

# Diseño de Cimentaciones sobre Pilotes. Estado del Arte.

**Autor: Dasley Soto Luis. Estudiante 5to año Ingeniería Civil.**  
[dsluis@uclv.edu.cu](mailto:dsluis@uclv.edu.cu)

**Tutor: Dr. Ing. Luis O. Ibañez. Dpto Ingeniería Civil.**  
**Universidad Central de Las Villas. Villa Clara. Cuba**  
[Ibanez@uclv.edu.cu](mailto:Ibanez@uclv.edu.cu)

## 1.1 Resumen.

El objetivo de este capítulo es redactar un estado del arte sobre las metodologías de diseño y revisión de las cimentaciones sobre pilotes, que nos permita un posterior análisis sobre el tema. Con este propósito se presenta de forma simplificada, un estudio y crítica de los diferentes métodos utilizados para la determinación de la carga a nivel de pilote aislado, la determinación de la capacidad de carga, y el cálculo de las deformaciones. Además se analizan las recomendaciones para el diseño estructural de los pilotes y por último el empleo de la computación en el diseño de este tipo de cimentaciones.

Para ello fueron consultados 49 libros, 53 artículos de revistas y una amplia revisión de trabajos en Internet, con el objetivo de identificar las tendencias actuales relacionadas con el diseño de cimentaciones sobre pilotes.

## 1.2 Introducción.

Los pilotes son elementos de cimentación, de gran longitud si es comparada con su sección transversal, que se hincan o se construyen en una cavidad previamente abierta en el terreno.

Las cimentaciones sobre pilotes se utilizaran en la práctica en problemas de relativa complejidad, normalmente con condiciones ingiero-geológicas complejas y/o sistemas de cargas actuantes con particularidades que traigan consigo la imposibilidad de resolver el problema con la utilización de cimentaciones superficiales.

**Clasificación de las cimentaciones sobre pilotes:**

Según su instalación	Pilotes aislados Grupo de pilotes	
Según el tipo de carga que actúa sobre el pilote	A compresión A flexión	A tracción A flexo-compresión
Según el tipo de material del pilote	De madera De concreto armado Pilotes combinados o mixtos	De concreto De acero o metálico
Según la interacción suelo-pilote	Pilotes resistentes en punta Pilotes resistentes en fuste o a fricción Pilotes resistentes en punta y fustes simultáneamente	
Por la forma de la sección transversal	Cuadrados Doble T T	Circulares Prismáticos Otros
Por la forma en que se construyen	Pilotes prefabricados hincados con ayuda de martillos sin extracción previa de suelo Pilotes hincados por vibración con o sin perforación del suelo Pilotes de concreto armado con camisa, hincados con relleno parcial o total Pilotes fundidos in situ de concreto o concreto armado	

**Condiciones de utilización:**

Las cimentaciones por pilotaje se utilizan cuando:

- No existe firme en una profundidad alcanzable con zapatas o posos
- Se quieren reducir o limitar los asentos del edificio.
- La permeabilidad u otras condiciones del terreno impiden la ejecución de cimentaciones superficiales.
- Las cargas son muy fuertes y concentradas(caso de torres sobre pocos pilares)

En la cimentación los pilotes están sometidos predominantemente a cargas verticales, pero en algunos casos deben tenerse en cuenta otros tipos de solicitaciones como son:

- Cargas horizontales debidas al viento, empujes de arcos o muros etc.
- Rozamiento negativo al producirse el asiento del terreno en torno a pilotes columna por haber extendido rellenos o sobrecargas, rebajar el nivel freático a través de suelos blandos aun en proceso de consolidación.
- Flexiones por deformación lateral de capas blandas bajo cargas aplicadas en superficie.
- Esfuerzos de corte, cuando los pilotes atraviesan superficies de deslizamiento de taludes.

La capacidad de una cimentación sobre pilotes para soportar cargas o asentamientos, depende de forma general del cabezal, el fuste del pilote, la transmisión de la carga del pilote al suelo y los estratos subyacentes de roca o suelo que soportan la carga de forma instantánea. Al colocar un pilote en el suelo, se crea una discontinuidad en el

medio según la forma de instalación del mismo. Para el caso de pilotes fundidos "in-situ", la estructura de las arcillas se desorganiza y la capacidad de las arenas se reduce. En la hinca, dentro de la zona de alteración (1 a 3 diámetros) se reduce la resistencia a cortante en arcillas, sin embargo, en la mayoría de los suelos no cohesivos se aumenta la compacidad y el ángulo de fricción interna. En el análisis de la transferencia de la carga, todos los autores, [Jiménez (1986), Juárez (1975), Sowers (1977), Lambert (1991), Zeeveart (1992), Bras(1999), Poulos and Davis(1980), Marquez(2006), Smith (2001)] coinciden que la carga se trasmite por la punta del pilote, a compresión, denominada "resistencia en punta" y/o por esfuerzo a cortante a lo largo de la superficie del pilote llamada "fricción lateral". Sin embargo, en todos los casos no se desarrollan ambas resistencias, y el estado de deformaciones para alcanzarlas difiere grandemente. Para las arcillas, el aporte a fricción predomina sobre el aporte en punta, no siendo así para el caso de las arenas. La determinación de los asentamientos, constituye, para estas cimentaciones un problema teóricamente muy complejo, por las incertidumbres que surgen al calcular la variación de tensiones por carga impuesta y por no conocer que por ciento de la carga es la que provocará deformaciones.

Finalmente, al analizar estas cimentaciones, no deben verse como un pilote aislado, sino como un conjunto, donde también intervienen el cabezal y el suelo adyacente al mismo, y donde el comportamiento de un pilote dependerá en gran medida de la acción de los pilotes vecinos.

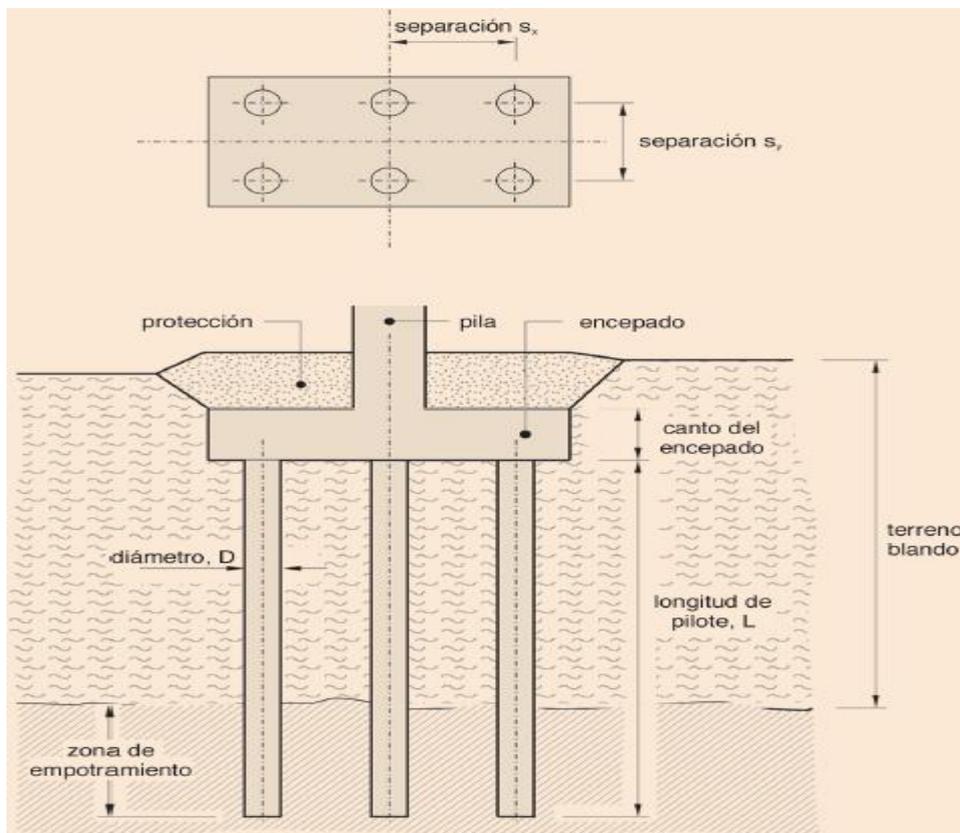
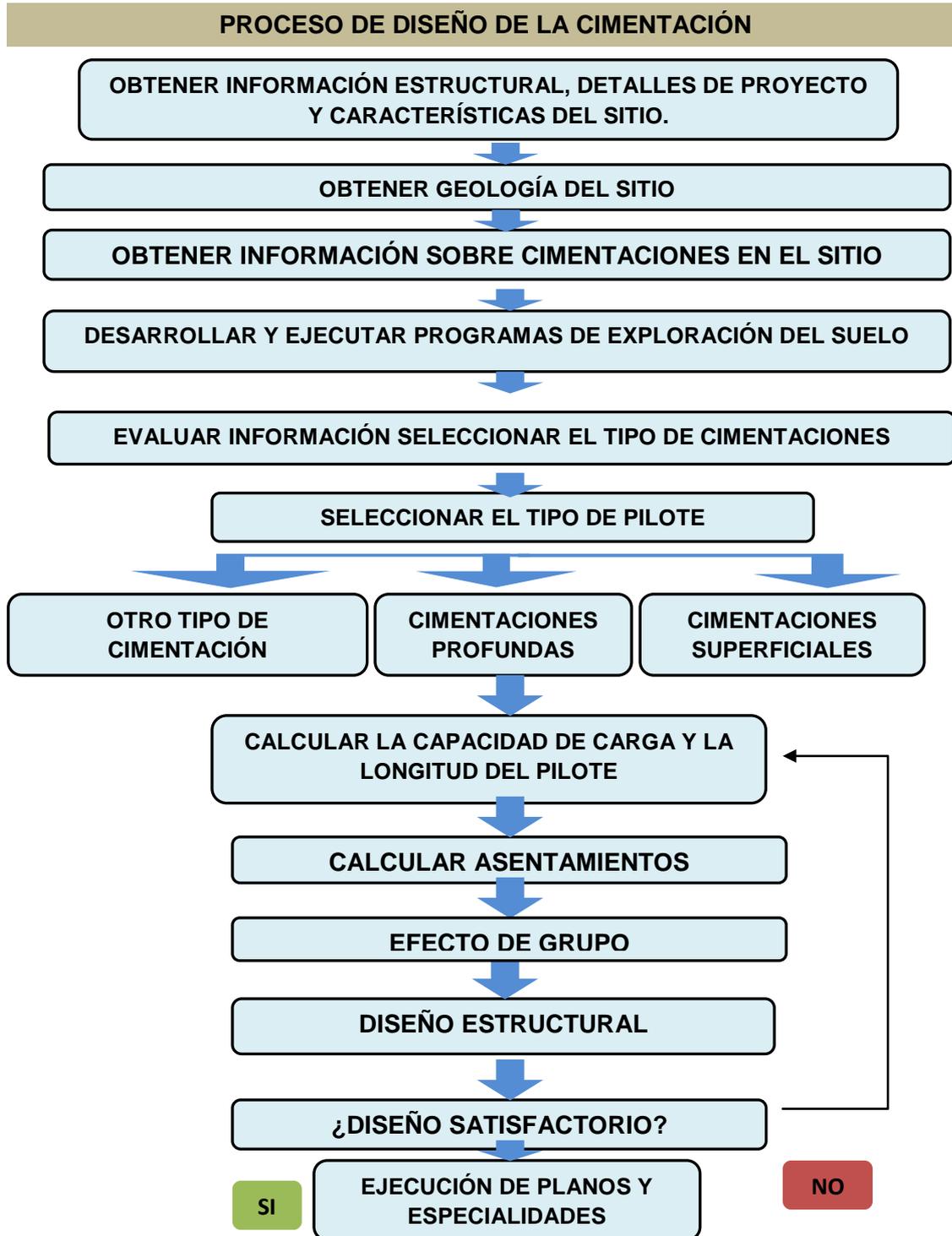


Figura 1.1 Ejemplo de una cimentación sobre pilote.

