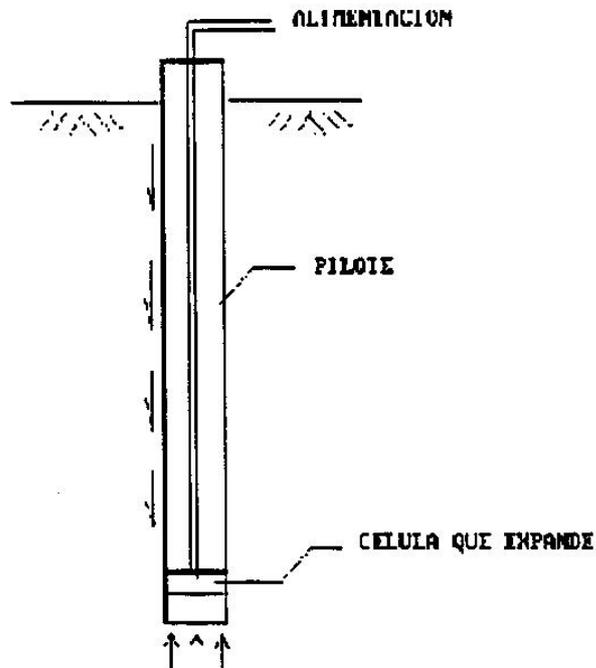
(caso típico) o a tracción (si se prevén situaciones de "arrancamiento o extracción").

El sistema exhibe los siguientes inconvenientes:

- a) Requiere de un sistema de reacción, lo cual demora y encarece la prueba.
- b) El costo es en general alto, lo cual limita el número de pruebas por obra a unas pocas (quizá dos, a lo sumo). Dependiendo de la variabilidad de los suelos (o rocas) del sitio, el proceso de "extrapolación" puede ser "discutible".
- c) Dependiendo del perfil de suelo (o roca) y de la longitud del pilote, puede darse el caso de que no sea posible lograr vencer tanto la fricción como la capacidad de punta, bien porque la capacidad del gato, o del sistema de reacción, se vean excedidas. En tal situación, el ensayo serviría para verificar la "capacidad" del pilote, pero no daría toda la información para verificar (y calibrar/mejorar) las teorías de capacidad "última".
- d) La interpretación de los resultados del ensayo pudiera no ser tan expedita y unívoca, máxime si no se cuenta con un sistema de instrumentación que permita definir el patrón de transferencia de carga a lo largo del pilote.

Lo anterior llevó al desarrollo de técnicas aún más simples que las descritas.

Los sistemas nuevos tienen un punto (el más importante) en común: *No requieren de un sistema externo de reacción*. La reacción se localiza en el pilote sometido al ensayo de carga. El esquema que se presenta a continuación puede servir para explicar el principio.



Que se mide: a) Carga (presión) aplicada por la célula; b) movimiento de la punta; c) movimiento del fuste.

Dos de los métodos de mayor renombre -y con los cuales trabajó el autor- fueron desarrollados por Da Silva (Brasil) y Osterberg (EE.UU.). El primero de ellos ha sido usado en numerosas oportunidades en el país de origen; el otro cuenta con menos casos, habiendo sido empleado en EE.UU. y Hong Kong, hasta donde conoce el autor. Curioso resulta el hecho de que las ideas surgieron independiente y casi simultáneamente.

La técnica amén de su simplicidad, exhibe otra ventaja: la carga registrada en el momento en que una de las partes falle es la mitad de la que el pilote soportaría al sumar las dos componentes

(fricción más punta). En tal sentido, la prueba se convierte en un instrumento para verificar comportamiento con Factor de Seguridad igual a dos (2).

El método presenta un inconveniente: El sentido del esfuerzo cortante en el fuste es contrario al que corresponde al de carga vertical de compresión. Aunque no hay consenso en cuanto a diferencias de comportamiento compresión/extracción <sup>3</sup>, se puede aseverar que el resultado del ensayo está del lado seguro.

El sistema se muestra como una herramienta muy promisoría en el campo de las cimentaciones profundas. Existen métodos para utilizar la información obtenida y así hallar la curva Carga (convencional) de compresión vs. Asentamiento.

### 3. METODOS DE DISEÑO MAS RECIENTES

Como ya se vió, los métodos tradicionales se basan en modelos teóricos o en recetas empíricas o semi-empíricas, que en general predicen una carga última, sin prestar atención al concepto del movimiento (asentamiento) asociado.

Existe otro enfoque, mediante el cual se considera el mecanismo de transferencia de carga a lo largo del fuste del pilote.

