



## **Trabajo de Diploma**

**TÍTULO: Ensayos de carga en cimentaciones sobre pilotes.**

**Autor: Moidel Rodríguez Padrón.**

**Tutor: Dr. Ing. Luis O. Ibáñez Mora.**

**Curso 2011 - 2012**

## Índice

Índice .....	2
<b>Introducción. ....</b>	<b>i</b>
Problema Científico.....	i
Objeto de Investigación.....	i
Campo de Acción.....	i
Objetivos General.....	ii
Objetivos específicos.....	ii
Hipótesis de la investigación.....	ii
Novedad Científica.....	ii
Aportes.....	ii
Definición de la población y la muestra .....	iii
Métodos y técnicas empleadas.....	iii
Estructura de los Capítulos.....	iii
Resultados esperados.....	iii
<b>Capítulo 1. Estado del arte de las cimentaciones sobre pilotes. ....</b>	<b>1</b>
1.1 Resumen:.....	1
1.2 Introducción:.....	1
1.3 Estudio de los métodos para la determinación de la capacidad de carga en pilotes.....	2
1.3.1 Métodos Estáticos, basados en la teoría de la plasticidad.....	2
1.3.2 Determinación del aporte en punta para pilotes apoyados en suelos: .....	3
1.3.3 Determinación del aporte en punta para pilotes apoyados en roca.....	7
1.3.4 Determinación del aporte a fricción para pilotes apoyados en suelo.....	9
Determinación del aporte a fricción para pilotes empotrados en roca.....	13
1.3.2 Métodos dinámicos.....	15
1.3.3 Ensayos de penetración.....	17
1.3.4 Pruebas de carga.....	18
1.3.4.1 Determinación de la capacidad de carga a través de ensayos de carga.....	19
1.4 Modelación por Elementos Finitos de cimentaciones en pilotes.....	22
1.5 Conclusiones del capítulo.....	24

<b>Capítulo 2. Ensayo de carga en pilotes. Utilización de correlaciones. ....</b>	<b>26</b>
2.1 Resumen:.....	26
2.2 Introducción:.....	26
2.3 Métodos dinámicos para la determinación de la capacidad de carga en pilotes. ....	27
2.4 Recomendaciones para la realización de ensayos de carga.....	33
2.5 Correlaciones para la determinación de la capacidad de carga en pilotes. ....	38
2.5 Conclusiones del capítulo. ....	46
<b>Capítulo 3. Comparación de resultados experimentales con la modelación y ensayos de carga reales. ....</b>	<b>47</b>
3.1 Resumen.....	47
3.1 Introducción.....	47
3.3 Recomendaciones para la modelación de cimentaciones sobre pilotes utilizando métodos numéricos.....	47
3.4 Empleo del Flac para la modelación de Cimentaciones sobre pilotes. ....	50
3.5 Comparación de los resultados obtenidos empleando el Programa Flac con los encontrados manejando otros softwares.....	65
3.6 Validación de la metodología propuesta para el uso del programa Flac a través de la modelación de un pilote y comparación de resultados de la realización de una prueba de carga.....	67
3.7 Conclusiones del capítulo. ....	68
Conclusiones Generales.....	70
Recomendaciones. ....	71
Bibliografía.....	72

*Pensamiento*

*La ciencia es el gran antídoto contra el veneno del entusiasmo y la superstición.*

*Adam Smith*

# *Agradecimientos*

*Le agradezco:*

*A mi tutor, el Dr. Ing. Luis Orlando Ibáñez Mora por la ayuda  
brindada.*

*A mi familia, por creer en mí y estar siempre presente.*

*A mis amigos, que no necesito nombrar porque ellos saben quiénes  
son.*

*A los profesores que han sabido guiarme por el camino del  
conocimiento.*

*A todos los que de alguna manera contribuyeron a hacer realidad  
este sueño.*

*A todos; Muchas Gracias.*

*Dedicatoria*



*Dedicado:*

*A toda mi familia, en especial a:*

*A mi mamá y a mi papá por estar siempre a mi lado y haber hecho  
de mí, la persona que hoy soy.*

*A mi hija, por hacerme reír en los momentos difíciles.*

*A mi mujer, por todo el apoyo que me ha dado.*

*Resumen*

## **Resumen.**

En este trabajo diploma se presenta una metodología para realizar la modelación de pilotes utilizando el programa computacional FLAC, basado en el método numérico de las Diferencias Finitas. Además se hace un análisis comparativo de diferentes normativas para la realización de ensayos de carga en cimentaciones sobre pilotes, con lo cual se establece para el caso de Cuba algunas recomendaciones en el desarrollo de dichas pruebas.

Para ello se efectúa una búsqueda bibliográfica relacionada con la aplicación de métodos numéricos para realizar la modelación de cimentaciones profundas, basándonos fundamentalmente en el programa antes mencionado. Así como los planteamientos de diferentes autores para llevar a cabo una prueba de carga estática a pilotes.

El resultado final constituye un material de interés práctico profesional y de utilidad didáctica para la solución de problemas ingenieriles, al presentar una secuencia de pasos que permitirá para el caso de cimentaciones sobre pilotes determinar la capacidad de carga, lo que constituye para estudiantes y proyectistas otra herramienta a emplear en favor de lograr un mejor entendimiento del funcionamiento de un pilote. También se presentan recomendaciones para la ejecución de pruebas de carga a pilotes, en el caso de encontrarse instalados en suelos cubanos, que posibilitarán un proceso de ensayo mucho más preciso y que además tenga en cuenta las tendencias internacionales referidas a este tema.

*Introducción.*

## **Introducción.**

Los pilotes son elementos que se utilizan para lograr cimentaciones seguras en terrenos difíciles, esta forma de construir comenzó a emplearse hace alrededor de 1200 años, en Europa, y en la actualidad se aplica cada vez más para resolver problemas ingenieriles. En Cuba el pilotaje se utiliza generalmente en zonas costeras y en lugares donde los estratos superiores son altamente compresibles y demasiado débiles para resistir la carga transmitida por la edificación. Los pilotes son los encargados de realizar la transmisión de cargas de la estructura al suelo, funcionan de formas diferentes dependiendo del tipo de carga y a la profundidad que se encuentre estrato resistente. Esta variante de cimentaciones profundas es generalmente mucho más costosa y difícil de construir que las superficiales [Das (1999)].

En los últimos tiempos en la universidad “Marta Abreu de las Villas”, específicamente en la Facultad de Construcciones se ha laborado en la revisión de cimentaciones sobre pilotes, como son los casos de los puertos del Mariel y Cienfuegos, en obras realizadas en zonas turísticas como Varadero y Cayo Santa María, por solo citar algunos ejemplos. La tendencia contemporánea en el sector de la Ingeniería Civil está encaminada a confeccionar hojas de cálculo que permitan comprender las diferentes etapas del diseño de una construcción. La presente investigación pretende obtener correlaciones entre pruebas de carga a escala real efectuadas a cimentaciones sobre pilotes y resultados obtenidos mediante la modelación de dichas cimentaciones utilizando programas computacionales basados en métodos numéricos, como herramienta computacional para la modelación de las cimentaciones sobre pilotes, se empleará el programa Flac, el cual se sustenta en el Método de las Diferencias Finitas (MDF), lo que es novedoso en Cuba ya que en la mayoría de los casos se utilizan programas apoyados en el Método de Elementos Finitos (MEF).

## **Problema Científico.**

El problema científico de nuestra investigación consiste en:

¿Reproduce la modelación de cimentaciones sobre pilotes, utilizando programas de computación, el comportamiento estructural de la forma más exacta posible?

## **Objeto de Investigación.**

El objetivo de esta investigación lo constituyen las cimentaciones sobre pilotes.

## **Campo de Acción.**

El campo de acción de este trabajo de diploma lo establecen los ensayos de carga en cimentaciones sobre pilotes.

## **Objetivos General**

Para el desarrollo de la investigación se consideró el siguiente objetivo general: Establecer correlaciones entre los ensayos de carga a escala real y modelos numéricos del comportamiento de cimentaciones sobre pilotes.

## **Objetivos específicos.**

Para darle cumplimiento al objetivo general anteriormente enunciado se desarrollaron los siguientes objetivos específicos:

1. Realizar una búsqueda bibliográfica relacionada con los ensayos de carga en pilotes, específicamente en la Norma Cubana (NC), las recomendaciones para la realización del ensayo carga estático.
2. Estudiar los parámetros de la curva carga deformación, así como forma determinar de capacidad de carga de un pilote, empleando tanto resultados de ensayos de penetración (NSPT) como aplicando Métodos Dinámicos.
3. Establecer una metodología que permita realizar la modelación de pilotes utilizando el programa computacional FLAC.
4. Comparar los resultados numéricos logrados mediante la modelación por MDF y resultados reales de ensayos de carga.

## **Hipótesis de la investigación.**

Utilizando la modelación matemática basada en métodos numéricos y los resultados de ensayos de carga a escala real se pueden resolver diferentes problemáticas que se presentan en cimentaciones sobre pilotes, entre las que se halla la capacidad de carga de la cimentación, lo cual podrá mejorar los procedimientos de diseño.

## **Novedad Científica.**

Se destaca como novedad científica del trabajo el empleo del Método de las Diferencias Finitas (MDF) para la modelación del comportamiento de cimentaciones sobre pilotes. Por otra parte se combinarán los resultados de ensayos de carga a escala real con las técnicas de modelación, lo que permitirá establecer correlaciones útiles para el análisis de los ensayos de carga en pilotes.

## **Aportes.**

### **➤ Aporte científico**

Se establece un procedimiento que permite modelar una cimentación sobre pilotes, cuyos resultados se acerquen a los obtenidos a partir de la correlación por métodos numéricos y de pruebas de carga adecuadas a los suelos cubanos.

### **➤ Aporte Práctico**

Posibilidad de realizar los ensayos de carga de una forma más efectiva y precisa, posibilitando la obtención de resultados más exactos.

## **Definición de la población y la muestra**

La población de este trabajo será los ensayos de carga realizados a cimentaciones sobre pilotes en Cuba. Como muestra utilizaremos los ensayos de carga realizados a la cimentaciones de las obras, Marina Gaviota y El Puerto Mariel, dicha muestra se tomó utilizando un método no probabilístico puesto que hay necesidad que sea estudiada las cimentaciones antes mencionadas.

## **Métodos y técnicas empleadas.**

- **Método analítico-sintético:** Existirá a lo largo de todo el trabajo de diploma, durante el procesamiento de la información bibliográfica y el arribo a conclusiones.
- **Método Inducción - deducción:** Este método al final de la investigación nos permitirá alcanzar una visión más desarrollada y profunda del origen, progreso y transformación de los fenómenos para poder generalizar o particularizar sobre los ensayos de carga en cimentaciones sobre pilotes.

## **Estructura de los Capítulos.**

### **Capítulo 1. Estado del arte de las cimentaciones sobre pilotes.**

En esta sección se realizará el estudio bibliográfico y un análisis del estado del arte de la temática. En este capítulo se exponen los antecedentes y las tendencias contemporáneas a escala mundial referidas a las diferentes formas que existen para determinar la capacidad de carga en cimentaciones sobre pilotes.

### **Capítulo 2. Ensayo de carga en pilotes.**

En este capítulo se realizará un estudio de las diferentes normativas vigentes en el mundo para realizar los ensayos de carga en cimentaciones sobre pilotes, sirviendo para plantear recomendaciones en la realización de dichos ensayos a pilotes bajo las condiciones cubanas. Además en este capítulo se logra a través de métodos dinámicos y correlaciones a partir de ensayos de penetración, determinar con éxito la capacidad de carga de cimentaciones sobre pilotes para el caso de Cuba.

### **Capítulo 3. Comparación de los resultados experimentales con la modelación y ensayos de carga reales.**

En este apartado se establecerá una metodología para realizar la modelación de pilotes con carga axial simétrico utilizando el programa computacional FLAC. Además se realiza una comparación entre los resultados de la modelación de un pilote utilizando el programa antes mencionado y los resultados de ensayos de carga a escala natural.

## **Resultados esperados.**

Se contará con una metodología para realizar pruebas de carga en cimentaciones sobre pilotes, de forma más efectiva y precisa. Además se dotarán a los proyectistas con una herramienta para efectuar la modelación de este tipo cimentación utilizando el programa computacional FLAC.

## **Capítulo 1. Estado del arte de las cimentaciones sobre pilotes.**

### **1.1 Resumen:**

En este capítulo se realiza un estudio métodos utilizados para determinar la capacidad de carga en cimentaciones sobre pilotes. Hacemos una recopilación de expresiones basadas en la teoría de la plasticidad, para determinar el aporte en punta, y por fricción de pilotes apoyados tanto en suelo, como en roca. Se muestran las principales características de los métodos dinámicos empleados en el mundo para intentar determinar la capacidad de carga de un pilote, particularizando en la norma cubana para la realización de estas pruebas. Se establecen las tendencias actuales referentes a los ensayos de penetración, además se estudiaron expresiones que proponen diferentes autores, que permitirán realizar correlaciones usando estos métodos con la carga que es capaz de soportar un pilote antes de producida la falla. En este apartado se hace un estudio referente a las pruebas de carga estáticas, señalando sus ventajas y desventajas, igualmente se consultó la Norma Cubana vigente (NC 54-265- 1984) para la ejecución de dichas pruebas.

### **1.2 Introducción:**

La capacidad de carga de una cimentación sobre pilotes depende de forma general, de la resistencia por fricción lateral en el fuste del elemento y de la resistencia que se genera en la punta del mismo. En obras complejas o de gran importancia donde exista el tipo de cimentación antes mencionada, es necesario realizar pruebas de carga, para garantizar que estas cumplen los requerimientos fijados en el proyecto. El máximo beneficio de los ensayos de carga “in situ”, se alcanza cuando los pilotes ensayados son aquellos cuyo comportamiento se quiere conocer, pero el ensayo sobre estos elementos de la obra, no permite alcanzar la carga de rotura. Aunque las pruebas de carga emiten los resultados más precisos, existe gran diversidad de métodos que pueden aplicarse con el fin de estimar la carga que es capaz de tomar una cimentación. Por otra parte, las fórmulas de hincado desarrolladas tratan de relacionar la capacidad portante de un pilote con su resistencia al hincado. Aunque actualmente desacreditadas por muchos ingenieros, las fórmulas de hincado todavía se utilizan en el sitio, como una verificación de las predicciones de diseño utilizando la mecánica de suelos. Las capacidades de carga en pilotes determinadas en base a las fórmulas dinámicas no son siempre confiables y deben apoyarse en la experiencia geológica local por otro tipo de métodos de predicción.

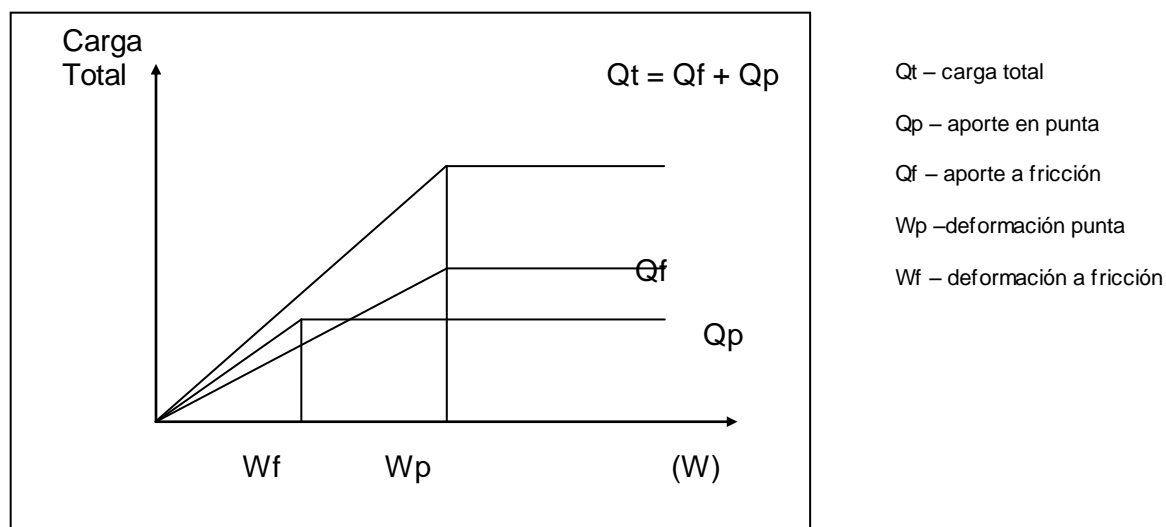


### 1.3 Estudio de los métodos para la determinación de la capacidad de carga en pilotes.

#### 1.3.1 Métodos Estáticos, basados en la teoría de la plasticidad.

Las expresiones estáticas están fundamentadas en principios teóricos y ensayos de carga, estas fórmulas intentan determinar la capacidad de carga que resiste un pilote o grupo de estos en el medio (suelo). Diferentes autores, entre los que se encuentran Sowers (1977), Juárez (1975), Jiménez (1986) (1994), L' Herminier (1968) coinciden al exponer que la capacidad de carga de una cimentación está determinada por la suma de la resistencia por punta y la resistencia por fricción lateral a lo largo del fuste del pilote en el momento de la carga máxima.

Es de señalar que la carga máxima o de falla no necesariamente es igual a la suma de la carga en punta más la carga por fricción lateral, ya que puede ocurrir que no se movilicen simultáneamente la resistencia en punta y la fricción lateral en las diferentes secciones del fuste del pilote. Ver figura 1.1



**Figura 1.1 Mecanismo de transferencia de carga en el pilote.**

Entre los métodos estáticos se mencionan los trabajos de Sowers (1977), Meyerhof (1976), Juárez (1975), Jiménez (1986) (1994) y L' Herminier (1968), dentro de los cuales esencialmente el aporte en punta se obtienen de un análisis similar al de Meyerhof de capacidad de carga para las cimentaciones superficiales; y el aporte a fricción depende del mecanismo de falla que se adopte en la cara del pilote.

La capacidad de carga de pilotes apoyados en suelo se puede expresar de forma genérica de la siguiente manera:

$$Q_t = Q_p + Q_f$$

Exp 1.1

Dónde:

$Q_p$  – es el aporte en punta

$Q_f$  – es el aporte a fricción

### **1.3.1. a. Determinación del aporte en punta para pilotes apoyados en suelos.**

El aporte en punta de un pilote apoyado en suelo puede enunciarse de la forma siguiente:

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

Dónde:

$A_p$  – área de la punta del pilote.

$q_0$  – resistencia en punta.

La forma en que un pilote resiste en punta es similar a la forma en que lo hace una cimentación superficial enterada profundamente, por lo que la resistencia en punta de un pilote se puede escribir de la siguiente forma:

$$q_0 = \frac{B \cdot \gamma}{2} \cdot N_\gamma + C \cdot N_c + q' \cdot N_q \quad \text{Exp 1.2}$$

Esta expresión la obtuvo por vez primera Terzaghi (1943) y mejorada por Meyerhof (1951). Para el caso de pilotes, en que B es pequeña, frecuentemente se descarta el primer término [Sowers (1977)]:

$$q_0 = C \cdot N_c + q' \cdot N_q \quad \text{Exp 1.3}$$

C - Cohesión del suelo que soporta la punta del Pilote.

$q'$  - Esfuerzo vertical efectivo al nivel de la punta del pilote.

$N_c$  y  $N_q$  - Factores de capacidad de carga.

Autores han trabajado en la determinación de factores de carga, entre los que podemos mencionar Terzaghi (1943), De Beer (1965) y Caquot – Krissel (1969).

En la actualidad se destacan enfoques para la determinación del aporte en punta de un pilote, entre los que se encuentran:

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

$$\text{Plantea, } Q_{\text{punta}} = A_p \cdot q_{p'} \quad \text{Exp 1.4}$$

Para suelos Cohesivos (C):

$$q_p = C_u \cdot N_c \cdot d_{sc}$$

Exp 1.5

$N_c$  - 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.

Para suelos  $\phi$ .

$$q_p' = N_q \cdot d_{sq} \cdot q'$$

Exp 1.6

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

$N_q$  - factor de la capacidad de carga, función de  $\phi$ .

$d_{sq}$  - 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  $q' = Z_c \cdot \gamma$ . En esta normativa el valor de  $Z_c$  se establece en función de la relación diámetro y ángulo de fricción interno del suelo. Los estudios teóricos hechos por Vesic (1977), indican que la profundidad  $Z_c$  es función de la compacidad relativa ( $D_r$ ). Para  $D_r < 30\%$   $Z_c = 10 \cdot D$ , para  $D_r > 70\%$ ,  $Z_c = 30 \cdot D$

### **Miguel León (1980):**

Plantea:  $Q_{punta} = A_p \cdot q_p'$

Exp 1.7

Para suelos friccionales ( $\phi$ ).

$$q_p = q' \cdot N_q$$

Exp 1.8

$N_q$  - factor de capacidad de carga función de  $\phi$  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):

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

Exp 1.9

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"

$$Q_{punta} = A_p \cdot C_u \cdot N_c$$

Exp 1.10

$N_c$  - ídem al visto anteriormente.

$C_u$  – Cohesión no drenada del suelo.

**Jiménez (1986):**

$$Q_{punta} = A_b \cdot q_p$$

Exp 1.11

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

Exp 1.12

$N_{cd}$  - 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. Queda por validar el comportamiento del aporte en punta para suelos cohesivos y el mecanismo de falla en suelos friccionales, así como el efecto de la profundidad y la forma.

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

**Fórmula de Meyerhof (1976):**

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

Exp 1.13

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

La expresión mostrada es análoga a la usada para determinar capacidad de carga en cimentaciones superficiales, la diferencia que los factores  $N_c$ ,  $N_q$ ,  $N_\gamma$  se obtienen para una cimentación profunda, tienen en cuenta la profundidad dentro del estrato resistente y el efecto de forma.

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

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

Exp 1.14

$S_q$ ,  $S_c$  - 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.

Autores como [Bowles (1984), Herminier (1968)] encierran los factores de profundidad y forma, con los coeficientes de capacidad de carga, dando directamente la carga de hundimiento por la punta a suficiente profundidad mediante la expresión:

$$Q_{\text{punta}} = A_p (q N_q + C N_c) \quad \text{Exp 1.15}$$

En la obtención de los valores de  $N_c$  y  $N_q$  se pueden mencionar los trabajos realizados por DeBeer (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.

**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:

$$Q_{\text{punta}} = A_p \cdot q_0 \quad \text{Exp 1.16}$$

$$q_0 = C \cdot N_c + P' \cdot N_q + \gamma \cdot d_b \cdot N_\gamma \quad \text{Exp 1.17}$$

$C_u$  – 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).

**Ramón Barbey Sánchez:**

$$Q_{\text{punta}} = A_p [C \cdot N_c + q' \cdot (N_q - 1)] \quad \text{Exp 1.18}$$

**R. L. Herminier (1968):**

$$Q_{\text{punta}} = A_p \cdot (1.3 \cdot C \cdot N_c + \gamma \cdot D \cdot N_q) \quad \text{Exp 1.19}$$

**Bowles (1984):**

$$Q_{\text{punta}} = A_p \cdot (1.3 \cdot C \cdot N_c + \eta \cdot \gamma \cdot L (N_q - 1) + 0.5 \cdot B \cdot N_\gamma) \quad \text{Exp 1.20}$$

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

Todas las expresiones que han sido presentadas, tienen una forma similar a la expresión de capacidad de carga deducida por Meyerhof(1951), la diferencia entre cada una de estas radica en la propia superficie de falla que cada autor propone, así como la forma de contemplar la profundidad dentro del estrato resistente y la forma del pilote. Por lo que los enfoques para la determinación de la capacidad de carga en cimentaciones sobre pilotes proponen vías diferentes para determinar los factores de carga.

### 1.3.1. b. Determinación del aporte en punta para pilotes apoyados en roca.

En ocasiones se hincan pilotes hasta un estrato de roca. En tales casos, el ingeniero debe evaluar la capacidad de carga de la roca. La resistencia unitaria última de punta en roca es según:

#### Goodman (1980)

$$q_p = q_u(N_\phi + 1) \quad \text{Exp 1.21}$$

Dónde:

$$N_\phi = \tan^2(45 + \phi/2) \quad \text{Exp 1.22}$$

$q_u$ : resistencia a compresión no confinada de la roca

$\phi$ : ángulo de fricción drenado

La resistencia a compresión no confinada de la roca se determina por medio de pruebas en el laboratorio sobre especímenes de roca obtenidos durante investigaciones de campo. Sin embargo, debe procederse con extremo cuidado al obtener el valor apropiado de  $q_u$  porque los especímenes de laboratorio son usualmente pequeños en diámetro. Conforme el diámetro del espécimen crece, la resistencia a compresión no confinada decrece, lo que se denomina “efecto de escala”.

$$q_{u(diseño)} = \frac{q_{u(lab)}}{5} \quad \text{Exp 1.23}$$

En las tablas 1.1 y 1.2, se dan las resistencias típicas a compresión no confinadas de rocas obtenidas mediante ensayos de laboratorio, así como los valores típicos del ángulo de fricción en rocas.

Tabla 1.1. Resistencia típica a compresión no confinada de rocas		
Tipo de roca	$q_u$ (lb/pulg <sup>2</sup> )	$q_u$ (MN/m <sup>2</sup> )
Arenisca	10000 – 20000	70 – 140
Caliza	15000 – 30000	105 – 210
Lutita	5000 – 10000	35 – 70
Granito	20000 – 30000	140 – 210
Mármol	8500 – 10000	60 – 70

Tabla 1. 2. Valores típicos del ángulo de fricción, $\phi$ , en rocas	
Tipo de roca	Ángulo de fricción, $\phi$ (grados)
Arenisca	27 – 45
Caliza	30 – 40
Lutita	10 – 20
Granito	40 – 50
Mármol	25 – 30

### Propuesta de Norma Cubana

La Norma Cubana establece para la resistencia en punta de los tipos de pilotes: hincados, encamisados, rellenables y perforadores, los cuales se apoyan en suelos rocosos o poco compresibles ( $E_o > 100000$  kPa) la fórmula:

$$Q^*_v = R^* \cdot A_p \quad (\text{kN}) \quad \text{Exp. 1.24}$$

Dónde:

$A_p$ : área de apoyo del pilote ( $\text{m}^2$ ) que se asume para los casos de pilotes de sección transversal constante e igual al área neta de la sección transversal para pilotes encamisados, huecos, cuando estos no son rellenados con hormigón. Si hay relleno con hormigón será igual al área bruta de la sección transversal, siempre que dicho relleno alcance una altura mayor o igual a  $3D$  (b).

