

# Centrífuga Geotécnica

## Geotechnical Centrifuge

Eugenio Jiménez García<sup>1\*</sup>, Svetlana Melentijevic<sup>2</sup>

### Palabras clave

geotecnia; centrífuga;  
modelización; ensayos;

### Resumen

La modelización centrífuga es una técnica que consiste en construir un modelo a escala reducida de un prototipo real e introducirlo en una máquina centrífuga, con el objetivo de crear una simulación artificial de distintos procesos geotécnicos (consolidación, deformaciones, roturas, etc.) en un periodo de tiempo muy corto comparándolo con los efectos a escala real. Estas simulaciones artificiales se alcanzan generando aceleraciones mayores a la gravedad, consiguiendo acelerar los procesos en el tiempo.

El objetivo de la modelización centrífuga es conseguir una reproducción fiable del problema geotécnico real. Para ello existen unas leyes de escala que marcan las pautas para poder conseguir un modelo que represente, lo más cercano posible, el comportamiento del prototipo.

Los ensayos de modelización centrífuga son una herramienta importante disponible en ingeniería geotécnica para estudiar, analizar y diseñar problemas reales geotécnicos. Una centrífuga es esencialmente un sofisticado dispositivo en el cual pueden ser ensayadas estructuras complejas geotécnicas cuyos resultados son luego extrapolados a un prototipo real.

Las centrífugas geotécnicas se clasifican en dos grandes grupos según su configuración: las de brazo giratorio y las de tambor. Las primeras están más difundidas, dado que tienen una capacidad de carga mayor, facilitando la construcción del modelo y su posterior instrumentación.

### Keywords

geotechnics; centrifuge;  
modelling; tests;

### Abstract

*The centrifuge modelling is a technique that studies different geotechnical processes (consolidation, deformation, failure types, etc.) by constructing a small scale model of an actual prototype and subject it in a centrifuge to acceleration fields much greater than gravity over a short period compared to the full-scale effects.*

*The aim of centrifuge modeling is a correct reproduction of the real geotechnical problem. Scaling laws are established to relate the behavior of the prototype with the real model.*

*Centrifuge modeling tests are an important tool available in geotechnical engineering, to study, analyze and design real geotechnical problems. A centrifuge is essentially a sophisticated device for testing complex geotechnical structures obtaining results that can be extrapolated to a real prototype.*

*Geotechnical centrifuges are classified in two groups according to their configuration: the rotating-arm type and the drum type. The first group is broadly spread compared to the drum type, since they have a higher loading capacity, providing construction of a model and its subsequent instrumentation.*

## 1. INTRODUCCIÓN

En el ámbito de la ingeniería geotécnica es ampliamente conocida la necesidad de realizar múltiples ensayos de materiales a fin de obtener la mayor cantidad de información posible, referente a su reología, resistencia a la fatiga, comportamiento tenso-deformacional, etc., para así poder realizar un estudio detallado, a la hora de integrar el material objeto de estudio en la estructura. El suelo muestra a menudo características muy complejas (no linealidad, anisotropía, etc.) que tratan de conocerse a través de los ensayos de laboratorio habituales (triaxiales, edómetros, etc.), realizados sobre muestras. Posteriormente, los resultados obtenidos son aplicados a la escala real.

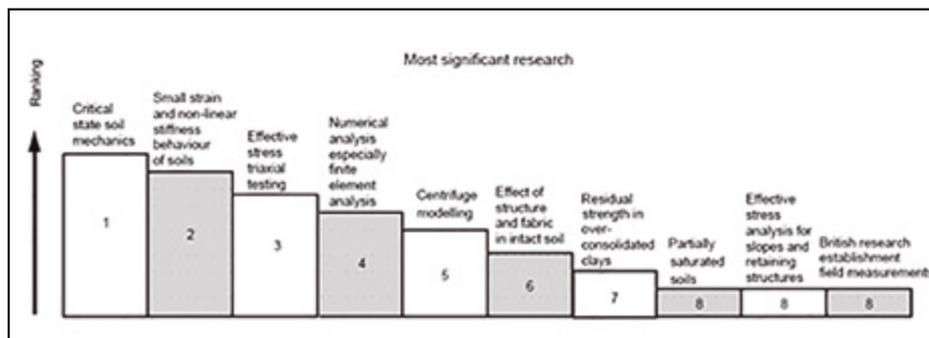
Sin embargo, el efecto conjunto de la totalidad de los elementos de suelo que conforman la estructura geotécnica, resulta difícil de precisar a través de los resultados obtenidos de un ensayo, debido a la amplia variedad de trayectorias de tensiones posibles en la estructura real. Por ello, se hace necesaria la creación de un nuevo método o ensayo donde se simulen las trayectorias de tensiones aplicadas a la estructura geotécnica, y simultáneamente a todos sus elementos.

