Laboratory equipment for the simulation of foundations in compacted trenches

Ing. Miguel Fernández Alvarez & Ing. Félix Rodríguez Alonso
ENIA UIC#4, Santa Clara, Villa Clara,Cuba

2011 Pan-Am CGS
Geotechnical Conference

ABSTRACT
The investigation of the authors required load tests in two function foundations, those executed in the country are very few and the literature doesn't offer all the data and they were carried out in soils and environment different to those of Cuba, for what got ready a laboratory equipment to achieve the necessary results. There are few references of tests and details of equipment and test procedures are not shown, being necessary to establish them following own approaches. The results of the tests and their correlation with the MEF allowed checking approaches on the performance of these foundations, as well as in other cases to reach conclusions that differ of the established ones.

RESUMEN
La investigación de los autores requería pruebas de carga en cimientos bifuncionales, las ejecutadas en el país son muy pocas y la literatura no ofrecen todos los datos y fueron realizadas en suelos y ambientes diferentes a las de Cuba, por lo que se preparó un equipo de laboratorio para lograr los resultados necesarios. Hay pocas referencias de pruebas y en las mismas no se muestran detalles de equipos ni procedimientos de ensayo, siendo necesario establecerlos siguiendo criterios propios. Los resultados de las pruebas y su correlación con la modelación por el MEF permitieron comprobar criterios sobre la forma de trabajo de estos cimientos, así como en otros casos llegar a conclusiones que difieren de los establecidos.

1. Introducción

Los cimientos bifuncionales son una muestra de las nuevas tecnologías dedicadas a la industrialización (mecanización) de la construcción y al ahorro en la misma, lográndose con ellos entre otras, las siguientes ventajas:

- Mayor por ciento de mecanización del proceso constructivo respecto al cimiento directo, con gran ahorro de tiempo.
- Eliminar los trabajos de excavación y rehincho, así como disminuir al mínimo o a cero el gasto de madera en encofrado.
- Disminución del costo de hormigón y, sobre todo, acero respecto a cimientos tradicionales que brinden la misma capacidad portante.
- Lograr capacidades portantes muy superiores a cimientos tradicionales con el mismo volumen de hormigón.

Lo anterior trae como consecuencia que los costos de estos cimientos sean entre dos a tres veces menores que los de cimentaciones tradicionales.

Se llama bifuncional a una clase de cimiento que cumple, como su nombre lo indica, con dos funciones, la primera mejorando durante su ejecución las características de la base sobre la cual descansa y la segunda entregando a la misma la carga de la superestructura. La característica principal que diferencia un bifuncional de un cimiento tradicional es que alrededor del foso compactado ó elemento hincado se forma una zona o bulbo de compactación (Fig. # 1), dentro de cuyos límites aumentan la densidad del suelo y las propiedades resistentes del mismo, por consiguiente el suelo puede soportar mayor carga que antes de ser compactado, lo que unido a la forma geométrica de los cimientos, la casi eliminación de madera de encofrado y pequeñas cuantías de acero produce una reducción considerable del costo de la cimentación, llegando a estar entre el 50 y 60 % del costo de un cimiento de plato que soporte la misma carga, aparte de apreciable disminución en el tiempo de ejecución.

Los bifuncionales se dividen en dos tipos generales:

a) Hincados
b) En fosos compactados

Los bifuncionales hincados, como su nombre lo indica, consisten en elementos prefabricados que se introducen en el terreno con la ayuda de martillos de hinca, estos elementos pueden ser de diversas formas tales como pilotes piramidales ó cónicos, bloques piramidales truncados con punta dentada, pilotes cónicos huecos, así como otras formas más complicadas. Este tipo de bifuncional tiene las ventajas clásicas de la prefabricación; rápidez en la puesta en obra, posibilidad de erigir la superestructura casi de inmediato, así como utilización racional y controlada en planta del hormigón y acero.Como desventajas pueden señalarse la invariavilidad de sus dimensiones, necesidad de armado para izaje, traslado y resistencia a la hinca; equipamiento de transporte y finalmente, de gran incidencia en nuestro país, la necesidad de martillos de hinca.