$R^*$ : resistencia a compresión no confinada de los núcleos de roca (kPa), que se asume de la forma siguiente:

(\*) Para pilotes encamisados, perforados o de huecos rellenados de hormigón apoyados en suelos rocosos se determina por la expresión siguiente:

$$R^* = \frac{Ksq \cdot \bar{R}}{\gamma_{gR}} \cdot dr \quad (\text{kPa}) \quad \text{Exp. 1.25}$$

Dónde:

$\bar{R}$ : Valor promedio de la resistencia límite a compresión axial del suelo rocoso en condiciones de humedad natural (en relación con el diámetro: altura de la muestra igual a dos, 2).

$\gamma_{gR}$ : coeficiente de seguridad para los suelos igual a  $\gamma_{gR} = 1.6$ .

$$dr = \left( 1 + 0.4 \frac{LE}{D} \right) \leq 3.5 \quad \text{Exp. 1.26}$$

LE: profundidad de embebimiento del pilote obturado en la roca. Se asume igual a la profundidad de empotramiento (m).

D: diámetro exterior de empotramiento en el suelo rocoso.

En la tabla 1.3, que se muestra a continuación se presentan los valores de Ksq en función de la calidad de la roca.

<b>Tabla1.3. Valores de Ksq.</b>		
Valores de RQD	Espaciamiento de las discontinuidades (m)	Ksq
25< RQD ≤ 50	0.06-0.2	0,1
50< RQD ≤ 75	0.2-1.6	0,3
75< RQD ≤ 90	1.6-2.0	0,75
90< RQD ≤ 100	>2.0	1

RQD: índice de calidad de la roca, se define como el porcentaje de recuperación de pedazos de núcleos de rocas mayores de 10cm de longitud con respecto a la longitud del sondeo.

RQD= Longitud de los pedazos de núcleo de 10cm / longitud del sondeo.

### **1.3.1. c. Determinación del aporte a fricción para pilotes apoyados en suelo.**

El aporte a fricción que se genera en las caras adyacentes al pilote producida por la falla fuste–suelo o suelo-suelo, la primera está determinada por la adherencia entre las dos superficies en contacto y la segunda determinada por la resistencia al esfuerzo cortante del suelo inmediatamente adyacente al pilote. Dicho aporte a fricción puede expresarse de forma genérica como:

$$Q_{\text{fricción}} = f (P_p, L_p, f_o)$$

Dónde:

$P_p$  – perímetro del pilote.

$L_p$  – Longitud del pilote.

$f_o$  – fricción unitaria del estrato.

En el caso de pilotes instalados en arcillas, se ha utilizado el método [Delgado (1999)] para la determinación de la fricción unitaria, definiendo un factor de adherencia ( $\alpha$ ), como la relación entre la adherencia ( $C_a$ ) y la resistencia al corte no drenado ( $C_u$ ), como se muestra:

$$\alpha = \frac{C_a}{C_u}$$

Teniendo en cuenta la proporcionalidad inversa que existe entre  $\alpha$  y  $C_u$ , se han desarrollado tentativas para identificar esta dependencia como una correlación.



En la actualidad se destacan enfoques para la determinación del aporte por fricción de un pilote, entre los que se encuentran:

**La Propuesta de Norma (1989)**

Se establece el mecanismo de falla en función del tipo de suelo, estableciendo de forma general:

$$Q_{fricción} = P_p \cdot \sum Li \cdot f_{oi} \quad \text{Exp 1.27}$$

Para suelo C. (Falla suelo - suelo)

$$f_{oi} = \alpha \cdot C_u \quad \text{Exp 1.28}$$

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

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

Para suelo  $\varphi$  (Falla pilote - suelo)

$f_{oi}$  - función de  $(\beta, q_{fm})$ , donde  $\beta$  es un coeficiente de resistencia a fricción en el fuste, que puede ser determinado por la siguiente expresión:

$$\beta = K_s \cdot m \cdot \tan \varphi \quad \text{Exp 1.29}$$

$m$  - 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.

**Miguel León (1980):**

$$Q_{fricción} = P_p \sum li \cdot f_o \quad \text{Exp 1.30}$$

Para suelos friccionales ( $\varphi$ )

$f_o$  - 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 (C):

$$f_o = \alpha \cdot C_u$$

En este caso el valor de  $f_o$ , está en función del valor de  $C_u$ , de la forma de instalación y del empuje que se genere.

**Menzembach (1968a):**

En suelos Cohesivos

$$Q_{\text{fricción}} = P_p \cdot \sum \alpha \cdot C_u$$

Exp 1.31

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

**Jiménez (1986):**

$$Q_{\text{fricción}} = P_p \cdot \sum L \cdot f_s$$

Exp 1.32

$$f_s = \alpha \cdot C_u$$

Exp 1.33

$\alpha$  - factor de adhesión o relación entre la resistencia a corte sin drenaje. Rogel (1987) coincide 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 la muy conocida de Vesic (1977).

$$f_s = k_o \cdot \sigma_v \cdot \tan \delta$$

Exp 1.34

$k_o$  - 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 ( $k_o$ )?. Tanto Miguel León como 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 como se analizó. Resultados más recientes Ibañez (2001), Das (2001) proponen tomar valores intermedios entre el empuje pasivo y activo, en la tabla 1.4, que se muestra a continuación se muestran coeficientes de empuje propuestos por diferentes autores.

<b>Tabla1.4. Valores de coeficientes de empuje propuestos por diferentes autores.</b>		
Autor.	Expresión.	Valor.
Das (1999).	$1 - \text{sen}(\phi)$	0.66 ~ 0.36
Mayne y Kulhway (1991)	$(1 - \text{sen}(\phi)) \cdot \text{OCR}^{\text{sen}(\phi)}$	0.69 ~ 0.54
American Petroleum Institute . API (1984)	-	1.00 ~ 0.80

Modelo	$k_s = (1 - \text{sen}(\varphi)) \cdot \frac{\text{sen}(\varphi)}{\text{sen}(25)}$	0.63 ~ 0.54
--------	--	-------------

A continuación se analizan otras expresiones utilizadas por el enfoque tradicional para determinación del aporte a fricción. De forma genérica pueden expresarse de la siguiente manera:

$$Q_{\text{fricción}} = P_p \cdot \Sigma L \cdot f_s$$

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

### La fórmula de Meyerhof (1976)

Establece la siguiente expresión en función del mecanismo de falla que se genere en las caras del pilote:

$$Q = \text{fricción} = P_p \cdot \Sigma l_i \cdot f_{oi} \quad \text{Exp 1.35}$$

Dónde:

$f_{oi}$  – 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. Exp 1.36

$f_{oi} = C_a + \sigma_h \cdot \tan \delta$  para la falla suelo – pilote. Exp 1.37

$C_a$  – Adherencia (función de la cohesión).

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

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

### Ramón Barbey Sánchez:

$$Q_{\text{fricción}} = P_p \cdot \Sigma l_i \cdot f_{si} \quad \text{Exp 1.38}$$

$$f_{si} = C_a + k_f \cdot \sigma_v \cdot \tan \delta \quad \text{Exp 1.39}$$

**a)** Para suelos cohesivos y friccionales, la propuesta de norma cubana(1989) establece que:

$$Q_f = \frac{P_p \Sigma L_i \cdot f_{oi}}{\gamma_{gf}} \quad \text{Exp 1.40}$$

Dónde:

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

$P_p$ : Perímetro del pilote (m).

$L_i$ : Potencia del estrato  $i$  (m).

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

### La Norma Soviética

Diferencia el aporte total en función de la forma de instalación del pilote en el suelo definiendo:

$$\text{Para pilotes de percusión: } P = K \cdot m \cdot (R^{\text{nor}} \text{Area} + \text{Perímetro} \sum f_i^{\text{nor}} \cdot L) \quad \text{Exp 1.41}$$

$$\text{Para pilotes in situ: } P = K \cdot m \cdot (R^{\text{nor}} \text{Area} + \text{Perímetro} \sum m f_i \cdot f_i^{\text{nor}} \cdot L) \quad \text{Exp 1.42}$$

$R^{\text{nor}}$  – Resistencia normativa del suelo por debajo del extremo inferior del pilote.

$f_i^{\text{nor}}$  – Resistencia normativa de una capa del suelo sobre la superficie lateral del pilote.

$m f$  – coeficiente que tiene en cuenta las condiciones de trabajo, depende de la forma de colocación.

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 podido constatar los enfoques actuales son efectivos para suelos puramente cohesivos o puramente friccionales, donde ocurra el caso de suelo cohesivo- friccional, se recurre a una solución donde se transforma en uno puramente cohesivo o puramente friccional a través de las siguientes expresiones:

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

$$C_{eq} = \frac{q f m \cdot \sin(\varphi) + C \cdot \cos(\varphi)}{(1 + \sin(2 \cdot A - 1))} \quad \text{Exp 1.43}$$

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

$$\tan^{-1}(\varphi_{eq}) = \tan^{-1} \frac{K_s \cdot q f m \cdot \tan \varphi + C}{K_s \cdot q f m} \quad \text{Exp 1.44}$$

$K_s = 1 - \sin \varphi$  (Empuje pasivo de Rankine)

Las expresiones que consideran la resistencia a cortante del suelo dado por la cohesión y el ángulo de fricción son más abarcadoras, pues evalúan la profundidad dentro del estrato resistente a la vez que se pueden aplicar a suelo cohesivos friccionales muy comunes en la práctica ingenieril.

#### 1.3.1. d. Determinación del aporte a fricción para pilotes empotrados en roca.

Sobresalen dos grandes grupos de expresiones para evaluar la resistencia por fuste de pilotes empotrados en roca. En uno se calcula como función lineal de la resistencia a compresión simple y en el otro se calcula como la raíz cuadrada de la resistencia a compresión simple. Además existen métodos para evaluar dicho aporte por fricción de pilotes empotrados en roca,

entre los que se encuentran la Normativa DIN 4014 (1980), Williams y Pells (1981), Serrano y Olalla (2004; 2006).

En nuestro país existen trabajos precedentes en el análisis de cimentaciones sobre pilotes en roca de dureza baja en la Marina Gaviota, Varadero. En este caso se hacen correlaciones entre los ensayos dinámicos y las pruebas de carga a 6 pilotes, estableciéndose la capacidad de carga de la cimentación, sin la necesidad de realizar un gran número de ensayos de carga.

### **Torne (1977)**

Propone los siguientes valores mínimo y máximo para el cálculo de la resistencia por fuste:

$$\tau_{ult} = 0.05(\rightarrow 0.1) \cdot \sigma_c$$

### **Poulos y Davis (1980)**

Establecen una resistencia admisible por fuste de  $0.05 \sigma_c$ . Suponiendo un coeficiente de seguridad de 3, se obtiene una resistencia última de  $0.15 \sigma_c$ , proporcionándose además una resistencia última de 0.45 Mpa para el caso de rocas que no estén meteorizadas:

$$\tau_{ult} = 0.15 \cdot \sigma_c \quad (\tau_{ult} < 0.45 \text{ Mpa}) \quad \text{Exp 1.45}$$

Tanto en esta teoría como en las formuladas a continuación, se considera un coeficiente de seguridad de 3. Aunque se trata de un valor elevado respecto del coeficiente de seguridad de 2.5 usado tradicionalmente para la evaluación de la resistencia por fuste, en el análisis comparativo la resistencia última por fuste se ha obtenido siempre multiplicando el valor de la carga admisible por 3.

### **Hooley y Lefroy (1993)**

Solamente es aplicable para rocas fuertemente meteorizadas, con una resistencia a compresión simple muy baja, inferior a 0.25 Mpa:

$$\tau_{ult} = 0.3 \cdot \sigma_c \quad (\sigma_c < 0.25 \text{ Mpa}) \quad \text{Exp 1.46}$$

En la tabla 1.5 se agrupan los métodos analizados para determinar el aporte por fricción de pilotes apoyados en roca.

<b>Tabla1.5. Resistencia por fuste de pilotes empotrados en roca como función lineal de la resistencia a compresión simple: <math>f(\sigma_c)</math></b>				
$\tau_{ult} = \alpha \cdot \sigma_c$				
Autores	Fecha	Coeficiente $\alpha$	Limitaciones	Observaciones
Torne	1977	0,05 $\rightarrow$ 0.1	-	Propone un valor mínimo y otro máximo para $\tau_{ult}$
Poulos & Davis	1980	0,15	$\tau_{ult} < 0,45 \text{ MPa}$	Para rocas no muy meteorizadas, se consideran $\tau_{ult} = 0,45 \text{ Mpa}$
Hooley & Lefroy	1993	0,3	$\sigma_c < 0,25 \text{ Mpa}$	Solamente aplicable a rocas fuertemente meteorizadas

### **1.3.2. Métodos dinámicos.**

Debido a la variación de los espesores de estratos de suelo, los pilotes no alcanzan la capacidad de carga requerida o de proyecto a la profundidad prefijada en el proceso de hincado, por lo que se han desarrollado varias ecuaciones para calcular la capacidad última de un pilote durante la operación. Las ecuaciones dinámicas son abundantemente usadas en el campo para determinar si el pilote ha alcanzado un valor satisfactorio de carga a la profundidad predeterminada.

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 radica 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 mismo. En ocasiones se ha logrado determinar con exactitud utilizando las expresiones dinámicas, la capacidad de carga de un pilote, y en otras oportunidades los resultados obtenidos no son tan certeros, y su uso indiscriminado ha traído como consecuencia [Jiménez (1994)], unas veces, la seguridad excesiva de la cimentación, y en otras el fracaso de la misma.

Juárez (1975), plantea que la resistencia dinámica opuesta al pilote en su punta durante el hincado por impacto no es igual a la resistencia que el pilote encontrará en su punta en condiciones de carga estática.

Un gran número de expresiones dinámicas han sido deducidas por diferentes autores, entre las que podemos mencionar la expresión de Hiley, Galabru (1974), la Engineering News, la que propone el fabricante del martillo Delmag, Gersevanov (1970), la Propuesta de Norma (1989) y Juárez (1975) donde se hace una buena recopilación bastante completa de estas fórmulas, incluyendo la expresión de CASE más completa y moderna.

Autores como Sowers (1977), Bowles (1982), Juárez (1975), etc., han expuesto que las fórmulas dinámicas no representan un método racional para determinar la capacidad de carga de pilotes, sin embargo con los avances alcanzados en la modelación matemática y la instrumentación electrónica, y la aparición de acelerómetros piezométricos capaces de registrar los detalles del proceso que ocurre bajo un golpe de maza, están permitiendo mejorar el entendimiento que existía del proceso de hincado. La mayoría de los autores para determinar la resistencia a la hincado, suelen utilizar la expresión de Case [Rocha (1998), Goble (1994)].

En la norma cubana vigente (NC 54-275- 1984), se establece la metodología para efectuar ensayos dinámicos, además se propone la expresión deducida por N. M. Gersevanov, con el propósito de calcular la capacidad de carga de una cimentación sobre pilotes.

Fórmula de N. M. Gersevanov:

$$P_c = \frac{Kmn \cdot F}{2} * \left( \sqrt{1 + \frac{4}{F} * \frac{Q}{H} * \frac{Q+0.2q}{Q+q}} - 1 \right)$$

Exp 1.47

Dónde:

P<sub>c</sub> - capacidad de carga del pilote

K - coeficiente de homogeneidad igual a 0.7

m - coeficiente de condición de trabajo igual a 1

n - coeficiente que depende del material con que está construido el pilote y el método de hincado que toma los siguientes valores:

100t/m<sup>2</sup> para pilotes de madera hincados sin cabezal.

150t/m<sup>2</sup> para pilotes de hormigón armado hincados con cabezal.

F - área neta de la sección transversal del pilote (m<sup>2</sup>)

QH - trabajo desarrollado por el martinete al caer. Cuando se usan martinetes diesel el valor de QH es igual a la energía de un solo golpe, cuando se hincan los pilotes.

q - masa del pilote y la sufridera (t)

Q - masa de la parte del martinete que golpea (t)

H - altura de caída del martinete (m)

E - rechazo del pilote a la hincada.

La propuesta de la norma cubana establece para determinar la carga resistente por estabilidad del pilote aislado dos métodos dinámicos:

- 1 - 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.
- 2 - Fórmulas de hincado: Los resultados obtenidos mediante la fórmula de hincado 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 o ambas.

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

### **1.3.3 Ensayos de penetración.**

Los ensayos de penetración se emplean asiduamente para determinar la capacidad soportante de los pilotes a través de correlaciones, debido a la relativa similitud del estado tenso-deformacional que se genera en la masa de suelo cuando un pilote está sometido a su carga última y el de un penetrómetro que se introduce en el suelo. Por esta razón se puede establecer una relación muy estrecha entre la resistencia a la penetración y la capacidad de carga del pilote [Menzembach (1968a)]. De forma genérica se puede expresar que la capacidad de carga de un pilote aislado está determinada por la suma de la carga que toma la punta del pilote y la que es tomada por fricción superficial a lo largo del elemento, de igual forma sucede con las expresiones utilizadas para calcular la capacidad resistente por estabilidad del pilote empleando como base los ensayos de penetración, pero afectados por un factor de escala entre la resistencia en punta del cono de penetración y la punta del pilote, y otro factor de escala entre la fricción sobre la camisa del penetrómetro y el fuste del pilote. En Cuba estos ensayos son realizados utilizando el cono holandés y los modelos soviéticos S-979 y Sp-59. Existen variado tipo de pruebas de penetración que permiten obtener a través de correlaciones, determinado conocimiento de las propiedades del suelo, así como estimar la capacidad soportante de una cimentación sobre pilotes, entre las que se encuentran: El ensayo de Penetración Estándar (SPT), la Prueba de Penetración de Cono (CPT), la Prueba del Presurímetro (PMT).

La Prueba de Penetración Estándar, es quizás entre todos los ensayos que se utilizan para determinar propiedades del suelo el que rinde mejores resultados en la práctica y proporciona información más útil en torno al subsuelo [Juárez y Rico (2005)], dicho sondeo consiste en determinar el número de golpes (N), que se requieren para que una barra vertical (llamada caña), penetre una longitud de 30 cm, dentro del suelo, por medio de golpes de un martillo de 140 libras de peso, levantado y soltado desde una altura de 76 cm. El ensayo SPT está especialmente indicado para suelos granulares, en la actualidad contando con el resultado de dicha prueba y teniendo datos de la geología del lugar donde se hincarán pilotes se puede estimar la carga de hundimiento de cimentaciones profundas, así como el valor de los asentamientos, bien directamente o por medio de otras correlaciones con el módulo de deformación. En suelos plásticos la prueba permite adquirir una idea, si bien tosca, de la resistencia a compresión simple. Además el método lleva implícito un muestreo que proporciona muestras alteradas que representan el suelo de estudio.

La prueba CPT, originalmente conocida como la prueba de penetración del cono holandés, constituye un método versátil de sondeo empleado para determinar los materiales en un perfil de suelo y estimar sus propiedades ingenieriles. En este método de penetración se usa un cono a  $60^{\circ}$  con área en su base de  $10 \text{ cm}^2$  que es empujado contra el terreno a una velocidad constante aproximadamente igual a  $20 \text{ mm/s}$  y se mide la resistencia a la penetración o



también conocida como resistencia en punta. Los penetrómetros empleados actualmente permiten determinar: a) la resistencia del cono a la penetración ( $q_c$ ), que es igual a la fuerza vertical aplicada al cono dividida entre su área horizontal proyectada y b) la resistencia por fricción que es la resistencia medida por el manguito situado arriba del cono con el suelo local rodeándolo. La resistencia por fricción es igual a la fuerza vertical aplicada al manguito dividido entre su área superficial, en realidad la suma de la fricción y la adherencia. Se ha desarrollado diversas correlaciones que permiten determinar el tipo de suelo encontrado al realizar una prueba CPT, Robertson y Campanella (1983) propusieron una relación entre  $q_c$ ,  $F_r = f_c/q_c$  y el tipo de suelo, correlaciones logradas entre la compacidad relativa  $C_r$  (%) y  $q_c$  han sido obtenidas para varios tipos de suelos por investigadores, entre los que se encuentran Lancellotta (1983), Jamiolkowski y otros (1985).

La prueba PMT, fue originalmente desarrollada por Menard (1956) para medir la resistencia y deformabilidad de un suelo, y posteriormente adoptada por la ASTM con la designación de prueba 4719, dicha prueba se conduce a través de un agujero previamente perforado en el terreno, el que debe tener un diámetro aproximado de 1,2 veces el nominal de la muestra, la probeta más usada tiene un diámetro de 58 mm y una longitud de 420 mm. La muestra está compuesta por tres celdas, de las cuales la superior y la inferior son de guarda o protectoras, y la central es para la medición. Después de introducir las celdas en el terreno a la profundidad requerida, se comienza a aplicar presiones en incrementos y la expansión volumétrica se mide, se continua hasta que el suelo falla o hasta que la presión límite del dispositivo se alcanza, es considerada la falla del suelo cuando el volumen de la cavidad expandida es el doble de la cavidad original. El resultado de estas pruebas se obtiene a través de una gráfica de presión contra volumen. Han sido desarrolladas correlaciones para inferir el comportamiento ingenieril del suelo, Kulhawy y Mayne (1990) obtuvieron una relación entre la presión de consolidación y la aplicada mediante la prueba PMT, Baguelin y otros (1978) propusieron una relación entre la resistencia al corte no drenado y la presión aplicada mediante la prueba del presurímetro.

A continuación se mencionan algunos métodos empíricos que han sido obtenidos por diferentes autores como son:

SPT - Método de Aoki y Velloso (1975)

SPT – Método de Decourt y Quaresma (1978)

CPT – Método de Bustamante y Gianeselli (1983)

CPT – Método de Philipponat (1980)

### **1.3.4 Pruebas de carga.**

Las pruebas de carga son considerados por varios autores entre los que se encuentran [Juárez (1975), Sowers (1977), Poulos y Davis (1980), Jiménez (1986), Lambe (1991)], como el método más confiable para determinar la capacidad de carga de un pilote para la mayoría de los países.

Existen dos formas para desarrollar dichas pruebas de carga:

- 1 Controlando el incremento de asiento o a una velocidad de asiento constante. (Asiento Controlando).
- 2 incremento de carga constante en el tiempo o asiento mínimo para un incremento de carga. (Carga controlada).

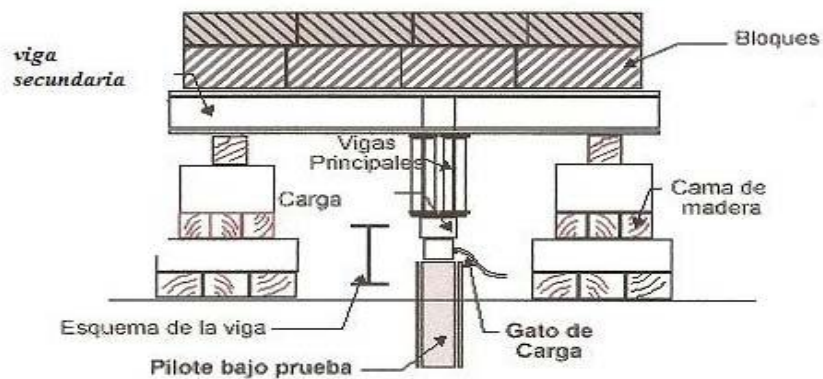
En esencia, estas pruebas, no son más que experimentar a escala real, un pilote, para procesar su comportamiento bajo la acción de cargas y determinar su capacidad de carga. A pesar de los buenos resultados que se obtienen con estas pruebas, su empleo se ve limitado a obras de gran importancia, ya que su elevado costo y tiempo de realización conspiran contra el empleo de estas pruebas para determinar la carga máxima que puede soportar un pilote. Sowers (1977), plantea 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, y su experiencia le ha evidenciado que existen casos de pilotes de pruebas ejecutados peor que los definitivos, además plantea que otra inconveniente radica en que la prueba de carga se realiza generalmente a un solo pilote y a partir de este resultado se intenta conocer el comportamiento de un grupo, que es diferente al de la unidad aislada. De la literatura consultada [Paulos (2000), Lototzke (1997)], la prueba de carga a grupos de pilotes es muy escasa, debido al costo del ensayo y la magnitud de la carga necesaria para movilizar la prueba.

#### **1.3.4.1 Determinación de la capacidad de carga a través de ensayos de carga.**

En la mayoría de los grandes proyectos donde existan cimentaciones profundas, un número de pruebas de carga sobre pilotes deben llevarse a cabo, la razón principal es la falta de confiabilidad en los demás métodos de predicción.

La prueba de carga controlada es la más empleada, ya que permite determinar la carga última cuando se ha movilizad la resistencia del suelo que se encuentra bajo la punta y rodeando al pilote. 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.

En la figura 1 expuesta posteriormente se muestra un diagrama esquemático del arreglo de una prueba de carga a un pilote.



