

# MODELACIÓN FÍSICA EN CENTRÍFUGA

**Bernardo Caicedo**

Phd. Profesor Asociado Universidad de Los Andes.

Raul Velasquez. Ingeniero Investigador Universidad de Los Andes

Julieth Monroy. Asistente de Investigacion Universidad de Los Andes

## RESUMEN:

El presente trabajo pretende mostrar la importancia de la modelación física en centrífuga en la Geotecnia actual a través de la descripción de dos modelos físicos desarrollados en los cursos de Maestría en la Universidad de Los Andes, modelos utilizados para entender los problemas de interacción suelo-estructura y para comparar los resultados obtenidos mediante modelación física con modelación numérica a través de diferencias finitas y elementos finitos. Los procesos de preparación y fabricación del suelo; e instrumentación son descritos de manera general. La metodología a emplear se basa en la teoría existente sobre modelos físicos a escala reducida en centrífuga.

**PALABRAS CLAVES:** Modelación física, Centrífuga, Consolidación, Elementos finitos, Diferencias finitas, Tablestacados, Placa de cimentación, Grupo de Pilotes.

## 1. INTRODUCCIÓN

La idea de realizar experiencias con modelos reducidos en centrífuga fue presentada por E. Phillips en 1869 a la Academia de Ciencias de Francia. Utilizando las ecuaciones diferenciales que controlan el equilibrio de los cuerpos elásticos, Phillips estableció las relaciones de similitud que se deberían satisfacer

con el fin de que la obra y su prototipo presentaran el mismo comportamiento. En los problemas en que la gravedad juega un papel preponderante en el equilibrio, Phillips propuso utilizar las fuerzas de inercia, más concretamente la fuerza centrífuga para lograr la similitud. Phillips presentó los principios generales que deberían seguirse para la concepción de una centrifuga y propuso utilizar un equipo de este tipo para el estudio de factibilidad de los grandes puentes metálicos, tal como el que se proyectaba construir en esa época sobre el Canal de la Mancha.

Aunque la idea de utilizar este tipo de equipos en el estudio de las estructuras fue valiosa, el campo de aplicación en el que esta idea tuvo un desarrollo importante fue en la geotécnica. Sin embargo se necesitaron más de cincuenta años para que esta idea fuera llevada a la práctica. En efecto solamente en los años treinta se comenzó a desarrollar esta técnica experimental en la antigua Unión soviética y en los Estados Unidos para utilizarla en diferentes problemas.

En los últimos 15 años ha habido un fuerte aumento del número de equipos de investigación que se han interesado en la modelación en centrífuga (e.g. estudio de la estabilidad de excavaciones, estudio de la licuefacción de un suelo bajo la acción de un sismo, estudio paramétrico de la estabilidad de túneles construidos en terrenos blandos, capacidad portante de cimentaciones, esfuerzos sobre muros de contención). hasta tal punto que actualmente el estudio de modelos geotécnicos en escala reducida es una etapa fundamental en el diseño de obras de ingeniería de relativa importancia.

## 2. INTERÉS DE LOS ENSAYOS CON MODELOS REDUCIDOS EN CENTRIFUGA

Los ensayos que se realizan con modelos reducidos están destinados a cumplir con dos fines principalmente:

- La simulación de un prototipo real preciso.
- El estudio de un prototipo simplificado con condiciones de frontera bien definidas. Esto con el fin de evidenciar ciertos modos de funcionamiento y acumular datos para compararlos con soluciones numéricas.

Recurrir a los modelos reducidos es una práctica corriente en la mecánica de fluidos. Los resultados obtenidos sirven para solucionar diversos problemas (obras fluviales o portuarias, comportamiento de buques, investigaciones aeronáuticas, etc.)

Aunque el desarrollo de modelos numéricos complejos ha desplazado en parte a los modelos físicos analógicos, los modelos reducidos conservan todo su interés en los siguientes casos:

- Cuando la capacidad de cálculo disponible es insuficiente debido a la complejidad de la geometría del problema tratado (típicamente los efectos tridimensionales) o la complejidad de la ley constitutiva de los materiales.
- Cuando el material no se puede modelar correctamente con una ley constitutiva.

Realizar estudios sobre obras a escala natural tampoco es la metodología que proporciona resultados indiscutibles. Además de su enorme costo, existen

diferentes factores que generan incertidumbre en los resultados. A continuación se presentan argumentos para sustentar esta opinión:

- cuando no se trata de obras construidas específicamente para la experimentación, su destino final no permite llevarlas hasta la ruina; por consiguiente su comportamiento solamente se puede apreciar en un pequeño dominio de deformaciones.
- las condiciones geotécnicas frecuentemente son heterogéneas y las características de los suelos no se conocen con toda precisión ya que son evaluadas de manera incompleta a partir de algunos ensayos de laboratorio.
- las condiciones de frontera no se conocen con precisión.

Con la utilización de modelos reducidos se obtienen cuerpos de prueba mucho menos costosos, cuyas características tanto geométricas como mecánicas las puede controlar mejor el experimentador. Por lo anterior, este tipo de ensayos se adaptan muy bien a los estudios paramétricos, lo cual no se puede realizar sobre obras reales. En oposición, el modelo no permite representar todos los detalles, esto conduce a considerar que los modelos reducidos solo constituyen una vía de experimentación complementaria a los cálculos teóricos y numéricos, a los estudios reológicos y a la experimentación sobre obras en escala natural.

La complejidad de la reología de los suelos condujo a los ingenieros a realizar modelos a escala reducida para postular reglas de diseño; este fue el caso de los diseños de capacidad portante de cimentaciones superficiales y profundas o la

estabilidad de pantallas y muros de contención. Sin embargo, estas experimentaciones se realizaron en la mayoría de los casos bajo el efecto de la gravedad normal, lo cual no permitió satisfacer las condiciones de similitud de la mecánica. La validez de la extrapolación a obras reales de los resultados obtenidos con esa metodología ha sido puesta en duda frecuentemente cuando se han confrontado las predicciones con los resultados obtenidos en la obra. La existencia de equipos de ensayo que permitan satisfacer las reglas de similitud, como por ejemplo las centrífugas, permite realizar modelos a escala reducida en geotécnica tan frecuentemente como se realizan en la mecánica de fluidos.

### 3. PRINCIPIO DE LOS ENSAYOS EN CENTRIFUGA

Para observar los mismos fenómenos en una obra en escala natural y en su modelo a escala reducida, se deben respetar, además de las propiedades físicas de los materiales, las condiciones de similitud. Estas condiciones se presentan como relaciones entre las escalas  $f^*$ , es decir los factores que se definen como la relación entre la dimensión física del modelo  $f_m$  y la dimensión del prototipo  $f_p$ . La literatura que trata sobre los problemas de similitud es numerosa, nuestro propósito se limitará a los aspectos esenciales propios a la modelación en centrífuga.