### **1.3 Diseño de Cimentaciones sobre Pilotes:**

En el proceso de diseño de una cimentación es necesario seguir una secuencia de pasos para obtener un resultado satisfactorio. Para el caso de los pilotes, son varios los factores a tener en cuenta en su selección y posterior proceso de diseño. A continuación se presenta un diagrama flujo que describe de forma general el proceso de diseño de este tipo de cimentaciones.

En este trabajo se profundizara en lo relacionado al diseño geotécnico de la cimentación sobre pilotes, la determinación de la capacidad de carga y la deformación (solo para los casos de carga axial) y al diseño estructural del pilote aislado. Se analizará la cimentación como un elemento individual y el efecto del grupo de pilotes.



#### 1.4 Estudio y crítica de los Métodos para el Diseño de Pilotes:

Para determinar la capacidad de carga en pilotes se han desarrollado fórmulas y criterios que pueden agruparse en cuatro clases que se citan a continuación:

- Pruebas de Cargas.
- Métodos Dinámicos.
- Ensayos de Penetración.

- Métodos Estáticos basados en la teoría de Plasticidad

#### .4.1 Prueba de Carga:

El método más seguro para determinar la capacidad de carga de un pilote, para la mayoría de los lugares, es la prueba de carga [Juárez (1975), Sowers (1977), Paulos and Davis (1980), Bras(1999) Jiménez (1986), Lambert (1991), Sales(2000), Fellenius (2001), Ibañez (2001), Vega Vélez (2005), Lourenco(2005)]. Dentro de ella se han desarrollado la prueba de asiento controlado (controlando el incremento de asiento o a una velocidad de asiento constante) y la prueba con carga controlada (incremento de carga constante en el tiempo o asiento mínimo para un incremento de carga). Este último es el más usado, ya que permite determinar la carga última cuando se ha movilizadado la resistencia del suelo que se encuentra bajo la punta y rodeando al pilote.

En esencia, estas pruebas, no son más que experimentar a escala real, un pilote, para procesar su comportamiento bajo la acción de cargas y determinar su capacidad de carga. Precisamente, su inconveniente fundamental estriba en su elevado costo y en el tiempo requerido para realizarla.

Sowers (1977), recomienda que los resultados del ensayo son una buena indicación del funcionamiento de los pilotes, a menos que se hagan después de un período de tiempo. Jiménez (1986) muestra preocupación ya que el pilote de prueba puede representar o no la calidad de los pilotes definitivos. Otra limitación planteada por este autor radica en que la prueba de carga se realiza generalmente a un solo pilote y se conoce que el comportamiento de un grupo es diferente al de la unidad aislada.

A modo de conclusión podemos plantear que la prueba de carga es un método bastante seguro en la determinación de la carga última de los pilotes, siempre que se proporcione el mismo grado de calidad al pilote en prueba y al definitivo, pero es muy costoso y por esto se toman otras alternativas en la medición de la capacidad de carga. En el trabajo fueron consultados varios libros que referencian este tema, entre ellos podemos citar: Principio de la Ingeniería de Cimentaciones Dajas (2001 Edición en español), Handbook on Pile load Testing (2006), Guía de Cimentaciones (2002).

A manera de resumen se muestran algunos criterios utilizados para determinar la capacidad de carga de un pilote a partir de los ensayos de carga.

Criterio	Descripción
1. Limitación de asentamiento total relativo	a) Desplazamiento en la punta mayor (D/30) (Norma Brasileña, ABNT, 1980)
2. Tangente a la curva carga – asentamiento (comportamiento hiperbólico)	a) Intersección de la tangente inicial y final de la curva carga – asentamiento definida por la carga admisible b) Valor constante de carga para asentamiento creciente
3. Limitación del asentamiento total	a) Absoluto 1 pulgada b) Relativo – 10% del diámetro
4. Postulado de Van de Beer (1953)	Asintota de la función exponencial: $P=P_{max}(1-e^{-az})$
5. Davisson (1980)	Desplazamiento aproximado de la punta del pilote mayor que $D/120 + 4mm$

Tabla 1.1 Criterios para determinar la carga ultima del ensayo de carga.

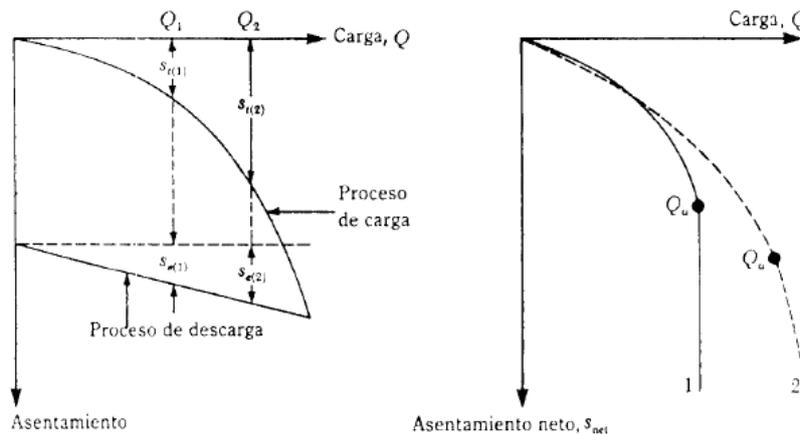


Fig. 1.2 Grafica de carga contra asentamiento total.

#### .4.2 Métodos dinámicos.

Estos métodos generalmente se asocian a la hincada de pilotes. Producto que la hincada de pilotes produce fallas sucesivas de la capacidad de carga del pilote, entonces se podría establecer teóricamente la relación entre la capacidad de carga del pilote y la resistencia que ofrecen a la hincada con un martillo.

Todos los análisis dinámicos están basados en la transferencia al pilote y al suelo de la energía cinética de la maza al caer [Sowers (1977), Juárez (1975)]. Esta realiza un trabajo útil forzando al pilote a introducirse en el suelo venciendo su resistencia dinámica. La mayor incertidumbre en este enfoque del problema y la diferencia básica entre todas las fórmulas dinámicas estriba en cómo calcular las pérdidas de energía y la eficiencia mecánica del proceso, por lo que se han desarrollado varias fórmulas que se basan en la utilización de coeficientes para evaluar el comportamiento de los factores que intervienen en el proceso.

Dentro de las fórmulas dinámicas se citan, entre otras, la expresión de Hiley [Galabru (1974)], la Engineering News [Galabru(1974)], de Delmag, Gersevanov(1970), la Propuesta de Norma(1989) y Juárez(1975) donde se hace una buena recopilación de estas expresiones incluyendo la expresión de CASE más completa y moderna. G. Bernárdez (1998) a través de pruebas de cargas dinámicas en suelos areno-arcillosos densos avala la utilización de la fórmula de Janbu y Hiley. P. Rocha (1998) expone los resultados obtenidos de pruebas de cargas dinámicas y los compara con los obtenidos en pruebas de carga estática, verificando las diferencias que existen con respecto a los resultados obtenidos para pilotes de pequeño diámetro.

La propuesta de la Norma Cubana (1989) para este aspecto establece lo siguiente:

La carga resistente por estabilidad del pilote aislado se determina según dos métodos dinámicos:

1. Ecuación de la onda.
2. Fórmulas de hincada.

*Ecuación de la Onda:* Para determinar la capacidad soportante utilizando este método, es necesario determinar mediante ensayos dinámicos del pilote la respuesta de éste al

impacto del martillo en términos de fuerza (tensión y deformación) y velocidad (aceleración), lo cual permite determinar las fuerzas y las trazas de las ondas de velocidad a partir de las cuales se pueden obtener las fuerzas de impacto, la energía y la respuesta dinámica del suelo. A partir de los datos de este ensayo se obtienen los parámetros necesarios para determinar, en función de la ecuación de la onda, la carga resistente por estabilidad del pilote.

*Fórmulas de hinca:* Los resultados obtenidos mediante la fórmula de hinca sirven para ser utilizados como: Correlación en un área geotécnicamente similar, con los valores de la carga resistente por estabilidad, determinada a partir de la prueba de carga, penetraciones estáticas ó ambas.

$$Q_U = \frac{N \cdot A_p}{2} \left[ \sqrt{1 + \left( \frac{4 \cdot E_m \cdot (Q + 0.2 \cdot W)}{N \cdot A_p \cdot e \cdot (Q + W_p)} \right)} \right] \quad \text{Exp 1.1}$$

o bien

$$e = \frac{N \cdot A_p \cdot E_M}{Q_U \cdot (Q_U + N \cdot A_p)} + \frac{Q + 0.2 \cdot W_p}{Q + W_p} \quad (\text{m/golpe}) \quad \text{Exp 1.2}$$

$E_M$ : energía del martillo/ golpe (kN.m )

$W_p$ : Peso del pilote

$Q$ : Peso de la masa de impacto del martillo (kN)

$N$ : constante elástica (kPa) que depende del material del pilote.

Como conclusión, podemos plantear que siempre que se cuente con la adecuada instrumentación electrónica [Aoki (1997), Balech (2000)] y una correcta modelación matemática, se puede estimar la capacidad de carga de las cimentaciones sobre pilotes por métodos dinámicos.

#### .4.3 Ensayos de Penetración:

Los ensayos de penetración son utilizados frecuentemente para determinar la capacidad soportante de los pilotes. El estado tensional y deformacional en el suelo debido a un pilote cargado con su carga última y el de un penetrómetro que se introduce en el suelo son muy similares. Por esta razón se puede establecer una relación muy estrecha entre la resistencia a penetración y la capacidad soportante del pilote [Menzanbach(1968a)]. En Cuba se utilizan los modelos de penetración del cono holandés y los modelos soviéticos S-979 y Sp-59. Un análisis de las expresiones utilizadas para la determinación de la capacidad resistente por estabilidad del pilote aislado, evidencia, que estas no son más que la suma del aporte a fricción y en punta, afectados por un factor de escala entre la resistencia en punta del cono de penetración y la punta del pilote ( $\beta_1$ ) y un factor de escala entre la fricción sobre la camisa del penetrómetro y el fuste del pilote ( $\beta_2$ ). Un interesante enfoque del problema se desarrolló por Bustamente y Gianceselli(1982), basado en la interpretación de 197 ensayos de carga en Francia, en suelos limosos, arcillosos y arenosos. Otros textos consultados en esta temática son: Paulos.and.Davis (1980), Dajas (2001), Cunha (2004)

El ensayo SPT (Standard Penetration Test) es probablemente el más extendido de los realizados "in situ". El resultado del ensayo, el índice  $N$ , es el número de golpes precisos para profundizar 30 cm. El ensayo SPT está especialmente indicado para suelos granulares, y sus resultados, a través de las correlaciones pertinentes (basadas en una gran cantidad de datos de campo), permiten estimar la carga de hundimiento de cimentaciones superficiales o profundas, así como estimar asentos, bien directamente, bien por medio de otras correlaciones con el módulo de deformación.