Es en este caso la modelización centrífuga, quien ha dado respuesta a esta necesidad. Desde prácticamente el siglo XIX se comenzó a investigar este campo. Hoy en día, la modelización centrífuga es uno de los métodos más desarrollados en el campo de la geotecnia. De acuerdo con una encuesta realizada por la Sociedad Geotécnica Británica en 1999, la modelización centrífuga se clasificó quinta entre las investigaciones y ensayos más desarrollados (figura 1). Una centrífuga es esencialmente un sofisticado dispositivo de carga en el cual pueden ser ensayadas estructuras complejas geotécnicas.

\* Autor de contacto: [eugeniojimenezgarcia@gmail.com](mailto:eugeniojimenezgarcia@gmail.com)

<sup>1</sup> GEOCISA UK Ltd. (Departamento de Instrumentación y Monitoreo), Londres, Reino Unido.

<sup>2</sup> GRUPO RODIO KRONSA, S.L. Madrid, España.



**Figura 1.** Clasificación de las investigaciones más relevantes en geotecnia, publicado en Ground Engineering en 1999 (Ng, 2014).

La modelización tiene una mayor importancia cuando su uso se destina a la ingeniería geotécnica. El modelo físico debe ser una réplica del prototipo a estudiar, siendo a menudo una versión reducida del prototipo, y esto es particularmente cierto si hablamos de modelización centrífuga. El prototipo real está ligado al modelo a través de unas leyes de escala.

Los modelos de suelo, colocados al final del brazo de la centrífuga, se someten a un campo de aceleración radial. Las muestras experimentan una aceleración gravitacional más fuerte que la gravedad de la Tierra. El suelo se dispone en un contenedor que deja libre de tensiones la parte superficial, en cuyo interior las tensiones aumentan con la profundidad debido a la densidad del suelo y a las fuerzas del campo de aceleración. Si el mismo suelo es usado tanto en el modelo como en el prototipo y se tiene cuidado en el procedimiento de preparación del modelo, se puede considerar que el modelo está sujeto a una historia tensional similar a la del prototipo. Se puede decir que el empaquetamiento de las partículas es semejante. Una vez construido el modelo es sometido a un campo de aceleración  $N$  veces la gravedad de la Tierra y la tensión vertical ( $h_m$ ) debida a la profundidad será idéntica a su prototipo correspondiente ( $h_p$ ), donde  $h_p = N * h_m$ . Esta es la ley de escala básica de la modelización centrífuga.

Dos cuestiones clave en la modelización centrífuga son: las leyes de escala y los errores de escala. Las leyes de escala pueden ser derivadas a través de un análisis dimensional (Langhaar 1951) o a través de ecuaciones diferenciales. La modelización centrífuga es a menudo criticada por tener errores de escala (por ejemplo, influencia del tamaño de partícula, efecto Coriolis o efectos constructivos) debidos al campo de aceleración no uniforme y también a la dificultad al representar suficientemente al detalle el prototipo en un modelo de menor escala. Es importante tener una apreciación adecuada de cuáles son las limitaciones de este tipo de modelización y conocer cuáles son los posibles problemas comunes que nos podemos encontrar.