**Figura 1.2 Arreglo de un ensayo de carga en pilotes para probar la compresión axial en el campo.**

Las cargas son aplicadas en etapas al pilote por medio del gato hidráulico y se espera que pase un tiempo adecuado después de cada aplicación de manera que ocurra una pequeña cantidad de asentamiento, el cual es medido mediante deformímetros. La cantidad de carga por aplicar en cada etapa variará, dependiendo de los reglamentos locales de construcción. La mayoría de los reglamentos requieren que cada etapa de carga sea aproximadamente igual a un cuarto de la carga de trabajo propuesta. La prueba debe efectuarse por lo menos a una carga total de dos veces la carga de trabajo planteada en el proceso de diseño. Después de alcanzarse la carga deseada en el pilote, éste es descargado gradualmente. La figura 1.3 muestra un diagrama obtenido de una carga y descarga de campo. Para cualquier carga  $Q$ , el asentamiento neto del pilote se calcula como sigue:

Cuando  $Q = Q_1$

$$\text{Asentamiento neto, } s_{\text{neto}(1)} = s_{t(1)} - s_{e(1)} \quad \text{Exp 1.48}$$

Cuando  $Q = Q_2$

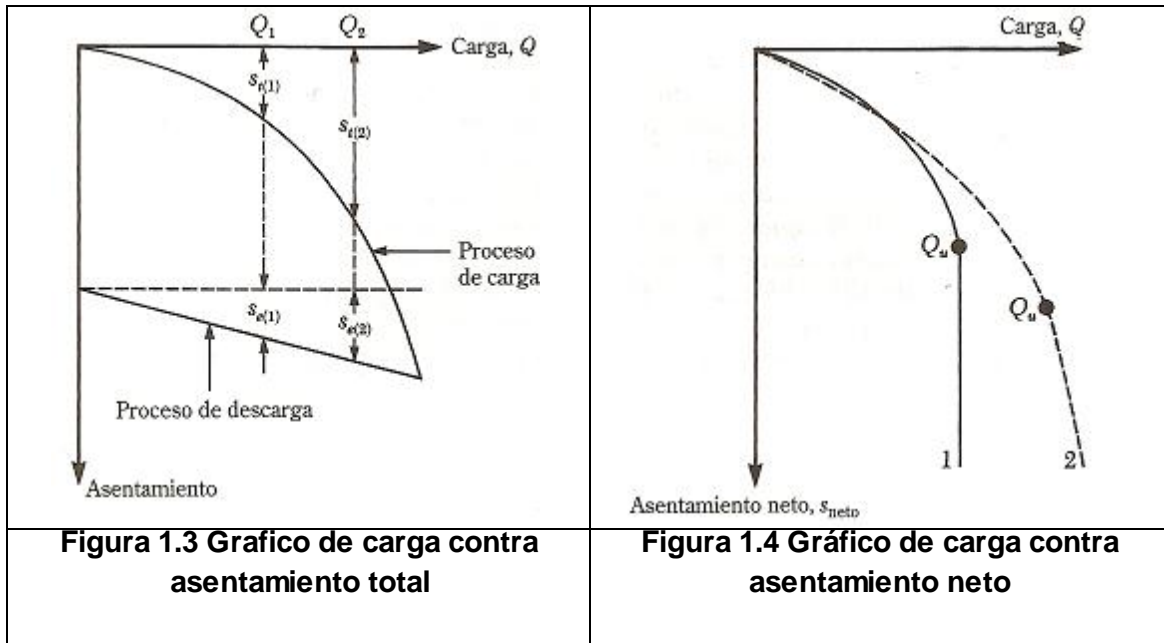
$$\text{Asentamiento neto, } s_{\text{neto}(2)} = s_{t(2)} - s_{e(2)} \quad \text{Exp 1.49}$$

Donde

$s_{\text{neto}}$ : asentamiento neto

$s_e$ : asentamiento elástico del pilote mismo

$s_t$ : asentamiento total



Estos valores de  $Q$  se indican en una gráfica contra el asentamiento neto correspondiente ( $s_{neto}$ ), como se muestra en la figura 1.4. La carga última del pilote se determina con esta gráfica. El asentamiento del pilote crece con la carga hasta cierto punto, más allá del cual la curva carga – asentamiento se vuelve vertical. La carga correspondiente al punto que la curva  $Q$  vs  $s_{neto}$  se vuelve vertical es la carga última, ( $Q_u$ ), del pilote.

Existe en Cuba una norma (NC 54-275- 1984) que establece la forma de realizar el ensayo estático a compresión, este método se basa en la determinación de la capacidad soportante y el asentamiento del pilote de prueba sometido a la acción de cargas estáticas a compresión bajo condiciones específicas.

En estas pruebas se utilizan dos pilotes vecinos, que servirán de anclaje del perfil metálico. El gato hidráulico que es el encargado de transmitirle la carga al pilote en prueba, se coloca entre el ala inferior de la viga de acero en forma de I y la cabeza del pilote, de forma tal que coincida con el eje longitudinal del pilote de ensayo. La cabeza del pilote debe ser cortada de forma tal que se obtenga una superficie plana y normal a la aplicación de la carga, con el objetivo de evitar excentricidad de la carga.

A manera de síntesis se muestran en la tabla 1.6, algunos métodos utilizados en el mundo para determinar la capacidad de carga de un pilote a partir de los ensayos de carga.

<b>Tabla1.6. Criterios para determinar la carga última del ensayo de carga.</b>	
<b>Criterio</b>	<b>Descripción</b>
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)	Asíntota de la función exponencial: $P=P_{\text{máx}}(1-e^{-az})$
5. Davisson (1980)	Desplazamiento aproximado de la punta del pilote mayor que $D/120 + 4\text{mm}$

#### 1.4 Modelación por Elementos Finitos de cimentaciones en pilotes.

La modelación por el Método de Elementos Finitos está pensado para ser usado en computadoras y permite resolver ecuaciones diferenciales asociadas a un problema físico sobre geometrías complejas, este método se usa en el diseño y mejora de productos y aplicaciones industriales, así como en la simulación de sistemas físicos y biológicos complejos. La variedad de problemas a los que puede aplicarse ha crecido enormemente, siendo el requisito básico que las ecuaciones constitutivas y ecuaciones de evolución temporal del problema a considerar sean conocidas de antemano. La metodología general a aplicar cuando se precisa obtener soluciones de dificultades en suelos, utilizando la modelación utilizando una computadora consta de los siguientes 4 pasos:

1. Establecimiento de un modelo conceptual para el problema.
2. Establecimiento de un modelo matemático para el problema dado.
3. Construcción de un modelo de la simulación numérico para el problema.
4. El despliegue gráfico de los resultados numéricos obtenido de la simulación numérica.

El MEF permite obtener una solución numérica aproximada sobre un cuerpo, estructura o dominio (medio continuo), sobre el que están definidas ciertas ecuaciones diferenciales en forma débil o integral que caracterizan el comportamiento físico del problema, dividiéndolo en un número elevado de subdominios no intersectantes entre sí denominados «elementos finitos». El conjunto de elementos finitos forma una partición del dominio también denominada discretización. Dentro de cada elemento se destacan una serie de puntos característicos llamados nodos, al conectarse varios nodos considerando sus condiciones de adyacencia y frontera se forman las denominadas mallas, cada uno de los retículos que conforman dichas mallas recibe el nombre de elementos finitos. Típicamente el método de los elementos finitos

se programa computacionalmente para calcular el campo de desplazamientos y, posteriormente, a través de relaciones cinemáticas y constitutivas las deformaciones y tensiones respectivamente, cuando se trata de un problema de mecánica de sólidos deformables o más generalmente un problema de mecánica de medios continuos. El objetivo del análisis por medio del método de los elementos finitos, es determinar de forma precisa la respuesta de un sistema modelado con una cantidad finita de elementos y sujeto a unas cargas determinadas.

La solución obtenida por MEF es sólo aproximada, coincidiendo con la solución exacta sólo en un número finito de nodos. En el resto de puntos que no son nodos, la solución aproximada se obtiene interpolando a partir de los resultados obtenidos para los nodos, lo cual hace que la solución sea sólo aproximada debido a ese último paso.

Desde el punto de vista de la programación algorítmica modular las tareas necesarias para llevar a cabo un cálculo mediante un programa MEF se dividen en:

1. Pre proceso, en este paso se define la geometría del elemento que se desea estudiar y con ello se genera la malla, además en este proceso se asignan las propiedades a los materiales y otras características del problema se almacena junto con la información que describe la malla. Por otro lado las fuerzas y las temperaturas se establecen a los puntos de la malla. A los nodos de la malla se les asigna una densidad por todo el material dependiendo del nivel de la tensión mecánica u otra propiedad. Las regiones que recibirán gran cantidad de tensión tienen normalmente una mayor densidad de nodos (densidad de malla) que aquellos que experimentan poco o ninguno. Puntos de interés consisten en: puntos de fractura previamente probados del material, entrantes, esquinas, detalles complejos, y áreas de elevada tensión.
2. Cálculo, en este proceso se obtienen resultados partiendo de las consideraciones realizadas en el Pre proceso, el cálculo generalmente se reduce a obtener el desplazamientos de los nodos y con ello el campo de desplazamientos aproximados el elemento finito, estando en presencia de un problema simple o no dependiente del tiempo la solución se obtiene generando un sistema de ecuaciones de  $N$  ecuaciones con  $N$  incógnitas, que puede ser resuelto utilizando cualquiera de los algoritmos para la resolución de ecuaciones lineales. Si por el contrario estamos en presencia de un problema no lineal o dependiente del tiempo, el resultado puede ser obtenido mediante una sucesión finita de sistemas de  $N$  ecuaciones y  $N$  incógnitas que deben resolverse uno a continuación de otro, y cuya entrada depende del resultado del paso anterior.
3. Post proceso, dado que generalmente el MEF se aplica a casos de relativa complejidad, el programa da como resultado una gran cantidad de datos que es preciso organizarlos, graficarlos de forma tal que permita su comprensión más fácil, en el post proceso se calculan magnitudes derivadas de los valores obtenidos para los nodos, y en ocasiones se aplican operaciones de suavizado, interpolación e incluso determinación de errores de aproximación.

En la mayoría de los casos, el uso de un modelo complejo y muy refinado no es justificable, aunque este probablemente genere mayor exactitud computacional a expensas de un innecesario incremento en el tiempo de procesamiento. El tipo y la complejidad del modelo dependen sobre todo del tipo de resultados requeridos. Como regla general, un modelo de elementos finitos puede empezar con un modelo simple. Los resultados de este modelo sencillo, combinados con la comprensión del comportamiento del sistema, puede ayudar a decidir si es necesario refinar el modelo y en qué parte del mismo.

En la bibliografía revisada Randolph (1994), Fernández (1998), Mata (1998), Gusmão (2000) entre otros acuden a la utilización del Método de los Elementos Finitos [Zinkiewics (1999)] y el comportamiento no lineal del suelo para la solución de problemas tensión deformación en diferentes obras geotécnicas y en el análisis del comportamiento de pilotes bajo el efecto de carga horizontal. Como tendencia mundial se aprecia la utilización de elementos deslizantes o interface para modelar la interacción entre la cara del pilote y el suelo, los parámetros que determinan estos modelos suelen ser muy variables en función del tipo de obra y problema a resolver.

Para modelar el comportamiento real del suelo se utilizan propiedades obtenidas a través de ensayos realizados al mismo, para intentar obtener un modelo que represente de la forma más exacta el comportamiento del suelo en el estado de carga de la estructura que se quiere analizar, como consecuencias de estos ensayos se precisa que el comportamiento del suelo no es lineal. De aquí la aplicación de modelos de comportamiento no lineal según Kondner (1963), Altaee (1998) y Brau (1997) cuyo uso viene unido a la aplicación del MEF.

La utilización de diferentes tipologías en las mallas utilizadas en la modelación es también un aspecto que se ha desarrollado en los últimos años con la utilización de análisis en tres dimensiones, sin la necesidad de recurrir a simplificaciones que se hacen en los actuales programas que analizan el estado tensional plano.

En la actualidad se han desarrollado diferentes sistemas basados en métodos numéricos, de ellos podemos mencionar el FLAC (1996), que realiza un análisis en tres dimensiones, con base matemática en las diferencias finitas; el SIGMAW (1995) y el PLAXIS (1990), con base matemática en los elementos finitos, que realizan un análisis plano. Estos softwares tiene grandes potencialidades para la resolución de problemas ingenieriles, pero su alto costo hace que se reduzca su utilización en diferentes países.

### **1.5 Conclusiones del capítulo.**

A continuación analizando cada uno de los epígrafes antes presentados y en correspondencia con el alcance de este trabajo de diploma se exponen las siguientes conclusiones para este capítulo.

1. En la actualidad existen diferentes metodologías para correlacionar ensayos de hinca con capacidad de carga de un pilote.

## Capítulo 1. Estado del arte de las cimentaciones sobre pilotes.

2. Se pueden establecer correlaciones entre los resultados de los ensayos de carga, y ensayos de penetración con el fin de determinar la capacidad de carga de cimentaciones sobre pilotes para las condiciones cubanas.
3. Existen variados criterios y metodologías para realizar ensayos de carga tanto en Cuba como en otros países, que permiten determinar la capacidad de carga de una cimentación sobre pilotes.
4. En la actualidad la modelación usando programas de computación constituye una herramienta fortísima para resolver diferentes problemas que se presentan en cimentaciones sobre pilotes.



## **Capítulo 2. Ensayo de carga en pilotes. Utilización de correlaciones.**

### **2.1 Resumen:**

En este capítulo se realiza un estudio de los principales trabajos existentes referidos a la determinación de la capacidad de carga en cimentaciones sobre pilotes utilizando expresiones dinámicas, cuyos resultados son comparados con los obtenidos posteriormente a la realización de una prueba de carga. Después de analizados los resultados que han logrado diferentes autores en la aplicación de dichas expresiones para suelos cubanos, y por la similitud de los resultados obtenidos, se destaca la expresión más fidedigna para el caso de Cuba. Además en este apartado se realiza una revisión bibliográfica de normas existentes en el mundo sobre la forma de llevar a cabo la realización de una prueba de carga a una cimentación sobre pilotes, entre tantas normativas se consultaron: la norma brasileña (NBR 12131/1992), la norma americana (ASTM-D-1143-81), y por supuesto la norma cubana (NC 54-265- 1984). En el análisis de estos tres documentos oficiales mencionados anteriormente se puede constatar que la norma cubana aunque en esencia coincide con las dos restantes normativas, es posible mejorarla en algunos aspectos. A nivel global es creciente la postura de intentar predecir la capacidad de carga de una cimentación sobre pilotes utilizando correlaciones obtenidas a partir de ensayos de penetración. En esta sección se realizó una búsqueda de los resultados de la aplicación de la expresión de Aoki - Velloso (1975) y la fórmula obtenida por Decourt y Quaresma (1978) para el caso de suelos brasileños. También se utilizan las dos correlaciones mencionadas anteriormente para el caso de suelos cubanos, específicamente en el puerto de Mariel.

### **2.2 Introducción:**

En la actualidad, a nivel mundial existe una tendencia ligada a intentar predecir la capacidad de carga de cimentaciones sobre pilotes, pero siempre con el menor costo posible. Se han desarrollado al paso del tiempo diferentes fórmulas dinámicas con las cuales se pueden lograr valores de capacidad de carga en cimentaciones sobre pilotes bastante confiables al compararse con los obtenidos después de la realización de una prueba de carga estática, otra forma de estimar la carga que puede soportar una cimentación profunda es, utilizando expresiones producto de correlaciones deducidas por diferentes autores y empleando los resultados de los ensayos de penetración. Si bien es una realidad que el método más preciso para conocer la capacidad de carga de una cimentación sobre pilotes es la prueba de carga, también es verdad que es el más caro de todos los procedimientos utilizados con ese fin. La utilización de los tres métodos antes mencionados de una forma complementada y precisa puede contribuir a alcanzar buenos resultados en la práctica y logrando además un efecto económico satisfactorio.

### 2.3 Métodos dinámicos para la determinación de la capacidad de carga en pilotes.

A continuación, en la tabla 2.1, se muestran expresiones deducidas por diferentes autores que pueden ser utilizadas para determinar la capacidad de carga de pilotes, partiendo del resultado de la prueba de hincas de los mismos.

Tabla 2.1. Expresiones para el cálculo de la capacidad de carga por formulas dinámicas.	
Formulación	Coeficientes
<p>Fórmula de Wellington</p> $Q = \frac{2 \cdot W \cdot h}{S + C}$	<p>W – peso del martillo H – altura de caída S – penetración C coeficiente 0.1 o 1</p>
<p>Fórmula holandesa</p> $Q = \frac{M^2 \cdot h}{K \cdot e \cdot (M + P)}$	<p>P – peso del pilote e – penetración M – peso del martillo</p>
<p>Fórmula holandesa corregida:</p> $R = \frac{1}{2 \cdot k \cdot e} \cdot \frac{M^2 \cdot h}{K \cdot e \cdot (M + P)}$	K = 6
<p>Fórmula de Hiley</p> $R = \frac{M^2}{K \cdot e \cdot (M + P)} \cdot (h - h_0)$	K = 3
<p>Fórmula de Terzaghi</p> $R = \frac{area \cdot Ep}{K \cdot L} \left[ -e + \sqrt{\frac{e^2 + 2 \cdot L \cdot M \cdot (M + 0.5 \cdot P) \cdot h}{Area \cdot E \cdot (P + M)}} \right]$	K = 3
<p>Fórmula de Redtenbacher:</p> $R = \frac{area \cdot Ep}{K \cdot L} \left[ -e + \sqrt{e^2 + \frac{2 \cdot L \cdot M^2 \cdot h}{Area \cdot E \cdot (P + M)}} \right]$	K = 3
<p>Fórmula de Gersevanov:</p> $P_c = \frac{k \cdot m \cdot Area}{2} \cdot \left[ \sqrt{1 + \frac{4}{n \cdot Area} \cdot \frac{Q \cdot H}{e} \cdot \frac{Q + 0.2q}{Q + q}} - 1 \right]$	<p>Pc – capacidad de carga (T) K, m – coeficientes empíricos q – masa del pilote + sufrideras (T) Q – masa del martinete que golpea (T) H – altura de caída. e – rechazo del pilote a la hincas (m).</p>
<p>Fórmula ENR modificada:</p> $Q_u = \frac{E \cdot W_r \cdot h}{S + C} \cdot \frac{W_r + n^2 \cdot W_p}{W_r + W_p}$	<p>E – eficiencia del martillo Wp – peso del pilote Wr – peso del martillo E: eficiencia del martillo C: 0.1 pulg, si las unidades de S y h están en pulgadas n: coeficiente de restitución entre el martinete y el capuchón del pilote, n-0.7 a 0.9</p>

	<p>Valores típicos para E</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Martillos de acción simple y doble 0.7 – 0.85</li> <li>• Martillos diesel 0.3 – 0.4</li> <li>• Martillos de caída libre 0.7 – 0.9</li> <li>•</li> </ul> <p>Valores típicos para n</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Martillo de hierro colado y pilotes 0.4 – 0.5 de concreto (sin capuchón)</li> <li>• Cojinete de madera sobre pilotes 0.3 – 0.4 de acero</li> </ul>
<p>Fórmula de la Michigan State Highway Commission (1965)</p> $Q_u = \frac{1.25 \cdot E \cdot H_e}{S + C} \cdot \frac{W_r + n^2 \cdot W_p}{W_r + W_p}$	<p>E – eficiencia del martillo  He – energía nominal del martillo  C – 0.1 pulgada  Se recomienda un factor de seguridad de 6.</p>
<p>Fórmula danesa (Olson y Flaate, 1967)</p> $Q_u = \frac{E \cdot H_e}{S + \sqrt{\frac{E \cdot H_e \cdot L}{2 \cdot A_p \cdot E_p}}}$	<p>E – eficiencia del martillo  He – energía nominal del martillo  Ep -Modulo elasticidad del material del pilote  L – longitud del pilote  Ap. – área de la sección transversal</p>
<p>Fórmula del Pacific Coast Uniform Building Code (International Conference of Building Officials, 1982)</p> $Q_u = \frac{(E H_e) \left( \frac{W_R + n W_p}{W_R + W_p} \right)}{S + \frac{Q_u L}{A E_p}}$	<p>El valor de n debe ser de 0.25 para pilotes de acero y de 0.1 para los otros. Se recomienda en general un factor de seguridad de 4.</p>
<p>Fórmula de Janbu (1953)</p> $Q_u = \frac{E H_e}{K'_u S}$	<p>Donde</p> $K'_u = C_d \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{\lambda'}{C_d}} \right)$ $C_d = 0.75 + 0.14 \left( \frac{W_p}{W_R} \right)$ $\lambda' = \left( \frac{E H_e L}{A_p E_p S^2} \right)$
<p>Fórmula de Gates (Gates, 1957)</p> $Q_u = a \sqrt{E H_e} (b - \log S)$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Si Qu está en klbs, entonces S está en pulg, a = 27, b = 1 y He está en klb·pies.</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>Si <math>Q_u</math> está en KN entonces S está en mm, <math>a = 104.5</math>, <math>b = 2.4</math> y <math>H_E</math> está en KN·m.</li> </ul> <p><math>E = 0.75</math> para martillo de caída libre; <math>E = 0.85</math> para los otros martillos. Use un factor de seguridad de 3</p>
<p>Fórmula de Navy – McKay</p> $Q_u = \frac{EH_E}{S \left(1 + 0.3 \frac{W_p}{W_R}\right)}$	Use un factor de seguridad de 6
<p>Fórmula que propone el fabricante del martillo DELMAG</p> $Q_{ultima} = \frac{E_m \cdot Q}{(C \cdot L + e)(Q + q)}$	<p>Q: masa de martinete que golpea (T) q: masa del pilote + sufrideras (T) e: rechazo del pilote a la hincada (m) L: longitud del pilote C: coeficiente de 0.1 o 1 <math>E_m</math> = Energía del martillo / golpe</p>
<p>Fórmula FHWA modificada Gates</p> $R_u = 0.5[1.5\sqrt{E}(\log_{10}N) - 100]$	<p><math>R_u</math> = Capacidad de carga del pilote N = Numero de Golpes por pie de penetración E = Energía del Martillo</p>

En el trabajo de diploma titulado “Estudio de la capacidad portante de los pilotes de la Marina Gaviota en Varadero” realizado por Eliezer Castillo Martínez, en el año 2010, se hace una comparación entre los resultados de la capacidad de carga conseguida empleando tres expresiones dinámicas para 7 pilotes. Entre las fórmulas que sirvieron para realizar dicha comparación se encuentran:

- La expresión propuesta por Gersevanov.
- La fórmula FHWA modificada por Gates.
- La expresión que propone el fabricante del martillo DELMAG.

Cada una del trío de expresiones mencionadas con anterioridad se recoge en la tabla mostrada al inicio de este epígrafe.

De los resultados obtenidos en dicho trabajo de diploma se puede concluir que existe dispersión entre los tres métodos utilizados, siendo aparentemente el más conservador el propuesto por Gersevanov, mientras que aplicando los métodos de la FHWA y el Delmag, se logran resultados un tanto similares para algunos de los pilotes, pero siempre se consiguen valores de capacidad de carga superiores a los obtenidos usando la expresión de Gersevanov, lo que se puede corroborar al analizar la tabla siguiente.

Tabla 2.2. Capacidad de carga del pilote aplicando expresiones dinámicas										
No	Golpes / Pie	Expresión de la FHWA			DELMAG			Expresión de Gersevanov		
		Factor de Seguridad			Factor de Seguridad			Factor de Seguridad		
		1	1.5	2	1	1.5	2	1	1.5	2
1	57	241.91	161.3	120.96	284.05	189.36	142	202.9	135.26	101.5
2	32	219.2	146.1	109.6	226.72	151.15	113.4	152.2	101.49	76.12
3	26	210.55	140.4	105.28	204.96	136.64	102.5	137.3	91.54	68.66
4	32	219.2	146.1	109.6	226.72	151.15	113.4	152.2	101.49	76.12
5	16	189.11	126.1	94.55	155.28	103.52	77.64	108	71.98	53.99
6	33	220.46	147	110.23	229.93	153.29	115	154.6	103.05	77.29
7	11	171.14	114.1	85.57	121.37	80.92	60.69	89.78	59.85	44.89

Estudiando esta vez el trabajo de diploma “Correlación de la capacidad de carga de los pilotes por los métodos de Prueba de Hincia, la Teoría de la Plasticidad y la Prueba de Carga”, realizado por Jorge Fernández Mas, en el año 2011, donde hace una recopilación del estudio de la capacidad portante de los pilotes de la Marina Gaviota en Varadero. Dicho estudio fue realizado en conjunto por el Centro de Investigación y Desarrollo de las Estructuras y los Materiales (CIDEM) y la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (ENIA).

Con los resultados de las pruebas de hincia hechas en la Marina Gaviota se realizó un análisis de la capacidad de carga última y de trabajo de los pilotes a partir de los métodos dinámicos, utilizándose los propuestos por: Gersevanov, la FHWA y el fabricante del martillo Delmag, obteniéndose resultados similares a los logrados por Eliezer Castillo Martínez, en el año 2010.

Como se puede apreciar en la tabla 2.4, los valores de capacidad de carga conseguidos aplicando las tres expresiones dinámicas antes mencionadas, arrojan que el empleo de la expresión de Gersevanov es un tanto conservador si se le compara con los resultados logrados aplicando las expresiones propuestas por el fabricante de martillo DELMAG y la expresión de FHWA.