La búsqueda de condiciones de similitud puede hacerse partiendo del sistema de ecuaciones y de condiciones de frontera escritas de manera explícita de tal manera que no se obtenga variación cuando se cambian las unidades. Para los

medios continuos, las ecuaciones de equilibrio de la mecánica se escriben:

$$\sum \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho \left( g_i - \frac{d^2 \xi_j}{dt^2} \right) = 0 \quad (1)$$

en donde:

$x_j$  representa las coordenadas

$\sigma_{ij}$  son las componentes del tensor de esfuerzos

$\xi_j$  son las componentes del tensor de desplazamientos

$g_i$  son las componentes del tensor de fuerzas de masa

$\rho$  representa la densidad

$t$  es el tiempo

Si se modifican las unidades se obtiene:

$$\sigma^* l^{*-1} \sum \frac{\partial \sigma'_{ij}}{\partial x'_j} + \rho^* \rho' \left( g^* g_i - \xi^* t^{*-2} \frac{d^2 \xi'_i}{dt'^2} \right) = 0 \quad (2)$$

en donde  $l^*$  representa la escala de reducción de las longitudes.

La ecuación permanecerá sin modificación si las escalas satisfacen a las dos siguientes ecuaciones:

$$\sigma^* = \rho^* g^* l^* \quad (3)$$

$$\xi^* = g^* t^{*2} \quad (4)$$

En mecánica de fluidos y para el estudio de las estructuras, las experiencias se realizan en condiciones normales (gravedad terrestre, es decir:  $g^*=1$ ) y los

materiales del problema prototipo se remplazan por otros (por ejemplo con un fluido de densidad o viscosidad diferente) cuyas características mecánicas se escogen de tal manera que se satisfagan las condiciones de similitud.

En la mayoría de problemas que se encuentran en la geotécnica, los esfuerzos generados por el peso propio juegan un papel fundamental en el equilibrio. De este modo, se debe tratar de satisfacer de la mejor manera la condición de similitud (3).

Para obtener el mismo estado de esfuerzos,  $\sigma^*=1$ , en el modelo reducido ( $\lambda^*\ll 1$ ), la condición (3) puede satisfacerse de dos maneras: aumentando la densidad  $\rho^*$  o aumentando la intensidad de las fuerzas de masa  $g^*$ . En el primer caso se deben encontrar materiales de remplazo más densos. Sin embargo, para obtener el mismo campo de deformaciones, es necesario que los materiales del prototipo y del modelo tengan las mismas leyes de comportamiento o leyes constitutivas. La complejidad de la reología de los suelos hace prácticamente imposible encontrar materiales de remplazo. La utilización de pequeños cilindros metálicos como materiales de remplazo para los suelos granulares para modelar un problema de deformaciones planas es una técnica válida pero tiene las siguientes limitaciones:

- Una baja reducción de escala (menos de 10)
- los efectos producidos por la deformabilidad del suelo no son reproducidos correctamente.

Puesto que es muy difícil encontrar un material de sustitución con una densidad muy elevada, la solución que queda planteada es la de aumentar las fuerzas de masa aplicadas al modelo siguiendo la relación:

$$g^* l^* = 1 \quad (5)$$

Este efecto puede obtenerse utilizando dos técnicas:

- El método del gradiente hidráulico (Zelikson, 1967) en el cual las fuerzas de filtración producidas por un flujo forzado en el modelo se superponen al efecto de la gravedad.
- La centrifugación del modelo, con esta técnica la aceleración centrífuga creada por la rotación del modelo permite aumentar la gravedad que actúa en el modelo.

De este modo, un modelo reducido a una escala 1:100 se deberá someter a una aceleración equivalente a cien veces la gravedad para tener el mismo campo de esfuerzos que en el prototipo.

La segunda técnica tiene un campo de aplicaciones mucho más amplio (problemas de filtración con superficie libre, etc.) y es aplicable a la gran mayoría de problemas que se presentan en geotécnica, no solamente en situaciones estáticas sino también en los problemas de carga cíclica (choques, explosiones, sismos, etc.).

En la tabla 1 se presenta una lista de los factores de escala que se obtienen de la similitud producida en modelación en centrífuga.

**TABLA 1**

**Factores de escala para ensayos en centrífuga realizados a  $N_g$  utilizando el mismo material en el prototipo y en el modelo**

| <u>Dimensión del modelo</u><br>Dimensión del prototipo |   |
|--|---|
| Densidad   | 1                                       |
| Longitud   | 1/N                                     |
| Desplazamiento   | 1/N                                     |
| Deformación  | 1                                       |
| Esfuerzo   | 1                                       |
| Velocidad  | 1                                       |
| Aceleración  | N                                       |
| Tiempo   | 1/N (problema dinámico)                 |
| Tiempo   | 1/N <sup>2</sup> (problema de difusión) |

### 3. LIMITACIONES DE LA MODELACION EN CENTRIFUGA

Para presentar de manera completa la técnica de la modelación en centrífuga debemos tener en cuenta las principales limitaciones de este tipo de modelación, las cuales se pueden agrupar en dos tipos según su origen: la modificación del campo de gravedad y la reducción de las dimensiones geométricas.

#### 3.1 El campo de aceleración centrífuga

La aceleración centrífuga crea un campo de aceleración con centro en el eje de rotación, la gravedad artificial inducida en el modelo no es uniforme sino que varía de un punto al otro dependiendo de la distancia al eje de rotación. Esta dificultad disminuye cuanto más grande sea el radio medio de la trayectoria del modelo. Si H representa la altura del modelo que se coloca en el contenedor y R es el radio de la trayectoria de la base del modelo, la diferencia relativa máxima entre los esfuerzos en el modelo y el perfil geostático es igual a  $H/(2R)$ .

Cuando un punto de materia se desplaza en el contenedor, su trayectoria en un sistema de coordenadas fijo al contenedor se modifica debido a la rotación del modelo. La aceleración de Coriolis en una centrífuga es mucho más importante que la que se tiene en nuestro planeta; de este modo ella crea una perturbación con respecto a la situación del prototipo. Sin embargo, lo anterior tiene una influencia importante solamente en las experiencias en las cuales existen elementos que se desplazan rápidamente con respecto al modelo.