En esencia, el efecto del suelo se representa por un esfuerzo cortante (convertible en fuerzas de fricción), y uno en la punta, cuyas magnitudes dependen del movimiento entre dicho suelo y el pilote. El comportamiento Fricción-Movimiento del Fuste y Esfuerzo (Carga) en la Punta-Movimiento de la Punta se ha denominado T-Z en la literatura dedicada al tema.

---

<sup>3</sup> Algunos investigadores sugieren que la relación entre Tao extracción y Tao compresión es del orden de 0.80. Otros indican valores cercanos a la unidad.

### 3.1 Determinación de las curvas T-Z

Existen dos alternativas directas para hallar las curvas T-Z:

a) Teórico, haciendo uso de las ecuaciones de equilibrio y teniendo en cuenta bien sea un comportamiento lineal del suelo, o uno no lineal (el modelo hiperbólico es común y se presta para la manipulación matemática) que considere el máximo esfuerzo de corte (falla) entre el pilote y el suelo. Este enfoque ha sido propuesto por Randolph y otros. Aunque simple, el modelo permite incluir comportamiento no lineal, y hace uso de las relaciones esfuerzo-deformación del suelo. El esfuerzo último (falla) de fricción se puede hallar con base en pruebas de penetración (usando el cono estático, por ejemplo). Debe aclararse que dentro de la formulación de la ecuación diferencial de equilibrio, se hacen ciertos supuestos en lo que atañe a la interacción entre un nivel del pilote y los otros.

b) Mediante pruebas de carga en pilotes "instrumentados". El uso de varillas testigo (telitales) o de deformímetros electrónicos embebidos en el pilote, permite calcular el esfuerzo de fricción pilote-suelo, así como el movimiento correspondiente, a diferentes profundidades; el comportamiento de la punta se obtiene como un subproducto del análisis. Las curvas así halladas, ya involucran el efecto de interacción descrito en el párrafo anterior, y más atractivo aún, ya involucran el efecto constructivo y de escala. Desafortunadamente, no se puede pensar que exista una amplia experiencia y gran cantidad de información de este tipo, dado el costo de los ensayos de carga.

### 3.2 Uso de las curvas T-Z

El modelo matemático para analizar el pilote es relativamente simple:

- a) El pilote se subdivide en una serie de segmentos (del orden de unos 20, para dar una idea). Cada uno se modela como un resorte, con una rigidez igual a  $K=(AE/l)$ , donde A=Area transversal, E=Módulo elástico y l=longitud del segmento. Los segmentos se unen en sus extremos (nodos), conformando un arreglo de resortes "en serie".
  
- b) El suelo se representa como otra serie de resortes (que confluyen a los nodos arriba indicados). Cada resorte tiene una curva Carga-Movimiento que se basa en la curva T-Z asociada a la profundidad que se esté considerando. Un último resorte se usa para el suelo bajo la punta del pilote.

La estructura (sometida a una carga en la cabeza) se puede resolver siguiendo los procedimientos del análisis matricial (usando las formulaciones para casos no lineales).

Un método quizá más simple consiste en "marchar" la solución, segmento por segmento, de la punta hacia arriba:

- a) Se asume un movimiento de la punta (llamémosle  $R_0$ ), lo cual permite calcular la fuerza desarrollada en dicha punta (llamémosla  $F_i$ ), usando la curva Fuerza Punta-Desplazamiento Punta.
  
- b) Empleando el mismo valor de movimiento, se halla el valor de la fuerza cortante, mediante el uso de la curva T-Z a la profundidad correspondiente. Tal fuerza se substraee de la hallada en (a), para así hallar la fuerza en el "techo" del segmento (llamémosla  $F_s$ ). Con el promedio entre  $F_i$  y  $F_s$  se puede calcular el acortamiento del segmento  $(\delta)=(F_i+F_s)/2/K$ .

c) Se calcula el movimiento del "techo" del segmento como  $R_0 - \delta = R_{01}$ ; con  $R_0$  y  $R_{01}$  se halla el movimiento promedio del segmento =  $(R_0 + R_{01})/2 = R_{03}$ .

d) Usando  $R_{03}$  se vuelve a la etapa (b) y luego a (c), y se repite el ciclo, hasta que la diferencia entre resultados de cálculos sucesivos sea despreciable.

Una vez se ha logrado convergencia en el segmento de "punta" se procede a analizar el siguiente, y así sucesivamente. Al culminar, se tiene una Carga en la cabeza del pilote, y el correspondiente movimiento. Se ha logrado definir un punto de la curva Carga-Asentamiento.