Tabla 2.3. Resultados de la hincia de los pilotes 000, 011 y 006			
Pilote	000	011	006
No. De Golpes	49	7	51
Longitud inicial m	15	11	11
Longitud de hincia m	12.2	11	7.2

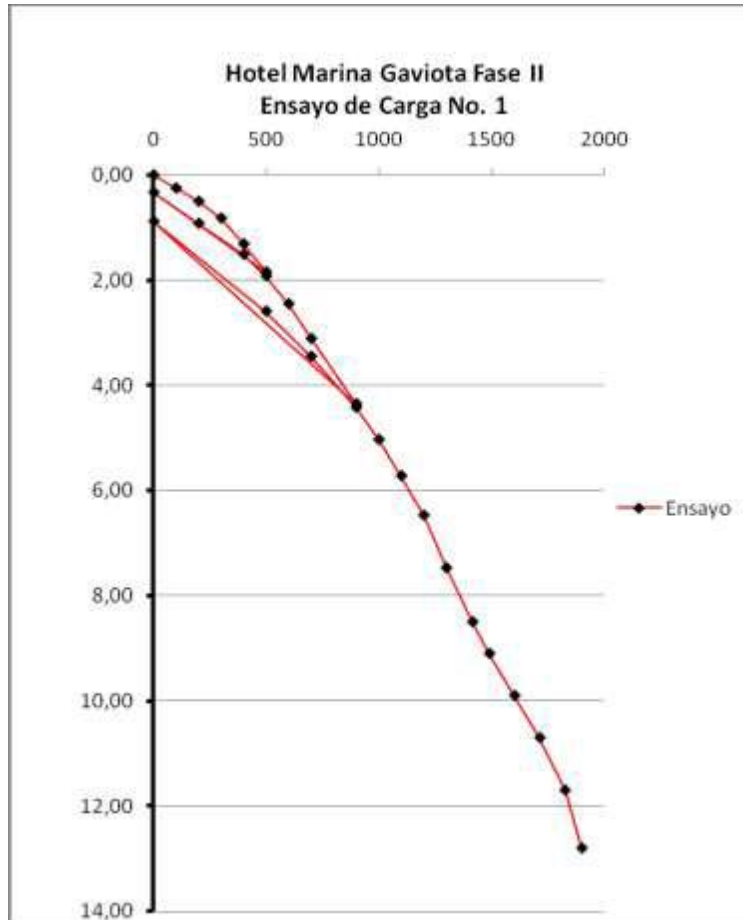
<b>Tabla 2.4. Capacidad de carga del pilote aplicando expresiones dinámicas</b>										
Pilote	Golpes / Pie	Expresión de la FHWA			DELMAG			Expresión de Gersevanov		
		Factor de Seguridad			Factor de Seguridad			Factor de Seguridad		
		1	1.5	1.92	1	1.5	1.92	1	1.5	1.92
000	49	236	157	123	218	145	113	188	125	98
011	7	147	98	76	99	66	51	72	48	37
006	51	238	158	72	273	182	142	192	128	100

Con fecha 13 de junio del 2010 la ENIA realizó el ensayo de carga in situ en la Marina Gaviota para el pilote 006, llevada hasta las 1300 kN, y posteriormente a inicio de julio se repitió en el mismo pilote, llevándola hasta 1902 kN. A continuación se exponen los resultados de dicho ensayo.

- El pilote ensayado se hincó hasta el rechazo (51 golpes, último pié).
- La punta del pilote se encuentra a 6.60 m de profundidad, instalada en las calcarenitas de dureza baja.
- Por debajo de la punta del pilote existen 2.50 m de espesor de esta roca.
- No se logró producir la falla del pilote con la carga máxima aplicada de 1902 KN (190.20Ton).
- La deformación máxima medida fue de 12.80 mm.
- Al descargarse el pilote quedaron 3.20 mm como deformación remanente.

<b>Tabla 2.5. Prueba de carga realizada al pilote 006</b>			
kN	mm	kN	mm
0	0	500	2.59
100	0.25	700	3.45
200	0.5	900	4.42
300	0.82	1000	5.03
400	1.31	1100	5.72
500	1.84	1200	6.47
0	0.33	1300	7.47
200	0.92	1417	8.5
400	1.51	1492	9.1
500	1.92	1603	9.9
600	2.45	1715	10.7
700	3.11	1827	11.7
900	4.35	1902	12.8
0	0.88		

En la figura que se muestra a continuación se aprecian los procesos de carga y descarga realizados en la prueba de carga al pilote 006.



**Figura 2.1 Grafico de la prueba de carga realizada al pilote 006.**

El pilote en cuestión, no se pudo llevar hasta la falla con una carga de 1902 kN, pero con los resultados obtenidos fue posible simular dicha falla y obtener un pronóstico de carga última resistente del pilote. Aplicando el método gráfico propuesto por la Norma Canadiense se pudo llegar a pronosticar que la carga resistente última es de 2300 kN, 230 Ton, para la cual se tiene una deformación de 57 mm.

Después de mostrados los resultados de la prueba de carga y realizando una comparación con los valores calculados utilizando expresiones dinámicas se puede arribar al siguiente pensamiento, para el caso de varadero la expresión que mejor predice la capacidad de carga de las cimentaciones sobre pilotes estudiadas es la propuesta por FWHA, dicha fórmula se puede apreciar en la tabla 2.1 de este trabajo de diploma.

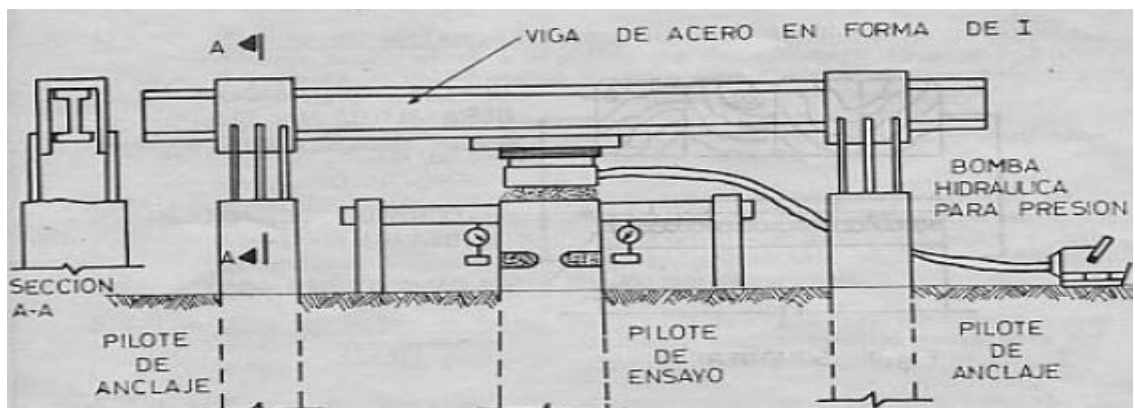
## 2.4 Recomendaciones para la realización de ensayos de carga.

La única manera segura de saber si un pilote es capaz de soportar la carga para la cual fue diseñado, es ejecutando un ensayo de carga. Para poder llegar a recomendar formas de realización de este tipo de pruebas, es sin dudas necesario revisar las opiniones de diferentes autores y normas que abordan la ejecución de dichos ensayos de carga.

En la Norma vigente en Cuba para llevar a cabo pruebas estáticas de carga (NC 54-265- 1984), se establece el siguiente arreglo y dispositivos para aplicar la carga al pilote:

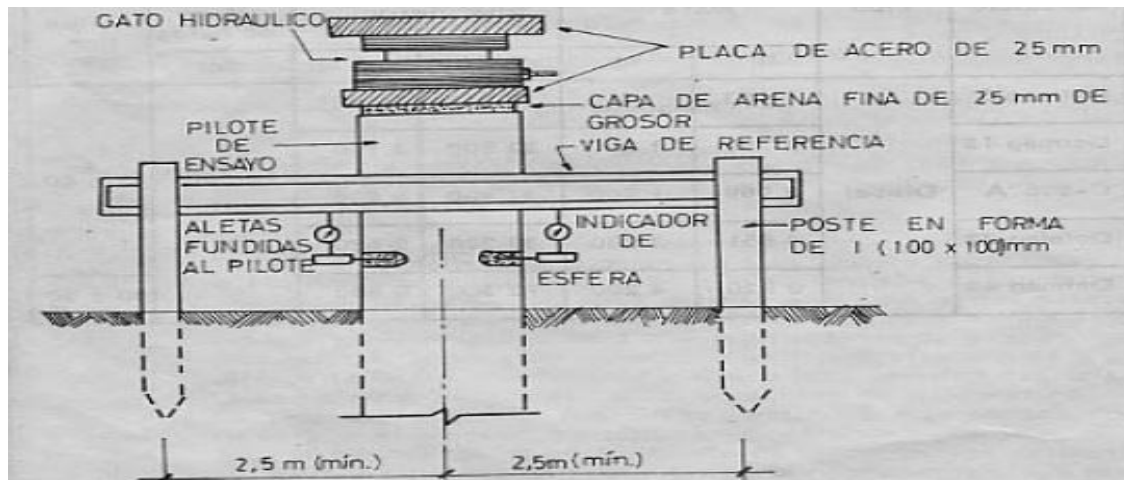
- Pilotes de anclaje, serán utilizados dos o más a cada lado del pilote de ensayo a una distancia mínima de 1,5 a 4 veces el diámetro de dicho pilote.
- Bomba hidráulica para presión
- Gato hidráulico
- Viga de acero en forma de I
- Tubos de conexión
- Manómetro
- Indicador de esfera
- Viga de referencia
- Cronometro
- Nivel topográfico

En las figuras que se presentan a continuación se puede contemplar la forma en que se acomodan dichos aparatos, utensilios y medios de medición para la aplicación de la carga al pilote de prueba.



**Figura 2.2. Diagrama esquemático de la forma de aplicación de la carga a un pilote de prueba.**





**Figura 2.3. Aparatos, utensilios y medios de medición para realizar la prueba de carga a un pilote de prueba.**

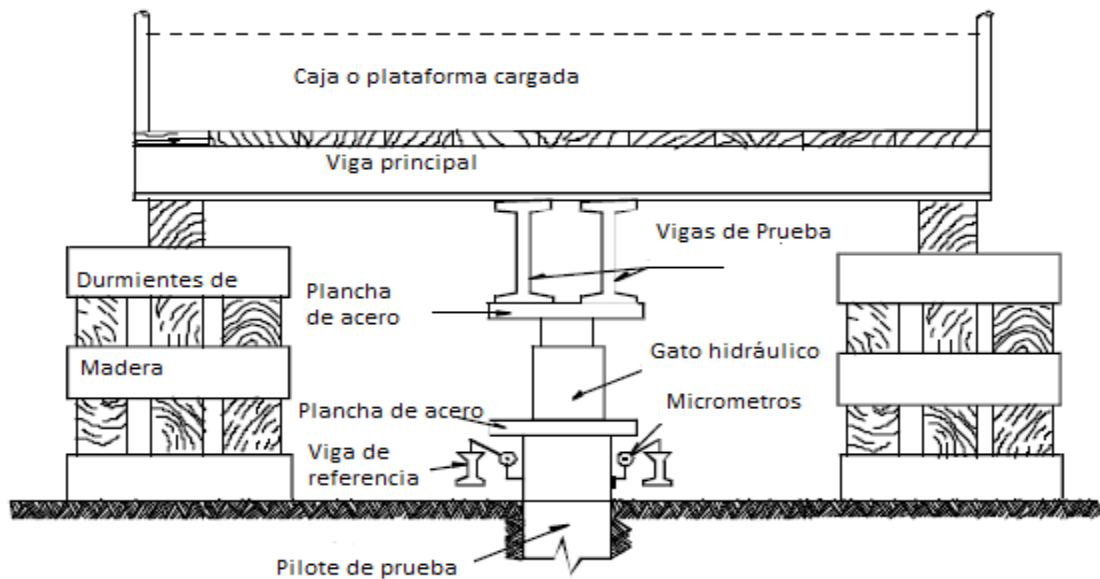
Revisando la Norma Brasileña (NBR 12131/1992) para la realización de las pruebas de carga a pilotes, así como la Norma Americana (ASTM-D-1143-81) que trata el mismo tema, se puede verificar que en ambas se contempla un arreglo similar que el planteado en la NC para llevar a cabo el ensayo de carga, con diferencias principalmente en la distancia entre los pilotes de anclaje y el que será sometido a ensayo.

Además tanto en la norma americana como en la norma brasileña se presentan otros arreglos y dispositivos que permiten aplicar la carga al pilote. Resumiendo de estas dos últimas normas arreglos que permitan sin contar con pilotes de anclaje, efectuar la prueba de carga. A continuación se describen estos arreglos.

### **1. Carga aplicada al pilote o grupo de pilotes por gato hidráulico actuando frente a caja plataforma cargada.**

La norma ASTM y la NBR para la realización de ensayos de carga especifican que se debe centrar sobre el pilote o grupo de pilotes una viga de prueba de medidas y resistencia suficiente para impedir una deflexión excesiva bajo carga, permitiendo espacio suficiente entre el cabezal del pilote y el fondo de la viga para poder ubicar las planchas y el gato hidráulico; los extremos de la viga se deben soportar sobre cajones temporales.

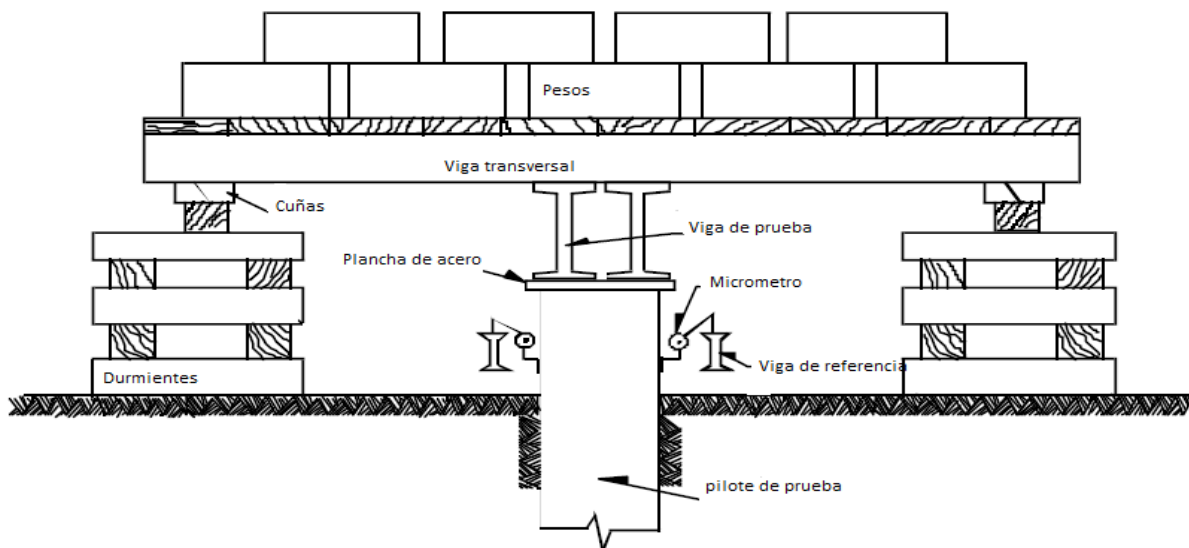
Se centra una caja o plataforma sobre la viga de prueba, la cual estará soportada por durmientes ubicados tan lejos como sea posible del pilote de prueba, pero en ningún caso la distancia será menor que 1.5 m de luz entre caras. La carga de la caja o plataforma será de material apropiado tal como suelo, roca, concreto o acero. Con este dispositivo de carga el gato hidráulico reacciona frente a esta carga como lo muestra la Figura 2.4.



**Figura 2.4. Arreglo para lograr realizar la prueba de carga a un pilote.**

## 2. Carga aplicada directamente a un pilote o grupo de pilotes.

La norma ASTM especifica que se debe centrar sobre la plancha de acero una viga de prueba de peso conocido, con suficiente medida y resistencia, con los extremos soportados sobre durmientes temporales; centrar una plataforma de peso conocido sobre la viga, esta plataforma es soportada por durmientes ubicadas a una distancia libre no menor de 1.5 m. La carga de la plataforma puede ser con acero o concreto. La Figura muestra este arreglo.



**Figura 2.5. Arreglo para la realización de la prueba de carga.**

De forma general las tres normas consultadas plantean que para desarrollar pruebas de carga a pilotes hincados en agua será necesario construir una plataforma segura y estable, completamente independiente del pilote de ensayo, y que garantice su acceso, estancia cómoda y segura del personal que realiza el ensayo.

Una vez analizado las diferentes maneras de lograr un marco de reacción para la aplicación de la carga a los pilotes, comenzaremos una revisión y análisis del proceso de aplicación de la carga al pilote ensayado.

Según la NC 54-265- 1984, las cargas de prueba se aplicarán en incrementos de cargas las que se mantendrán constante hasta que la razón de asentamiento, al representar en un gráfico de asentamiento contra tiempo no exceda de 0,1 mm en los últimos 30 min en suelos arenosos y en los últimos 60 min en suelos arcillosos; el tiempo mínimo de aplicación de un incremento de carga es de 2 horas, la carga de prueba será entonces reducida a cero es decir se descargará el pilote de ensayo y será mantenido en cero hasta que la razón de asentamiento representada en el gráfico de asentamiento contra tiempo no exceda de 0,1 mm por hora o durante 2 horas, según lo que ocurra primero, produciéndose entonces a aplicar otro incremento de carga.

El incremento de carga que es igual a la capacidad de carga estimada del pilote ( $P_c$ ) según los cálculos, se aplicará durante un tiempo igual a 24 horas y el incremento de carga final que será igual a dos veces la capacidad de carga del pilote ( $2P_c$ ) se aplicará durante un tiempo igual a 48 horas y se tomarán observaciones de las deformaciones cada 30 min, a partir del instante exacto de la aplicación de la carga e inmediatamente antes y después de reducir a cero dicha carga máxima.

El incremento final de carga será disminuido en cuatro decrementos de carga iguales a la cuarta parte de la carga final, manteniéndose estos decrementos de carga un tiempo no menos de 2 horas. Después de descargado el pilote se tomará las lecturas de asentamiento cada una hora y la última lectura será tomada a las 24 horas de descargado el pilote.

La norma americana ASTM-D-1143-81 establece como el procedimiento estándar de carga el siguiente: Siempre y cuando no ocurra la falla primero, cargar el pilote hasta 200% de su carga de diseño, aplicando la carga en incrementos del 25% de la carga de cálculo del pilote. Mantener cada incremento de carga hasta que la razón de asentamiento no sea mayor que 0.01 pulgadas (0.25 mm)/hora, pero nunca por encima de 2 horas. Si el pilote de prueba no ha fallado, remover la carga de prueba total en cualquier momento después de 12 horas si el asentamiento del tope sobre un período de 1 hora no es más grande que 0.01 pulgadas (0.25 mm); si ocurre lo contrario, permita que la carga total permanezca sobre el pilote por 24 horas. Después del tiempo requerido de espera, remover la carga de prueba en decrementos de 25% de la carga total con 1 hora entre decrementos. Si la falla del pilote ocurre, continúe aplicando carga con el gato al pilote hasta que el asentamiento sea igual al 15% del diámetro del pilote o dimensión diagonal.

Según la norma brasileña NBR 12131/1992 el pilote se lleva a la ruptura o, por lo menos, hasta dos veces el valor previsto de la carga de trabajo. A criterio del proyectista la prueba de carga puede ser realizada de dos maneras:

- Con cargamento lento
- Con cargamento rápido

Para el caso del ensayo con cargamento lento, la carga aplicada en cada incremento debe ser superior en 20% de la carga de trabajo prevista para el pilote, en cada incremento la carga debe ser mantenida hasta estabilizados los desplazamientos y nunca un tiempo menor que 30 minutos. Los desplazamientos deben ser leídos a partir del inicio de la aplicación de la carga correspondiente e inmediatamente después de estabilizado el peso.

No siendo alcanzada la carga de rotura del pilote, la carga máxima del ensayo debe ser mantenida durante un tiempo de 12 horas entre la estabilización de los asentamientos y el comienzo de la descarga, dicha descarga del pilote debe ser hecho por lo mínimo en cuatro decrementos, después de haberle quitado toda la carga al pilote las lecturas de los desplazamientos deben continuar hasta su estabilización.

Analizando ahora la prueba de cargamento rápido que propone la norma brasileña, la carga aplicada en cada incremento debe ser superior en 10% de la carga de trabajo prevista para el pilote, cada uno de los incrementos antes mencionados la carga debe ser mantenida 5 minutos, independientemente de que se logre la estabilización de los desplazamientos serán medidos al inicio y al final de cada incremento de carga.

Después de ser alcanzada la carga máxima del ensayo se procede a la descarga realizándose en cuatro decrementos de carga al igual que en el ensayo de cargamento lento pero el tiempo que se mantendrá cada decremento será 5 minutos, realizando lecturas de los desplazamientos. Luego de transcurrido 10 minutos de la descarga del pilote se realizará la última lectura de desplazamientos.

Después de revisadas y analizadas las normas antes mencionadas para la realización de ensayos de carga estáticos en cimentaciones sobre pilotes, se puede afirmar que tanto la Norma Brasileña (NBR 12131/1992) como la Norma Americana ASTM-D-1143-81 presentan al compararla con la norma cubana (NC 54-265- 1984), mayor cantidad de arreglos para construir marcos de reacción, los que permiten aplicarle la carga al pilote de prueba en diversas condiciones.

Coincidentemente las tres normas plantean que los incrementos de carga sean en el orden de 25% la carga de cálculo o estimada en el proyecto hasta llegar a una carga última de 2 veces la carga prefijada. En cuanto al tiempo de aplicación de cada incremento de carga las tres normativas proponen tiempo diferente como también lo hacen para la carga última.

Proponemos dotar a la norma cubana (NC 54-265- 1984) con otros arreglos que permitan aplicarle la carga al pilote de diversas maneras, al igual que la Norma Brasileña y la Norma Americana. De hecho, el arreglo que plantea la norma para la realización de ensayos de carga estáticos para cimentaciones sobre pilotes en Cuba, es un marco de reacción formado por dos pilotes de anclaje introducidos en el terreno y una viga de acero que une a estos pilotes, sin embargo en la práctica ingenieril cubana no se aplica este arreglo y en su lugar se aplica otro que si aparece contemplado en las dos restantes normas que se mencionan en los párrafos

anteriores. Además por los buenos resultados obtenidos internacionalmente con el empleo de la Norma Americana (ASTM-D-1143-81) en la realización de pruebas de carga y porque utilizando este reglamento se ahorraría tiempo en la aplicación de este ensayo, sugerimos adecuar la Norma Cubana a las tendencias de la Norma Americana.

## 2.5 Correlaciones para la determinación de la capacidad de carga en pilotes.

A nivel mundial hace ya algunas décadas se han desarrollado trabajos encaminados a intentar predecir la capacidad de carga de cimentaciones sobre pilotes utilizando correlaciones a partir de ensayos de penetración, en este epígrafe particularmente se recopilan dos expresiones obtenidas específicamente para ser usadas utilizando los resultados del ensayo SPT. La fórmula de Aoki y Velloso (1975) y la expresión conseguida por Decourt y Quaresma (1978), han sido aplicadas en suelos brasileños lográndose buenos resultados al compararlos con los obtenidos después de hacer pruebas de carga estáticas a pilotes. A continuación se muestran los dos métodos desarrollados por brasileños en la década de 1970.

### Método de Aoki y Velloso (1975)

$$R = A_b \times \frac{KN^{1}_{spt}}{F_1} + P \sum \frac{\alpha KN^{m}_{spt}}{F_2} \times \Delta L \quad \text{Exp 2.1}$$

Tabla 2.6. Valores de F1 y F2 según Velloso, Aoki y Salamoni (1978).		
Tipo de pilote	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>
Franki	2.5	5
Metálico	1.75	3.5
Hincado	1.75	3.5
In situ	3.5	7

<b>Tabla 2.7. Valores de K y <math>\alpha</math> en función del tipo de suelo.</b>		
Tipo de suelo	K (Mpa)	$\alpha$ (%)
Arena	1	1,4
Arena limosa	0,8	2
Arena limo-Arcilloso	0,7	2,4
Arena arcillosa	0,6	3
Arena arcillo- limosa	0,5	2,8
Limo	0,4	3
Limo arenoso	0,55	2,2
Limo areno-arcilloso	0,45	2,8
Limo Arcilloso	0,23	3,4
Limo arcillo-arenoso	0,25	3
Arcilla	0,2	6
Arcillo arenoso	0,35	2,4
Arcilla areno-limosa	0,3	2,8
Arcilla limosa	0,22	4
Arcilla limo-arenosa	0,33	3

Método de Decourt y Quaresma (1978).

La capacidad de carga última ( $Q_u$ ) es definida como a suma de las cargas máximas que puede soportar el pilote por fricción lateral con el suelo  $Q_s$  y por punta del pilote  $Q_p$ .

$$Q_u = Q_s + Q_p$$

Exp 2.2

Con base a los ensayos de SPT, Decourt y Quaresma (1978), presentan un proceso de cálculo de capacidad de carga en pilotes.

$$Q_u = q_p A_p + q_s A_s$$

La tensión de rotura en la punta está dada por:

$$q_p = K N'$$

Donde k está en función del tipo de suelo, como se muestra en la siguiente tabla.

<b>Tabla 2.8. Valores de K y <math>\alpha</math> en función del tipo de suelo.</b>		
Tipo de suelo	K (kN/m <sup>2</sup> )	K (tf/m <sup>2</sup> )
Arcilla	120	12
Limo arcilloso	200	20
Limo arenoso	250	25
Arena	400	40

N' es la media de 3 valores N a nivel de la punta, inmediatamente encima e inmediatamente abajo.

El aporte a fricción causado por la resistencia a cortante entre el suelo y el pilote se determina de la siguiente manera.

$$q_s = 10 (N/3 + 1) \text{ kN/m}^2$$

$$q_s = N/3 + 1 \text{ tf/m}^2$$

Donde N es la media dos valores de N a lo largo del fuste del pilote (se utiliza los valores de N utilizados para la determinación de la rotura en punta). La rotura aquí considerada, cuando la misma este claramente definida, o sea, carga correspondiente a un desplazamiento de un 10% de su diámetro.

**DECOURT (1983):**

$$Q_{adm} = Q_p/F_p + Q_s/F_s$$

Ou

$$Q_{adm} = (Q_p + Q_s)/2$$

Donde  $F_p$  es un factor de seguridad, igual a 1,3 y  $F_s$  es un factor de seguridad igual a 4.

El ensayo CPT, (Cone Penetration Test) permite conocer la resistencia al corte sin drenaje de arcillas blandas. Suele emplearse la siguiente expresión:

$$S_u = 1/N_K (q_c - \sigma_v)$$

Dónde:

$s_u$ = Resistencia al corte sin drenaje del terreno atravesado.

$N_K$ = Factor adimensional de proporcionalidad.

$q_c$ = Resistencia unitaria por la punta al avance del cono (descontado el rozamiento en el fuste).