### 3.2 Consecuencias de la reducción de las dimensiones geométricas

En ciertos problemas las condiciones de similitud no pueden satisfacerse simultáneamente. Esta situación que es clásica en la mecánica de fluidos (conflicto entre las similitudes de Froude y de Reynolds) también se encuentra en centrífuga en los problemas geotécnicos en los que varios fenómenos que dependen del tiempo se presentan simultáneamente. Por ejemplo, si consideramos los problemas de filtración en medios porosos saturados, conservando los mismos materiales, fluidos y esqueleto sólido, la ley de Darcy conduce a la condición siguiente para los problemas de difusión:

$$t^* = l^{*2} \quad (6)$$

mientras que según (4) los efectos de inercia están controlados por la condición:

$$t^* = l^* \quad (7)$$

En ciertos casos es posible limitar esta incompatibilidad modificando la curva granulométrica del suelo o la viscosidad del fluido, sin embargo para esta modificación se debe tener en cuenta la ley de comportamiento del suelo. Si no es posible encontrar una solución para esta incompatibilidad, la similitud será

imperfecta y el experimentador deberá escoger la base de tiempo a utilizar en función del fenómeno fundamental que controla el problema.

Otras fuentes de error pueden provenir de los materiales utilizados para la modelación:

- Cuando se utilizan bloques de suelo natural, las inclusiones orgánicas, las discontinuidades y otras heterogeneidades locales tomarán otra proporción en el modelo. La resistencia mecánica o las condiciones de drenaje a la escala del modelo reducido podrán alterarse fuertemente con respecto al prototipo.
- El espesor de las superficies de rotura, de las discontinuidades, de las zonas de interface depende principalmente del tamaño de las partículas elementales del material; por consiguiente estas zonas no serán representadas a escala correctamente; actualmente no se conocen completamente las implicaciones de este error de similitud.

#### 4. DESCRIPCION MODELOS FISICOS TRABAJADOS

Como parte importante del desarrollo de los cursos de Diseño Avanzado de Cimentaciones (2002, 2003) del programa de Maestría en la Universidad de Los Andes se elaboraron 2 modelos en centrífuga; el análisis de una losa de cimentación y la influencia de un pilote cargado horizontalmente sobre el grupo, modelos que se describen a continuación:

#### 4.1 ESTUDIO DE LAS DEFORMACIONES DE UNA LOSA DE CIMENTACIÓN SOBRE SUELO BLANDO

El prototipo que se quiere analizar con sus dimensiones y cargas aplicadas se presenta en la siguiente figura:

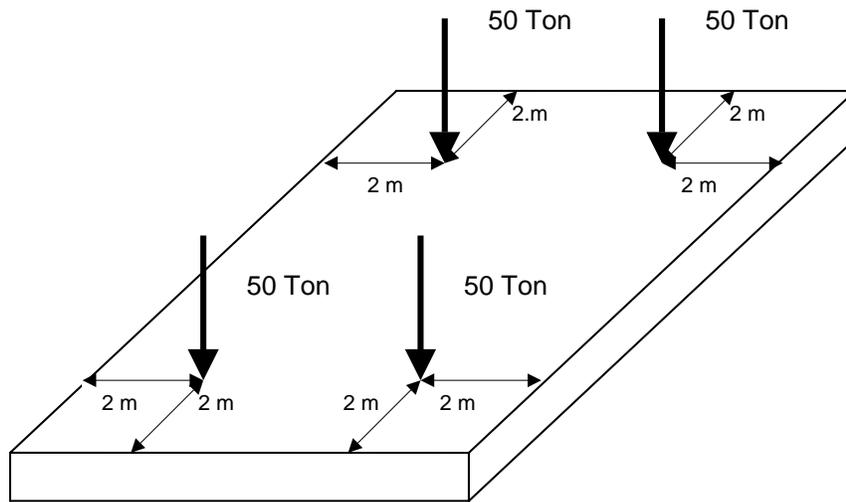


Figura 1. – Aplicación de cargas

La placa de cimentación se apoya sobre un perfil de suelo mostrado en la figura No 2 el cual está compuesto por caolín y un lente de arcilla que tiene las dimensiones mostradas en esa figura, es importante aclarar que la muestra de suelo se construyó con el perfil de consolidación mostrado en la figura No3 corresponde a un suelo normalmente consolidado

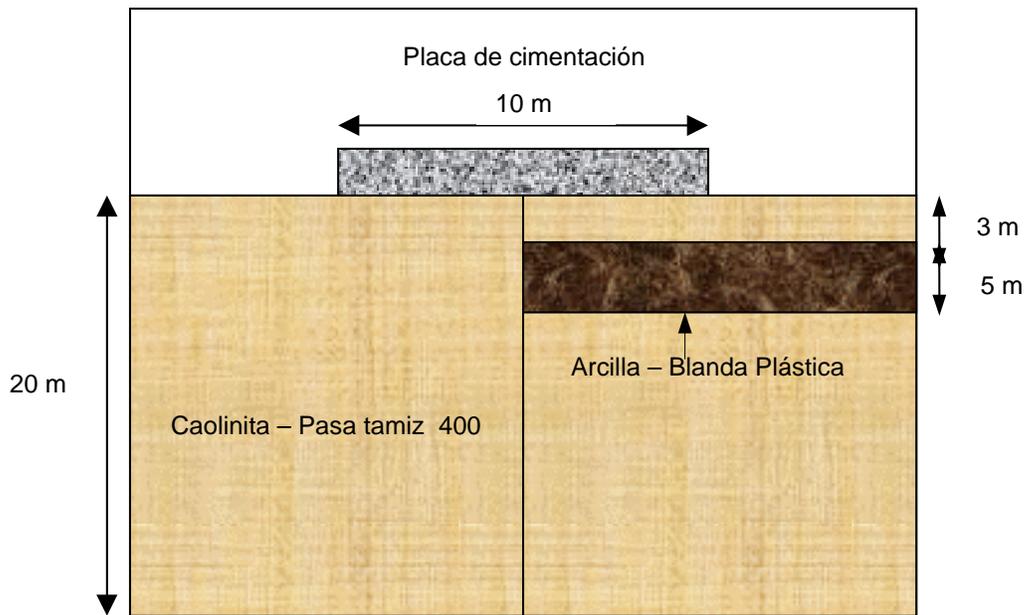


Figura 2. – Perfil del Suelo

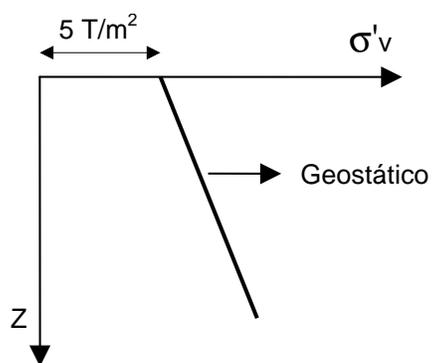


Figura 3. – Perfil de consolidación del suelo

En el proceso de preparación del suelo, se pretendió modificar los parámetros que más influyen en el comportamiento del suelo como el perfil de esfuerzos y la cohesión.