Analizado todo lo anterior, se concluye, que los ensayos de penetración, a pesar del grado de empirismo que encierran (Factores de escala), tienen un gran carácter regional, ya que se obtienen de ensayos realizados en lugares específicos y de aquí su limitación de aplicación. Por otra parte, es importante señalar que este método permite determinar la capacidad resistente por estabilidad del pilote aislado, y como se ha expresado, el comportamiento de un pilote está estrechamente vinculado a la acción de los pilotes vecinos.

#### 4.4 Métodos estáticos basados en la teoría de la plasticidad:

Son formula que están basadas en principios teóricos y ensayos, que procuran determinar la capacidad máxima de carga que es capaz de resistir un pilote o grupo de estos en el medio (Suelo). Sowers (1977), Juárez (1975), Jiménez (1986)(1994), la Norma Soviética, L´ Herminier (1968), la Norma SNIP (1975), la CNC 73001 (1970), Norma Cubana(1989), Ibañez(2001) entre otros coinciden en que la capacidad de carga se obtiene de la suma de la resistencia por la punta y por la fricción lateral en el instante de carga máxima:

$$Q_{\text{total}} = Q_{\text{punta}} + Q_{\text{fricción}} \quad \text{Exp(1.3)}$$

Para el aporte en punta puede aceptarse:

$$Q_{\text{punta}} = A_b \cdot q_p \quad \text{Exp(1.4)}$$

$A_b$ : el área de la punta y  $q_p$  la resistencia unitaria de punta.

Respecto a la fórmula inicial lo que se refiere a  $Q_{\text{fricción}}$  puede aceptarse la expresión clásica:

$$Q_{\text{fricción}} = \pi \cdot D \cdot \sum L_i \cdot f_{si} \quad \text{Exp(1.5)}$$

$D$ : es el diámetro del pilote,  $L_i$  es la longitud de cada estrato atravesado por el pilote y  $f_{si}$  la resistencia lateral en cada capa o estrato de suelo.

### 1.5 Estudio y Crítica de las expresiones para la determinación de la Carga a Nivel de Pilote.

En el proceso de diseño de la cimentación se hace necesario determinar la carga actuante a nivel del pilote aislado para posteriormente determinar la capacidad de carga y la deformación del mismo. En este sentido se han desarrollado dos tendencias [Propuesta de Norma (1989)], el método de la superposición de efectos y el método de Interacción Suelo – Estructura (ISE). En el primero de ellos se considera que generalmente el cabezal sobre los pilotes es una viga de hormigón armado que por sus dimensiones se supone que sea un elemento rígido y, por tanto, se asume que la distribución de las cargas sobre cada uno de los pilotes sigue una ley lineal o plana.

Sin embargo, existen diferentes criterios para definir el comportamiento del cabezal como un elemento rígido o flexible. En el segundo enfoque el pilote se supone apoyado sobre un suelo, modelado como un medio tipo Winkler (medio discontinuo). El modelo supuesto se resuelve considerándolo como una estructura y utilizando para ello el método de las deformaciones [Propuesta de Norma (1989)].

Analizando la cimentación como un conjunto, la posibilidad de colaboración entre los pilotes y su encepado o cabezal, para soportar las cargas, que antes era totalmente despreciada, se acepta hoy como muy normal [Aoki,(1991)], en aquellos casos en que el cabezal se hormigona sobre el suelo. Jiménez (1994) cita los trabajos de Coke, que plantea que ensayos en Londres, demuestran que alrededor de 30 % de la carga esta siendo transmitida por el encepado, aun cuando en el proyecto se había supuesto que la carga iba a ser tomada por los pilotes. En recientes investigaciones [Aoki(1991), Ibañez(1997)(1998)], se realiza un estudio sobre el trabajo cabezal - suelo en este tipo de cimentaciones, donde se evidencia la variación de la carga actuante a nivel del pilote en función de la rigidez del cabezal y el módulo de deformación del terreno en la cabeza y punta del pilote. Sales (2000b) y Cunha (1998) obtienen a través de pruebas de cargas en suelos arcillosos tropicales, resultados similares, lo que evidencia el trabajo conjunto cabezal suelo, razón por la cual se elevará la capacidad de carga de rotura de la cimentación y la disminución de los asentamientos para la condición de carga de trabajo en comparación con el pilotes aislado. Actualmente existen análisis muy detallados mediante elementos finitos para determinar la distribución óptima de los pilotes [Chow(1991), Lobo(1997)M. Sales(2000a)], sin embargo, no se han llegado a presentar en una forma paramétrica que permita su utilización sencilla sin necesidad de llevar a cabo el análisis completo por computación.

<b>INVARIANTES PARA LA DETERMINACIÓN DE LA CARGA ACTUANTE A NIVEL DEL PILOTE AISLADO.</b>
<p>Para la determinación de la carga actuante a nivel del pilote aislado se debe tener en cuenta:</p> <p><i>Solicitaciones externas(momento, cortante y axial):</i> influyen en la magnitud de la carga a nivel del pilote aislado y su forma de trabajo.</p> <p>Número, distribución de pilotes y tipo de unión cabezal – pilote: definen el método de análisis a emplear.</p> <p><i>Rigidez del cabezal:</i> viene dado por las dimensiones del cabezal y el espaciamiento entre pilotes definiendo: cabezal rígido o flexible.</p> <p><i>Aporte del terreno bajo el cabezal:</i> En caso de que se tenga en cuenta representa un trabajo conjunto de la cimentación y por ende una disminución de carga a nivel del pilote aislado</p>

La Propuesta de norma cubana establece 1989 que cuando se realiza el diseño de una cimentación sobre pilotes, como sólo se conocen las sollicitaciones externas, las características resistentes y deformacionales del suelo de la base, se hace necesario determinar: el número, la distribución y la longitud de los pilotes. En la mayoría de los casos se mantienen dos de las tres incógnitas y se determina la otra.

En el método de la superposición de efectos la carga actuante a nivel del pilote aislado se determina a través de la siguiente expresión:

$$Np = \frac{N_{total}}{n} \pm \frac{M_x \cdot Y_i}{\sum Y_i^2} \pm \frac{M_y \cdot X_i}{\sum X_i^2} \quad \text{Exp(1.6)}$$

Donde:

$Np$ :	Carga a nivel del pilote
$N_{total}$ :	Carga total a nivel de la cimentación.
$M_x, M_y$ :	Momento total actuante en el plano X o Y de la cimentación.
$X_i, Y_i$ :	Distancia del pilote analizado al centroide de la cimentación
$n$ :	Número total de pilotes.

Sin embargo, este método solo es aplicable cuando se cumple que:

- Todos los pilotes del grupo tienen igual área transversal,
- La cantidad de pilotes por fila es igual,
- Se considera cabezal rígido.
- Pilotes verticales y articulados al cabezal.

Precisamente el método de Interacción Suelo Estructura (ISE) permite resolver, a diferencia del método anterior, grupos de pilotes que dependan de las siguientes condiciones [Propuesta de Norma (1989)]:

- Unión cabezal pilote articulado o empotrado,
- Cabezal rígido o flexible,
- Igual número de pilotes por fila y por columnas.

### **1.6 Estudio y Crítica de las Expresiones para la Determinación de la capacidad de Carga en Pilotes:**

A continuación se realiza un análisis sobre los diferentes enfoques para la determinación de la capacidad de carga del pilote de manera general se analizan las expresiones clásicas de la mecánica de suelos y se hace referencia a estudios mas recientes. Por el gran volumen de información referido a este tema consultado en la literatura internacional se hará énfasis en las expresiones de mayor uso en nuestro país y el enfoque de la propuesta de norma.

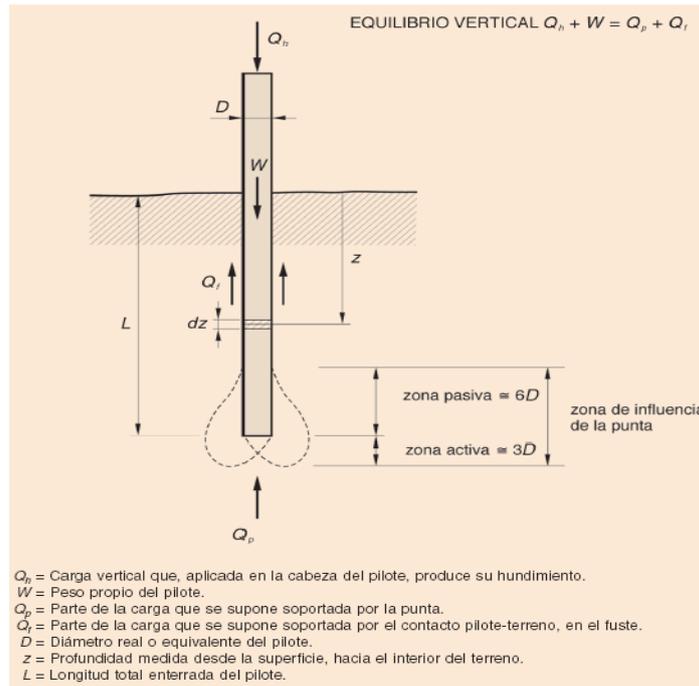


Figura 1.3 Esquema del hundimiento de un pilote aislado.

### .6.1 Pilotes apoyados en suelos:

La Capacidad última de carga de un pilote se logra por una simple ecuación:

$$Q_u = Q_p + Q_f \quad \text{Exp(1.7)}$$

Donde:

- $Q_u$ : Capacidad ultima del Pilote.
- $Q_p$ : Capacidad de carga de la punta del Pilote.
- $Q_f$ : Resistencia por Fricción.

Numerosos estudios publicados tratan la determinación de los valores de  $Q_p$  y  $Q_s$ . Excelentes resúmenes de muchas de estas investigaciones fueron proporcionados por Vesic (1977), Meyerhof (1976) y Coyle y Castello (1981), Paulos and Davis (1980), Ibañez (2001), Louranco (2005), Propuesta de Norma Cubana (1989), etc. Tales estudios son una valiosa ayuda en la determinación de la Capacidad última de los pilotes.

#### Resistencia por Fricción de un Pilote $Q_f$ :

La resistencia por fricción o superficial de un pilote se expresa como:

Donde:

- $p$ : perímetro de la sección del pilote.
- $\Delta L$ : Longitud incremental del pilote sobre la cual  $p$  y  $f$  se consideran constantes.
- $f$ : Resistencia unitaria por fricción a cualquier profundidad  $z$ .

Existen varios métodos para estimar  $Q_P$  y  $Q_S$ . Debe recalcar que en el terreno, para movilizar plenamente la resistencia de punta ( $Q_P$ ) el pilote debe desplazarse de 10 a 25% del ancho (o diámetro) del pilote.