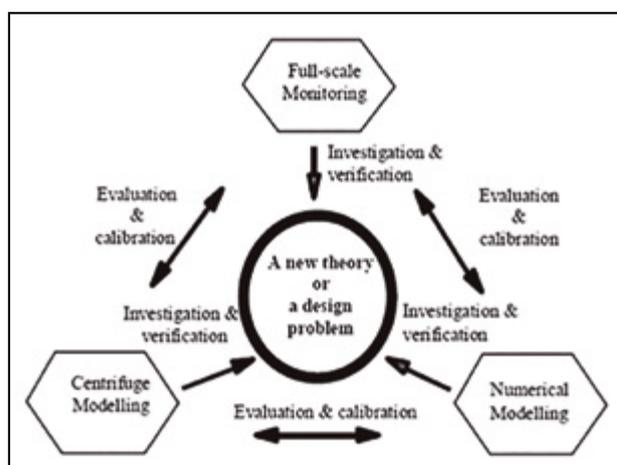
## 2. MODELIZACIÓN FÍSICA

Es común estudiar el comportamiento de determinadas estructuras y/o obras por medio de modelos físicos reducidos. Por definición, un modelo físico es una estructura que tiene como función simular el comportamiento de un determinado prototipo. Partiendo de esta forma de trabajo, se debe apuntar que en la modelización física existen dos campos bien diferenciados: modelación física

convencional y la modelización física con centrífugas. En el primer caso los modelos son ensayados en el campo gravitatorio normal y no se utiliza ninguna simulación artificial para crear fuerzas de gravedad nuevas. En el segundo caso ocurre lo contrario.

En la figura 2 se pueden ver tres maneras diferentes de abordar un problema geotécnico (monitoreo a escala real, modelización numérica y modelización centrífuga). Cada campo tiene sus propias ventajas en cuanto a calidad de los resultados, tiempo y coste. En casos donde existen incertidumbres a la hora de aplicar un método propuesto, el empleo de más de un enfoque permite calibrar los resultados y verificar las conclusiones obtenidas. Algunos autores consideran que la modelización centrífuga no solo completa los análisis numéricos más convencionales, sino que optimizan el tiempo de ejecución y coste.

La modelización física convencional o no, en realidad, siempre está asociada a unas reglas de semejanza, es decir, el comportamiento a estudiar en un modelo solamente será válido si una semejanza determinada, al menos cualitativa, es igual a la del comportamiento del prototipo. Estos modelos normalmente son construidos con materiales cuyas características representan a las del prototipo. Se intenta reproducir toda la complejidad del comportamiento del suelo como puede ser la historia de tensiones que ha sufrido. De esta forma se pueden usar materiales de sustitución pudiendo realizar una interpretación fiable. Es una característica especial en la modelización geotécnica la necesidad de reproducir el comportamiento de los suelos, pues para algunos estudios este problema es extremadamente relevante.



**Figura 2.** Relación entre los campos de auscultación geotécnica, modelización numérica y centrífuga (Schofield, 1980).

Un aspecto fundamental en la modelización es respetar las condiciones de semejanza reológicas, a través de la correcta selección de los materiales de sustitución. Existen dificultades para encontrar materiales que satisfagan los criterios básicos de semejanza en términos tensión-deformación-tiempo. Son excluidos los materiales de sustitución que no son suelos del mismo tipo, debido a las particularidades de las relaciones constitutivas.

La utilización de modelos físicos reducidos convencionales y materiales iguales a los del prototipo, no garantiza los comportamientos de semejanza reológica. Esto es debido a que los estados de tensiones que sufre el modelo son inferiores a los sufridos por el prototipo. Para garantizar el cumplimiento de las condiciones de semejanza reológicas se deben utilizar los mismos materiales que los del prototipo y el modelo deberá experimentar los mismos niveles de tensiones que sufre el prototipo, por lo tanto la escala de tensiones deberá ser unitaria.

Para que dicha escala de tensiones sea unitaria el campo de gravedad debe ser mayor en el modelo que en el prototipo, en la misma proporción en la que se reduzcan las dimensiones geométricas. De esta forma se cumplen las condiciones de semejanza tanto en tensiones como en deformaciones, pues si el modelo es sometido a la misma trayectoria de tensiones que el prototipo, las deformaciones serán iguales. Este incremento del campo gravitacional, en geotecnia, únicamente es conseguido utilizando centrífugas.