Los bifuncionales en fosos compactados se caracterizan porque las cavidades para cimentar no se excavan ni se barrenan, sino que se abren por compactación local del terreno mediante caída libre de una maza compactadora (Figura 2)

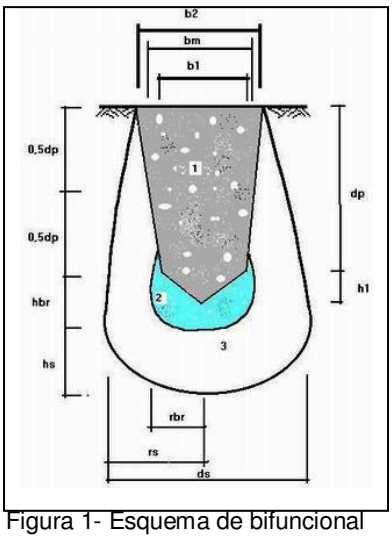

Figura 1- Esquema de bifuncional

1- Elemento hincado ó fundido ´´in situ´´.
2- Ampliación del bulbo con material en el caso de foso compactado.
3- Zona o bulbo compactado en el suelo natural.
dp- Profundidad ó longuitud del cimiento.
h_1- Longuitud de la punta aguzada.
b_1- Ancho ó diámetro en la punta.
b_2- Ancho ó diámetro superior.
b_m- Ancho ó diámetro medio, en 0.5dp.
hb_r- Profundidad de la ampliación.
rb_r- Radio de la ampliación.
h_s- Profundidad del bulbo, en caso de no existir ampliación se mide a partir de dp.
r_s- Radio del bulbo con ó sin ampliación.
d_s- Diámetro del bulbo con ó sin ampliación.

Estos cimientos toman la forma de la maza, por lo que en general son pirámides ó conos truncados con punta plana ó aguzada, la profundidad de los cimientos en fosos compactados oscila entre 0,60 m y 5,00 m, la maza, cuyo peso varía desde 10 hasta 170 kN, cae dirigida por una guía desde una altura que oscila entre 4,00 m y 8,00 m. Después que se forma el foso, se hormigona el mismo. Presentan la ventaja de posibilitar con una maza producir varios tipos de cimientos y la creación del bulbo de ampliación agregando material resistente en el fondo del foso.

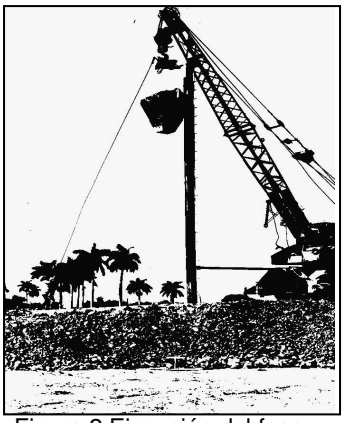
Figura 2 Ejecución del foso

2- Experiencias Nacionales

En Cuba los bifucionales se introdujeron desde 1985, habiéndose aplicado en varias obras y situaciones geotécnicas, aunque en general los cimientos se han ubicado dentro de terrazas que apoyan sobre diversos suelos, tanto arcillas plásticas fisuradas como arenas en estado suelto y saturadas. Las estructuras han sido de esqueleto y de paneles desde una hasta cinco plantas y con cargas máximas de 900 kN. En dos de las obras se hicieron pruebas de carga sobre cimientos de tamaño real.

Durante los trabajos se manifestó la flexibilidad del sistema de foso compactado, al ejecutarse en cinco de las obras 2002 cimientos de dieciocho tipos diferentes con sólo cuatro tipos de mazas (Figuras #3 y #4). En general el costo de la cimentación bifuncional fue entre el 50% y 60% del de las cimentaciones tradicionales si estas se hubiesen empleado en esas obras.