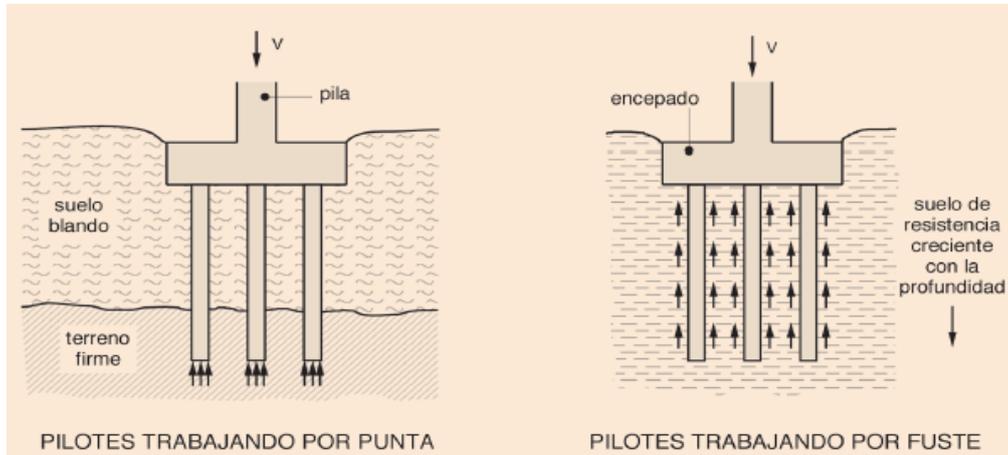


Figura 1.4 Esquema de cimentaciones profundas

## 6.2 Análisis del aporte en punta

Determinación de  $Q_P$

El aporte en punta para pilotes apoyados en suelo de forma genérica se expresa como:

$$Q_{\text{punta}} = F (A_p, q_0) \quad \text{Exp(1.12)}$$

$A_p$  – área de punta del pilote.

$q_0$  – resistencia en punta.

$$q_0 = \frac{B \cdot \gamma}{2} \cdot N\gamma + C \cdot P_{ff} Nc + q' \cdot Nq \quad \text{Exp(1.13)}$$

El mecanismo de resistencia en punta, se asemeja al de una cimentación superficial enterrada profundamente. Al igual que los resultados analíticos de las cimentaciones poco profundas se puede expresar de forma general:

$$q_0 = \frac{B \cdot \gamma}{2} \cdot N\gamma + C \cdot Nc + q' \cdot Nq \quad \text{Exp(1.14)}$$

Esta expresión que fue deducida por primera vez por Terzaghi (1943) y mejorada por Meyerhof (1951), en la que se basan los enfoques clásicos, establece un mecanismo de falla a través de espirales logarítmicas que siempre se cierran en el caso de pilotes, basado en la mecánica del medio continuo [Juárez(1975)]. Para los pilotes, en que  $B$  es pequeña, frecuentemente se omite el primer término [Sowers (1977)]:

$$q_0 = C \cdot Nc + q' \cdot Nq \quad \text{Exp(1.15)}$$

Sowers (1977) de forma acertada plantea lo difícil de precisar cual es el factor de capacidad de carga correcto que debe usarse. Sobre el estudio de estos factores existen los trabajos de Meyerhof y Berezantzev (1976). El factor de capacidad de carga en arenas, está en función de la relación del ángulo de rozamiento interno ( $\phi$ ),

con la profundidad [Jiménez (1994)]. En este sentido se han desarrollados los trabajos de Terzaghi(1943) , De Beer (1965) y Caquot – Krissel (1969).

Dentro de los enfoques actuales para la determinación del aporte en punta se destacan:

**a) La Propuesta de Norma (1989):**

$$Q_{punta} = A_p \cdot q_p' \quad \text{Exp(1.16)}$$

Para suelos friccionales ( $\varphi$ ).

$$q_p' = N_d q \cdot d_s q \cdot q'$$

$q_p'$  - capacidad de carga en la punta del pilote (en tensiones).

$N_d$  – factor de la capacidad de carga, función de  $\varphi$ .

$d_s q$  – factor que tiene en cuenta la longitud del pilote y la forma de la cimentación.

$q'$  – presión efectiva vertical en la punta del pilote. Por debajo de la profundidad crítica ( $Z_c$ ) toma el valor de  $q' = Z_c \cdot \gamma$ . Vale destacar que en esta normativa el valor de  $Z_c$  se establece en función de la relación diámetro y ángulo de fricción interno del suelo.

Como se aprecia, en suelos friccionales, la determinación de la capacidad de carga depende del estado tensional en la punta y en las caras del pilote. Un detallado análisis a estos problemas realiza Sowers (1977) donde se plantea que el valor de  $q'$  se calcula teóricamente como  $q' = \gamma \cdot Z$ , pero a medida que se aumenta la carga en el pilote, hay una reducción en el esfuerzo vertical inmediatamente adyacente en la parte inferior del pilote, debido a la transferencia de carga en punta. Aunque esta puede ser parcialmente compensada por el aumento de la tensión vertical causado por la transferencia de carga por la fricción lateral en la parte superior, el efecto neto en pilotes largos y esbeltos será una reducción de tensiones. Además, el hundimiento de la masa de suelo alrededor del pilote produce una reducción del esfuerzo vertical similar al que se produce en una zanja que se ha rellenado. Como resultado de esto, el esfuerzo vertical adyacente a un pilote cargado es menor que  $\gamma \cdot Z$ , conocido como efecto de Vesic, por debajo de una profundidad crítica denominada  $Z_c$ . Los ensayos a gran escala en suelos arenosos y estudios teóricos hechos por Vesic (1977), indican que la profundidad  $Z_c$  es función de la compacidad relativa ( $D_r$ ). Para  $D_r < 30\% \Rightarrow Z_c = 10 \cdot D$ , para  $D_r > 70\% \Rightarrow Z_c = 30 \cdot D$ . Otras normativas establecen  $Z_c$  en función de la relación entre el ángulo de fricción interna y el diámetro de los pilotes. Entre las expresiones que consideran el efecto de Vesic se encuentran la de la Propuesta de Norma (1989), Berezentzev (1961), Jiménez (1984), Tomilson (1986), mientras que Caquot (1967), Bowles (1977) entre otros, no lo consideran. Ibáñez (2001) destaca que  $Z_c = 20D$  y que además no depende del ángulo de fricción interno.

Concluimos, entonces, que una de las razones por las que difieren tanto los resultados obtenidos al aplicar las metodologías para la obtención de la capacidad portante en los pilotes apoyados en suelo es la diversidad de criterios empleados en cuanto al valor de  $Z_c$  asumido.

Para suelos Cohesivos (C):

$$q_p = C_u \cdot N_c \cdot d_s c \quad \text{Exp(1.17)}$$

$N_c$  - coeficiente de la capacidad de carga, función del diámetro o forma del pilote.  
 $d_{sc}$  – coeficiente que tiene en cuenta el diámetro o forma del pilote.  
 $C_u$  – Cohesión no drenada del suelo.

**La Propuesta de Ibañez (2001):** En la tesis de doctorado de Ibañez (2001), a través de la Modelación por Elementos Finitos, el autor propone nuevos coeficientes para la determinación de la capacidad de carga en pilotes. Estas expresiones forman parte de la actual propuesta de Norma

**c) Miguel León (1980):**

$$Q_{punta} = A_p \cdot q_p' \quad \text{Exp(1.18)}$$

Para suelos friccionales ( $\varphi$ ).

$$q_p = q' \cdot N_q$$

$N_q$  - factor de capacidad de carga función de  $\varphi$  y recomienda los valores de Berezantzev (1961).

$q'$  - presión efectiva vertical en la punta del pilote. A diferencia de la Propuesta de Norma  $Z_c$  se establece a partir de los 20·Diámetros ( $Z_c = 20 \cdot D$ )

Para suelos Cohesivos (C).

Para pilotes hincados,  $C_u > 100$  kPa, recomienda la fórmula de Skempton(1951):

$$Q_{punta} = A_p \cdot 5.14 \cdot C_u \cdot (1 + 0.2 \cdot B/A) \cdot (1 + 2 \cdot L_e/B) \quad \text{Exp(1.19)}$$

Donde B y A son las dimensiones de la sección transversal del pilote y  $L_e$  la longitud de empotramiento del pilote en el suelo.

Para pilotes "in-situ"

$$Q_{punta} = A_p \cdot C_u \cdot N_c \quad \text{Exp(1.20)}$$

$N_c$  – igual al anteriormente.

$C_u$  – Cohesión no drenada del suelo.

**c) Jiménez (1986):**

$$Q_{punta} = A_b \cdot q_p \quad \text{Exp(1.21)}$$

$$q_p = N_{cd} \cdot C_u$$

$N_{cd}$  - Coeficiente que varía entre 6 y 12 y propone el valor de 9.

Como puede apreciarse el aporte en punta, para el caso de suelos cohesivos se reduce a multiplicar el valor de cohesión por un coeficiente que oscila entre 6 y 12, y para el caso de suelos friccionales debido a la magnitud de este aporte se recurre a expresiones basadas en mecanismos de falla a través de espirales logarítmicas que siempre se cierran en el caso de pilotes, basado en la mecánica del medio continuo. En algunos casos se evalúa la profundidad dentro del estrato resistente y la forma de la cimentación, mientras que en otros esto se tiene en cuenta en el factor  $N_q$  de capacidad de carga.

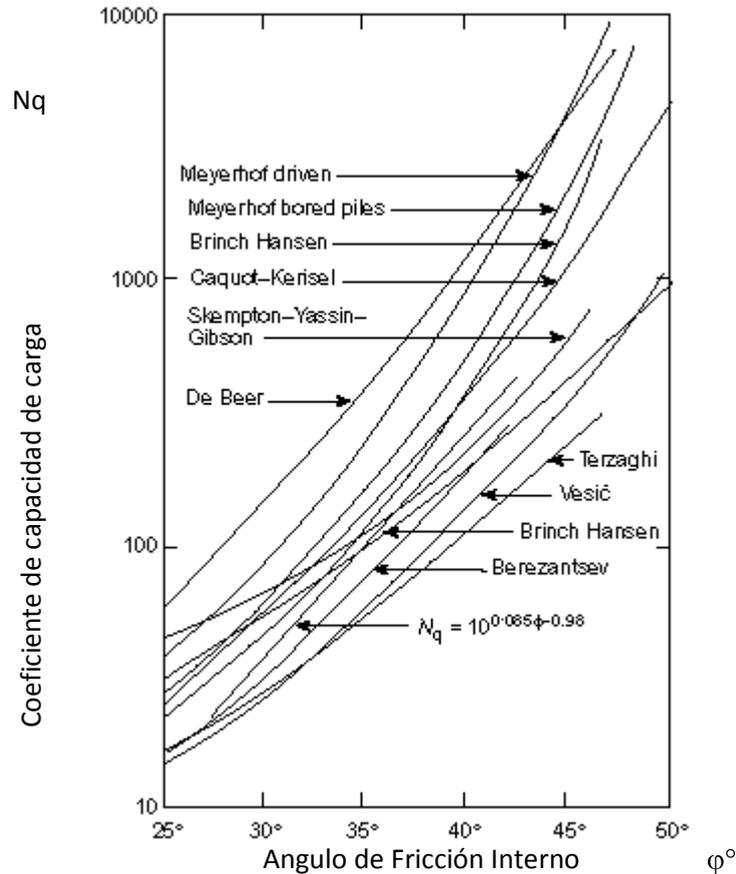


Figura 1.5. Coeficiente de capacidad de Carga  $N_q$

A continuación se analizan las expresiones utilizadas por el enfoque tradicional para determinación del aporte en punta (Ley de resistencia a cortante  $S = C + \sigma' \cdot \tan \phi$ ):

**a) Fórmula de Meyerhof (1976):**

$$Q_{punta} = A_p \cdot \left[ \frac{\gamma \cdot 2 \cdot d}{2} \cdot N_\gamma + C \cdot N_c + q' \cdot (N_q - 1) \right] \quad \text{Exp(1.22)}$$

$N_c, N_q, N_\gamma$  - factores de capacidad de carga.