En la siguiente tabla, se encuentran las propiedades que los materiales poseían antes de realizarse la consolidación.

| <b>Propiedades Mecánicas</b>          | <b>Caolín</b>          | <b>Arcilla</b>         |
|---------------------------------------|------------------------|------------------------|
| Humedad Natural                       | 64.95% (1.5 LL)        | 84.84% (1.5 LL)        |
| Límite Líquido (LL)                   | 43.3%                  | 100.37 %               |
| Límite Plástico (LP)                  | 25.6 %                 | 11.99 %                |
| Relación de Vacíos (e)                | 1.85                   | 5.60                   |
| Peso Unitario total $\gamma_T$        | 1.62 g/cm <sup>3</sup> | 1.46 g/cm <sup>3</sup> |
| Gravedad Específica (G <sub>s</sub> ) | 2.65                   | 2.49                   |

**Tabla 2. – Propiedades de los materiales**

El recipiente en el que se encontraba la muestra era de material metálico (Figura

4) y sus dimensiones eran:

- l = 60 cm.
- b = 40 cm.
- h = 50 cm.



Figura 4. – Recipiente de la Muestra

La consolidación se realizó por capas, con el fin de lograr una distribución homogénea de esfuerzos. Los espesores de cada capa y los respectivos esfuerzos que fueron aplicados se presentan en la siguiente tabla:

| Capa | Descripción            | Espesor<br>[cm] | Esfuerzo<br>en la<br>Superficie<br>[kg/cm <sup>2</sup> ] | Carga<br>Aplicada con<br>la MTS<br>[kg] |
|------|------------------------|-----------------|--|---|
| 1    | Más Profunda<br>Caolín | 8               | 3.09   | 7300                                    |
| 2    | Caolín                 | 16              | 1.8  | 4200                                    |
| 3    | Caolín –<br>Arcilla    | 8               | 1.15   | 2700                                    |
| 4    | Superficial<br>Caolín  | 8               | 1.15   | 2700                                    |

Tabla 3. – Distribución de Esfuerzos en la muestra

La aplicación de la carga definida para cada capa se aplicó gradualmente para evitar que el exceso presión de poros causara el derramamiento del material por los bordes de la tapa. Para efectos de drenaje, cada capa se cubría con geotextil y sobre este se colocaba la tapa metálica que soportaba la carga aplicada por la MTS, como se muestra en la figura 5



Figura 5.– Aplicación del Geotextil en la muestra

Una vez se consolidaron las capas de caolín 1 y 2; se procedió al vertimiento del material correspondiente a la capa 3 (caolín-arcilla). En la interfase de esta capa se colocó geotextil para evitar la posible mezcla entre ellos (Figura 6)



Figura 6.– Capa 3 (Caolín-Arcilla)

Teniendo consolidada la última capa (4-caolín), la muestra de suelo se encontraba lista para el vuelo en la centrífuga (Figura 7).



Figura 7. – Estado Final de la muestra

Luego se procedió a construir la placa de cimentación siguiendo las leyes de escalamiento enunciadas anteriormente con  $N=50$  con lo que se obtuvieron las siguientes dimensiones entre modelo y prototipo.

|                  | <b>l</b><br>[cm] | <b>b</b><br>[cm] | <b>h</b><br>[cm] | <b>Cargas Puntuales</b><br>[kg] |
|------------------|------------------|------------------|------------------|---------------------------------|
| <b>Prototipo</b> | 1000             | 800              | 100              | 50000                           |
| <b>Modelo</b>    | 20               | 16               | 2                | 0.4                             |

Tabla 4 – Dimensiones y cargas escaladas

La suma de las cuatro cargas puntuales (1.6 kg) se aplicó a la placa de cimentación mediante una segunda placa, El concreto con el cual se construyó la placa se diseño utilizando un mortero de 3000 psi. La placa de cimentación se reforzó utilizando alambre dulce, al igual que el refuerzo longitudinal de las columnas, y para el refuerzo transversal de las columnas se utilizó alambre de cobre (Figura 8).

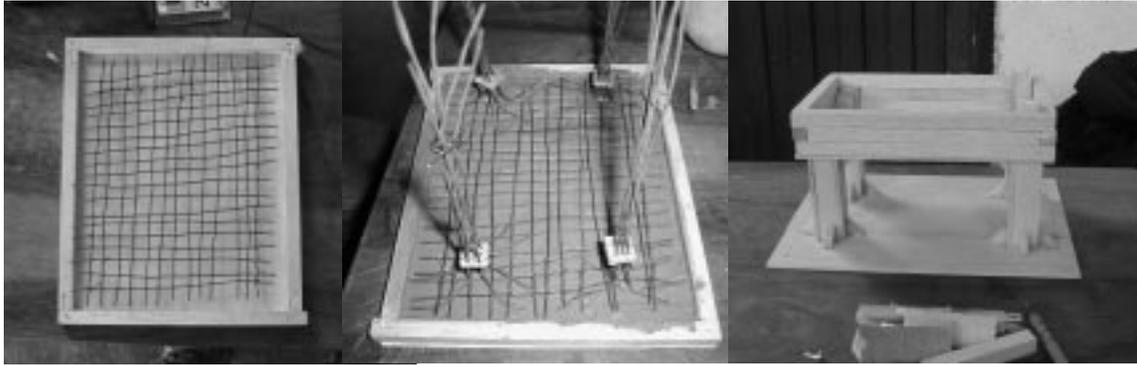


Figura 8. – Proceso de construcción de la placa (Formaleta y Refuerzos)

Para la medición de los asentamientos en la placa de cimentación se utilizaron medidores de desplazamiento basados en potenciómetros de tipo analógico, los cuales se disponen en una cámara especialmente fabricada para tal fin y la cual tiene un embolo adaptado a la parte inferior del potenciómetro con el cual se lleva a cabo la medida real. Este embolo es el que realmente se encuentra en contacto con las superficies a medir. (Figura 9).



Figura 9.– Medidores de Desplazamiento

Cuatro de estos de estos dispositivos fueron colocados en la placa; tres en las esquinas y uno en la parte central, como se observa en la figura 10.



Figura 10. – Colocación de los Deformímetros

Una vez montado el modelo físico, junto con sus dispositivos de medición, se llevó a cabo el vuelo. Este se realizó a 50 gravedades durante un periodo de 10 minutos (Figura 11).