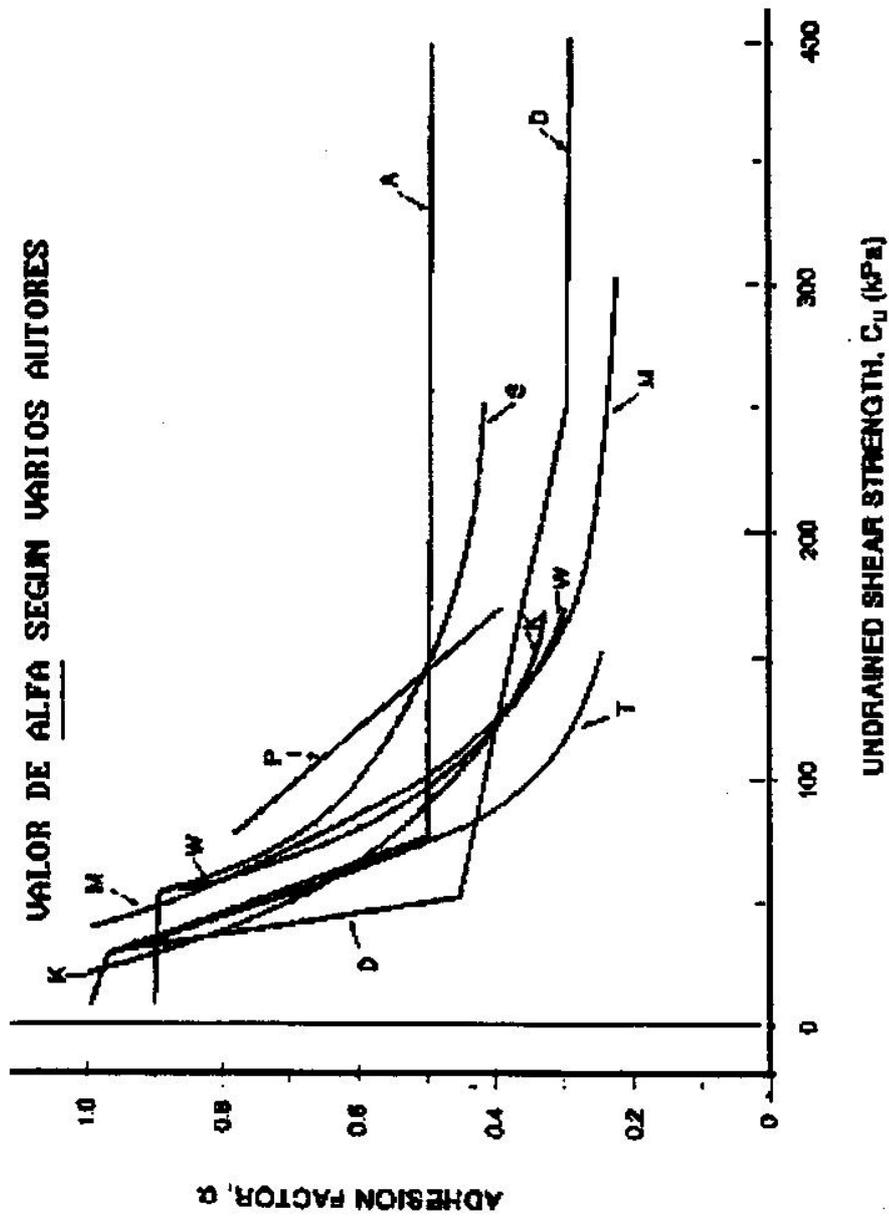
El proceso se repite para otros valores de movimiento de la punta.

Programas de computador como los desarrollados por el grupo de investigadores de Tejas (Reese, O'Neill) utilizan el esquema descrito arriba.