Como muestra esta expresión, es similar a la de capacidad de carga para cimentaciones superficiales, con la diferencia que los factores  $N_c, N_q, N_\gamma$  se obtienen para una cimentación profunda y tienen en cuenta la profundidad dentro del estrato resistente y el efecto de forma.

**b) Fórmula de Brinch – Hansen(1961):**

$$Q_{punta} = A_p \cdot (q \cdot N_q \cdot S_q \cdot d_q + C \cdot N_c \cdot S_c \cdot d_c) \quad \text{Exp(1.23)}$$

$S_q, S_c$  - factores que dependen de la forma de la sección de la cimentación.

$d_q, d_c$ ,- factores que tienen en cuenta la profundidad de la base del pilote dentro del estrato resistente.

Otros autores [Bowles(1984), L`Herminier(1968)] engloban los factores de forma y profundidad, con los coeficientes de capacidad de carga, dando directamente la carga de hundimiento por la punta a suficiente profundidad mediante la expresión:

$$Q_{punta} = A_p (q N_q + C N_c) \quad \text{Exp(1.24)}$$

En la obtención de los valores de  $N_c$  y  $N_q$  se pueden mencionar los trabajos de De Beer (1965), Buissman y Terzaghi(1943). De todas las expresiones estudiadas, la de Brinch – Hansen (1961), por primera vez, evalúa la profundidad del pilote dentro del estrato resistente.

**c) Según Ernest Menzenbach (1968a):**

Estas expresiones están basadas en la teoría y los resultados de ensayos de laboratorios, y se obtienen del equilibrio de las fuerzas que actúan en la superficie de falla de la base del pilote:

$$Q_{punta} = A_p \cdot q_0 \quad \text{Exp(1.25)}$$

$$q_0 = C \cdot N_c + P' \cdot N_q + \gamma \cdot d_b \cdot N_\gamma \quad \text{Exp(1.26)}$$

$C_u$  – Cohesión no drenada.

El valor de  $N_c$  oscila entre 6 y 9, y puede ser obtenido por las expresiones de Skempton (1951) y Gibsón.

$N_q$  – factor de la capacidad de carga. Según este autor pueden ser utilizados los valores propuestos por Meyerhof (1951), Berezantzev, Khristoforov y Golubkov (1961).

**d) Ramón Barbey Sánchez:**  $Q_{punta} = A_p \cdot [C \cdot N_c + q' \cdot (N_q - 1)]$  Exp(1.27)

**e) R. L. Herminier (1968):**  $Q_{punta} = A_p \cdot (1.3 \cdot C \cdot N_c + \gamma \cdot D \cdot N_q)$  Exp(1.28)

**f) Bowles (1984):**  $Q_{punta} = A_p \cdot (1.3 \cdot C \cdot N_c + \eta \cdot \gamma \cdot L (N_q - 1) + 0.5 \cdot B \cdot N_\gamma)$  Exp(1.29)

$\eta$  - factor de corrección en función de la profundidad.

En resumen, todas las expresiones en forma son similares a la expresión de capacidad de carga de Meyerhof (1951), y difieren en la manera de determinar los factores de capacidad de carga, es decir, cuál es la superficie de falla que se genera en la base de la cimentación y la manera de evaluar la profundidad dentro del estrato resistente y la forma del pilote. El análisis realizado demuestra que las tendencias actuales en el diseño de pilotes, es ir a utilizar las teorías de esfuerzos efectivos para suelos friccionales y esfuerzos totales para suelos cohesivos.

### .6.3 Análisis del aporte a fricción.

El aporte a fricción que se genera en las caras adyacentes al pilote producidas por la falla fuste–suelo o suelo–suelo, puede expresarse de forma genérica como:

$$Q_{fricción} = f (P_p, L_p, f_0)$$

$P_p$  – perímetro del pilote.

$L_p$  – Longitud del pilote.

$f_o$  – fricción unitaria del estrato.

Para este caso el mecanismo de rotura puede producirse por la superficie de contacto pilote - suelo o suelo - suelo. Para el primer caso la fricción viene dada por la adherencia o fricción en la superficie de contacto y en el segundo a la resistencia al esfuerzo cortante del suelo inmediatamente adyacente al pilote.

Para pilotes instalados en arcillas, un método tradicionalmente utilizado [Delgado(1999)] para el cálculo de la fricción unitaria, ha sido por muchos años, el de definir un factor de adherencia  $\alpha$ , como la relación entre la adherencia ( $C_a$ ) y la resistencia al corte no drenado ( $C_u$ ), es decir:

$$\alpha = \frac{C_a}{C_u} \quad \text{Exp(1.30)}$$

y correlacionarlo empíricamente con  $C_u$  a partir de resultados de pruebas de carga sobre pilotes. Debido a la propensión general observada en este coeficiente de adherencia  $\alpha$ , a disminuir con el crecimiento de la resistencia al corte, se han realizado varias tentativas para identificar esta dependencia por medio de la correlación entre  $\alpha$  y  $C_u$ .

El método  $\alpha$ , basado en tensiones totales, se puede utilizar para relacionar la adherencia entre el pilote y una arcilla con la resistencia no drenada de la arcilla. El método  $\beta$ , basado en tensiones efectivas funciona mejor para pilotes en arcillas normalmente consolidadas y ligeramente sobreconsolidadas. El método tiende a sobrestimar la fricción superficial de los pilotes en suelos fuertemente sobreconsolidados. El método  $\lambda$ , basado en tensiones efectivas, se puede utilizar para relacionar la fricción superficial unitaria, El valor de  $\lambda$  disminuye con la longitud del pilote y fue determinado empíricamente, examinando los resultados de ensayos de carga realizados sobre pilotes tubulares de acero.

**a) La Propuesta de Norma (1989)** establece el mecanismo de falla en función del tipo de suelo estableciendo de forma general:

$$Q_{\text{fricción}} = P_p \sum L_i \cdot f_{oi} \quad \text{Exp(1.31)}$$

Para suelo  $\phi$  (Falla pilote – suelo)

$f_{oi}$  – función de ( $\beta, q_{fm}$ ) y  $\beta$  es un coeficiente de la resistencia a fricción en el fuste

$$\beta = K_s \cdot m \cdot \tan \phi \quad \text{Exp(1.32)}$$

$m$  – evalúa el material del pilote.

$K_s$  – coeficiente de empuje (estado pasivo o de reposo en función de la forma de colocación del pilote).

Las correlaciones más recientes [Das(2000)] se basan en el coeficiente de empuje lateral de tierras en reposo,  $K_o$  y la relación de sobreconsolidación (OCR) cuya

determinación confiable exige métodos refinados de investigación del subsuelo en el terreno y en laboratorio.

Para suelo C. (Falla suelo – suelo)

$$f_{oi} = \alpha \cdot C_u \quad \text{Exp(1.33)}$$

$C_u$  – adherencia o cohesión no drenada del suelo.

$\alpha$  - coeficiente que depende de la cohesión.

**b) Miguel León(1980):**

$$Q_{fricción} = P_p \sum l_i \cdot f_{oi} \quad \text{Exp(1.34)}$$

Para suelos friccionales ( $\phi$ )

$f_{oi}$  – función de  $q_p$  y  $\alpha \cdot \phi$ , que es un coeficiente que depende del ángulo de fricción interno y se recomienda tomar los valores de Vesic(1977)

Para suelos Cohesivos:  $f_{oi} = \alpha \cdot C_u \quad \text{Exp(1.35)}$

En este caso el valor de  $f_{oi}$ , esta en función del valor de  $C_u$ , de la forma de instalación y del empuje que se genere.

**b) Menzembach (1968<sup>a</sup>):**

*En suelos Cohesivos*

$$Q_{fricción} = P_p \cdot \sum \alpha \cdot C_u \quad \text{Exp(1.36)}$$

$\alpha$  - coeficiente de adhesión del fuste, depende del tipo de pilote y también de la resistencia a cortante del suelo.

**c) Jiménez (1986):**

$$Q_{fricción} = P_p \cdot \sum L \cdot f_s \quad \text{Exp(1.37)}$$

$$f_s = \alpha \cdot C_u \quad \text{Exp(1.38)}$$

$\alpha$  - factor de adhesión o relación entre la resistencia a corte sin drenaje. Rogel et. Al. (1987) coinciden con la propuesta de Woodward.

Para el caso de suelo  $\phi$ , no se dispone de tantos datos experimentales fiables como para evaluar la resistencia por punta y su deformabilidad, salvo las muy conocida de Vesic (1977) y Kerisel.

$$F_s = k_o \cdot \sigma_v \cdot \tan \delta \quad \text{Exp(1.39)}$$

$k_o$  – coeficiente de empuje de reposo.

$\sigma_v$  – tensión efectiva vertical.

Pero como resulta difícil evaluar  $k_o \cdot \sigma_v$ , se engloba en un coeficiente  $\beta$ , función de la densidad relativa.

En las metodologías analizadas anteriormente merece un comentario qué valor toma el coeficiente de empuje del suelo ( $k_0$ ). Tanto Miguel León y Menzembach(1968) coinciden en tomar  $k_s$  como el estado pasivo de Rankine, suponiendo que producto de la colocación del pilote en el suelo (“in-situ” o prefabricado) no habrá desplazamiento lateral de este último, algo que evidentemente no ocurre cuando se hinca un pilote, pero que se podría alcanzar con el tiempo. Para el caso de suelos cohesivos (falla suelo – suelo, de forma general) se afecta la cohesión  $C_u$  por un valor  $\alpha$ , que depende de varios factores. Resultados más recientes (Ibañez (2001), Das (2001)) proponen tomar valores intermedios entre el empuje pasivo y activo.

Autor.	Expresión.	Valor.
Das (1999).	$1-\text{sen}(\varphi)$	0.66 ~ 0.36
Mayne y Kulhway (1991)	$(1-\text{sen}(\varphi)) \cdot \text{OCR}^{\text{sen}(\varphi)}$	0.69 ~ 0.54
American Petroleum Institute . API (1984)	-	1.00 ~ 0.80
Ibañez (2001)	$k_s = (1 - \text{sen}(\varphi)) \cdot \frac{\text{sen}(\varphi)}{\text{sen}(25)}$	0.63 ~ 0.54

Tabla 1.2. Valor del coeficiente de empuje propuesto por diferentes autores.