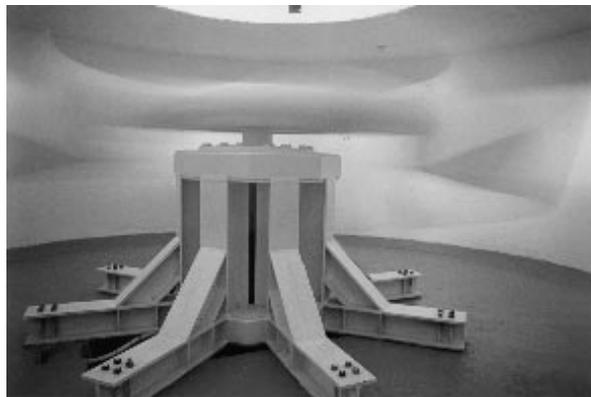


Figura 11. – Vuelo en la Centrífuga

## 4.2 ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE UN PILOTE CARGADO HORIZONTALMENTE SOBRE EL GRUPO

Este modelo físico representa un grupo de tres pilotes, en el cual, uno de ellos se encuentra bajo la acción de una carga horizontal. El objetivo de este trabajo es el de confrontar los resultados obtenidos en la modelación física, con los resultados que se obtienen a partir de un análisis numérico basado en la teoría elastoplástica, para el mismo grupo de pilotes y el determinar la influencia de un pilote cargado horizontalmente sobre sus pilotes vecinos (factor  $\alpha_F$ ).

A continuación se presenta un esquema del prototipo a modelar y de sus características geométrica generales:

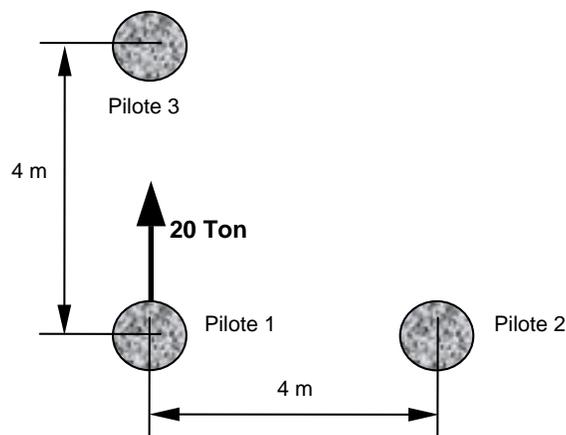


Figura 12 – Aplicación de cargas (Vista Superior)

|                 | Masa<br>[Ton] | LONG.<br>[m] | $\phi$ Externo<br>[m] | Espesor Pared<br>[cm] | Material |
|-----------------|---------------|--------------|-----------------------|-----------------------|----------|
| <b>PILOTE 1</b> | 4.2           | 17.5         | 0.975                 | 6                     | Aluminio |
| <b>PILOTE 2</b> | 4.2           | 17.5         | 0.975                 | 6                     | Aluminio |
| <b>PILOTE 3</b> | 4.2           | 17.5         | 0.975                 | 6                     | Aluminio |

Tabla 5 – Características de los pilotes

El prototipo en sección transversal junto con el tipo de suelo utilizado se muestra a continuación:

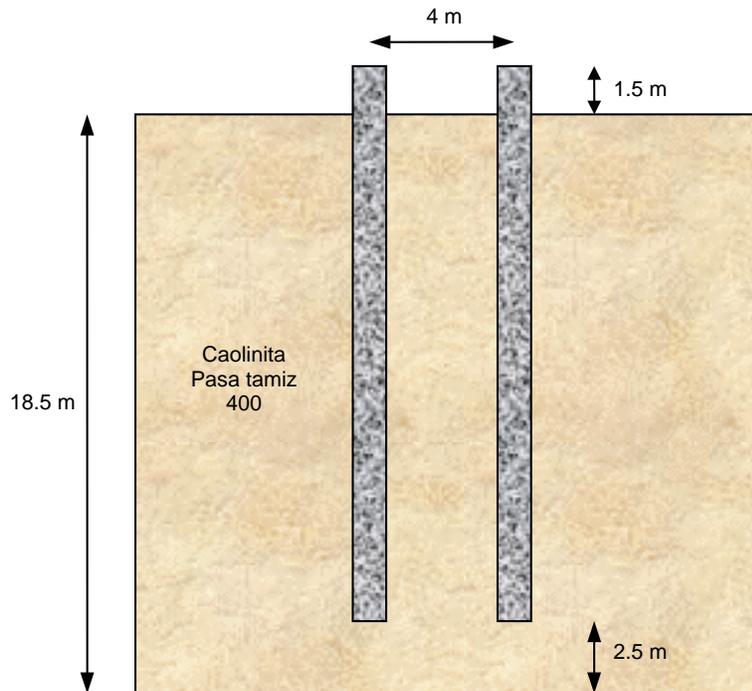


Figura 13 – Aplicación de cargas (Vista Superior)

Se utilizó el mismo caolin del anterior modelo y con las características geomecánicas presentadas en la tabla No 2 se procedió a realizar el proceso de consolidación de la misma forma y con el mismo perfil utilizado en el modelo de la placa excluyendo el lente de arcilla .

Se utilizaron tubos de aluminio de sección circular para simular los pilotes, utilizando las leyes de escalamiento con  $N=50$  se obtuvieron las siguientes dimensiones entre modelo y prototipo.

|                  | Long.<br>[cm] | $\phi_{EXT}$<br>[cm] | $\phi_{INT}$<br>[cm] | Carga Horizontal<br>[kg] |
|------------------|---------------|----------------------|----------------------|--------------------------|
| <b>Prototipo</b> | 1750          | 93.75                | 88.75                | 40000                    |
| <b>Modelo</b>    | 35            | 1.895                | 1.775                | 0.32                     |

Tabla 6 – Dimensiones y cargas escaladas

La carga horizontal inicial definida a partir de las leyes de escalamiento (0.32 kg) se aplicó al Pilote 1 a través de una polea como se muestra en la figura 14.

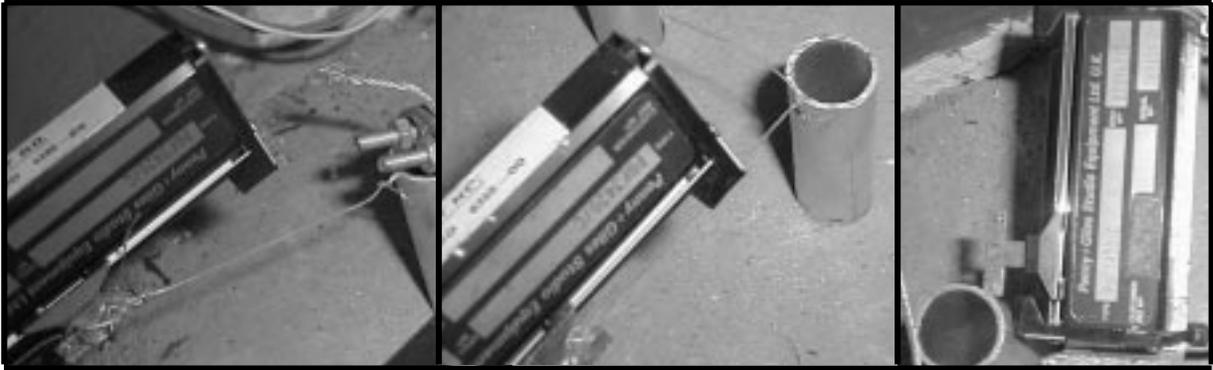


Figura 14 – Aplicación de la carga horizontal

Para la medición de los desplazamientos inducidos por la carga horizontal en el pilote uno y su influencia sobre los pilotes 2 y 3, se utilizaron medidores de desplazamiento basados en potenciómetros de tipo analógico iguales a los utilizados en el anterior modelo.