Las leyes básicas de similitud mecánica entre modelo centrífugo y prototipo, que constituye la base de esta técnica de simulación, pueden resumirse en:

- Si un suelo con idénticas característica de densidad, fricción interna y cohesión, es utilizado en la realización de cuerpos geoméricamente similares: uno, el prototipo a escala natural, y otro el modelo a escala  $1/N$ , será necesario acelerar centrífugamente  $N$  veces este último para conseguir estados tensionales similares.
- Una vez que exista correspondencia entre la distribución de presiones intersticiales del modelo y del prototipo, todos los procesos de flujo primario subsiguientes son correctamente modelizados, después de un tiempo  $t_m$  (en el modelo) menor que  $t_p$  (en el prototipo), cumpliendo la relación:

$$\frac{t_m}{t_p} = \frac{1}{N^2}$$

### 3. OBJETIVOS DE LOS ENSAYOS CON CENTRÍFUGA

Los ensayos con centrífuga son una modelización física de un problema geotécnico. Sin embargo, su uso no está restringido para estudiar un prototipo en particular con el objetivo de mejorar su diseño, sino que se usa normalmente para entender el comportamiento de un suelo bajo unas sollicitaciones determinadas. Los ensayos con centrífuga pueden ser diseñados con diferentes metas. Las siguientes categorías de modelos de ensayo fueron identificados por James (1972):

- El estudio de un problema en particular (por ejemplo un terraplén) puede tener algunas dificultades

de diseño que hay que tener en cuenta. En un estudio de este tipo, existe claramente la necesidad de reproducir las características esenciales del prototipo en el modelo. De esta forma podremos extrapolar las magnitudes a escala del prototipo y así evaluar sensiblemente su comportamiento.

- El estudio de un problema en general sin tener un prototipo fijado. La investigación es orientada a realizar una exposición sobre una clase de problema, por ejemplo la estabilidad a largo plazo de un muro de contención o los asientos producidos por la construcción de un túnel.
- El estudio al detalle de los cambios en los esfuerzos y los desplazamientos en un tipo de problema determinado. Se busca obtener información sobre el comportamiento del suelo, el cual puede ser reproducido por algún modelo constitutivo.

De acuerdo con la clasificación realizada por Ko (1988), citada por Ng en 2014, son cuatro las aplicaciones principales de la centrífuga geotécnica:

- Modelización del prototipo: es la aplicación más evidente y directa de la técnica del modelado con centrífuga. En la mayoría de los casos se emplea para simular y hacer frente a los problemas reales de ingeniería. Algunas aplicaciones comunes incluyen investigar la inestabilidad de taludes, capacidad de pilotes, el efecto de excavación de túneles en estructuras subterráneas adyacentes existentes, etc.
- Investigación de nuevos fenómenos: el modelado con centrífuga se ha aplicado con éxito para el estudio de diversos fenómenos inusuales de los que no se tiene información, ya que es muy difícil acceder a ellos. Por ejemplo la tectónica de placas, formaciones de cráteres por las explosiones nucleares, licuefacción del suelo, efectos devastadores de terremotos, transporte de contaminantes en el suelo, etc.
- Estudios paramétricos: la modelización centrífuga geotécnica es un ejemplo donde los experimentos de modelización física se presentan en su mayor desarrollo. Normalmente es complicado diseñar y realizar el primer modelo, mientras que la prueba real y las pequeñas variaciones en el modelo se realizan con relativa facilidad. Variando algunos parámetros del modelo (geometría, cargas, condiciones de contorno, intensidad de lluvia o tipo de suelo) puede ser evaluada la sensibilidad de los resultados de las pruebas a estas variaciones, y los parámetros más críticos pueden ser identificados. Esto permite la posibilidad de crear gráficos de diseño útiles. Los ejemplos incluyen capacidad portante de cimentación en terraplenes, capacidad de pilotes bajo cargas laterales, diseño crítico en los procesos de flujo, etc.
- Validación de métodos numéricos: cualquier técnica de modelado, ya sea física o numérica, exige la aceptación de simplificaciones e hipótesis. Para investigar cualquier problema geotécnico complicado sería ideal llevarlo a cabo tanto a través de análisis numéricos, como a través de modelización de centrífuga. Los resultados de estas dos técnicas pueden ser comparados y verificados.