A continuación se analizan otras expresiones utilizadas por el enfoque tradicional para determinación del aporte a fricción.

De forma genérica estas expresiones pueden resumirse de igual manera como:

$$Q_{\text{fricción}} = P_p \cdot \sum L \cdot f_s \quad \text{Exp(1.40)}$$

$f_s$  = función (cohesión, tensión horizontal, estado que se considere, ángulo de fricción interna). Falla suelo – suelo. Fallo suelo –pilote.

**d) La fórmula de Meyerhof (1976)** establece la siguiente expresión en función del mecanismo de falla que se genere en las caras del pilote:

$$Q = \text{fricción} = P_p \cdot \sum l_i \cdot f_{oi} \quad \text{Exp(1.41)}$$

$f_{oi}$  – fricción lateral que depende del tipo de falla (suelo – suelo o suelo – pilote)

$f_{oi} = C' + \sigma_h \cdot \tan \varphi$  para la falla suelo – suelo

$f_{oi} = C_a + \sigma_h \cdot \tan \delta$  para la falla suelo – pilote.

$C_a$  – adherencia (función de la cohesión)

$\delta$  - ángulo de rozamiento entre el suelo y la superficie del pilote.

$\sigma_h$  – presión horizontal sobre le fuste. Función de la presión lateral y del estado que se considere.

Tipo de Pilote	$\delta$ - ángulo de rozamiento entre el suelo y la superficie del pilote
Acero	$20^\circ$
Madera	$\frac{3}{4} \varphi$
Hormigón	$\frac{3}{4} \varphi$

Tabla 1.3. Ángulo de rozamiento entre el suelo y la superficie del pilote

e) **Ramón Barbey Sánchez:**

$$Q_{fricción} = Pp \cdot \sum li \cdot f_{si} \quad \text{Exp(1.42)}$$

$$f_{si} = Ca + k_f \cdot \sigma_v \cdot \tan \delta \quad \text{Exp(1.43)}$$

f) Para suelos cohesivos y friccionales, la norma cubana(2007) establece que

$$Q_f = \frac{Pp \sum Li \cdot f_{oi}}{\gamma_{gf}} \quad \text{Exp(1.44)}$$

donde:

$f_{oi}^*$ : fricción unitaria promedio minorada del estrato i (kPa).

Pp: perímetro del pilote (m).

Li: potencia del estrato i (m).

$\gamma_{gf}$ : coeficiente de minoración de la fricción unitaria que tiene en consideración el tipo de pilote.

Sowers (1977) y Bowles (1984) siguen procedimientos similares a los anteriores, definiéndose el coeficiente de presión de tierra  $k_0$ , en dependencia del emplazamiento del pilote y de la compresibilidad del suelo. Como se puede apreciar vuelve a surgir como interrogante el empuje que se genera alrededor del pilote.

Como se ha analizado, las expresiones utilizadas en los enfoques actuales, son válidas para suelos puramente cohesivos (Suelo C) o suelos puramente friccionales (Suelo  $\phi$ ). Para el caso de la presencia de suelos C- $\phi$ , se recurre a una solución ingenieril donde se transforma el suelo en uno puramente cohesivo o puramente friccional utilizando las siguientes expresiones:

Si  $\phi < 25$ . Suelo predominantemente cohesivo:

$$C_{eq} = \frac{q_{fm} \cdot \text{sen}(\phi) + C \cdot \cos(\phi)}{(1 + \text{sen}(2 \cdot A - 1))} \quad \text{Exp(1.45)}$$

Si  $\phi > 25$ . Suelo predominantemente friccional:

$$\tan^{-1}(\phi_{eq}) = \tan^{-1} \frac{K_s \cdot q_{fm} \cdot \tan \phi + C}{K_s \cdot q_{fm}} \quad \text{Exp(1.46)}$$

(1.32)

$$K_s = 1 - \text{sen} \phi \quad (\text{Empuje pasivo de Rankine}) \quad \text{Exp(1.47)}$$

#### .6.4 Pilotes apoyados en roca.

La resistencia en punta para estos casos será de forma genérica:

$$Q_p = f(A_p, R) \quad \text{Exp(1.48)}$$

$A_p$  es el área de la punta del pilote, R es la resistencia a compresión de los núcleos de roca o de suelo bajo la punta y está en función del valor medio de la resistencia límite

a compresión axial de la roca, en las condiciones de humedad natural ( $W_{nat}$ ), del coeficiente que toma en cuenta la profundidad a la que penetra el pilote en la roca ( $d_r$ ) y del porcentaje de recuperación de pedazos de núcleos de roca mayores de 10cm de longitud con respecto a la longitud del sondeo ( $K_{sq}$ ).

Matemáticamente se expresa:  $Q_p = A_p \cdot R$  Exp(1.49)

En estos pilotes, como se expresa, el aporte en punta dependerá del área en la punta del pilote y de la resistencia que presenta la roca bajo la punta ( $E_o > 100\ 000$  Kpa). En ellas se evalúan todos los factores que influyen en el diseño y la diferencia que existe entre la mayoría de los autores radica en la forma de obtención del factor de profundidad ( $d_r$ ). En esencia, con la utilización de estos métodos se garantiza que el estado tensional en la roca o en el suelo, sea menor que el permisible en el mismo. La Propuesta de Norma Cubana 1989 se basa en este mismo planteamiento.

$$Q_p = A_p \cdot R$$

Donde

$$R = \frac{K_{sq} \cdot \bar{R}}{\gamma_{gr}} \cdot d_r$$

Coeficiente que evalúa la resistencia de la Roca, y  $\gamma_{gr}$  coeficiente de seguridad. El factor de profundidad se calcula como:

$$d_r = \left(1 + 0.4 \frac{LE}{D}\right) \leq 3.5$$

Las tendencias actuales para caso de pilotes en roca se enfocan al trabajo con los valores de compresión no confinada del macizo rocoso evaluando el aporte en punta y a fricción (Serrano y Olalla (2004; 2006). Se debe destacar que la actual propuesta de Norma Cubana (1989) no aborda el tema de los pilotes trabajando a fricción. A continuación se presenta un pequeño compendio de las principales teorías disponibles y representativas del estado de la practica para la evaluación de la Capacidad de carga de pilotes cimentados en macizos rocosos.

Capacidad Portante Ultima por Punta,  $q_{m\acute{a}x}$ :

Capacidad Portante Ultima por Punta, $q_{m\acute{a}x}$ .	Autor
Función (RQD)	Peck y otros,1974
(5 a 8) $\sigma_c$	Teng,1962
3 $\sigma_c$ .	Coates,1967
2.7 $\sigma_c$	Rowe and Armitage,1987
4.5 $\sigma_c \leq 10$ Mpa	Argema,1992
3 $\sigma_c$ Ksp D	Canadian foundation engineering Manual,CGS,1992
(3 a 6.6) ( $\sigma_c$ ) <sup>0.5</sup> . Valor medio=4.8	Zhang y Einstein,1998

oc: Compresión Inconfinada

Tabla 1.3

Resistencia Lateral o Tensión última,  $f_s$  o  $q_s$ 

Resistencia Lateral	Autor
$f_s/Pa = \Psi(\sigma_c/2Pa)^{0.5}$ . Para $\sigma_c \geq 2.5 \text{ N/m}^2$ donde: $\Psi=1$ , superficie lisa $\Psi=2$ , Valor medio en rocas. $\Psi=3$ , superficie rugosa	Kulhawy y Phoon, 1993
$f_s = 0.05 \sigma_c$	Australian Piling Code
$f_s = a^* (\sigma_c)^{0.5}$ $a=0.45$ Para rugosidad R1, R2 y R3 $a=0.60$ Para rugosidad R4	Rowe y Armitage, 1984
$f_s = 0.375 (\sigma_c)^{0.515}$	Rosenberg y Journeaux, 1976
$f_s = 0.4^* (\sigma_c)^{0.5}$ para superficie lisa $f_s = 0.8^* (\sigma_c)^{0.5}$ para superficie rugosa	Zhang y Einstein, 1998
$f_s = 0.15^* (\sigma_c)$	Reese y O'Neill, 1987
$f_s = 0.63^* (\sigma_c)^{0.5}$	Carter y Kulhawy, 1988

Pa: Presión atmosférica.

Tabla XXX

Una vez realizado el estudio de las expresiones para la determinación de la capacidad de carga en pilotes podemos resumir que:

1. Existen diferentes criterios para la determinación de la tensión vertical en la punta del pilote ( $q'$ ) y en la determinación de la profundidad crítica ( $Z_c$ ) a partir de la cual el estado tensional vertical permanece casi constante, lo que influye en los resultados finales para el cálculo de la carga a fricción y en punta en suelos friccionales.
2. Existen diferencias entre los coeficientes de capacidad de carga  $N_q$  y  $N_c$  que se utilizan para el diseño, debido a las hipótesis utilizadas para su obtención.
3. Existe incertidumbre en la obtención del coeficiente de empuje lateral de tierra ( $k_s$ ), ya que al calcular el estado tensional alrededor del pilote no se considera la discontinuidad que este crea en el medio.
4. Se acepta por los especialistas determinar para el caso de pilotes en rocas el aporte a fricción, aspecto que no lo tiene en cuenta la propuesta de norma cubana.

### 1.7 Estudio y Crítica de las expresiones para el Cálculo de las Deformaciones.

Es muy difícil determinar los asentamientos mediante métodos sencillos de cálculo. Lo más apropiado es realizar pruebas de carga, lo que puede resultar muy costoso. El asentamiento de un pilote se debe a dos términos, uno de deformación del propio pilote y otro de deformación del terreno.

La comprobación de asentamientos es innecesaria en pilotes columna sobre roca, en arenas

densas y en arcillas duras.

Para el caso de los asentamientos, después del Congreso de Montreal de 1965, se desarrollaron varios trabajos [Feming(1992),Lee(1993)], con el empleo de la ecuación de Midlin, integrada numéricamente. Sus aplicaciones vienen dadas a terrenos que se comporten como un sólido elástico lineal. Como bien plantea Jiménez (1986), para suelos granulares, donde el incremento del módulo de deformación depende de la profundidad, debía verse con criterios muy restrictivos. Feming(1992), Randolph y Wroth (1980), realizaron el estudio de las deformaciones alrededor del pilote, trabajos que se complementaron con la modelación por elementos finitos de Frank (1994). En ellos se puede apreciar que el terreno alrededor del pilote se deforma como una serie de tubos, con gran aproximación a cilindros, sin que las deformaciones que se producen en el terreno de la cabeza y de la punta tengan gran importancia sobre los resultados. En estos trabajos no se tuvo en cuenta la variación de módulo de deformación, visto anteriormente, pero se estableció un modelo muy sencillo de interacción suelo estructura. En 1988, Luker adopta un modelo hiperbólico de comportamiento de suelo y como el gradiente de disipación de los esfuerzos tangenciales al alejarse de las superficies es muy grande, él define una capa limite, en la cual las deformaciones son grandes, por lo tanto el módulo G de deformación transversal es bajo. El problema se resuelve con un algoritmo sencillo en diferencias finitas, en forma iterativa, pero queda por ver la determinación de los parámetros necesarios.