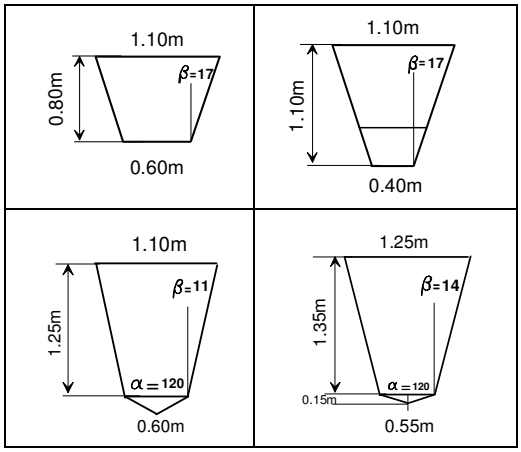

Figura 3 Diseño de las de mazas utilizadas

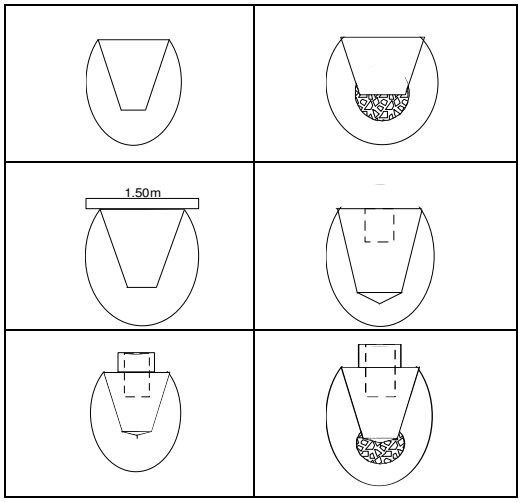

Figura 4 Tipos de cimientos ejecutados

III- Equipamiento utilizado

Se realizó una búsqueda bibliográfica y se encontró referencias de pruebas con modelos a nivel de laboratorio solamente en un caso y en el mismo no se muestran detalles del equipo utilizado ni se explican los procedimientos de ensayo. Por lo tanto fue necesario modificar un equipo y establecer los procedimientos para la ejecución del las pruebas siguiendo criterios propios.

Como base se utilizó un edómetro diseñado para la obtención del módulo de deformación general desarrollado en el Instituto de la Construcción de Odessa (Oisis), una copia de este aparato fue construida en la década de 1980 en Santa Clara para los trabajos de investigación del Ing. Félix Rodríguez sobre cimentaciones. En el equipo original se aplican cargas mediante ponderales colocados en un marco, cuyas varillas cuelgan del travesaño que transmite la carga a un vástago terminado en una placa circular. Esta placa se apoya sobre la superficie de la muestra, de gran volumen comparada con las de los edómetros clásicos, La deformación del suelo bajo la placa principal se mide con el indicador de carátula, ajustado a la varilla.

Dado que la porción de muestra directamente debajo y alrededor de la placa de carga principal no está confinada se producirán deformaciones verticales y distorsiones laterales, al igual de lo que ocurre bajo un cimiento real y entonces los módulos de deformación obtenidos en la prueba serán módulos generales.

Para transformar este equipo a uno que permitiera simular tanto la hinca ó formación del foso, y luego ejecutar pruebas para medir la capacidad portante vertical y asentamientos ante todo había que crear modelos a escala reducida de cimientos bifuncionales con características geométricas que permitieran analizar los problemas planteados en el diseño de la investigación. Siguiendo estos criterios se fabricaron, utilizando el bronce como material, tres modelos que cumplieran las especificaciones dadas a continuación:

a) La altura (dp), diámetro medio (bm), y volumen (Vm) deben ser similares; variando solamente el ángulo de inclinación de las caras (β).
b) La diferencia entre los ángulos de inclinación debe ser lo suficientemente grande, de manera que permita lograr resultados diferenciados en los ensayos**.**
c) Las mazas deben clasificar según su relación dp/bm como poco profundas ó superficiales aunque cercanas a las alargadas, lo que significa (bm/dp) = 1.5 ~ 2.0. Con lo que se logran relaciones similares a las de las mazas reales utilizadas en el país.
d) Que la escala con relación a la magnitud de los cimientos reales ejecutados en el país y teniendo en cuenta las dimensiones del equipamiento disponible fuese lo mayor posible.