$\sigma_v$ = Presión vertical total.

A pesar del grado de empirismo que encierran los ensayos de penetración debido a los factores de escala, estas pruebas se emplean bastante a menudo en obras civiles. 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.

Se han logrado buenos resultados al predecir la capacidad de carga de un pilote aplicando los métodos de los métodos de Aoki y Velloso (1975) y el de Decourt y Quaresma (1978), como se evidencian en los siguientes ejemplos.

(Tomado de: Validación de la adaptabilidad de los métodos de cálculo de capacidad de carga para diferentes tipos de pilotes. A Ayres y J. Companum[1998])

Pilote: Longitud  $L = 8$  m.

Diámetro  $D = 0.32$  m.

En la tabla 2.9 se muestran los parámetros resistentes de los suelos utilizados para el empleo de las expresiones dinámicas mencionadas anteriormente.

<b>Tabla 2.9. Parámetros de resistencia del suelo.</b>		
Profundidad (m)	Cohesión (kPa)	Ángulo de fricción interno ( $\phi^\circ$ )
1	3	28
2	-	28
6	22	31

A continuación se presentan los resultados logrados después de emplear las expresiones de Aoki – Velloso (1975) y Decourt– Quaresma (1978), además se cuenta con los resultados de la prueba de carga correspondiente al pilote analizado.

<b>Tabla 2.10. Comparación entre los resultados obtenidos del empleo de las expresiones de Aoki – Velloso (1975), Decourt– Quaresma (1978) con la prueba de carga.</b>	
Prueba o metodología.	Carga de rotura (kN)
Prueba de Carga	423
Aoki – Velloso (1975)	423
Decourt– Quaresma (1978)	314

Como se puede apreciar al utilizar la metodología que proponen Aoki – Velloso (1975), se alcanza el mismo valor de capacidad de carga, que el determinado al emplear el ensayo de carga estática. Sin embargo al aplicar el método propuesto por Decourt– Quaresma (1978), difiere en más de 100 kN con el verdadero valor de carga que puede soportar el elemento sin que se produzca la falla, pero aún se acepta como un método a utilizar para predecir la carga que puede tomar un pilote cualquiera.

(Tomado de: Prueba de carga estática en pilotes, comparación con los métodos de cálculo de capacidad de carga. A. Stephan y E. Mintte [1998])

Pilote: Longitud  $L = 10$  metros

Lados  $b = 0.25$  metros.

En la tabla 2.11 se muestran los parámetros resistentes de los suelos utilizados para el empleo de las expresiones dinámicas mencionadas anteriormente, que permiten determinar la capacidad de carga de un pilote.



<b>Tabla 2.11. Características de los suelos</b>				
Estrato	Suelo 1	Suelo 2	Suelo 3	Suelo 4
Espesor	3 m	2 m	2 m	4 m
Descripción	Arena arcillosa	Limo arenoso	Arena arcillosa	Arena suelta
Cohesión (kPa)	2	-	14	-
$\varphi^\circ$	25	25	17	43

El resultado logrado utilizando tanto las expresiones de Aoki – Velloso (1975), Decourt–Quaresma (1978), así como el obtenido de la realización de una prueba de carga realizada a un pilote se muestran en la tabla 2.12.

<b>Tabla 2.12. Comparación entre los resultados obtenidos del empleo de las expresiones de Aoki – Velloso (1975), Decourt– Quaresma (1978) con la prueba de carga.</b>	
Prueba o metodología.	Carga de rotura (kN)
Prueba de Carga	1050
Aoki – Velloso (1975)	1020
Decourt Quaresma (1978)	915

Como puede apreciarse al igual que en el ejemplo anterior se obtiene como método más exacto al ser comparado con el resultado de la prueba de carga aplicada a un pilote es el de Aoki – Velloso (1975).

A continuación se realizará las comparaciones entre los métodos antes mencionados utilizando específicamente resultados de ensayos realizados en el Puerto de Mariel.

Partiendo de los datos obtenidos del Informe ingeniero geológico realizado para el Proyecto de Investigación “Estudio de la capacidad de carga del muelle de Mariel”, con fecha 7 de mayo de 1980, se calculará utilizando expresiones que correlacionan los resultados de los ensayos de penetración con la capacidad de carga de un pilote. Seguidamente se muestran los datos con los cuales se trabajará para obtener la carga que es capaz de resistir un pilote apoyado en los diferentes estratos.

Estrato 1: Relleno de arcilla carmelita con  $N_{spt} = 15$ , espesores entre los 1.3 y los 7.4 m

Estrato 2: Relleno de restos marítimos con  $N_{spt} = 4 - 14$ , espesores entre los 1. y los 2.4 m

Estrato 3: Cieno arcilloso con  $N_{spt} = 0 - 10$ , espesores entre los 3.1 y los 6.7 m

Estrato 4: Arcilla limosa con  $N_{spt} = 15 - 25$ , espesores de 7 m

Estrato 5: Argilita con  $N_{spt} = 40$  espesores de 10m.

Como dato a considerar de importancia y solo después de haber realizado investigaciones pertinentes, se detecta la presencia de una antigua ensenada en la bahía, donde la parte superior de la Argilita está a más de 20 metros de profundidad y cuyo ancho es de 60m.

En la tabla 2.13 se muestran los parámetros resistentes de los suelos utilizados para el empleo de las expresiones dinámicas mencionadas anteriormente.

<b>Tabla 2.13 Características de los suelos.</b>					
Capa	Descripción	$\varphi^\circ$	C kg/cm <sup>2</sup>	E <sub>o</sub> kg/cm <sup>2</sup>	q <sub>u</sub> kg/cm <sup>2</sup>
1	Relleno de arcilla	-	-	-	-
2	Relleno restos marítimos	-	-	-	-
3	Cieno arenoso	8	0.05	25	-
4	Arcilla Limosa	18	0.3	15	1.9
5	Argilita	18	0.6	30	4

Debido a la heterogeneidad en sentido vertical del corte litológico existe también cierta diferencia entre la resistencia de los pilotes que están en la ensenada y fuera de ella. Para este cálculo se empleará de base un pilote de 14 m de longitud que descansa directamente sobre la Argilita, al cual con anterioridad utilizando la expresión que propone el fabricante de martillo DELMAG se le determinó su capacidad de carga obteniéndose como resultado 73 t.

Ahora bien, procediendo a la aplicación de la expresión propuesta por (Aoki y Velloso 1975), la cual aparece al inicio de este epígrafe y utilizando los datos de ensayos de penetración que se muestran anteriormente intentamos llegar a conocer la carga de trabajo del pilote.

Para realizar los cálculos de capacidad de carga por el método antes mencionado se necesitan una serie de coeficientes y datos que se muestran en la siguiente tabla.

<b>Tabla 2.14. Datos y coeficientes para el empleo de la expresión propuesta por Aoki y Velloso 1975.</b>				
Estrato	Profundidad (m)	Valor de K(KPa)	valor de $\alpha$	N <sub>spt</sub>
Relleno de arcilla carmelita	terreno - 1,3	200	0,06	9
Relleno con restos marítimos	1,3 - 2,7	800	0,02	10
Cieno arcilloso	2,7-5,8	230	0,034	4
Arcilla limosa	5,8 - 12,8	220	0,04	25
Argilita	12,8 -14	1000	0,014	40

Se conoce además que los pilotes fueron hincados ( $F_1 = 1,75$  y  $F_2 = 3,5$ ) y que cuentan con una sección de  $0,45 \text{ m} \times 0,45 \text{ m}$ . Después de conocidos estos datos y una vez aplicado el Método de Aoki y Velloso se tiene el siguiente resultado:

$$R = 6015,86 \text{ kN} = 601,5 \text{ t}$$

Aplicando esta vez el Método de Decourt y Quaresma (1978), que aparece al inicio de este epígrafe, para el caso del pilote de  $14 \text{ m}$  que descansa sobre la Argilita tenemos:

$$Q_u = 4986,8 \text{ kN} = 498,7 \text{ t}$$

En la tabla que se muestra a continuación se presentan de forma resumida los resultados obtenidos por las metodologías empleadas.

<b>Tabla 2.12. Comparación entre los resultados obtenidos del empleo de las expresiones de Aoki – Velloso (1975), Decourt– Quaresma (1978), con el logro de la aplicación de la expresión dinámica que propone el fabricante del Martillo DELMAG.</b>	
Metodología.	Carga de rotura (kN)
Expresión Dinámica	730
Aoki – Velloso (1975)	1020
Decourt Quaresma (1978)	4986

Según el informe Ingeniero Geológico realizado el 20 de marzo de 1982 se determinó la presencia de los diferentes suelos, que se muestran a continuación.

Estrato 1: Relleno

$$\varphi = 25^\circ \quad C = 0.1 \text{ kg/cm}^2$$

Estrato 2: Mezclas de cieno y turba

$$\varphi = 0^\circ \quad C = 0.01 \text{ kg/cm}^2$$

Estrato 3: Arcilla

$$\varphi = 8^\circ \quad C = 0.63 \text{ kg/cm}^2, \text{ por ensayos se propone para los pilotes a hincar}$$

$$q_f = 0.3 \text{ kg/cm}^2 \text{ y } q_0 = 6 \text{ kg/cm}^2$$

Estrato 4: Argilita

$$\varphi = 17^\circ \quad C = 0.45 \text{ kg/cm}^2, \text{ por ensayos se propone para los pilotes a hincar } q_f = 0.4 \text{ kg/cm}^2 \text{ y}$$

$$q_0 = 7 \text{ kg/cm}^2.$$

Con los resultados de la prueba de carga y definiendo como condición más crítica la capa C-9 donde el estrato de Argilita se encuentra a una profundidad de 21 metros. Se asume que los pilotes utilizados tienen una longitud de 23 metros, considerando que el pilote penetra 10m en el estrato de arcilla y 1m en la Argilita, con las siguientes características físico-mecánicas:

Tabla 2.13 Características y parámetros de resistencia del suelo.			
Capa	Tensiones totales	Tensiones efectivas	Propiedades
Arcilla	$\phi = 15^\circ$	$\phi = 0^\circ$	$\gamma_\phi = 18.3 \text{ kN}/\mu^3$
	C = 30 kPa	C = 80 kPa	Eo = 15 000 kPa
Argilita	$\phi = 12^\circ$	$\phi = 0^\circ$	$\gamma_\phi = 18.7 \text{ kN}/\mu^3$
	C = 160 kPa	C = 180 kPa	Eo = 30 000 kPa

Para los datos mostrados se calculará la capacidad de carga del pilote 23 m de longitud utilizando los métodos propuestos por Aoki y Velloso (1975) y Decourt y Quaresma (1978).

Utilizando la expresión propuesta por el primero de los dos métodos mencionados en el párrafo anterior y con los datos que se muestran en la siguiente tabla se obtendrá la capacidad de carga última que puede tomar según este procedimiento.

Tabla 2.14 Datos y coeficientes para el empleo de la expresión propuesta por Aoki y Velloso 1975.				
Estrato	Profundidad (m)	Valor de K (KPa)	Valor de $\alpha$	N <sub>spt</sub>
Relleno	terreno - 7	200	0,06	9
Cieno y turba	7.-12	230	0,034	10
Arcilla limosa	12.-22	220	0,04	25
Argilita	22- 23	1000	1,4	40

Una vez realizado el cálculo se tiene el resultado:

$$R = 6868,17 \text{ kN} = 687 \text{ t}$$

Aplicando esta vez el método de Decourt y Qeresma se logra la capacidad de carga que se presenta a continuación.

$$Q_u = 6684,2 \text{ kN} = 668,4 \text{ t}$$

En la tabla que se presenta a continuación se muestran de una forma resumida los resultados de la aplicación de diferentes métodos para determinar la capacidad de carga de una cimentación sobre pilotes.

<b>Tabla 2.15. Comparación entre los resultados obtenidos del empleo de las expresiones de Aoki – Velloso (1975), Decourt– Quaresma (1978), con el logrado de la aplicación de otras metodologías basadas en la teoría de la plasticidad.</b>	
Metodologías	$Q_{ULTIMA} (T)$
Sowers	170.6
Caquot - Kerisel	170.8
MEF	131.2
Aoki – Velloso (1975)	687
Decourt - Quaresma (1978)	668.4

Se aprecia que los resultados obtenidos distan mucho de los obtenidos en los ensayos de carga, lo que evidencia la no justificación de estas expresiones para suelos de gran dureza o pilotes apoyados en roca blanda. Sería posible realizar un estudio más profundo, estableciendo un nuevo sistema de coeficientes que se ajuste a los resultados reales obtenidos en los ensayos de carga.

## 2.6 Conclusiones del capítulo.

Después de presentado cada una de los epígrafes de este capítulo y en correspondencia con los resultados obtenidos se muestra las siguientes conclusiones parciales:

1. Para suelos cubanos la expresión dinámica más precisa de las utilizadas en la determinación de la capacidad de carga de una cimentación sobre pilotes para el caso de Cuba es la fórmula propuesta por FHWA.
2. La norma cubana para la realización de Pruebas de Carga debe adecuarse a las tendencias internacionales y a las condiciones cubanas.
3. Se evidencia la no justificación de las expresiones propuestas por Aoki - Velloso y Decourt - Quaresma para suelos de gran dureza o pilotes apoyados en roca blanda.
4. Existe relación entre el tiempo de aplicación de la carga y el criterio de tiempo para el ensayo de carga.

## **Capítulo 3. Comparación de resultados experimentales con la modelación y ensayos de carga reales.**

### **3.1 Resumen**

En este capítulo se realiza un estudio profundo de la forma de realizar la modelación axial simétrico de un pilote con carga axial, utilizando el programa computacional Flac con base matemática en el Método de las Diferencias Finitas. Para el programa mencionado anteriormente se elaboró un manual de usuario con el cual se puede modelar un pilote con las condiciones de carga y simetría que se mencionan precedentemente. Partiendo de dicha secuencia de pasos se efectúa la modelación de varios pilotes utilizando el Flac, los resultados obtenidos por dicha vía son comparados con los logrados empleando una hoja Excel programada y el programa de computadoras Geo 5. Además en este apartado se modela utilizando el programa Flac una cimentación sobre pilotes real, a la cual con anterioridad se le realizó una prueba de carga estática por lo que se conoce la verdadera capacidad de carga. Para realizar la modelación de un elemento estructural utilizando el cálculo electrónico basado en métodos numéricos que responda a las condiciones reales de una estructura es preciso conocer las recomendaciones que se presentan para el trabajo con estos softwares, precisamente en este capítulo se exhiben algunas ayudas que permitirán el empleo de este tipo de programas de una manera adecuada y precisa.

### **3.2 Introducción**

Con el gran desarrollo logrado por la industria de la computación y las ventajas que se generan utilizando esta vía para la modelación de estructuras, resulta evidente que la frecuencia con que se emplean programas computacionales en el sector ingenieril es creciente, hasta el punto que en la contemporaneidad constituye la vía más usada para predecir el comportamiento de estructuras. Si a todo lo anterior le sumamos la precisión de los resultados logrados y la economía que representa al compararlos con otros métodos de predicción, no quedan incertidumbres del que el empleo de programas computacionales para la modelación estructural en el sector ingenieril constituye una vía potentísima.

### **3.3 Recomendaciones para la modelación de cimentaciones sobre pilotes utilizando métodos numéricos.**

Los métodos numéricos son aquellos en los que la solución analítica es inaccesible por la complejidad matemática que requiere y que actualmente con la ayuda del cálculo electrónico se logra una respuesta rápida. Dentro de estos métodos se puede citar el Método de las

Diferencias Finitas (MDF) y el Método de los Elementos Finitos (MEF). La modelación de la capacidad de carga de los materiales constituyentes del suelo es un tema de la ingeniería ampliamente desarrollado, sin embargo, múltiples son los aspectos a tener en cuenta en el análisis del fenómeno.

Con el impulsivo desarrollo que ha experimentado la industria de la computación y la programación se han desarrollado varios sistemas basados en diferentes métodos numéricos con grandes potencialidades para el análisis de los problemas tensión deformación en los suelos y la roca. Entre ellos podemos mencionar el FLAC (1996), que realiza un análisis en tres dimensiones, con base matemática en las diferencias finitas; el PLAXIS (1990), el SIGMAW (1995), ABAQUS (1995) y ANSYS (1996) con base matemática en los elementos finitos, de ellos solo el SIGMAW no trabaja espacialmente. Se debe señalar, además, el elevado precio en el mercado internacional de estos softwares.

En el empleo de cualquiera de los programas computacionales que coexisten para la modelación empleando métodos numéricos se destacan cuatro pasos para la conformación de un modelo como son:

- Generación de la geometría (Mallado).
- Condiciones de contorno.
- Generación y aplicación del material.
- Aplicación de las cargas.

Para cada uno de los pasos que se acaban de presentar se darán recomendaciones para modelar un problema real por esta vía.

### **Recomendaciones para la generación de la malla.**

Adentrándonos en el proceso de modelación debemos de partir del mallado. Una malla de elementos finitos para la solución de un problema debe tener en cuenta lo esencial de la geometría de la estructura y las capas de suelo que se ponen en contacto para la solución del problema (heterogeneidad de los materiales, presencia de discontinuidad). Pero la malla debe ser en sí, el fruto de un compromiso entre la capacidad de cálculo posible (número máximo de grados de libertad) y la precisión aceptable sobre los resultados numéricos. La malla utilizada debe ser construida considerando los siguientes puntos.

- 1 Todas las simetrías compatibles con el problema mecánico (geometría, condiciones límites, cargas) deben ser utilizadas a fin de reducir el tamaño del sistema estudiado.
- 2 La malla debe ser suficientemente fina en las zonas más solicitadas, quiere decir, en las zonas donde existan grandes variaciones de los desplazamientos y las tensiones. Estas variaciones son coaccionadas ya sea por una carga, o por la presencia de una singularidad geométrica (ángulo brusco, cambio de espesor), por los contornos geométricos de fuerte curvatura (cavidades), o también por las características mecánicas localmente muy leves o muy fuertes en correspondencia a este medio ambiente [Mesat (1993)].
- 3 El tamaño de los elementos debe estar, en la medida de lo posible de tal forma que la relación entre la mayor dimensión del elemento y la menor dimensión este cercana a la

## Comparación de resultados experimentales con la modelación y ensayos de carga reales.

unidad. En particular, en las zonas de fuertes gradientes, los triángulos tendrán similitud, en lo posible, a los triángulos equiláteros, los cuadriláteros a los cuadrados, y los hexaedros a los cúbicos, para no introducir perturbaciones en los cálculos numéricos (distorsión de los elementos).

- 4 En las zonas menos solicitadas, los elementos de gran tamaño son generalmente colocados en el lugar para alcanzar las fronteras exteriores. No hay reglas precisas para establecer el tamaño de los elementos, es suficiente argumentar un aumento progresivo regular lejos de las zonas sensibles.

Para los problemas bidimensionales las mallas cuadradas pueden ser fácilmente utilizadas, en el mismo grado de la singularidad. En cambio, para los problemas tridimensionales las mallas refinadas son difíciles de realizar, pues el tamaño de los sistemas matriciales pueden pasar más allá de las capacidades de las computadoras actuales (en caso de los cálculos no lineales complejos). En consecuencia con la modelación, es frecuente la utilización en el caso de problemas tridimensionales soluciones bidimensionales.

### **Comparación entre los programas computacionales FLAC y PLAXIS.**

La comparación entre los dos programas comerciales de métodos numéricos no solo consiste en comparar dos métodos de cálculo diferentes, sino también, dos filosofías distintas a partir de las cuales se desarrollaron ambos programas.

En primer lugar analizaremos las diferencias entre los dos métodos de cálculo. Por un lado, FLAC se basa en el método de solución explícita, mientras que PLAXIS se basa en el método de solución implícita. Ambos métodos transforman un grupo de ecuaciones diferenciales en una matriz de ecuaciones para cada elemento, relacionando tensiones con los desplazamientos en los nodos.

El método de diferencias finitas es quizás la técnica numérica más antigua utilizada para la resolución de grupos de ecuaciones diferenciales. En él, cada grupo de ecuaciones es reemplazado directamente por una expresión algebraica escrita en términos de variable en puntos discretos. En cambio, en el método de elementos finitos el requisito principal consiste en que las cantidades (tensiones y deformaciones), varían a lo largo de cada elemento en un campo prescrito, utilizando las funciones específicas controladas por parámetros. La formulación consiste en ajustar estos parámetros de tal forma que el error sea mínimo en términos de energía local o global.

En la tabla 3.1 se resumen las diferencias entre ambos métodos. Básicamente, las ventajas del método explícito frente al método implícito están en que el primero necesita menos cantidad de memoria para resolver problemas numéricos no-lineales y de grandes deformaciones ya que no necesita almacenar ninguna matriz de rigidez. En cambio, el método implícito tiene como ventaja frente al método explícito su mayor robustez debido al uso de la matriz de rigidez.



<b>Tabla3.1. Comparación entre el método de solución explícita (FLAC), y el método de solución implícita (PLAXIS).</b>	
Método Explícito	Método Implícito
Pequeña cantidad de esfuerzo computacional por tiempo de cálculo.	Gran cantidad de esfuerzo computacional por tiempo de cálculo.
Necesita emplear más tiempo para llegar a la solución final. En modelos elásticos lineales es excesivamente lento.	El tiempo de cálculo necesario es menor al empleado por el método explícito. En modelos elásticos lineales, la matriz de rigidez es constante y el cálculo es rápido y robusto.
El método explícito es sensible a los cambios bruscos en las propiedades de los materiales del modelo (por ejemplo, grandes diferencias en la rigidez o en la permeabilidad).	El método implícito es más consistente ante cambios bruscos en las propiedades de los materiales del modelo.
Las matrices nunca son creadas. Los requerimientos de memoria son siempre mínimos.	Las matrices de rigidez tienen que ser almacenadas.
Desde que las matrices no son creadas, grandes deformaciones y desplazamientos son alojadas sin un esfuerzo computacional adicional.	Se necesita un esfuerzo computacional adicional para seguir grandes desplazamientos y deformaciones.
No es un método incondicionalmente estable. Puede seguir iterando en estados de colapso del modelo.	Método incondicionalmente estable. En un estado plástico el programa deja de iterar.
No es necesario iterar para seguir la ley constitutiva no-lineal.	Es necesario el proceso de iteración para seguir la ley constitutiva no-lineal.
Siempre que el criterio del tiempo de cálculo sea siempre correcto, las leyes no lineales son siempre seguidas en un camino físico válido.	Siempre es necesario demostrar que el procedimiento arriba mencionado es: (a) estable; (b) sigue el camino físicamente correcto.

### **3.4 Empleo del Flac para la modelación de Cimentaciones sobre pilotes.**

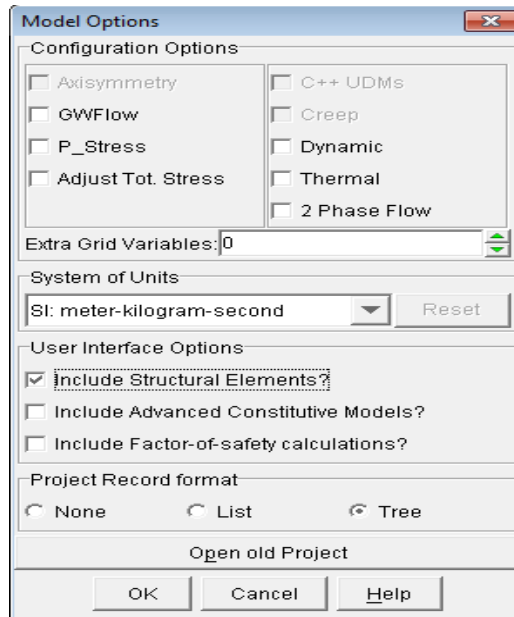
Después de haber estudiado minuciosamente las potencialidades que tiene el programa de computadoras Flac para la modelación de diversos tipos de estructuras, somos capaces de establecer una secuencia de pasos que permitirán realizar la modelación de una cimentación sobre pilotes de cualquier diámetro y profundidad apoyada en uno o varios estratos de suelo. La metodología que se presentará está encaminada a determinar la capacidad de carga de un pilote con carga axial simétrica.

Inmediatamente después que el programa computacional Flac basado matemáticamente en el Método de las Diferencias Finitas ha sido instalado en su computadora correctamente ya es posible comenzar el trabajo de modelación con el empleo de esta herramienta.

## **Pasos para confeccionar un modelo de un pilote utilizando el Flac.**

### **1- Especificar opciones para el análisis al programa.**

Una vez ejecutado el programa Flac se muestra la primera pantalla de este, en la cual se presentan las opciones de configuración para el análisis. Además en este mismo paso se escoge el sistema de unidades preferido para el trabajo de modelación, así como el formato de registro de proyecto y las opciones de interfaz de usuario. En la siguiente figura se presenta este cuadro de diálogo.

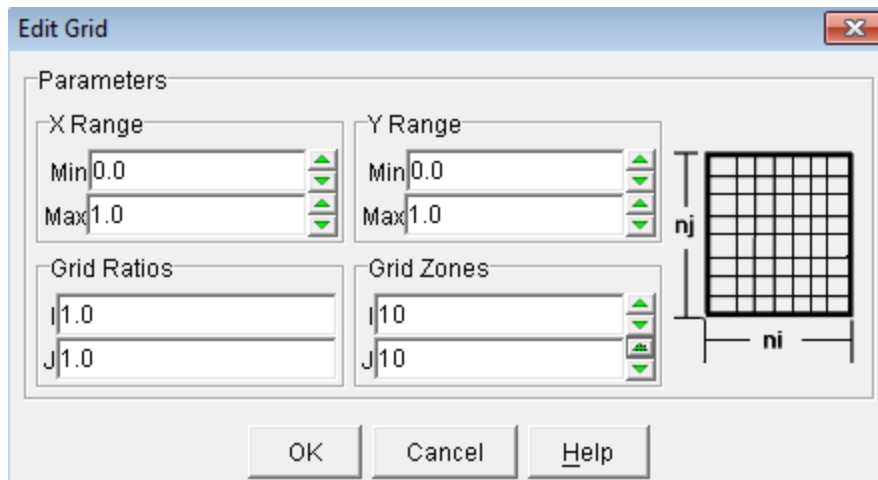


**Figura 3.10 Cuadro de dialogo con los modos optativos de análisis que presenta el programa Flac.**

En el caso de un pilote con carga axial simétrica se marcará solamente en la opción de interface de usuario, la que incluye el elemento estructural, tal y como se mostró en la figura anterior. Después de presionar el botón ok, se abre un cuadro de texto que permite guardar el proyecto.