<b>INVARIANTES PARA LA DETERMINACIÓN DE LAS DEFORMACIONES EN LA BASE DE LAS CIMENTACIONES SOBRE PILOTES.</b>
<p>La deformación total depende de:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Deformación debida a la compresión del propio pilote:</li> <li>▪ Deformación debida a la consolidación del suelo en la punta del pilote.</li> </ul>
<p>Deformación debida a la compresión del propio pilote:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Carga total.</li> <li>▪ Dimensiones del Pilote (Area de la punta y perímetro). <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Longitud del pilote.</li> <li>▪ Ancho o diámetro del pilote.</li> </ul> </li> <li>▪ Módulo de Elasticidad del material del Pilote.</li> </ul> <p>Deformación debida a la consolidación del suelo en la punta del pilote.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Carga total. <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Carga en el fuste.</li> <li>▪ Carga en la punta.</li> </ul> </li> <li>▪ Variación del estado tensional.</li> <li>▪ Modelo del comportamiento del suelo. <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Modelos de comportamiento lineal, elástico, hiperbólico.</li> <li>▪ Parámetros que caracterizan el modelo.</li> </ul> </li> <li>▪ Dimensiones del pilote (área de la punta).</li> <li>▪ Ancho o diámetro del pilote.</li> </ul>

Aquí el problema básico es determinar la distribución de tensiones en el subsuelo debido a la carga de un pilote o grupo de pilotes. Menzenbach (1968b) plantea que

como la relación profundidad diámetro del pilote es usualmente alta, es necesario determinar la distribución de tensiones bajo la base del pilote para un área que está actuando dentro del espacio semi - infinito elástico e isotrópico. Debe advertirse que las tensiones bajo una cimentación profunda son más pequeñas que para un área cargada que descansa en la superficie del espacio semi – infinito [Milovic(1998)].

El asiento de un grupo excederá al de un pilote aislado que soporte la misma carga que cada uno de los del grupo, a menos que los pilotes se apoyen en roca o en un estrato grueso de suelo incompresible. El asentamiento del grupo se puede calcular suponiéndose que el grupo representa una cimentación gigantesca según la Propuesta de Norma (1989).

Como puede concluirse de los análisis anteriores, cada uno de los métodos aborda un tópico de la problemática del cálculo de las deformaciones o son válidas para situaciones marcadas.

### .7.1 Cálculo de los asentamientos para el pilote aislado.

**a) Métodos empíricos:** están basados en la recopilación de ensayos o son una recomendación de los diferentes autores. Meyerhof (1960) plantea que el asentamiento depende del diámetro del pilote. Aschenbrenner y Olson (1968) también lo ponen en función del diámetro. Menzenbach (1968a) hace mención a resultados similares para 60 pruebas de cargas en diferentes tipos de suelos

**b) Los procedimientos elásticos** están basados en la integración de las soluciones de Midlin (1973) al caso de una fuerza concentrada en el interior de un semiespacio de Boussinesq. En ellos el pilote y el cabezal se consideran por separado y sometidos a fuerzas iguales y contrarias. Su aplicación es acertada en arcillas donde se asume que el módulo de elasticidad es constante con la profundidad. Vesic (1977) plantea que el asentamiento de la cabeza de un pilote puede separarse, en el asiento debido a la compresión axial del propio pilote, asiento de la punta causado por la carga que dicha punta aplica sobre el suelo y el asentamiento de la punta causado por las distintas cargas transmitidas al terreno a lo largo del fuste.

**d) Métodos experimentales.** Borland, Butler y Duncan (1966) para el caso de arcillas en Londres, consideran un comportamiento lineal del suelo. Kezdi (1964) determinó que para el eje de un área cargada circular cimentada a profundidad, empleando la ecuación para la tensión bajo una carga puntual, el asentamiento depende del diámetro del pilote, la tensión bajo la base del pilote, el módulo de compresibilidad del suelo y de tres factores de influencia. La Propuesta de Norma (1989) propone convertir la cimentación sobre pilotes en una cimentación ficticia con ancho en función del tipo de suelo y seguir la misma metodología que para una cimentación superficial donde se calculan los asentamientos por la expresión de sumatorias de capas que se propone de la Norma de Cimentaciones Superficiales.

En los tres primeros casos se considera que solo la carga en punta provoca asentamientos, mientras que la Propuesta de Norma trabaja con la carga total ( $Q_t$ ).

Trabajos realizados en este sentido [Ibáñez (1999)] demuestran la similitud de los resultados aplicando el método de Vesic (1977) y la Propuesta de Norma (1989).

MÉTODO	AUTOR	EXPRESIÓN
Métodos empíricos	Meyerhof	$S = \frac{D}{30 \cdot F}$
	Aschenbrenner y Olson	$S = 0.01 \cdot D$
Procedimientos elásticos	Vesic	$S = W_s + W_{pp} + W_{ps}$ $W_s = (Q_{punta} + Q_{fricción}) \cdot \frac{L}{A_p \cdot I_p}$ $W_{pp} = \frac{Q_{punta}}{D \cdot q_p} \cdot C_p$ $W_{ps} = \frac{Q_{punta}}{D \cdot q_p} \cdot C_s$
Métodos experimentales	Borland, Butler y Duncan	$S = 2 \cdot q \cdot db \cdot \frac{1 - \nu^2}{E_s} \cdot I_p$
	Whitaker y Cooke	$S = \frac{Kl \cdot qb \cdot db}{E_s}$
	Kezdi	$S = \frac{db \cdot qb}{E_s} \cdot \sqrt{1 + I_2 + I_3}$
	La Propuesta de Norma	$S = \frac{\sum_{i=1}^n H}{6} \cdot \varepsilon_s + 4 \cdot \varepsilon_c + \varepsilon_i$

Tabla 1.3

Para el cálculo del asiento absoluto de este tipo de cimentación, según la Propuesta de Norma Cubana (1998) se supone que el mismo será igual al que alcance una cimentación equivalente cuyas dimensiones y situación se muestra en la Figura siguiente:

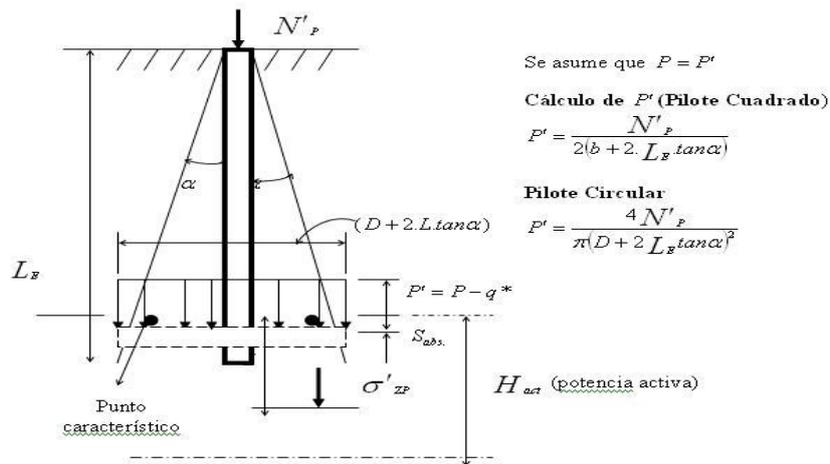


Figura 1.6. Cálculo del asiento de un pilote aislado resistente en fuste o resistente en fuste y en punta.

### 7.2 Asentamiento pilote en grupo.

Para el cálculo del asiento absoluto de pilotes en grupos, según la Norma Cubana (1989) se supone que el mismo será igual al que alcance una cimentación equivalente, cuyas dimensiones y situación se muestran en la Figura (1.7). El asiento absoluto de esta cimentación equivalente se determinará igual que el de una cimentación superficial. Cuando el espaciamiento entre pilotes sea mayor de  $D + 2 \cdot \tan \alpha$  se calculará el asiento como pilote y como grupo de pilote, tomándose el mayor de los asientos calculados para compararlo con el asiento absoluto límite.

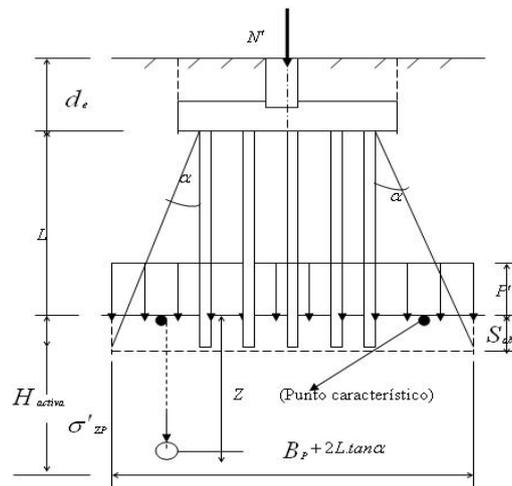


Figura 1.7. Cálculo de asentamientos de grupos de pilotes (Resistentes en fuste, punta ó ambos)

Una vez realizado el estudio de las expresiones para la determinación de las deformaciones podemos resumir que:

1. Existen diferentes criterios para la determinación de los asentamientos que se basan en expresiones teóricas o simplificaciones a soluciones más sencillas.
2. Cuando se cuenta con una detallada información de la hincada del pilote y las condiciones del lugar, se emplean metodologías con mayor grado de precisión en la determinación de la deformación del pilote.

### 1.8 Grupo de Pilotes. Eficiencia de Grupo

La eficiencia del grupo de pilotes ( $\xi$ ) es la relación entre la capacidad del grupo  $Q_{grupo}$ , y la suma de las capacidades del número de pilotes,  $n$ , que integran el grupo:

$$\xi = \frac{Q_{grupo}}{n \cdot Q_{pilote}} \quad \text{Exp. 1.51}$$

Producto de la construcción del pilote se puede afectar el terreno, de forma que se compacte extraordinariamente (arenas flojas y medias) o que disminuya apreciablemente su consistencia (arcillas sensibles). Por esta razón varios autores [Jiménez(1986), Paulos y Davis (1980), Lee (1991)] plantean que la eficiencia de grupo en arcillas es de 0.8 y del orden de 1,5 en arenas medias con igual

espaciamiento. La capacidad del grupo aumentará con la separación entre pilotes, mientras que la capacidad individual, en arcillas no aumenta.

La literatura consultada coincide en definir las siguientes invariantes a la hora de determinar la eficiencia del grupo depende de:

- El espaciamiento entre pilotes,
- El número de pilotes,
- El diámetro de los pilotes,
- La longitud de los pilotes,
- Las propiedades del suelo.

Para la obtención del valor de eficiencia de grupo, existe amplia bibliografía donde se expresan recomendaciones a partir de modelos y fórmulas empíricas. De acuerdo con el ensayo de modelos, Sowers (1977) expone que las fallas en grupos de pilotes en arcillas ocurren a un espaciamiento de  $1.75 \cdot D$  para grupos de 2 pilotes y  $2.5 \cdot D$  para grupos de 16 pilotes, estando la eficiencia  $\xi = 0.8 \sim 0.9$ . La discrepancia en cuanto a la forma de obtener la eficiencia de grupo es evidente y se explica por el hecho de que las fórmulas son resultados de experimentos y toman varios valores empíricos. Es interesante por lo tanto comprobar la eficiencia calculada con los resultados de los ensayos de modelos de pilotes. En arcillas, las fórmulas empíricas parecen estar sorprendentemente en un estrecho acuerdo para espaciamiento y número de pilotes. Para grupos de pilotes en arenas y gravas, la aplicación parece dudosa.