Las propiedades de las mazas (modelos) fabricadas se muestran en la figura 5 y la tabla # 1:

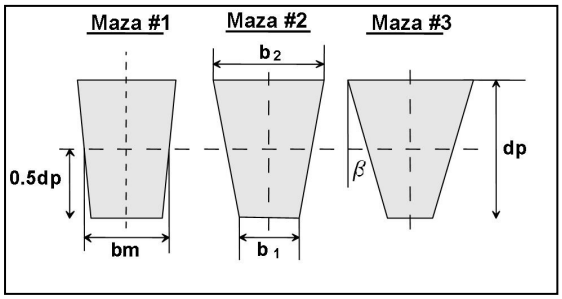

Figura 5- Modelos de maza

Maza	bm (cm)	β (o)	dp (cm)	dp/bm	Vmaza (cm^3)
1	3.0	6	4.8	1.6	34.2
2	3.0	11	4.8	1.6	35.0
3	3.0	16	4.8	1.6	36.2

Tabla # 1- Propiedades de los modelos

Analizando los datos de la tabla se ve que las tres primeras condiciones son cumplidas, en el caso del punto d) considerando que los cimientos construidos en Cuba tienen valores de hp y bm que varían entre hp = 0.90 ~1.20m y bm= 0.70~ 0.80 la escala de los modelos de laboratorio está entre 1/19 y 1/22 en relación a hp y 1/23 a 1/28 respecto a la bm.

Otro aspecto que se tuvo en cuenta al conformar el equipo fue que las paredes del cilindro contenedor de la muestra no llegasen a representar una constricción a las deformaciones de la misma producto de la hinca y posterior prueba de carga. En este sentido se trató de cumplir con los dos requerimientos que siguen:

a) Que la distancia entre el borde superior de la maza modelo y la pared del cilindro sea igual ó mayor que 2 bm, que es la exigida en la metodología soviética para que dos cimientos contiguos se consideren como aislados.
b) Que el espesor de la muestra por debajo de la punta de la maza modelo sea no menor de 4 bm, lo que es equivalente a decir que sea al menos 2 ds, o sea, dos veces el diámetro que se considera para el bulbo de compactación.

Para lograr esto fue necesario desechar el uso de los cilindros del equipo original que no cumplen con el punto b, y se adoptaron en su lugar los moldes del ensayo C.B.R, que aparte de cumplir con las dos condiciones deseadas, hay una gran existencia de los mismos en el laboratorio y además se dispone de los implementos necesarios para la compactación estática de las muestras y su posterior extracción.

Otros elementos necesarios para la conversión del equipo fueron un vástago donde acoplar las diferentes mazas, la sufridera a cual se acopla una varilla guía por la cual se desliza el martillo anular, que proporciona la energía necesaria para la hinca de la maza modelo siendo fabricados dos martillos de diferente peso. El conjunto se completa con los postes y el travesaño, que forman un marco que fija la varilla guía, una regla metálica con graduación de 0.5 mm para la medición de la penetración progresiva de la maza modelo y el indicador de carátula ó defómetro con precisión de 0.01 mm que se apoya sobre el vástago para medir la deformación durante la etapa de carga.