Un dispositivo de este tipo fue colocado a cada uno de los tres pilotes para medir los desplazamientos en la misma dirección de la aplicación de la carga. El acople de los potenciómetros a los pilotes 1 (Figura 15a) y 2 (Figura 135) se realizó por

medio de un nylon, mientras que para el pilote 3, el sistema de acople funcionó por contacto (Figura 15c).



(a) – Pilote 1

(b) – Pilote 2

(c) – Pilote 3

Figura 15 - Dispositivos de medición en cada pilote

Una vez dispuestos los potenciómetros y el mecanismo de aplicación de la carga horizontal, el montaje se encontraba listo para el vuelo (Figura 16)

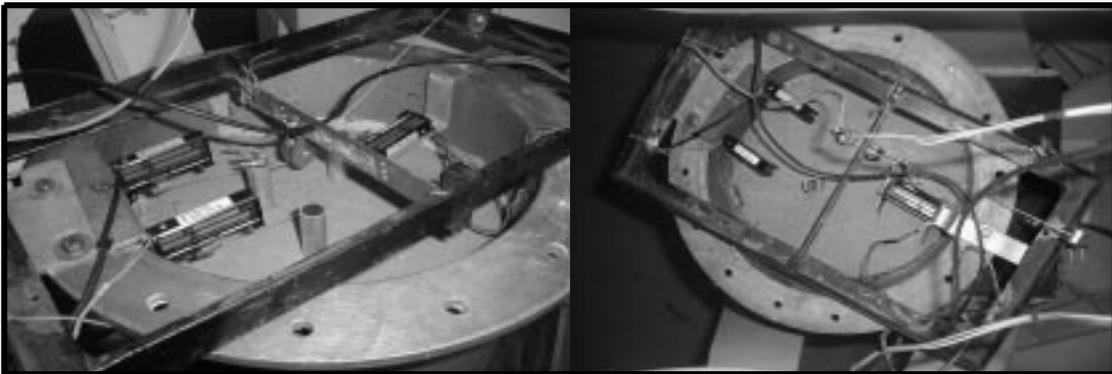




Figura 16 – Montaje final del Modelo y vuelo

## 5. RESULTADOS

En la Figura 17 se observa el estado del modelo de la placa una vez terminado el vuelo. Seguidamente se procedió con un levantamiento topográfico sobre la superficie del suelo y el procesamiento de las mediciones realizadas por los deformímetros.

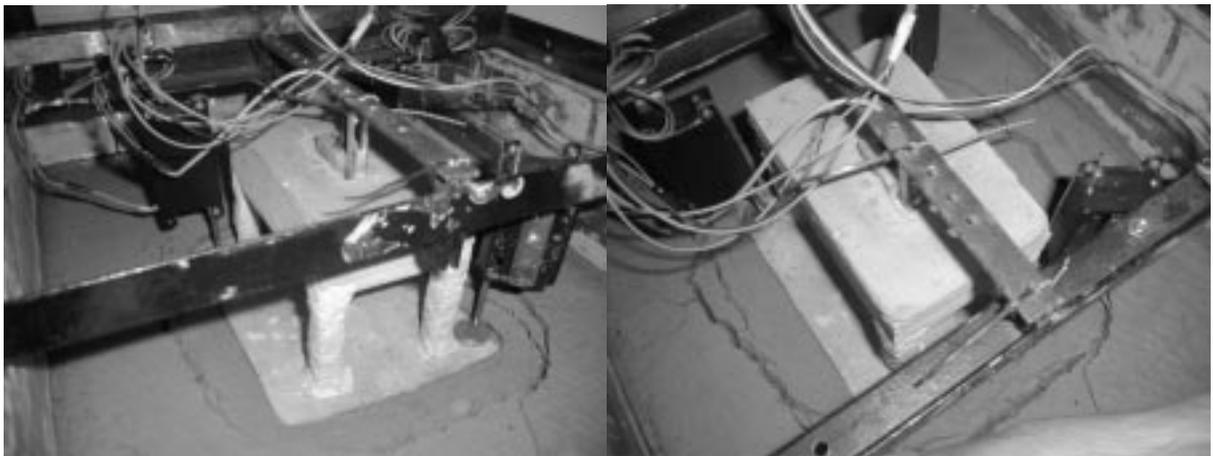


Figura 17 Estado Final del modelo placa

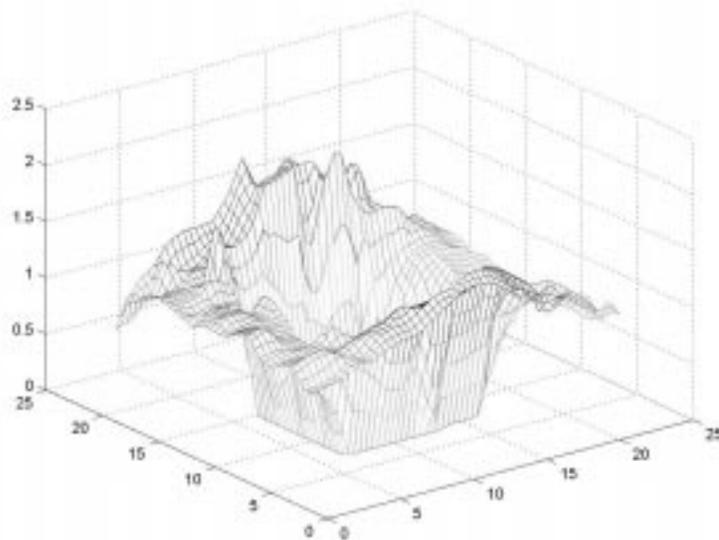


Figura 18 Deformaciones Medidas en el modelo (Escala aumentada)

Para los desplazamientos medidos en el modelo se interpolaron los datos en las tres direcciones y se obtuvo una superficie de desplazamientos relativos (Figura 18) a partir de la resta del desplazamiento máximo con el resto de lecturas.