### 1.9 Estudio y Crítica de los Métodos para el Diseño Estructural de Pilotes

El pilote es un elemento alargado que puede calcularse como una columna. Hay sin embargo dos diferencias:

- La constricción que en el terreno produce el movimiento lateral disminuye mucho el peligro de pandeo, aún cuando el terreno sea muy blando. Un estudio cuantitativo de este fenómeno lleva a la conclusión de que y tan solo hay que tenerlo en cuenta en pilotes metálicos excepcionales, y en los casos en que el pilote se prolonga por fuera del suelo, para constituir por si mismo una columna o pilar.
- La segunda diferencia es que las cargas que se admiten para los pilotes en todas las normas y reglamentos que tratan específicamente de estas fuerzas, son más modestas que para estructuras normales. Esto se debe a que, en los pilotes (in situ) la calidad del hormigón, por las circunstancias que rodean la ejecución no puede garantizarse de la misma manera, y en cuanto a los pilotes prefabricados la hincados, el trato que reciben es tan dura, que puede provocar fisuras o comienzos de desagregación solo podían escapar de estos peligros los pilotes prefabricados en suelos prebarrenados

**Pilotes de madera:** Conviene aclarar que las cargas probables de diseño, están en función del material con el cual se construya el pilote. No debe usarse pilotes de madera, para cargas mayores de 250 kN por pilote. No se recomienda el empleo de pilotes de madera en suelos que no contengan agua, y siempre se debe de tener precaución de cortar el pilote a 0,30m por debajo del nivel del manto freático.

**Pilotes de Hormigón:** Para el caso de pilotes de hormigón debe tenerse presente reforzar la longitud de 1 a 2 m del pilote (dependiendo de su longitud total), tanto en la punta como en la cabeza, con un zunchado especial de acero (helicoidal), usándose en la zona de la punta aceros de  $\frac{1}{4}$ " como mínimo, con paso 0,05 como máximo. Este refuerzo especial ayudará a resistir los esfuerzos producidos por los impactos durante la hincada de los pilotes.

Cargas admisibles en pilotes de Hormigón.

De 24 a 35 kg por  $\text{cm}^2$  de área de hormigón, más 420 a 530 kg por  $\text{cm}^2$  de área de acero de refuerzo longitudinal, por tanto un pilote de hormigón de aproximadamente 0,3 x 03m, con su acero adecuado puede resistir hasta 500 kN

### **Pilotes Prefabricados:**

*Armadura Longitudinal:* Las armaduras longitudinales de un pilote de sección cuadrada se compone de cuatro barras del mismo diámetro, situadas en los ángulos de la sección, en el caso de pilotes de gran sección, se incrementa con cuatro barras suplementarias, situadas en el centro de las lados. Para pilote octogonal, las armaduras están formadas por ocho barras del mismo diámetro, situadas en los ángulos de la sección.

Para pilotes muy largos, se pueden emplear empalmes sin ganchos con las condiciones siguientes:

- Evitar situar todos los empalmes en la misma sección
- Evitar el empalme a una distancia de la cabeza igual a 10 veces el lado
- Dar a los empalmes una longitud igual a 50 diámetros de la barra.

Las armaduras longitudinales deben calcularse de forma que el pilote pueda además de resistir las fuerzas estáticas propias de la construcción, transportarse y puesta en obra. Para disminuir los esfuerzos producidos en el transporte se aumenta el número de puntos de suspensión.

El porcentaje de las armaduras longitudinales varía del 1 al 3 % (los reglamentos americanos recomiendan un 2% de la media). Para evitar el pandeo los aceros longitudinales, deben escogerse de diámetros grandes (16,20, 25, 32mm). La regla empírica siguiente establece la relación entre la longitud y el diámetro de la barra:

$$D = 0.0015 * L \text{ a } 0.002 * L$$

Referido al tema del diseño estructural de cimentaciones sobre pilotes, se consultaron además otras bibliografías destacándose Reinforced concrete analysis and design de S. Ray (1995) en su capítulo 7, Engineering and Design: Design of pile foundations de la Armada Americana (1991) en Capítulo 4, Foundation engineering handbook: design and construction with the 2006 international building code / Robert W. Day. 2006 Capítulo 5 y Curso aplicado de Cimentaciones, Rodríguez 1998 entre otros libros consultados. Para el caso de pilotes de hormigón y metálicos la norma AASHTO LRFD 2002 establece expresiones similares al diseño de columnas de hormigón armado y acero, variando los coeficientes de resistencia en función de la sollicitación actuante.

### **1.10 Tendencias actuales en el diseño de Cimentaciones sobre pilotes**

El estudio de las cimentaciones sobre pilotes, además de los aspectos aquí abordados abarca la problemática del efecto de la carga horizontal, la interacción pilote- encepado –suelo y el diseño estructural de la losa de cimentación. Actualmente se reporta en la bibliografía internacional un profundo análisis sobre la seguridad en el diseño (Libro LRFD del 2002). Desde el punto de vista teórico se reporta el uso de las curvas p-z y q-z para la estimación de la curva Carga – Deformación en pilotes sometidos a carga vertical y Horizontal respectivamente.

Se destaca además el uso de la computación como herramienta de diseño con el empleo de los métodos numéricos y el desarrollo de computadoras más potentes. La instrumentación durante el proceso de inca y la realización de pruebas de cargas también a tenido un alto desarrollo. El empleo de hojas de calculo en formato Mathcad y Excel también se ha extendido al diseño de cimentaciones sobre pilotes, como una herramienta de ayuda, lo que será abordado en el Capitulo 2 de este trabajo. Mencionar libros modernos o poner la tabla que esta en ingles.

En el desarrollo de los capítulos 2 y 3 se abordaran los temas relacionados con la seguridad en el diseño y otros aspectos como el efecto de la fricción negativa y el fallo en bloque.

### **1.11 Empleo de la computación en el diseño de Cimentaciones sobre Pilotes**

Referente al uso de programa profesionales varios autores (Yevenesu 2006, .Suarez 2007, Orlando University of Central Florida 2008 etc.) plantea la conveniencia de que los estudiantes, en especial aquellos de cursos de post grado, escriban sus propios programas ya que la mejor manera de entender cabalmente un método de análisis y diseño, es programarlo. Además la amplia difusión de programas en lenguaje de alto nivel (como por ejemplo, Matlab, Maple, Mathematica, Mathcad) facilita mucho la programación, si se compara con lo que se impartían en pregrado como Pascal, etc.

Aquellos que argumentan en contra de que se enseñe la programación de los métodos de análisis y diseño afirman que es imposible y sin sentido tratar de competir con programas comerciales sofisticados y poderosos que llevaron años en desarrollarlos y que tienen como respaldo a un ejército de ingenieros y programadores. Este argumento sugiere que es más efectivo dedicar tiempo y esfuerzo a entender mejor las capacidades de estos programas y a considerar sus múltiples opciones. En algo en que ambos, los propulsores y los escépticos del uso de programas de computadora, están de acuerdo es en el famoso aforismo que en inglés se enuncia como “garbage-in, garbage-out”. En otras palabras, si se le entra “basura” al programa, lo que éste entrega también es “basura”.

Para facilitar el uso de programas comerciales para fines didácticos, sería de gran ayuda que los programas entreguen resultados parciales, lo que parece ser una tendencia actual. No obstante, la gran mayoría de los programas tienen la característica de lo que se conoce como “caja negra” (“black box”). En la búsqueda en internet de programas para el diseño de cimentaciones sobre pilotes en específico, podemos señalar:

<b>Nombre del Programa</b>	<b>Fabricante</b>	<b>Características</b>
<b>AIIPIle</b>	CivilTech Software	Diseño geotécnico de pilotes. Incluye gráficos con resultados parciales. Incluye varias normativas
<b>Geo 5 Piles</b>	FineSoftware	Diseño geotécnico y estructural de Pilotes. Norma CSN – 73 1002.
<b>GGU - AXPILE</b>	GUU - Software	Diseño geotécnica de pilotes. Norma DIN
<b>PileCap</b>	Engineering Software Research Center	Diseño geotécnico y estructural de Pilotes.
<b>Spile</b>		Diseño geotécnico de Pilotes. Basado en los métodos y ecuaciones propuestas por: Nordlund (1963-1979), Thurman (1964), Meyerhof (1976), Cheney y Chassie (1982), y Tomlinson (1978-1985)
<b>FECP</b>		Diseño geotécnico de Pilotes. Basado en la utilización de fórmulas empíricas para el cálculo de la capacidad de carga de pilotes individuales: Aoki-Velloso (1975), P.P. Velloso (1982), Meyerhof (1976) y Decourt-Quaresma.
<b>SPTSP</b>		Basada en las "Normas para Uso en la Investigación de Suelos y Diseño de Cimentaciones para Estructuras de Puentes en el Estado de Florida", John Schmertmann (1967) and. Michael McVay et al, en 1994.
<b>SHAFT</b>		Basado en el manual de la Federal Highway Administration del U.S Department of Transportation (FHWA) por Reese, L y O'Neill, M. (1988) y O'Neill, M.W, et al (1996).

Tabla XXX

En este trabajo de diploma específicamente se conformaran ayudas de diseño en programas como Excel y Mathcad. Este software facilita la solución de problemas numéricos complejos. En términos numéricos, nos permite gran flexibilidad en la manipulación de datos. Su interface representa la última generación de la tecnología Windows, con menús claramente organizados y barras de herramientas para un acceso inmediato a los lineamientos que cualquier persona que tenga conocimiento de algún programa de Office, podrá utilizar de una manera cotidiana. Dentro de sus ventajas, se tiene que esta aplicación permite, en una misma hoja de trabajo, incluir cálculos, textos y programas gráficos. Automáticamente busca y convierte las unidades y opera usando escalares, vectores o matrices. También permite insertar datos o procedimientos realizados en otras aplicaciones. En el capítulo 2 se profundizará en esta temática.

## 1.12 Conclusiones

Después de analizada los métodos para el diseño de cimentaciones sobre pilotes arribamos a las siguientes conclusiones parciales:

1. Existe un gran número de expresiones y criterios para el diseño geotécnico de cimentaciones sobre pilotes basadas en diferentes criterios e hipótesis.
2. Para el cálculo de las deformaciones la propuesta de norma cubana (1989) propone llevar el pilote a un cimiento equivalente, solución aceptada internacionalmente.

3. La propuesta de Norma(1989) se encuentra desactualizada en algunos temas como los pilotes trabajando a fricción en roca y el calculo del Coeficiente de capacidad de carga  $N_q$
4. Para el diseño estructural del pilote se utilizan las expresiones clásicas de diseño, teniéndose en cuenta además los aspectos constructivos como el izaje y la hincada del pilote.
5. Existen un gran número de softwares para el diseño de cimentaciones sobre pilotes, en base a diferentes normativas enfocado al diseño geotécnico o estructural.
6. Es una tendencia actual el uso de hojas de cálculo en la ingeniería Civil y en todos los procesos de diseño.