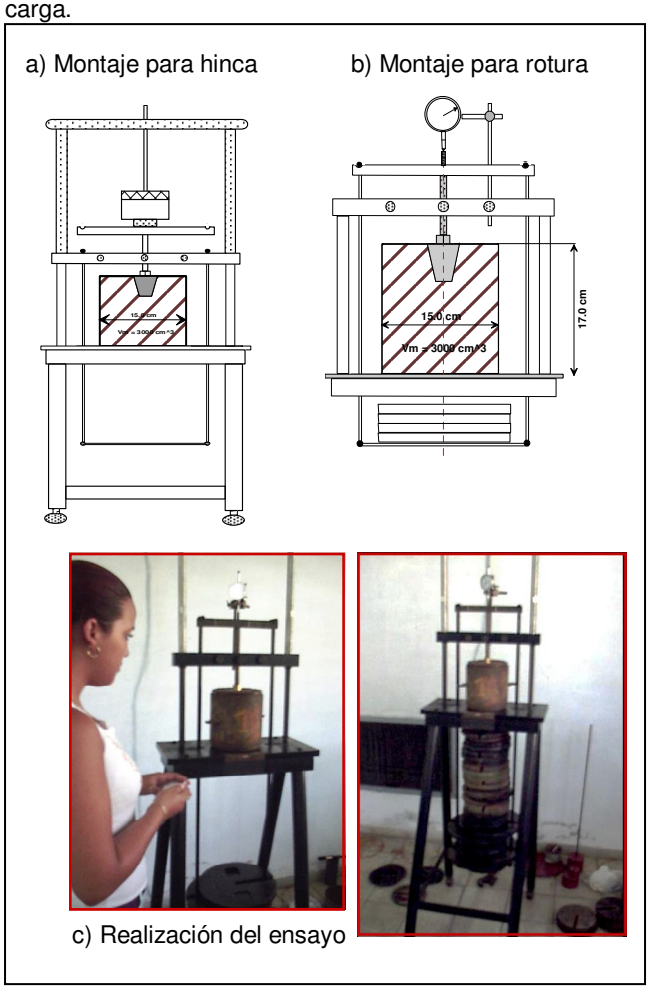

Figura 6 Equipo transformado y en fase de ensayo

Las transformaciones descritas anteriormente tienen la ventaja que no impiden que el equipo original pueda seguir utilizándose para la determinación del módulo general de deformación.

4- Procedimiento general de ensayo

Un ensayo o prueba en el equipo descrito se divide en cuatro procesos bien definidos:

a) Preparación de la muestra, que pueden ser de dos tipos; remoldeadas mediante compactación estática o muestras naturales obtenidas en campo mediante un cilindro muestreador biselado.
b) Hinca de la maza modelo utilizando uno de los martillos anulares con medición de la altura de caída y penetración del modelo dentro de la muestra.
c) Etapa de carga ó rotura, la cual se realiza, dadas las características del equipo, por el método de esfuerzos controlados y que puede ser rápida, sin estabilización total de las deformaciones, o lenta, esperando esta estabilización en cada incremento de carga.
d) Mediciones del bulbo y otras propiedades después de la extracción de la muestra del cilindro al terminar la etapa de carga ó sin llevar a cabo la misma.

Para cada uno de los procesos se diseñó un procedimiento de trabajo con el registro correspondiente.

5- Procesamiento de los resultados del ensayo

Del ensayo descrito en el punto anterior se obtienen los resultados siguientes:

1- Gráfico de penetración volumétrica del modelo contra la energía acumulada aplicada en la etapa de hinca. Los resultados obtenidos muestran que este gráfico (Figura 7), dibujado en escala aritmética, se desarrolla en forma de tramos de recta con puntos de inflexión entre los mismos y aumentando la pendiente al aumentar la penetración.
2- Gráfico de esfuerzo – deformación (Figura 8, obtenido de los resultados de la etapa de carga. Con el objetivo de independizar la deformación de las dimensiones particulares del modelo se determina una deformación relativa **εdp = (**deformación / dp) x 100, que se plotea contra los valores de la presión en la sección media **σ**m = ΣW / Am. En este gráfico se obtienen dos puntos de inflexión, correspondientes a la presión máxima de linealidad **Py** y la de falla, **Pult**, las cuales en algunos casos pueden ser definidas visualmente en la curva pero no así en otros, por lo que para ayudar en esta definición y estandarizar los resultados se implementó el uso de un gráfico adjunto con la diferencia de deformación entre las lecturas de los 30 y 60 seg contra **σ**m. En este gráfico se pueden llegar a trazar tramos de rectas que al cortarse definen los valores de Py y Pult, y sus correspondientes deformaciones relativas **εdpy** y **εdpult**.(Figura 9)
3- Dimensiones del bulbo de compactación, determinadas con ayuda de las capas de material contrastante y otras determinaciones como penetraciones con penetrómetro manual y pesos volumétricos obtenidos mediante la hinca de anillos muestreadores pequeños.

6-Resultados del estudio en un suelo

Se una muestra alterada de 30 kg de una cantera local para realizar el estudio de la misma utilizando los tres modelos de maza, la descripción y propiedades del suelo se dan a continuación:

Descripción: Arcilla arenosa de baja compresibilidad, color pardo oscuro, aluvial.