El desplazamiento promedio máximo del suelo por debajo de la cimentación fue de 2.14 cm en el modelo, la cual corresponde a 1.07 m en escala 1:1. Los desplazamientos verticales promedio en la sección transversal obtenidos en el modelo, como se muestra en la Figura 18 fueron de 1.1 cm en el costado izquierdo y 1.0 cm en el costado derecho las cuales corresponden a unos desplazamientos de 50 y 55 cm correspondientemente para la situación 1:1.

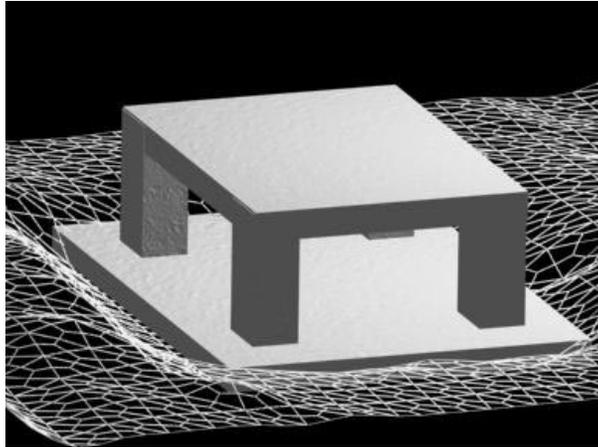


Figura 19 Modelación numérica

Los desplazamientos verticales en la sección longitudinal, que en promedio presentó el modelo (Figura 18) fueron en el costado izquierdo (Capa caolín intercalada con arcilla) de 1.3 cm, con un valor máximo de 1.6 cm y en el costado derecho (capa de caolín) de 1.5 cm, con un valor máximo en este costado de 2.1 cm, lo cual indica las diferencias de rigidez esperadas por la presencia de la interface de materiales. No se presentó deformación apreciable en la placa de cimentación, debido al contraste de rigidez entre este elemento y el suelo.

La modelación por elementos finitos se realizó con ANSYS utilizando el criterio de falla de mohr coulomb, con las propiedades adecuadas para cada material obtenidas despues de realizar el vuelo en la centrífuga, los resultados de esta modelación se muestran a continuación con la forma de la deformada igual al obtenido en la modelación fisica pero con magnitudes diferentes, hecho que pone en claro la necesidad de realizar ajustes de los modelos numéricos a traves de ensayos de laboratorio y modelos físicos.

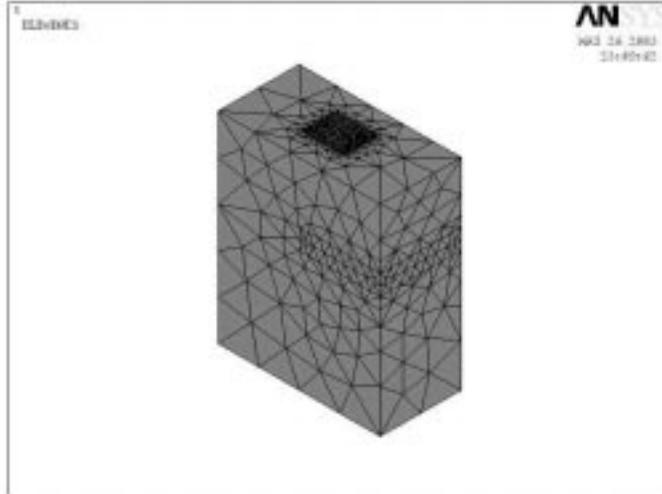


Figura 20 Modelación numérica

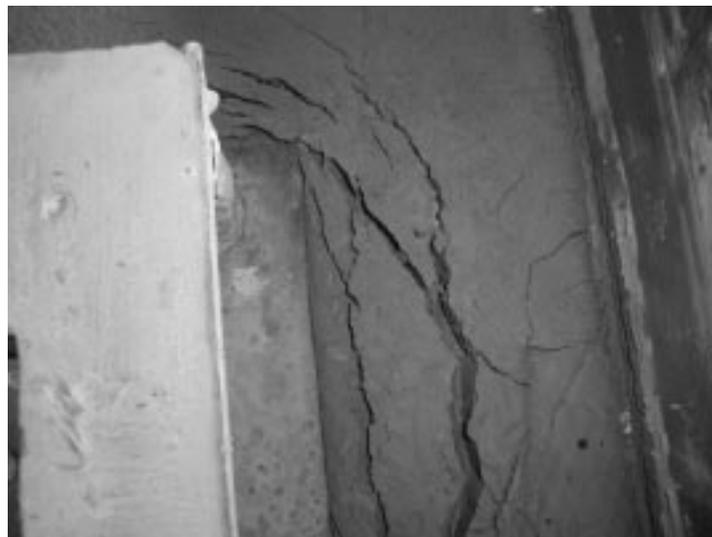


Figura 21 Grietas presentes en el modelo

El suelo alrededor de la cimentación presentó grietas visibles (Figura 21) hasta de 0.7 cm de abertura debido a la gran diferencia de deformaciones obtenidas entre el suelo por debajo de la cimentación y este mismo a una distancia en el modelo

entre 5 y 6 cm. Los asentamientos calculados con teoría elástica suponiendo suelo homogéneo e isotrópico y módulo constante (en el caso más desfavorable) son de aproximadamente 10 cm los cuales son muy inferiores a los obtenidos con el modelo físico y el con el método numérico. Los excesivos asentamientos obtenidos en el modelo físico pueden ser ocasionados por la falta de compactación del material conduciendo a módulos muy inferiores a los esperados. Para el modelo de pilotes sometidos a carga horizontal se obtuvieron los siguientes resultados, a partir de los cuatro vuelos, que se realizaron a las respectivas cargas de 632gr, 1132gr, 1632gr y 2132gr, se obtuvo información que permitió correlacionar tiempos, desplazamientos y fuerzas, para finalmente definir el desplazamiento de los pilotes libres de carga en términos de la deformación del pilote cargado.