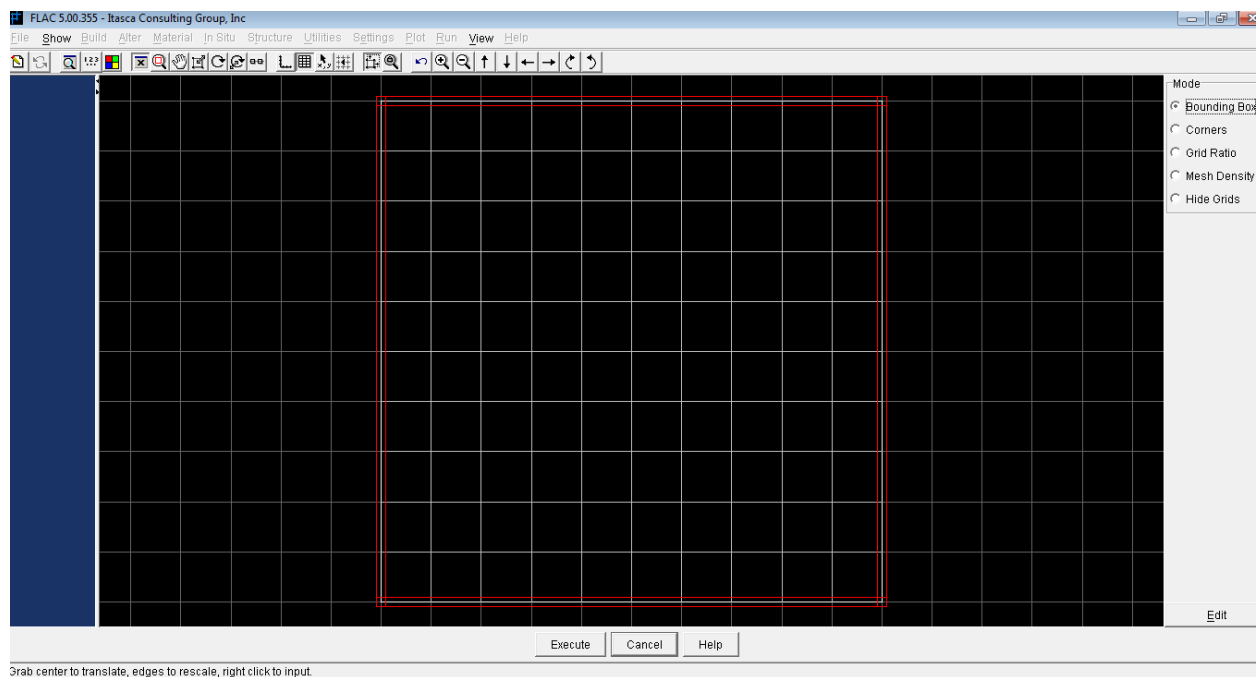
### **2- Generación de la malla.**

El programa en cuestión muestra una serie de elecciones que permiten realizar el mallado del modelo. Al dar click en la herramienta para Construir (Build) se desdoblán las opciones para la generación de la malla, en el caso que presentamos se utiliza la opción simple. Inmediatamente después de presionar dicha opción se presenta un cuadro de diálogo en el que se puede cambiar el tamaño de la reja y además las divisiones interiores. Para el proceso que nos ocupa se realiza una malla cuadrada de 10x10 divisiones, como se presenta en la figura consecutiva.



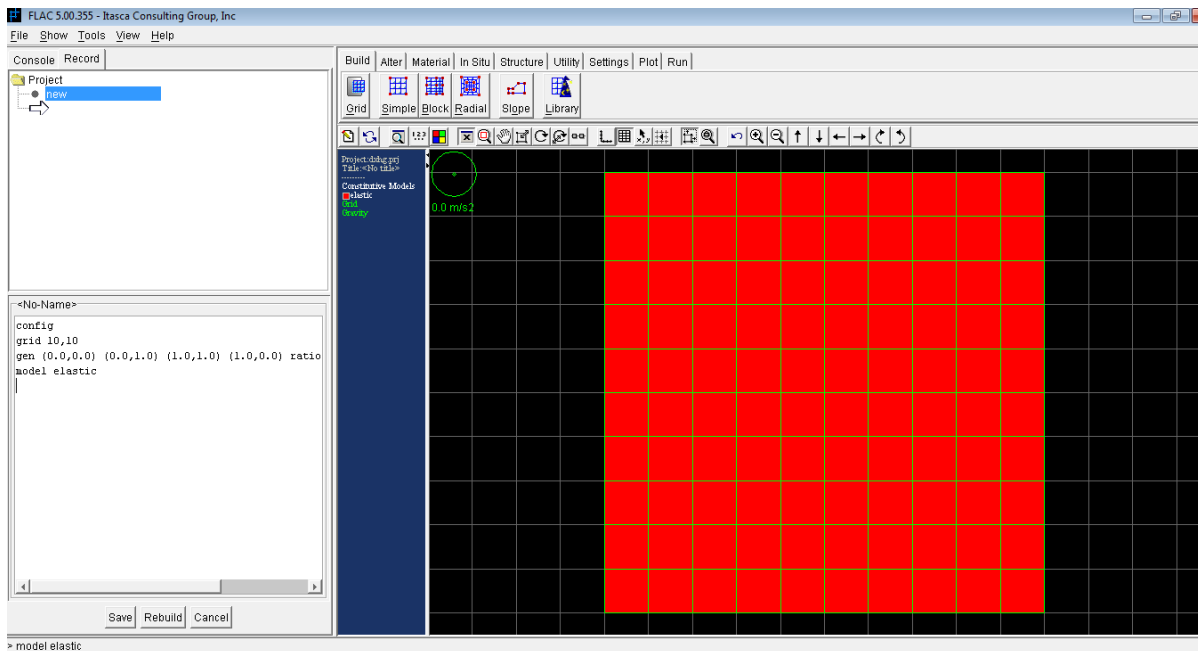
**Figura 3.11. Cuadro de diálogo para la generación de una malla simple.**

Después de presionar el botón ok, en el cuadro de diálogo mostrado en la figura anterior se exhibe una vista previa de la malla que se ha generado, en el lateral derecho de dicha vista se presentan recursos que permiten transformar la reja. En la figura 3.12 se muestran estos recursos.



**Figura 3.12. Vista previa de la generación de la malla simple.**

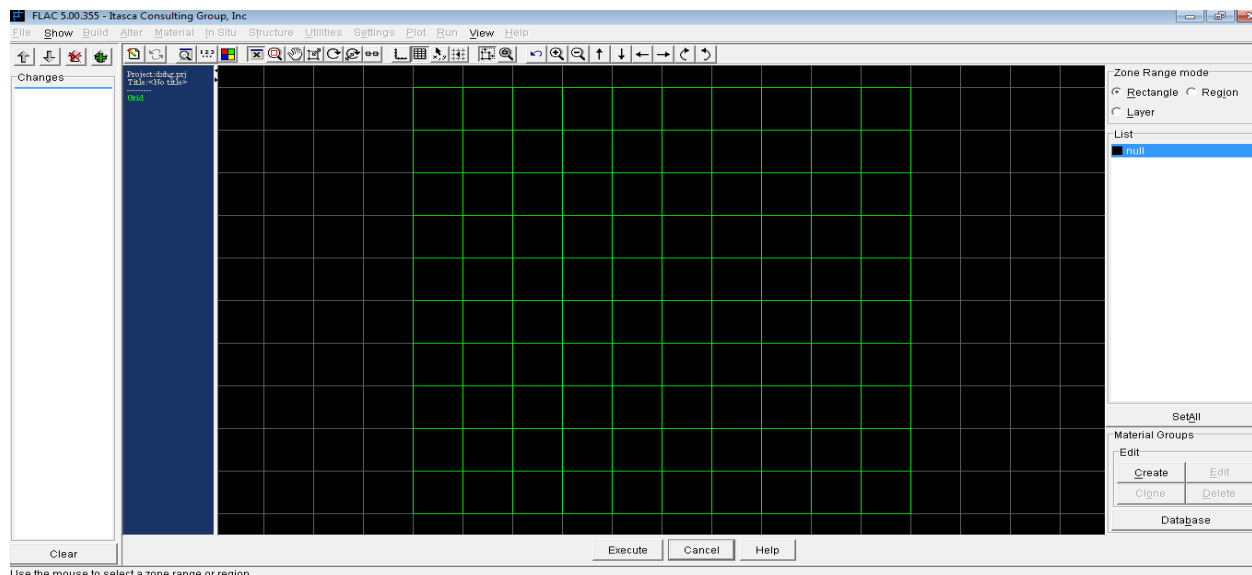
Para el caso del ejemplo que presento, no se realiza modificaciones en la reja, por lo tanto solo queda presionar el botón ejecute que puede verse en la parte inferior de la figura 3.12 y automáticamente el programa cambia a la pantalla que se muestra en la figura que sigue.



**Figura 3.13. Vista del ambiente del programa Flac con la reja generada**

### **3- Generación de las propiedades del suelo.**

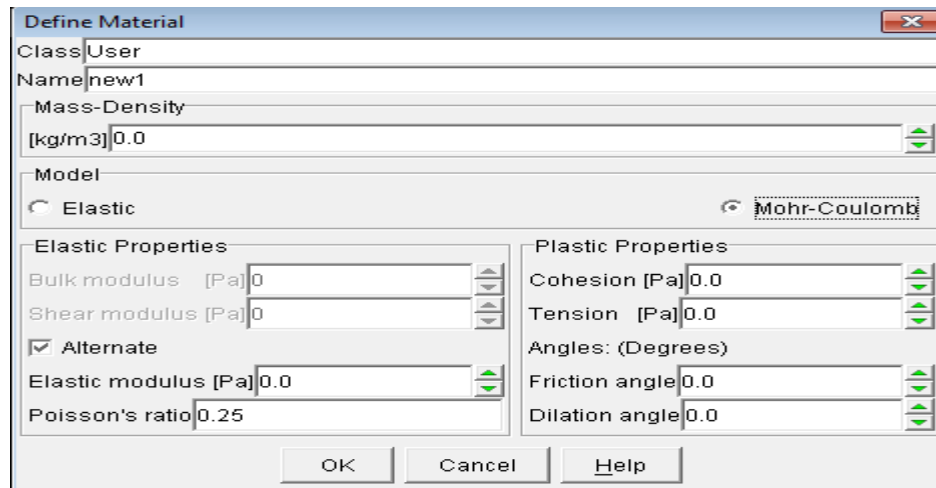
Para utilizar las bondades del Flac en cuanto a la generación de materiales es preciso dar click en la herramienta material, la que se desdobra en opciones que permiten asignar y adecuar los materiales al modelo según el análisis que se desea analizar. Se presiona la opción asignar (assign) y se muestra la pantalla que permite establecer los materiales constituyentes del análisis, tanto creándolos como utilizando los que el programa Flac trae por defecto en su base de datos. En la figura 3.14 se exhibe dicha pantalla.



**Figura 3.14. Pantalla mostrada después de dar click en asignar material**

En la parte inferior derecha de la figura mostrada anteriormente aparecen las opciones Crear (Create) y base de datos (Database), ambas permiten crear modelos de suelos.

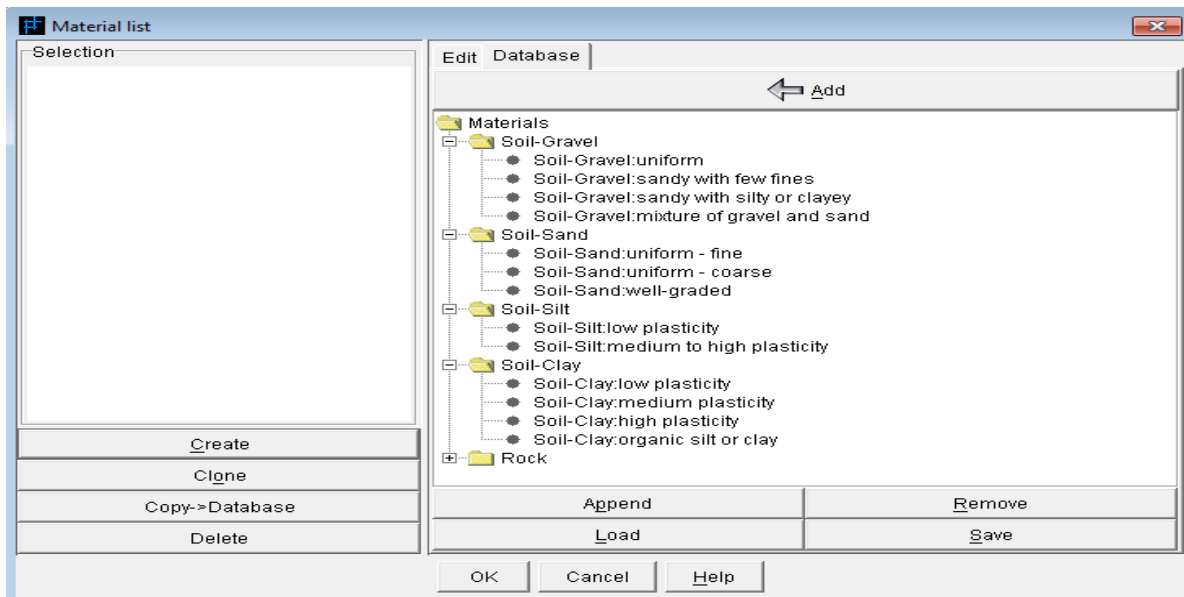
Para el caso de crear un material la elección lógica es presionar con un click en crear (Create), al presionar esta opción se abre un cuadro de dialogo que permite establecer el nombre del material que se pretende crear, la densidad del mismo, además ofrece la bondad de escoger el modelo a emplear en el análisis (Elástico o Mohr – Coulomb), así como la cohesión y el ángulo de fricción que tendrá el nuevo material creado. Todas las opciones posibles se muestran en la siguiente figura.



**Figura 3.15. Foto del cuadro de dialogo que permite definir las propiedades del material que se quiere crear.**

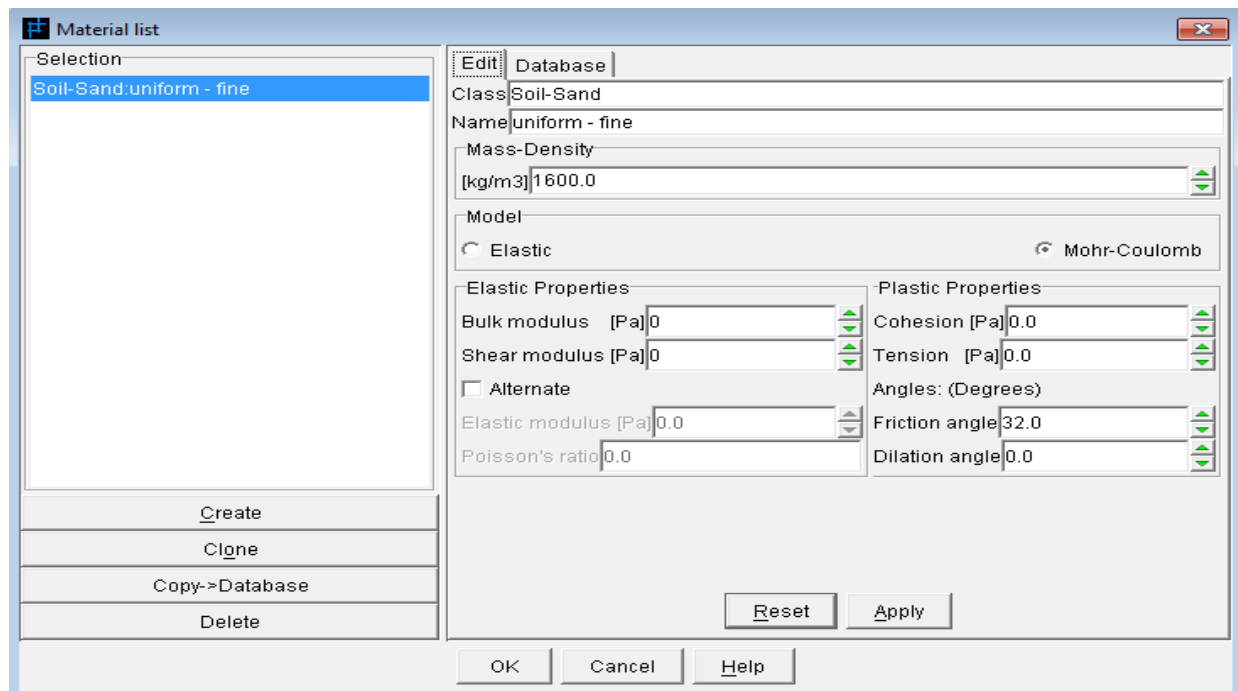
Después de llenar las propiedades plásticas o elásticas según sea el caso se presiona ok y ya está creado el material nuevo.

Si se desea utilizar materiales ya creados que existen en la base de dato del Flac es necesario dar click en la opción base de datos. Al activar esta opción se muestra la ventana que aparece en la figura 3.16.



**Figura 3.16. Base de datos del programa para escoger materiales.**

Para seleccionar cada uno de los materiales que aparecen en la base de datos del Flac es necesario dar doble click encima de estos. Cuando por necesidad se haga pertinente cambiar algunas de las propiedades de un material se presionará la pestaña editar (Edit) que se muestra en la parte superior de la figura 3.16, con lo que se abrirá la ventana que muestra la figura siguiente.



**Figura 3.17. Forma de variar las propiedades de los materiales de la base de datos del Flac.**

## Comparación de resultados experimentales con la modelación y ensayos de carga reales.

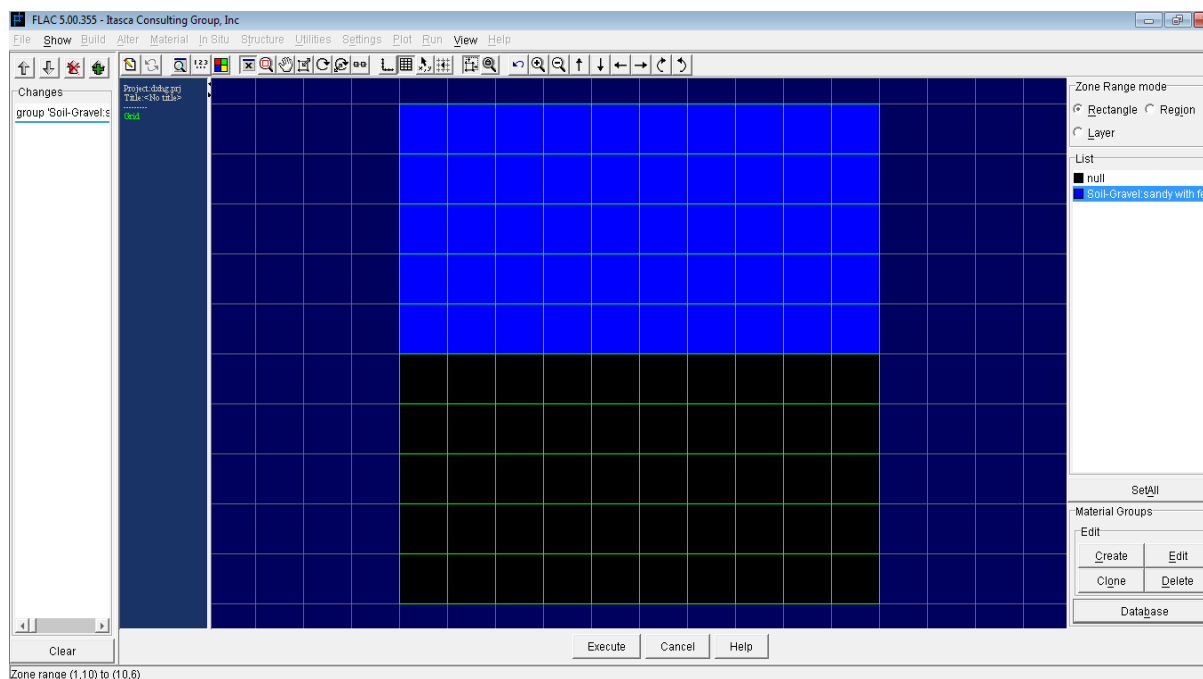
Para agregar el material editado a la lista de materiales es solo necesario dar clic en el botón ok.

En el ejemplo que se ha venido presentando se genera un solo suelo, cuyas características principales son:

- Densidad  $1980 \text{ kN/m}^3$
- Angulo de fricción  $20^\circ$
- Cohesión  $25 \text{ kPa}$

Una vez que los materiales se encuentran en la lista solo queda aplicarlos al modelo utilizando el procedimiento se describe posteriormente.

- El primer paso es señalar el material en la lista que se encuentra a la derecha de la pantalla que se muestra en la figura 3.18.
- Segundo paso precisar la forma en que se marcaran las zonas para aplicar el material (rectangular, por regiones o por filas completas) que aparece también en la parte superior derecha de la pantalla que se muestra en la figura 3.18.
- Tercer paso marcar las zonas que corresponden a cada material y presionar el botón ejecute.

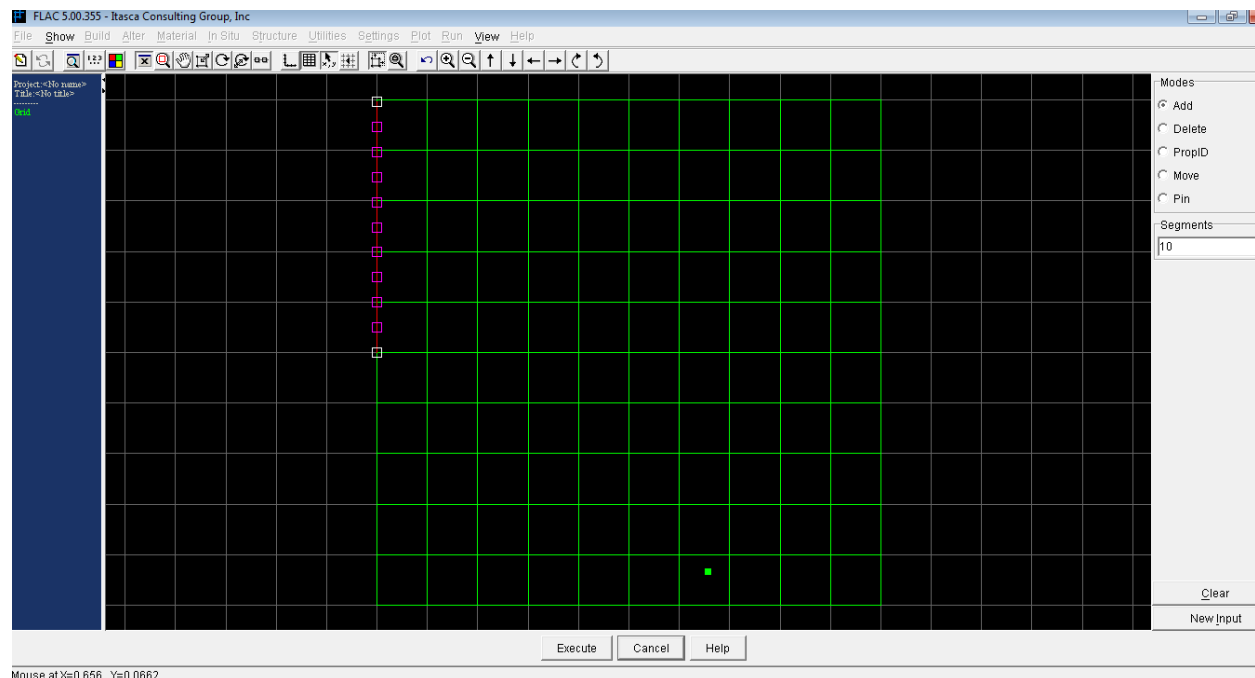


**Figura 3.18. Ilustrando la forma en que se aplica el material al modelo a través de rectángulos**

#### 4- Generación del pilote en el modelo

Es necesario para la colocación del pilote dentro de la masa de suelo dar click en la herramienta Estructura (Structure), una vez presionado este botón se despliega todas las opciones de estructuras que permite modelar el Flac. Para el caso de un pilote se toma seleccionamos (pile). Posteriormente a la selección de esta opción se muestra una nueva pantalla donde se permite entre otras cosas colocar el pilote, dicha pantalla se muestra en la figura 3.19.

Para colocar un pilote dentro de la reja o en uno de sus bordes se presiona el click en el punto que usted desee el comienzo del elemento y aún con el click presionado se traslada el ratón hasta el otro extremo del pilote deseado. Para el caso del ejemplo de pilote axial simétrico que se está realizando paralelamente a esta secuencia de pasos la longitud es de 5 m, como se muestra en la figura siguiente.



**Figura 3.19. Pantalla para la generación de un pilote**

La cantidad de elementos en los cuales se quiere dividir el pilote aparecen en la parte derecha de la pantalla permitiéndose variarse en función de los requerimientos del modelo, además allí mismo aparecen otras opciones que facilitan las operaciones de colocación del pilote dentro de la masa de suelo. Cuando el elemento esté en la posición deseada, presionar el botón ejecute.

#### 5- Asignación de las propiedades del pilote

Para asignarle al elemento las propiedades que necesita el programa para funcionar correctamente, se presiona la opción SEProp y al marcar el elemento al que se le quiere asignar la propiedad aparece un cuadro de texto donde se le asignan al pilote tanto propiedades geométricas como mecánicas.