Granulometría
T#4 = 100%
T#10 = 100%
T#40= 81%
T#200= 62%

Plasticidad
LL= 42%
LP= 21%
IP= 21%

Clasificación SUCS - C.L

Proctor Standar
Wopt= 16.7%
Gh máx= 21.7 kN/m^3
Gd máx= 18.6 kN/m^3
e= 0.50
S= 93% GS=2.79

Módulos dentro y fuera del bulbo
Ebulbo= 40 MPa
Efuera = 22 MPa

utar las pruebas se obtuvieron los resultados en en las tablas # 2 y # 3, mientras que los ca y carga rápida en el caso del modelo de β an en las figuras #7 y # 8

	Gd_1 kN/m^3	S_1 adm	Gd2 kN/m^3	S_2 adm	ds f(bm)	hs f(bm)
β=6	16.4	0.68	18.3	0.85	2.1	1.00
β=11	16.7	0.66	17.9	0.69	2.0	0.85
β=16	17.2	0.67	18.1	0.81	2.0	0.75

Tabla #2

	Σ E g	Py kpa	edpy %	Pult kPa	edpult %
β = 6	1015	875	0.80	1220	2.0
β=11	2096	1350	0.92	2000	2.1
β=16	1429	1400	1.20	1850	3.15

Tabla #3

Como ya se dijo, se producen varios tramos de pendiente creciente a mayor volumen hincado, donde el valor de esa pendiente constituye la resistencia a
la penetración de la maza y queda definido por:

$$R = \Sigma Eg / Vt \quad (Kgs/cm^2)$$

Donde: Eg - energía de un golpe de la maza de hinca
ΣEg - suma de la energía de hinca hasta un volumen Vt de la maza

Las pruebas de hinca en campo de cimientos reales en algunas de las obras ejecutadas presentan resultados similares. En las curvas de carga se pueden determinar tensiones de linealidad (Py) y última (Pult) utilizando el gráfico del incremento de deformación entre 30 y 60 s contra Sigma media

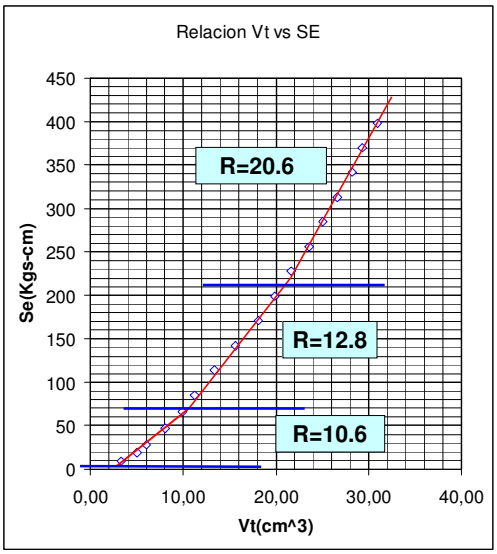

Figura 7 Gráfico de hinca

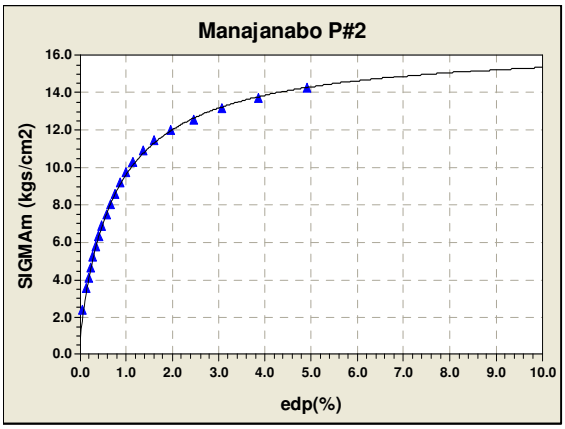

Figura 8 Gráfico Esfuerzo - Deformación

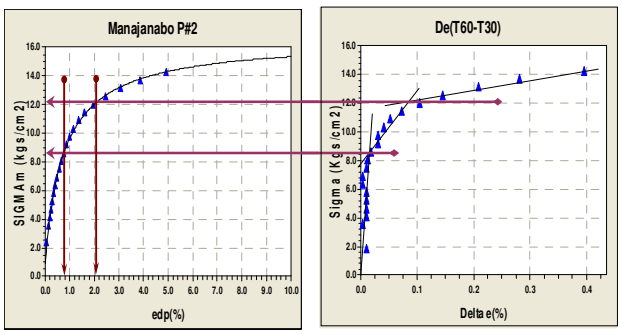

Figura 9 Uso del gráfico de diferencia de deformación para obtener Py y Pult

Analizando los resultados es necesario destacar la similitud en los valores de las edp obtenidos en varias pruebas ejecutadas, que en el nivel de la Py rondan el valor del 1% mientras que para la Pult están entre 2% y 4%

7-Modelación del trabajo conjunto cimiento-suelo mediante elementos finitos

Se incluyó en el diseño de la investigación el uso del método de los elementos finitos (MEF), basado en la teoría de los desplazamientos y trabajos virtuales, y que será usado, luego de calibrado con las pruebas de laboratorio, como patrón de comparación de los otros métodos en estudio.