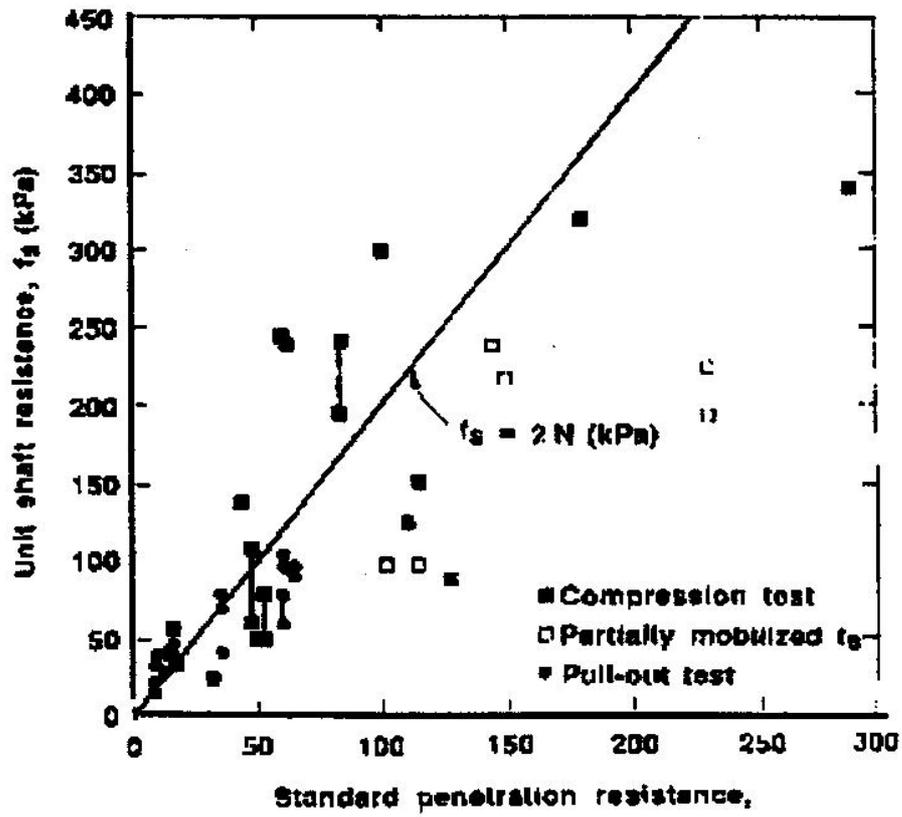
El lector puede apreciar que el enfoque es simple. En caso de contar con curvas T-Z empíricas, uno logra "escaparse" de las complicaciones inherentes al problema físico/matemático asociadas al fenómeno de instalación y posterior carga del pilote.

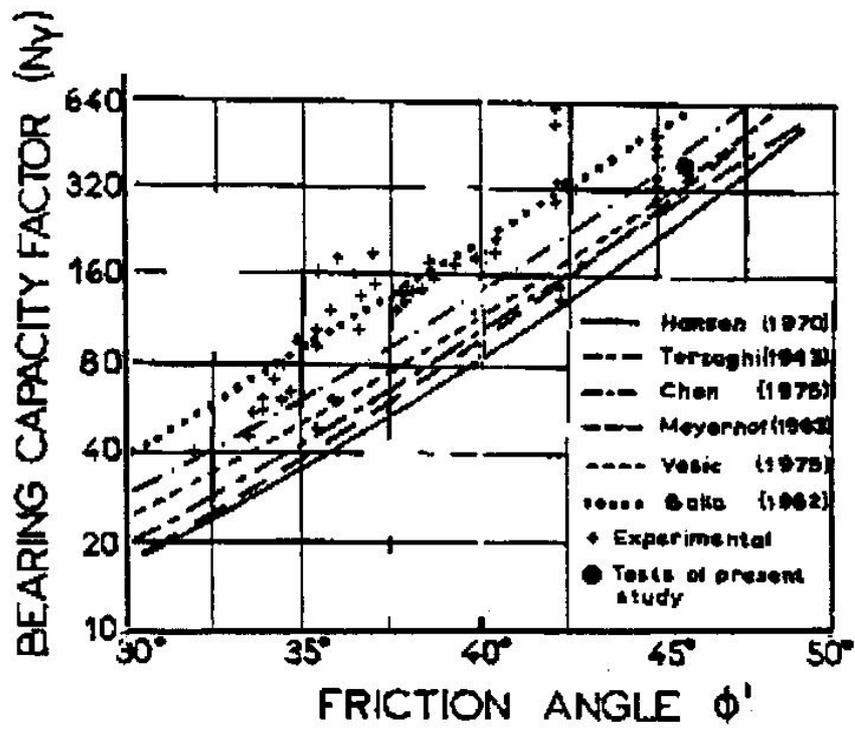
Sin embargo, como se indicó anteriormente, la experiencia en este campo es algo reducida, y en lo que atañe a nuestro medio, *prácticamente inexistente*. Quizá sea hora de impulsar este tipo de metodología en la rutina local, al menos para contar con un punto de arranque para comparaciones con lo que aparece en la literatura.

**PILOTES EN SUELO ARCILLOSO**  
**VALOR DE ALFA SEGUN VARIOS AUTORES**



### FRICCION EN FUSTE vs SPT





## PILOTES EN ROCA VALORES DE ALFA