## Comparación de resultados experimentales con la modelación y ensayos de carga reales.

Para el caso del ejemplo que se viene realizando estos datos aparecen en las figuras 3.20 y 3.21 que se muestran a continuación aparecen los datos empleados en la corrida del modelo.

The screenshot shows the 'Pile Element Properties' dialog box with the 'Geometric' tab selected. The 'Property list' on the left contains 'P1'. The 'Properties' section on the right is divided into 'Cross-sectional parameters' and '2D/3D Equivalence'. The 'Cross-sectional parameters' section has three radio buttons: '1: Area [m2]' (selected), '2: Height [m]', and '3: Radius [m]'. The '2D/3D Equivalence' section has two radio buttons: 'Continuous in Z-direction' (selected) and 'Spaced Reinforcement'. The 'Z Spacing [m]' field is set to 1.0. At the bottom, there are 'OK', 'Cancel', and 'Help' buttons.

Property	Value
1: Area [m2]	0.5
Mom./Inertia [m4]	0.0
2: Height [m]	0.0
Width [m]	0.0
3: Radius [m]	0.0
Continuous in Z-direction	Selected
Spaced Reinforcement	Not Selected
Z Spacing [m]	1.0

**Figura 3.20. Propiedades geométricas del pilote modelado**

The screenshot shows the 'Pile Element Properties' dialog box with the 'Mechanical' tab selected. The 'Property list' on the left contains 'P1'. The 'Properties' section on the right is divided into 'Elastic', 'Plastic Moment', 'Coupling-Spring Constants', and 'Density'. The 'Elastic' section has a 'Young's Modulus [Pa]' field set to 2e9. The 'Plastic Moment' section has a 'Plastic Moment [N\*m]' field set to 0.0. The 'Coupling-Spring Constants' section has two columns: 'Normal' and 'Shear'. The 'Normal' column has fields for 'Stiffness [N/m/m]', 'Cohesive Strength [N/m]', 'Tensile Strength [N/m]', 'Friction Angle[deg]', and 'Gap Coef.', all set to 0.0. The 'Shear' column has fields for 'Stiffness [N/m/m]', 'Cohesive Strength [N/m]', 'Friction Angle[deg]', and 'Perimeter [m]', set to 1e8, 0.0, 10, and 1 respectively. The 'Density' section has a 'Compute with timestep(static only)' checkbox checked and a 'Density' field set to 0.0. At the bottom, there are 'OK', 'Cancel', and 'Help' buttons.

Property	Value
Young's Modulus [Pa]	2e9
Plastic Moment [N*m]	0.0
Normal Stiffness [N/m/m]	0
Normal Cohesive Strength [N/m]	0.0
Normal Tensile Strength [N/m]	0.0
Normal Friction Angle[deg]	0.0
Normal Gap Coef.	0.0
Shear Stiffness [N/m/m]	1e8
Shear Cohesive Strength [N/m]	0.0
Shear Friction Angle[deg]	10
Shear Perimeter [m]	1
Density	0.0

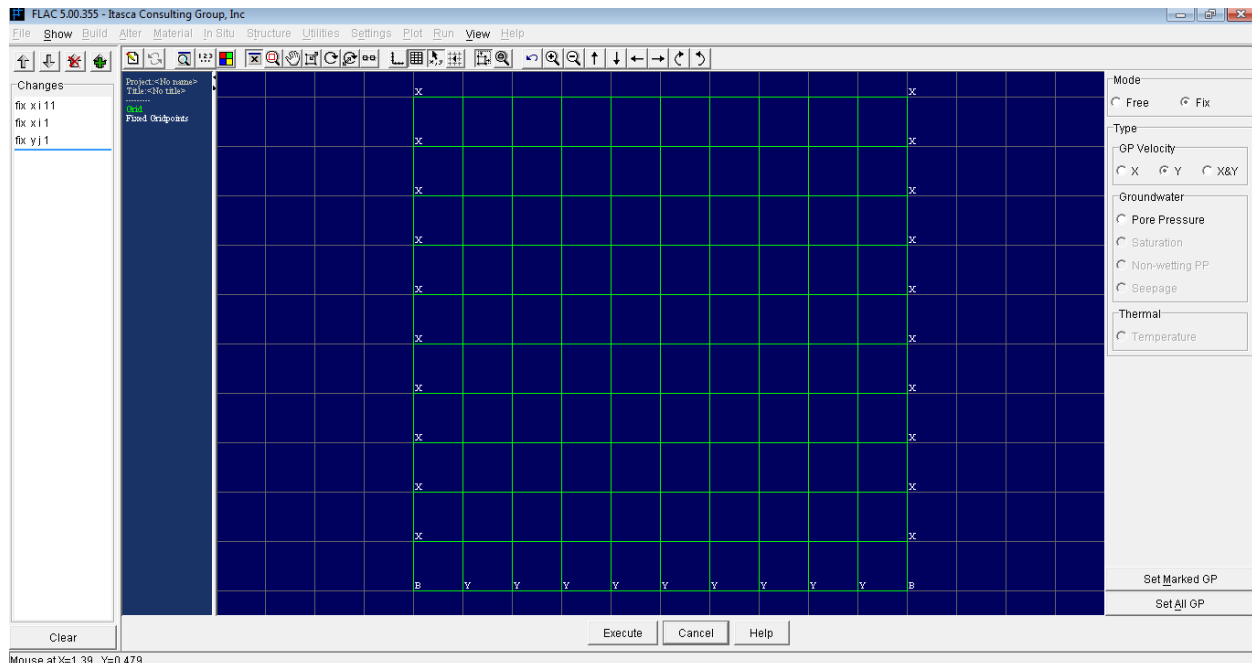
**Figura 3.21. Propiedades mecánicas del pilote modelado.**

## Comparación de resultados experimentales con la modelación y ensayos de carga reales.

Cuando se le hallan asignado las propiedades al pilote antes de presionar ejecutar se presiona ok para asignar definitivamente los materiales al elemento modelado.

### 6- Aplicar condiciones de contorno.

Para asignar al modelo las condiciones de contorno es preciso remitirse a la herramienta in situ, y luego de seleccionar con un click la opción (Fix) aparece la pantalla que se muestra en la figura 3.22, como puede verse en la parte derecha de la figura antes mencionada se establece el modo y el tipo de contorno que se desea aplicar a dicho modelo.

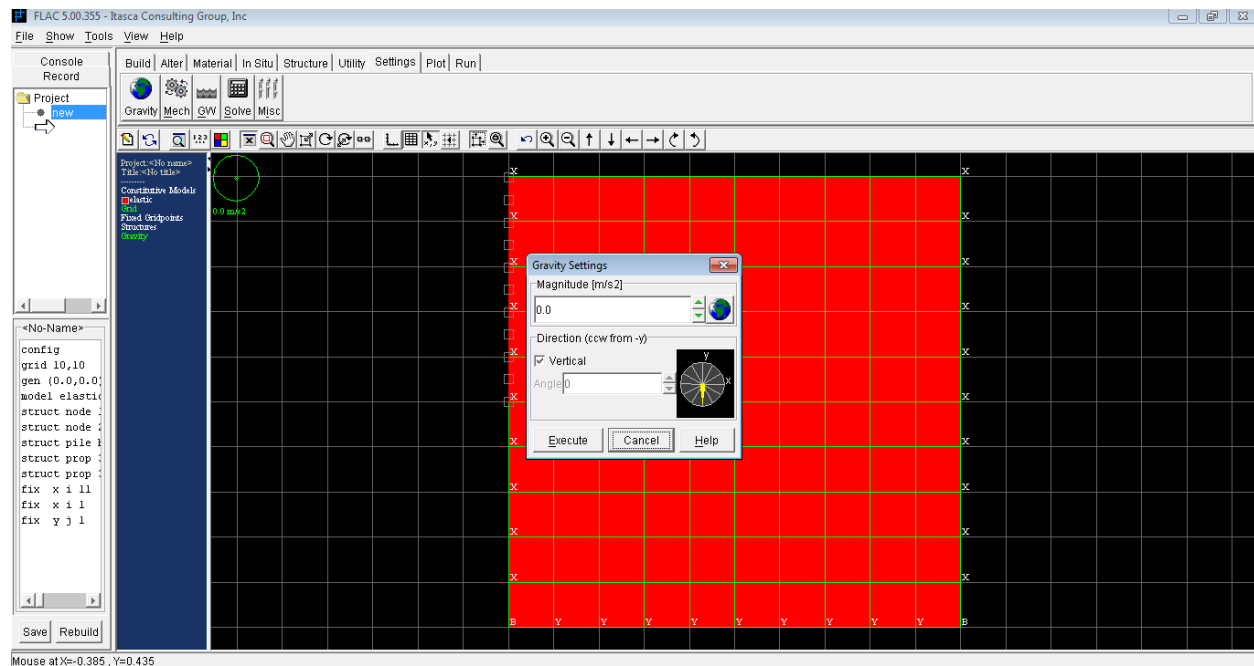


**Figura 3.22. Generación de las condiciones de contorno.**

Continuando con el ejemplo que se ha venido construyendo a la par de la secuencia de pasos para la generación de un modelo con carga axial simétrico, las condiciones son las que se muestran en la figura 3.22. En los laterales de la malla se restringe los desplazamientos en la dirección del eje x y en la parte inferior de la reja se limita los desplazamiento en la dirección del eje y. después de condicionadas las condiciones de límites a la malla se presiona el botón ejecute para guardar este cambio en el modelo.

### 7- Generación de las condiciones iniciales.

Las condiciones iniciales a los modelos están representadas mediante aplicación de la fuerza de gravedad. Para llevar a cabo este procedimiento es preciso ejecutar la herramienta (Settings) y dentro de esta la opción gravedad (gravity) como se muestra en la figura 3.23, asignándole el valor de la aceleración de la gravedad al modelo. Por último se oprime el botón ejecute para guardar esta adecuación en el modelo.



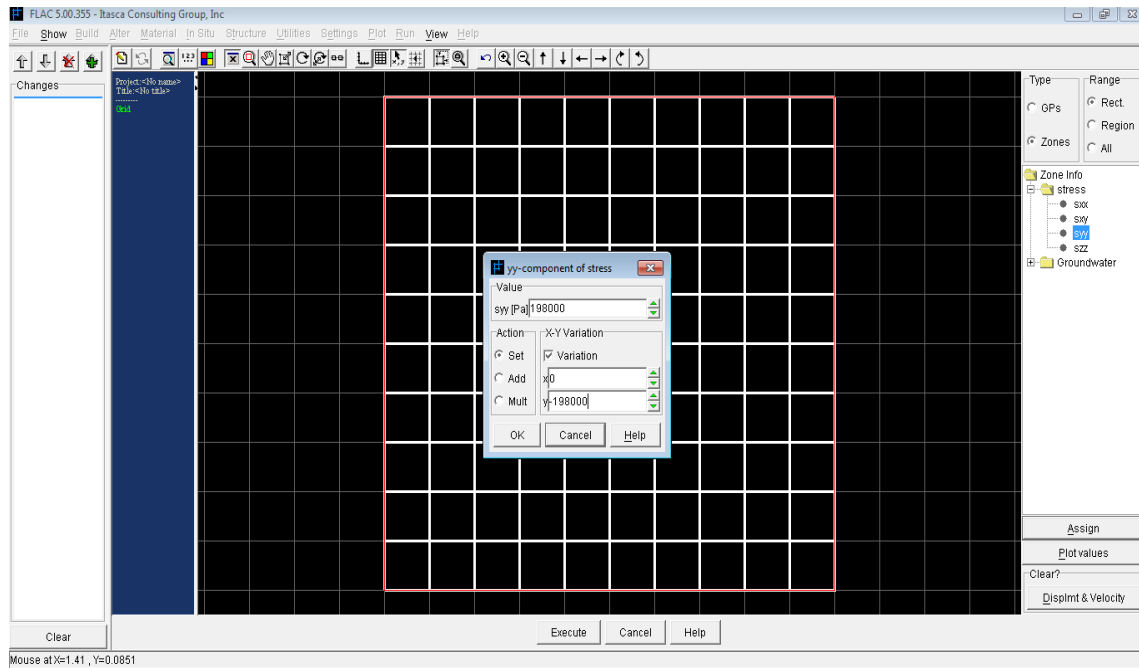
**Figura 3.23. Aplicación de la aceleración de la gravedad al modelo.**

#### **8- Asignación de tensiones por peso propio en la masa se suelo.**

El procedimiento indicado es dentro de la herramienta in situ activar la opción inicial (initial), con lo que se generará una nueva pantalla que permitirá establecer la variación de tensión por peso propio tanto en x, y, z coordenados.

Refiriéndonos concretamente al ejemplo que se ha confeccionado paralelamente a este manual de usuario para modelar un pilote bajo carga axial simétrico. Después de dar un click en la opción (initial) aparece la pantalla que se muestra en la figura 3.24. Se elige el tipo y el rango de selección de las cuadrículas que en este prototipo lo constituyen las zonas y rectángulo respectivamente. Luego se presiona el click dos veces sobre la etiqueta de tensión (stress) y se presiona el botón asignar después de escoger la dirección a la cual se le pretende aplicar las variaciones de tensiones por peso propio en el suelo.

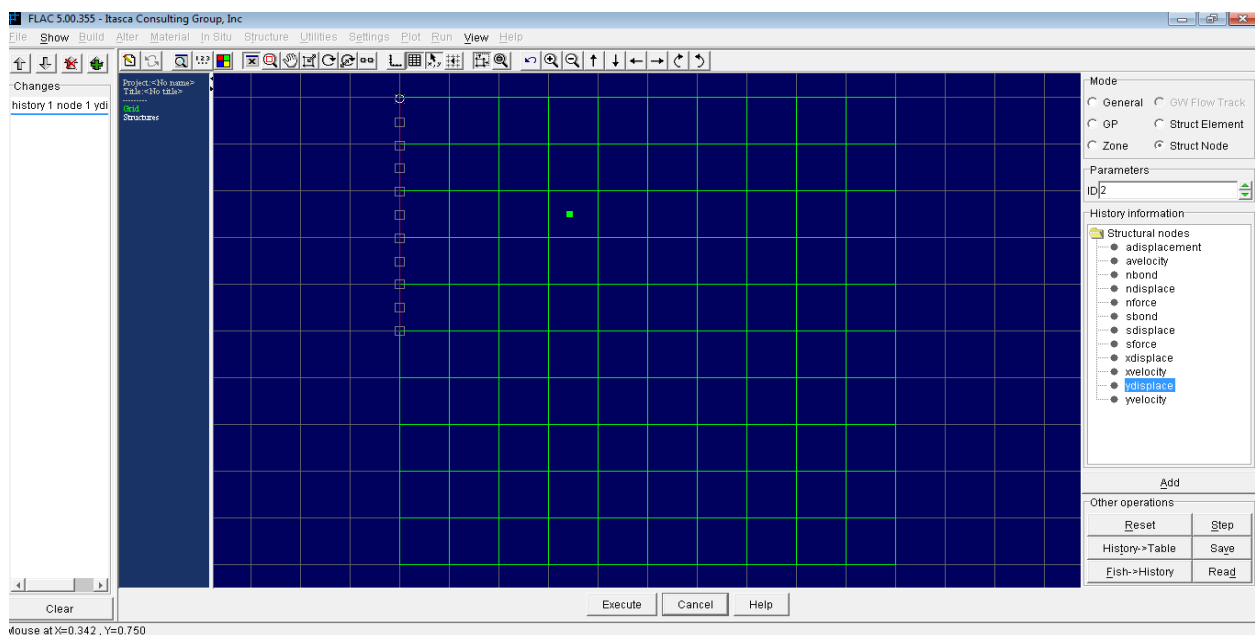
## Comparación de resultados experimentales con la modelación y ensayos de carga reales.



**Figura 3.24 Generación de las presiones por peso propio**

### **9- Establecer las variables para supervisar su contestación durante el ciclismo del cálculo.**

Para llevar a cabo este paso debemos remitirnos dentro de la herramienta Utilidades (utility) a la opción historia (history), dándole un click, se mostrará la pantalla que se muestra en la figura 3.25.



**Figura 3.25. Pantalla para generar historiales de elementos**

## Comparación de resultados experimentales con la modelación y ensayos de carga reales.

Como puede apreciarse en la figura anterior en la parte derecha aparecen los modos que permitirán establecer la supervisión del modelo. Para el caso de ejemplo que se ha ido construyendo se realiza de la siguiente manera:

- Después de marcar la opción de elementos estructurales, aparece un carpeta que al abrirla permite seleccionar el tipo de solicitación (axial), luego se marca con el cursor el elemento al cual se le pretende conocer la fuerza axial.
- Luego se repite el mismo procedimiento pero en esta ocasión para a los nodos estructurales, se selecciona la opción de desplazamiento en la dirección y (vertical), se marca el nodo al cual se le pretende conocer el desplazamiento posteriormente a la aplicación de la carga.

Consecutivamente a la realización de las gestiones dentro de este paso se oprime ejecute para que el modelo tome los cambios realizados.

### **10- Aplicación de una velocidad en dirección vertical al pilote.**

La razón por la cual se aplica una velocidad al pilote es para que el programa sea capaz de dibujar la curva carga deformación de dicho elemento. Para realizar la aplicación de dicha velocidad al pilote se utiliza la herramienta Estructura y dentro de esta se ejecuta la opción Nodo (node), con lo que se presenta una pantalla nueva. Dentro de dicha pantalla se seleccionará con el ratón el nodo que representa la cabeza del pilote, inmediatamente se muestra un cuadro de dialogo que se presenta en la siguiente figura 3.26.

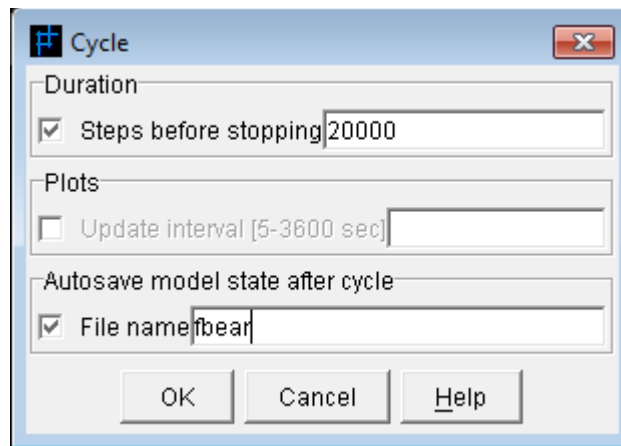
The image shows a software dialog box titled "Node:1". It contains several input fields and checkboxes organized into sections. The "Position" section shows X=-1.677274... and Y=0.99647665. The "Grid" section shows I=0 and J=0. The "Load" section has input fields for fx=0.0, fy=0.0, and Moment=0.0. The "Fix" section has checkboxes for X-velocity, Y-velocity (which is checked), and Rotation. The "Pin" section has radio buttons for Yes and No. The "Slave" section has checkboxes for x-direction and y-direction, and a text field for Master node. The "Initial" section is divided into "Velocity" and "Displacement". The "Velocity" section has input fields for X=0.0, Y=-0.000007 (highlighted with a blue box), and Rotation=0.0. The "Displacement" section has input fields for X=0.0 and Y=0.0. At the bottom of the dialog are three buttons: OK, Cancel, and Help.

**Figura 3.26. Cuadro de dialogo para establecer las condiciones del nodo 1.**

Para el caso del ejemplo que se está construyendo, los valores y las selecciones mostradas en la figura 3.26 son idénticos a los utilizados. Se oprime ejecute inmediatamente después de presionar ok en la figura referida en la oración anterior.

#### 11- Establecimiento de los pasos antes de detener la corrida.

Este es el último paso para realizar la modelación de un pilote con carga axial simétrica, por lo que se explicará el procedimiento a seguir a esta instancia. Después de haber apretado el botón de la herramienta de corrida (Run), se dará un click en la opción de ciclos (cycle) donde se entrará entre otras cosas la cantidad de ciclos a realizar antes de la parada. Los datos que utilizamos en el ejemplo que se ha corrido simultáneamente con la realización de esta secuencia de pasos son los que se muestran en la figura 3.27.

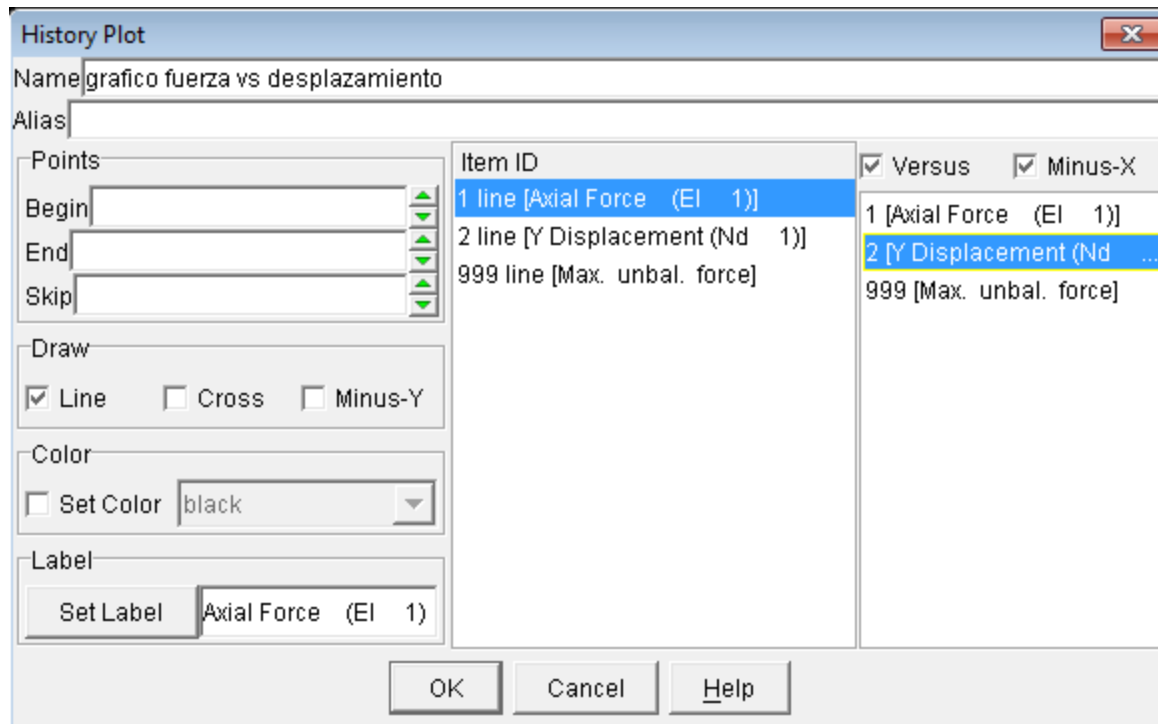


**Figura 3.27 Cuadro de dialogo de la opción ciclos.**

#### 12- Obtención de resultados a través del programa.

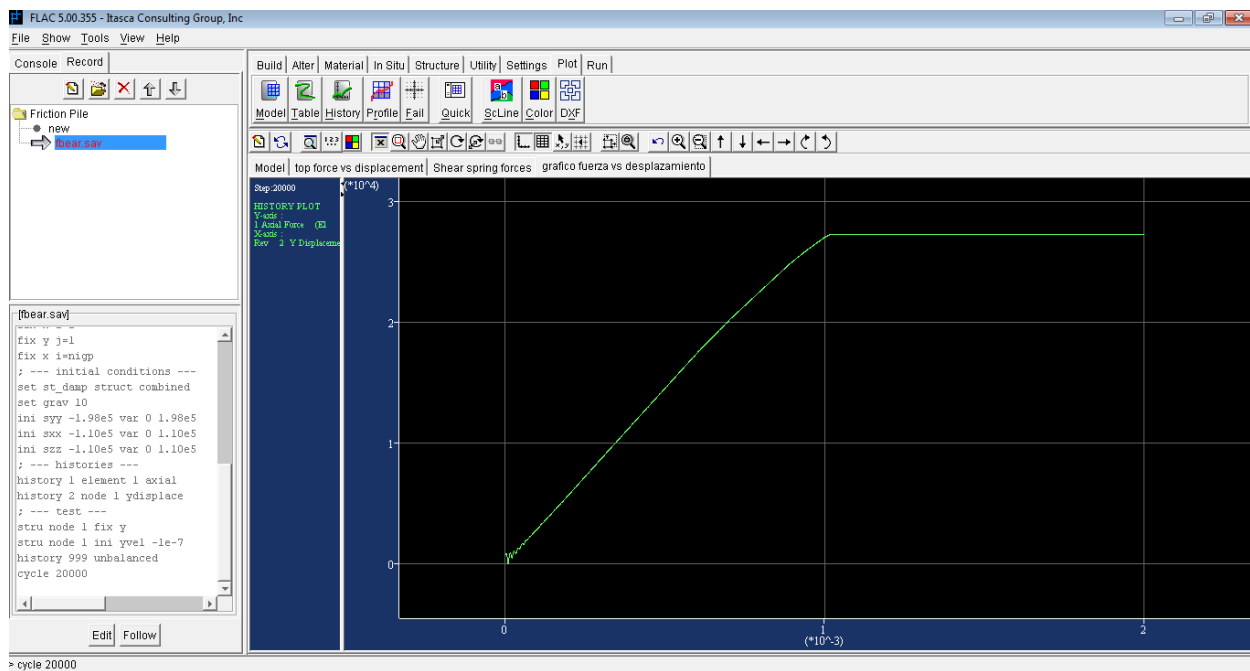
Una vez terminada la corrida estamos en condiciones de obtener los resultados de la modelación del pilote con carga axial simétrico, este caso solo se explicará la forma de lograr el dibujo de la curva carga – deformación, aunque el programa es capaz de proporcionar una gran cantidad de resultados.

Para lograr la curva carga deformación se deberá primero presionar la herramienta de ploteo (Plot), después será preciso dar click en la opción de los historiales (history), que presentará un cuadro de dialogo que se completara de la manera que se hizo en el ejemplo que se ha corrido paralelamente a la realización de esta secuencia de pasos, esta información se exhibe en la figura 3.28.