1) Se modelaron elementos cónicos truncados por su similitud a las mazas de las pruebas de laboratorio.
2) Teniendo en cuenta lo anterior el análisis fue axialsimétrico de tipo carga-deformación
3) Dado que los métodos de cálculo fundamentales trabajan en régimen lineal y que las pruebas de la bibliografía y los pocos resultados nacionales confirman el régimen lineal, en ocasiones seguido de falla con incremento de la resistencia en el Sigma se declararon materiales de tipo elástico.
4) Se usaron elementos rectangulares de cuatro nodos y triangulares de tres, ya que la geometría de los cimientos así como la presencia de la zona de compactación hacen difícil la discretización con un solo tipo de elemento.
5) Como variable de control se usó la deformación vertical, relacionando de esta forma la solución por el MEF con las pruebas de laboratorio, que para este caso se expresan en mm y no en edp.

En la tabla #4 se presentan los resultados comparativos de las variables de control obtenidas en el ensayo de laboratorio DYlab y la modelación con el Sigma DYmod, destacándose la magnitud pequeña de los errores en las mazas de 6° y 16°, en el caso de la maza de 11° el error es grande, sin embargo, la causa de esto debe ser una variación del material ó compactación de la muestra utilizada en el ensayo de laboratorio, lo que se refleja perfectamente en la tabla # 3 donde la ΣEg de la maza de 11° es mucho mayor que las de las otras dos, demostrando mayor compacidad en la muestra para la maza de 11^0 y por consiguiente mayores valores de los módulos de deformación que los asignados en general para el suelo en totalidad.

βmaza (o)	Cant. Elem	βmod (o)	DYlab (mm)	DYmod (mm)	Error (%)
6.0	2005	6.0	0.384	0.367	-4.4
11.0	1970	11.3	0.442	0.557	+26.0
16.0	2020	16.7	0.576	0.593	+2.9

Tabla #4 Comparación con la variable de control en la tensión Py

Otros resultados del análisis por el MEF son los gráficos de isolíneas de gran variedad de tipos de tensiones ó deformaciones que se obtienen luego del procesamiento del modelo y que en este caso han permitido comprobar la influencia que tiene el bulbo de compactación en la distribución de las tensiones y deformaciones mencionadas así como llegar a otras conclusiones importantes. A modo de ejemplo de esos numerosos gráficos se muestran los de las figuras 9 a 12 de resultados obtenidos para el caso de 16° bajo la carga correspondiente al punto de presión máxima de linealidad.

En la figura # 8 se muestran las isolíneas de deformación vertical DYmod donde se observa que tienen forma similar a la del bulbo de compactación obtenido en la etapa de determinaciones finales del ensayo.

La figura# 9 muestra las deformaciones horizontales DX, positivas de izquierda a derecha, donde se puede concluir que estas deformaciones se concentran cercanas a la arista del elemento y dentro de la zona de desarrollo del mecanismo de falla.

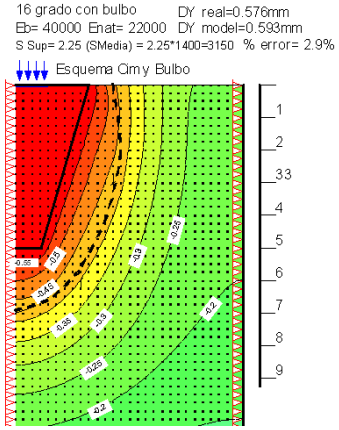

Figura 9

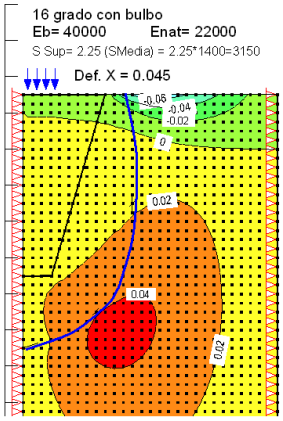

Figura 10

Las figuras # 10 y #11 se refieren a las deformaciones relativas en Y y a las volumétricas, donde se concluye que las mismas son mayores bajo la punta del elemento y además se observa cómo influye el bulbo de compactación en estas deformaciones.