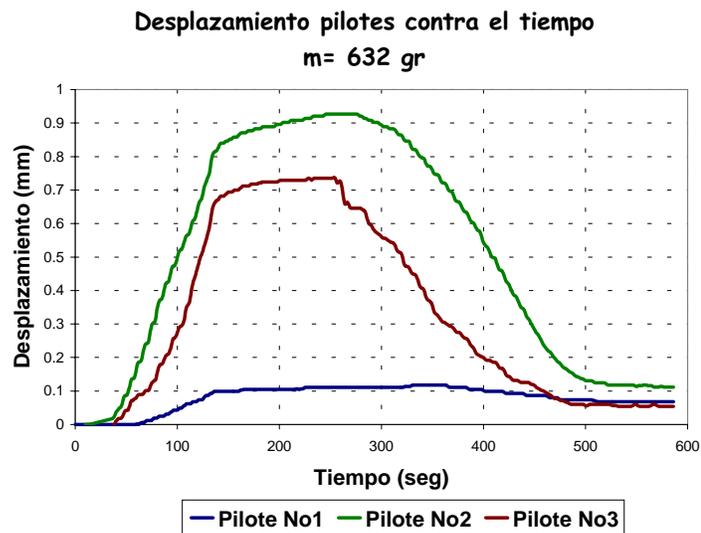


Figura No 20. Resultados modelo grupo de pilotes

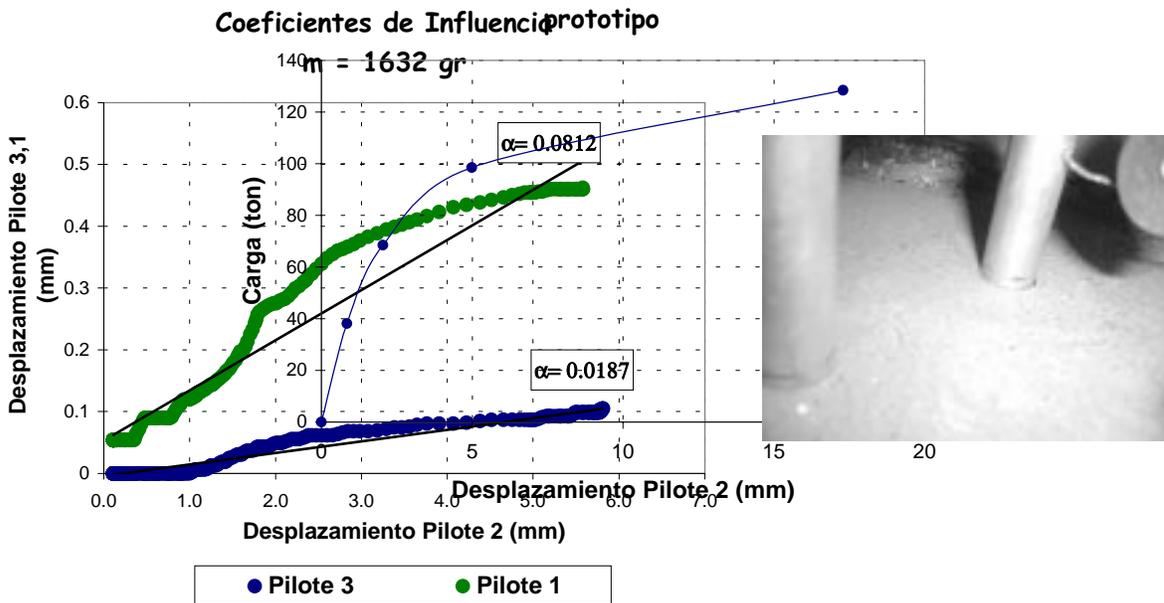
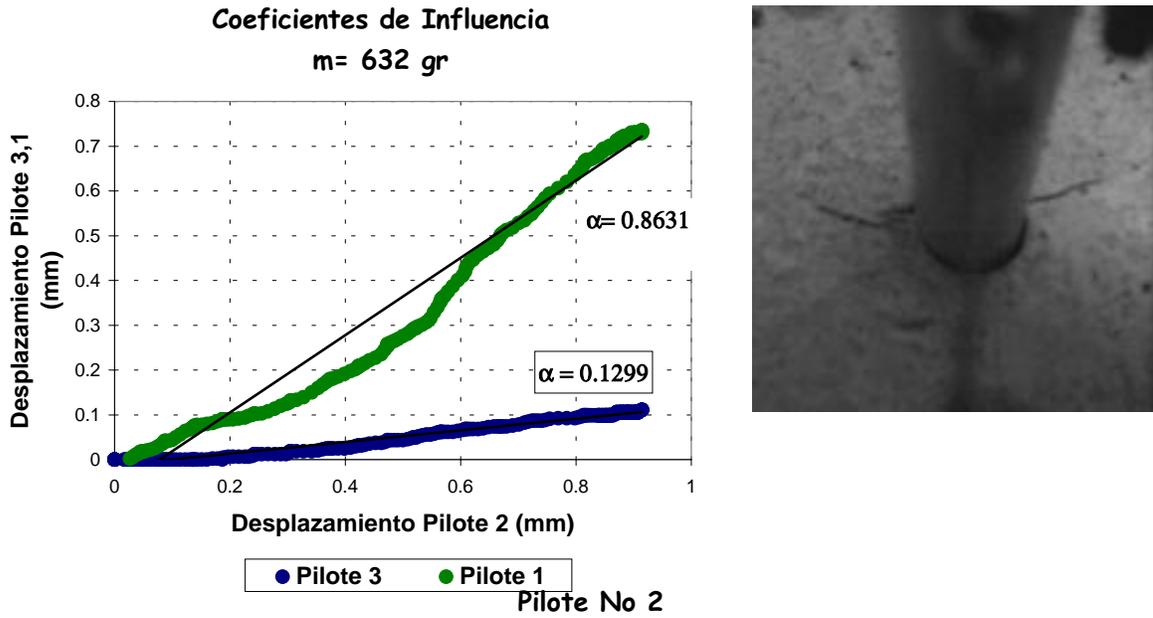


Figura No 23 Resultados modelo grupo de pilotes

Se observó una mayor influencia, en términos de desplazamiento inducido, del PILOTE 1 (cargado) sobre el PILOTE 3 (alineado con la carga) que sobre el PILOTE 2 (lateral). Se determinó que los factores de influencia decayeron a medida que se realizaban vuelos con aumentos progresivos de carga, fenómeno que no se tiene en cuenta en el cálculo teórico convencional. Esto se debe a que cada carga induce deformaciones plásticas al suelo. Esta degradación progresiva conlleva a que el pilote cargado pierda capacidad de inducir desplazamientos al resto del sistema suelo-pilotes

## 6. CONCLUSIONES

De la misma manera que las otras metodologías de simulación utilizadas en otras disciplinas, la modelación en centrífuga no es una técnica de simulación perfecta. Tampoco es más imperfecta que las practicadas ampliamente en mecánica de fluidos o estructuras. El ingeniero debe analizar en cada caso la calidad de los resultados obtenidos teniendo en cuenta los posibles problemas que pueden presentarse.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los estudiantes de Diseño Avanzado de Cimentaciones del 2002 y 2003 de la Universidad de los Andes.

## REFERENCIAS

- Taylor, R.N.(1995), *Geotechnical Centrifuge Technology*. Blackie Academic and Professional
- W. Powrie. D.J. Richards & C Kantartzi. (1994), *Centrifuge 94. Balkema Rotterdam*.

- Garnier Jacques.(2001), *Physical Models in Geotechnics: State of the Art and Recent advances*. Biennale Coulomb.

No Copiar