**Figura 3.28. Cuadro de dialogo que permite trazar la curva carga deformación.**

Al presionar el botón ok se dibujara la gráfico de fuerza vs desplazamiento, aparece en la figura siguiente.



**Figura 3.29. Gráfico de fuerza vs desplazamiento obtenido del ejemplo corrido empleando el Flac.**

## Comparación de resultados experimentales con la modelación y ensayos de carga reales.

Después de confeccionar el manual de usuario para la modelación de un pilote con carga axial simétrica y además efectuar la construcción de un modelo de pilote apoyado en un solo estrato de suelo somos capaces de exponer los resultados obtenidos de la curva que se muestra en la figura anterior. El punto de plastificación en la curva ocurre cuando la carga impuesta a pilote es de aproximadamente  $27000\text{kg} = 270\text{ kN}$ , cuando ha ocurrido un desplazamiento de  $1\text{ mm}$ .

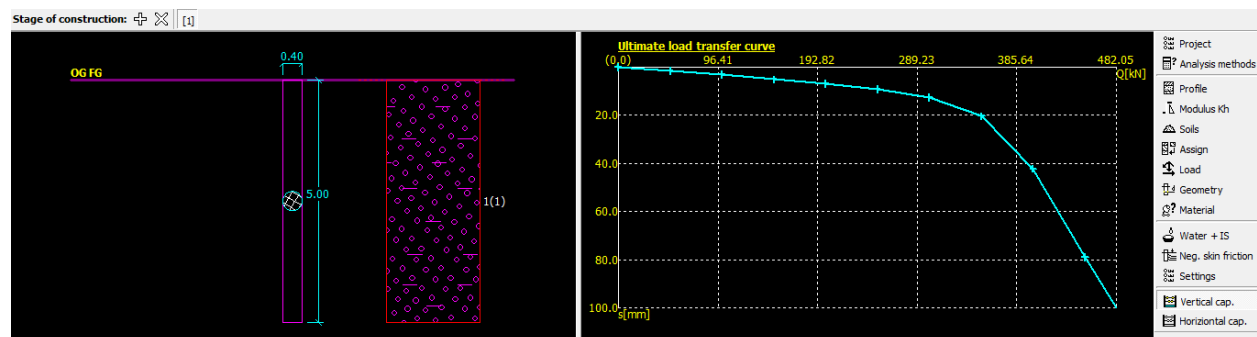
### **3.5 Comparación de los resultados obtenidos empleando el Programa Flac con los encontrados manejando otros softwares.**

Realizando la validación de la metodología creada para la modelación de un pilote con carga axial simétrica en el epígrafe anterior, se realizan las corridas de modelos con pilotes de  $5\text{ m}$ ,  $10\text{ m}$  y  $15\text{ m}$  de longitud utilizando el programa Flac. Para cada una de las longitudes anteriores se realizan tres variantes en los cuales se cambia el diámetro de la sección transversal del elemento, dichos valores de diámetro son:  $0.4\text{ m}$ ,  $0.8\text{ m}$ ,  $1.2\text{ m}$ . Todos los modelos que se utilizan en este epígrafe están apoyados sobre un solo estrato de suelo, con las siguientes características:

- Densidad =  $1850\text{ kg/m}^3$ .
- $C = 20\text{ kPa}$
- $\varphi^\circ = 25^\circ$

Las combinaciones creadas entre la longitud y el diámetro de los pilotes son corridos además utilizando el programa de computadoras Geo 5 y una hoja Excel programada con las expresiones de Caquot - Kerisel. Para ilustrar los resultados se presentarán fotos de las corridas de los programas (gráfico de fuerza vs desplazamiento que experimenta el pilote).

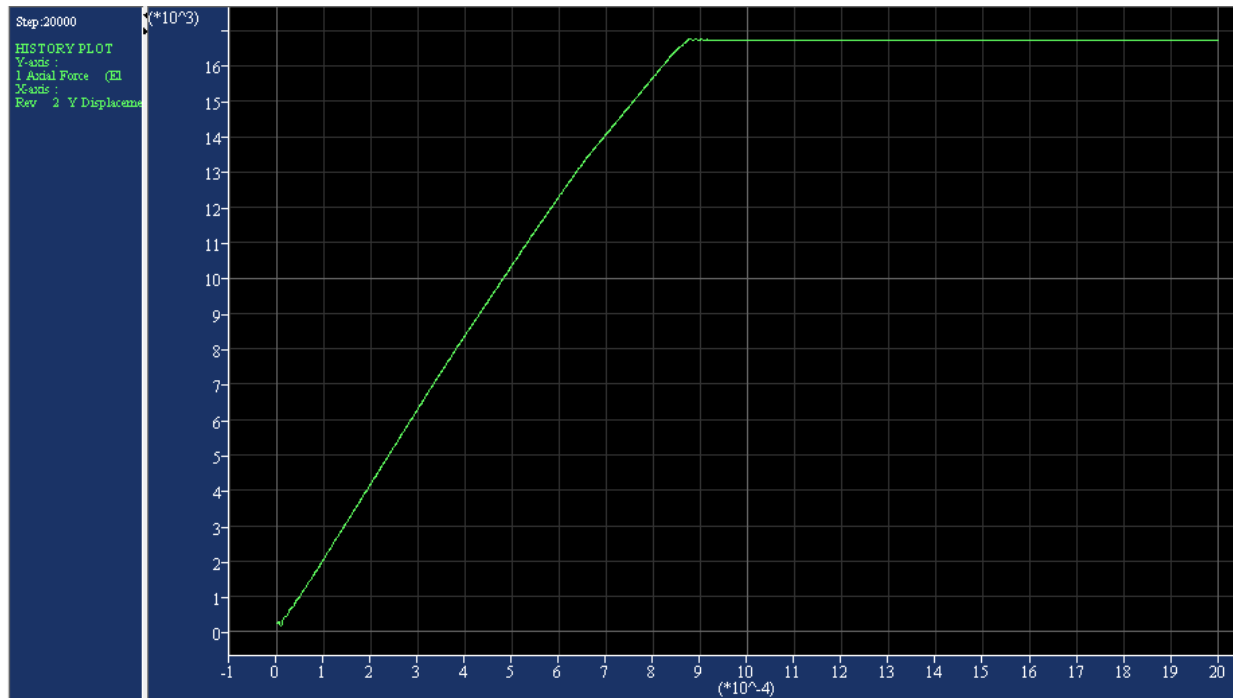
En la figura que se presenta a continuación se muestra el gráfico de asentamiento contra tiempo obtenido de la variante de pilote de  $5\text{ m}$  de longitud y  $0.4\text{ m}$  de diámetro empleando el programa Geo 5.



**Figura 3.30. Gráfico de fuerza vs asentamiento logrado en el programa Geo 5 para un pilote.**

Este mismo ejemplo se presentará pero utilizando esta vez el programa Flac y el grafico se muestra en la figura siguiente.





**Figura 3.31. Gráfico de fuerza vs asentamiento logrado en el programa Flac para un pilote.**

Después de realizar las corridas de los programas computacionales mencionados en este epígrafe para cada una de las 9 variantes de pilotes creadas, estamos en posición de presentar una tabla resumen con los resultados de capacidad de carga conseguida mediante la utilización de cada uno de los tres programas.

Tabla 3.1 Comparación entre tres vías de predicción de capacidad de carga en cimentaciones sobre pilotes.				
Diámetro del pilote (m)	Longitud del pilote (m)	Metodología utilizada		
		Caquot-Kerisel (kN)	Flac (kN)	Geo 5 (kN)
D = 0.4m	L = 5 m	360	340	350
D = 0.8m		936	700	800
D = 1.2m		1730	1060	1200
D = 0.4m	L = 10 m	916	1100	1010
D = 0.8m		2210	2250	2280
D = 1.2m		3880	4100	4000
D = 0.4m	L = 15 m	1680	2200	2100
D = 0.8m		3910	5000	4800
D = 1.2m		6680	6800	6850

### 3.6 Validación de la metodología propuesta para el uso del programa Flac a través de la modelación de un pilote y comparación de resultados de la realización de una prueba de carga.

Para la realización de este epígrafe se modelará utilizando el programa FLAC, un pilote de hormigón con 15 m de longitud y 0.5 m de diámetro, apoyado en varios suelos cuyos datos se presentan a continuación:

Estrato 1 Profundidad (0- 3 m)

$$\varphi = 18^\circ \text{C} = 42 \text{ kPa}$$

Estrato 2 Profundidad (3 - 7 m)

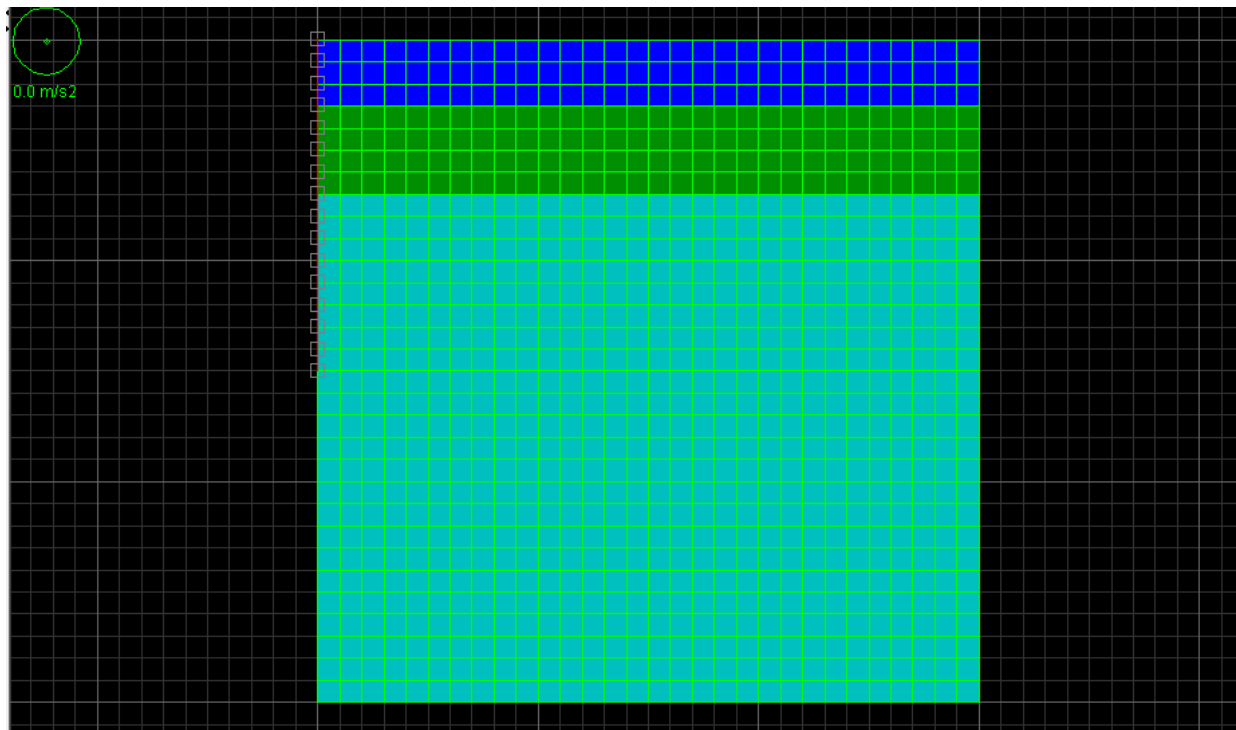
$$\varphi = 18^\circ \text{C} = 32 \text{ kPa}$$

Estrato 3 Profundidad (3 - 15 m)

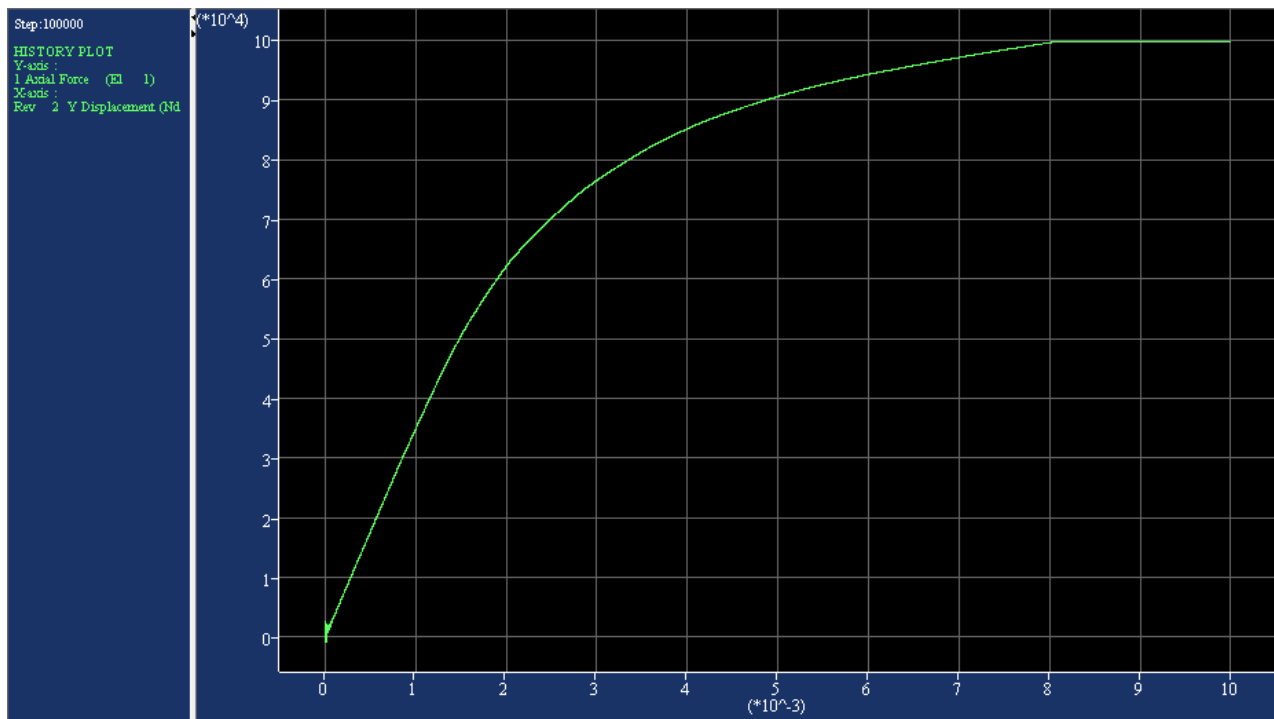
$$\varphi = 30^\circ \text{C} = 0 \text{ kPa} \quad \gamma_{\text{sat}} = 19.5 \text{ t/m}^3 \quad E_0 = 22000 \text{ kPa.}$$

Se conoce de la prueba de carga que la carga de rotura es de 1022 kN.

Como dato adicional para la conformación del modelo se establece que el nivel freático se encuentra a una profundidad de 3 m.



**Figura 3.32. Asignación de los suelos al modelo**



**Figura 3.33 Curva carga vs desplazamiento obtenida de la corrida del programa FLAC.**

En la tabla presentada a continuación se presentan los resultados obtenidos empleando varios métodos para la determinación de la capacidad de carga al pilote presentado anteriormente.

Tabla 3.2 Comparación de los resultados logrados utilizando el programa FLAC con los obtenidos empleando otros métodos de predicción.								
Ensayo de carga (KN)	Caquot - Kerisel (kN)	% de diferencia	Hojas Mathcad	% de diferencia	Geo 5	% de diferencia	FLAC	% de diferencia
1022	1635	37.5	1124	9	1114	8	1000	2

Queda demostrada una vez más la validez de la modelación con el empleo de métodos numéricos de las cimentaciones sobre pilotes obteniéndose resultados que se ajustan a los obtenidos ensayos de carga reales.

### 3.7 Conclusiones del capítulo.

Después de presentado cada una de los epígrafes de este capítulo y en correspondencia con los resultados obtenidos se muestra las siguientes conclusiones parciales:

1. Queda demostrada la validez del empleo de los métodos numéricos en la solución de problemas ingenieriles.

### Comparación de resultados experimentales con la modelación y ensayos de carga reales.

2. Se presenta una secuencia de pasos para la modelación de cimentaciones sobre pilotes aplicando el FLAC en 2 dimensiones, lo que constituye una herramienta para el análisis de dichos elementos.
3. El empleo del programa computacional FLAC no requiere de computadores potentes, ya que emplea poco esfuerzo computacional por tiempo de cálculo.

## **Conclusiones Generales.**

En este trabajo de diploma han sido investigadas diferentes problemáticas relacionadas con el análisis de las cimentaciones sobre pilotes, como los métodos disponibles actualmente para realizar su análisis, los diferentes factores que intervienen en este, las facilidades que brindan los softwares más complejos en su diseño, entre otros. Estos aspectos fueron abordados en tres capítulos llegando a conclusiones específicas en cada uno de ellos. A continuación, se hace énfasis en aquellas conclusiones, que engloban el aporte de este trabajo al tema objeto de estudio:

1. En la actualidad existen diferentes metodologías para correlacionar ensayos de hincia con capacidad de carga de un pilote.
2. Existen variados criterios y metodologías para realizar ensayos de carga tanto en Cuba como en otros países, que permiten determinar la capacidad de carga de una cimentación sobre pilotes.
3. Se evidencia la no justificación de las expresiones propuestas por Aoki - Velloso y Decourt - Quaresma para suelos de gran dureza o pilotes apoyados en roca blanda.
4. Queda demostrada la validez del empleo de los métodos numéricos en la solución de problemas ingenieriles.
5. La norma cubana para la realización de Pruebas de Carga debe adecuarse a las tendencias internacionales y a las condiciones cubanas.

## **Recomendaciones.**

No obstante los resultados obtenidos en esta investigación, aún quedan muchos aspectos relacionados con la modelación de las cimentaciones sobre pilotes con el software Flac y el uso de correlaciones que deben ser analizados con mayor profundidad. Como recomendaciones y futuras líneas de investigación que continúen las presentadas en este trabajo se pueden destacar las siguientes:

1. Profundizar en el programa FLAC para obtener soluciones de otro tipo de problemas geotécnicos por sus potencialidades.
2. Continuar trabajando en la búsqueda de expresiones que relacionan los ensayos de penetración con la capacidad de carga de cimentaciones sobre pilotes, para el caso específico de suelos cubanos.
3. Profundizar en el empleo del software FLAC para la modelación de pilotes en 2 y 3 dimensiones.

## **Bibliografía.**

1. Aoki, N.; Cintra, J.C.A. (1997): New Interpretations of the Dynamic Loading Curves for Driven Piles Based on the Energy Approach. Recent Developments in Soil and Pavement Mechanics. p. 467-472. Rotterdam, Balkema.
2. Altaee, A. (1998): Physical Modeling in Sand. Canadian Geotechnical(3)p. 420-431
3. Balech, J. (2000): Análisis de la transferencia de carga de pilotes hincados en arcillas a partir de pruebas de carga dinámica de energía creciente São Carlos. 152 p. Escuela de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
4. Barbey S., R. : Mecánica de suelos. s.l. , s.n., s.a. p. 281-318.
5. Berezantzev, V. G. (1961): Load bearing capacity and deformation of piled foundations. V ICSMFE, París, vol. 2, p. 11-15
6. Brau, J. P. Berga, J.P. (1997): Estado de las tensiones iniciales en los suelos y cálculo por MEF. Francia. Boletín de laboratorio de mecánica de suelo # 215-1997. (Enero -febrero) 15-31pág
7. Bowels, J.E. (1982): Foundation Design and Analysis. McGraw-Hill, New York.
8. Bowles, J. E.(1984): Physical and Geotechnical Properties of Soils. 2da Edición. New York. Ed. Mac Grau- Hill Books. 578 p..
9. Caquot, A and Kerisel, J. (1964): Tratado de Mecánica de Suelos. 1ed en Castellanos. Gaunthier-Villars, Paris, France.
10. Código del American Petroleum Institute . API (1984)
11. Das, Braja M. (1999): Principios de ingeniería de Cimentaciones. Braja M. Das. Editorial Thomson. México. 4ta edición. 855 pág.
12. De Beer, E.E.(1965): Bearing capacity and settlement of shallow of foundations on sand. Proc. Symp. Bearing capacity and settlement of Foundations. Duke, Univ., Durham, N.C.
13. Delgado M. (1999): Ingeniería de Cimentaciones. Fundamentos e introducción al análisis geotécnico. Manuel Delgado Vargas. Editorial Alfaomega. Colombia 1999. 500 pág.
14. Fernández, H. y Duarte, I. (1998): Estudio del comportamiento no lineal de pilotes cargados lateralmente usando elementos finitos tridimensionales. Proceeding XI Congreso Brasileño de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotecnica, p. 377-383

15. Galabru, P. (1974): Cimentaciones y túneles. Editorial Reverte. Barcelona, p. 5-91.
16. GeoSlope (1995): SIGMA/W. For finite element analysis. User's guide. Geoslope International Ltd. Calgary, Alberta, Canadá.
17. Goble, G.G (1994): Pile driving an international state of the art. Proc. International Des. And Constrn. Of deep foundations. FHWA, Orlando, 1 1-26
18. Gusmão Filho, J.A. e Gusmão, A.D. (2000): Compaction Piles for Building Foundation, International Conference on Geotechnical and Geological Engineering, Melbourne
19. Ibañez M., L. (2000); Algunas recomendaciones para la modelación de problemas tensión deformación en cimentaciones sobre pilotes. Revista Internacional de Métodos Numéricos para el Cálculo y Diseño Estructural # 1626 (Aceptado a publicar)
20. Ibañez Mora, L. C. (2001). Modelación matemática de las cimentaciones sobre Pilotes. Aplicaciones. Departamento de Ingeniería Civil Ciudad de La Habana, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría.
21. Itasca (1996): Flac Manual, Versión 3.3. Minneapolis, Minesota.
22. Jiménez S., J. A. (1994): Curso sobre pilotajes y cimentaciones especiales. CEDEX. Madrid. Tomo I y II.
23. Jiménez S., J. A.(1986): Geotecnia y Cimientos. Editorial Rueda. Madrid. Tomos II y III.
24. Juárez B., E.; Rico R., A.(1969): Mecánica de suelo. Edición Revolucionaria, La Habana. 1969. Tomo I y II.
25. Kulhaway. F. (1991): Drilled shat foundations. FoundationEngineeringHanbook, 2da edición, Van NostrandReinholds.
26. L' Herminier, R.(1968): Mecánica de suelos y dimensionamiento de firmes. Versión al Español de José Luis Ortiz. Madrid. Editorial Blume, 208 p.
27. Lambe, T. W. (1991): Mecaánica de suelos. Editorial Limusa. Mexico.
28. Luis, D. S. 2009. Hojas de cálculo para el diseño de cimentaciones sobre pilotes., Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas.
29. León, M (1980): Mecánica de suelos. Editorial Pueblo y Educación. s.a. 40 p.
30. Lototske, J. (1997): Efects of reaction piles in axial pile a soft rock. Proclnt Conf. SoilsMechs. And Found. Hamburg, 2: 1097-1101



31. Martínez, E. C. 2010. Estudio de la capacidad portante de los pilotes de la Marina Gaviota en Varadero. Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas.
32. MAS, J. F. 2011. Correlación de la capacidad de carga de los pilotes por los métodos de la Prueba de Hincia, la Teoría de la Plasticidad y la Prueba de Carga., Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas.
33. Manual PLAXIS (1998): Finite element code for soil and rock plasticity. Versión 3.0. Edited by P.A. Verner. Holanda
34. Mata, W.; Romulo, C. (1998): Análisis numérico del comportamiento de pilotes en suelos estratificados. Proceeding XI Congreso Brasileño de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica. P 285-291
35. Menziesbach, E. (1968a): La capacidad de carga de pilotes y grupos de pilotes. La Habana. CITC. Universidad de la Habana. 78 p.
36. Meyerhof, G. G. (1951): The ultimate bearing capacity of foundations. Geotechnique, No 2.
37. Meyerhof, G. G. (1976): Bearing capacity and settlement of pile foundations. Eleventh Terzaghi lecture. Journal of Soil Mechanics and Foundation Division. GT 3.
38. Ministerio de Educación. Anteproyecto de norma cubana (1989): Cimentaciones sobre pilotes. Métodos de cálculo para el dimensionamiento geotécnico. Ministerio de Educación. Cuba. Editorial Pueblo y Educación, 50 p.
39. Normas Soviéticas: Cimentaciones sobre pilotes. Normas Soviéticas. s.l., s.a. octubre, 30 p.
40. Normalización, C. E. D. 1984. NC 54-265. Pilotes. Métodos de Ensayo
41. Paulos H. G (2000): Pile load test methods – applications and limitations. Libro de homenaje a Jiménez Salas. CEDEX p. 101-111.
42. Poulos, H.G. and Davis, E.H. (1980): Pile foundation analysis and design. Chichester: Wiley.
43. Randolph, M.F. (1994): Design methods for pile groups and piled rafts. Proceedings of the 13<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. New Delhi: 1-21.
44. Rocha, P.; Carvalho, D. (1998): Estimación de la capacidad de carga de pilotes pre moldeados a través de pruebas de carga dinámicas. Proceeding XI Congreso Brasileño de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica, p. 1351-1357.

45. Rogel, J.M.(1987): Transferencia de carga a lo largo de un pilote excavado en arcillas rígidas. Tesis Doctoral Universidad Politécnica de Madrid.
46. Skempton, A. W. (1951): The bearing capacity of clays. Bldg. Res. Congress 1951, Div. 1, Pt 3, p.180
47. Sowers, G y Sowers F.(1977): Introducción a la mecánica de suelo y cimentaciones. La Habana. Editorial Pueblo y Educación, 677 p.
48. Técnicas, A. B. D. N. 1992. NBR 12131 Estacas-Prova de carga estática.
49. Terzaghi, K. (1943): Theoretical soil mechanics, John Wiley and Sonns, New York.
50. Vesic, A.S. (1977): Design of pile foundations, National Cooperative highway Reseach Program. Synthesis of Practice No 42, TransportationReseachBoard, Washington, DC.
51. Zinkiewics, O.C. (1999): Computational Geomechanics. Willey.