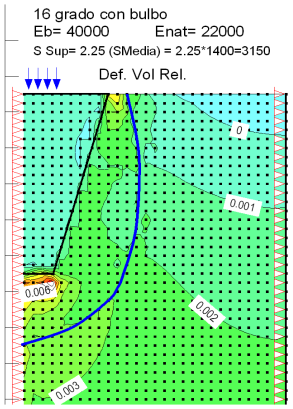

Figura 11

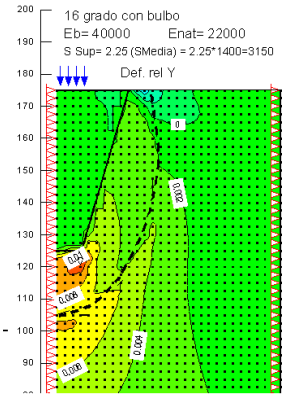

Figura 12

8-Conclusiones:

Los resultados del conjunto de pruebas realizadas y su modelación han permitido arribar a un grupo de criterios que si bien en algunos casos no pueden considerarse como definitivos si han permitido una visión del trabajo conjunto entre el cimiento, el bulbo ó zona de compactación y el suelo circundante que no es posible lograr con las pruebas de carga a tamaño real tradicionales, varios de esos criterios se dan a continuación:

1) El equipo desarrollado y las determinaciones que en él se hacen constituyen una novedad en el país así como algo no frecuente internacionalmente.
2) Aplicar la metodología de Menárd para el ensayo de carga considerando la similitud de deformaciones entre las mazas y presiómetros, dio como resultado gráficos esfuerzo-deformación de buen ajuste a los puntos experimentales.
3) El uso de la deformación relativa edp es novedoso puesto que no se vio en las pruebas de carga de las referencias consultadas. La edp independiza el resultado del volumen del elemento, permitiendo extrapolar así como generalizar conclusiones.
4) Los gráficos de hinca de la prueba de laboratorio, similares a los obtenidos en campo, pueden ser usados para el desarrollo de un método dinámico para estimar la capacidad del bifuncional**.**
5) Los resultados de la investigación parecen indicar que la profundidad hs del bulbo de compactación disminuye al aumentar β para el mismo Vcim, lo que no es considerado en los métodos soviéticos. Por otra parte, se confirma la influencia del ángulo de inclinación de las caras en la capacidad portante del elemento.
6) El modelo discretizado del MEF ha mostrado gran concordancia con el ensayo de laboratorio, lográndose valores muy cercanos a los de la variable de control (deformación vertical).
7) Los contornos de tensiones y deformaciones relativas permiten comprender la influencia del bulbo de compactación en el comportamiento de estos cimientos.
8) Las zonas de concentración de tensiones internas y externas al cimiento, relacionadas con aristas de la sección vertical del mismo pueden indicar que un cambio en el diseño de esta permitiría reducir esos indeseables efectos.
9) La permanencia de la zona de cortantes en el suelo dentro del bulbo hasta la tensión máxima de linealidad del ensayo y su expansión fuera del mismo a tensiones mayores corrobora el concepto de que cuando la zona de deformaciones apreciables sobrepasa el bulbo comienza la falla del cimiento.
10) Los gráficos de tensiones en punta y fuste a nivel de linealidad (Py) ó falla (Pult) obtenidos mediante el MEF pueden dar la posibilidad del cálculo de la capacidad de cimientos reales por métodos que utilicen esos parámetros.

<u>Simbología</u>

Um- Perímetro en la sección media
Am- Area de la sección media
β- Angulo de inclinación con la vertical de las caras del cimiento (o)
Gd- Peso volumétrico seco del suelo
e- Relación de vacíos
S- Saturación del suelo
GS- Peso específico relativo del suelo
DyLab- Deformación vertical del modelo de laboratorio
DyMod- Deformación vertical del modelo MEF