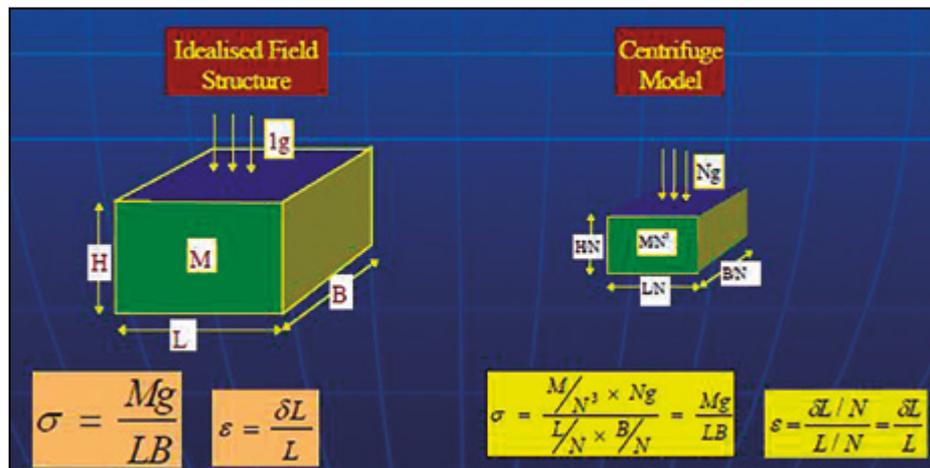


Figura 3. Factor reductor entre prototipo y modelo (Madabhushi, 2011).

#### 4. PRINCIPIOS TEÓRICOS Y LEYES DE ESCALA

En las centrífugas geotécnicas, la gravedad actuante a escala de modelo es aumentada por la aceleración centrífuga en una relación de  $N \cdot g$ , donde las dimensiones del modelo están escaladas con un factor  $1/N$  respecto al prototipo como se puede observar en la figura 3.

La muestra de suelo es introducida en el contenedor, que se sitúa al final del brazo de la centrífuga, con la vertical perpendicular al brazo. Cuando la máquina comienza a rotar, el modelo es posicionado de tal manera que su vertical coincide con la dirección de la aceleración centrífuga que es el plano horizontal (figura 4).

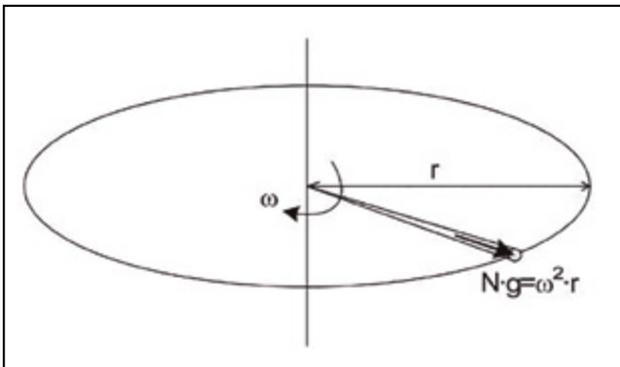


Figura 4. Esquema de giro de la centrífuga (Leth et al., 2011).

El marco de referencia para el modelo y todas las demás orientaciones deben tener un ajuste acorde. Durante el ensayo, la gravedad de la Tierra todavía está actuando en el modelo, perpendicularmente al plano de rotación de la centrífuga. Por lo tanto el ensayo es diseñado normalmente para que la aceleración radial o centrífuga sea lo suficientemente alta como para hacer que la gravedad terrestre sea insignificante.

En el caso estático, donde un objeto es fijado al contenedor, se puede decir que la velocidad angular es constante, por lo tanto la expresión que rige el comportamiento es la siguiente:

$$N \cdot g = r \cdot \omega^2$$

Por lo tanto el valor  $N$  es proporcional al radio de la centrífuga. Cuando la máquina está rotando con velocidad angular constante ( $\omega$ ), la aceleración centrífuga es igual a

la gravedad terrestre ( $g$ ) multiplicada por el factor de escala de gravedad ( $N$ ).

Conociendo el radio de la centrífuga ( $r$ ) y la velocidad angular ( $\omega$ ) de trabajo se puede obtener  $N$ , también conocido como “nivel de  $g$ ”.

##### 4.1. Leyes de escala para modelos estáticos

En los puntos anteriores se ha reflejado la importancia de conseguir un campo de tensiones semejantes entre el modelo y su prototipo correspondiente. Si una aceleración,  $N$  veces la gravedad de la Tierra ( $g$ ), es aplicada a un material de densidad  $\rho$ , con tensión vertical  $\sigma_v$  y de profundidad  $h_m$ , vendrá dada por la siguiente expresión (usando el subíndice  $m$  para indicar al modelo):

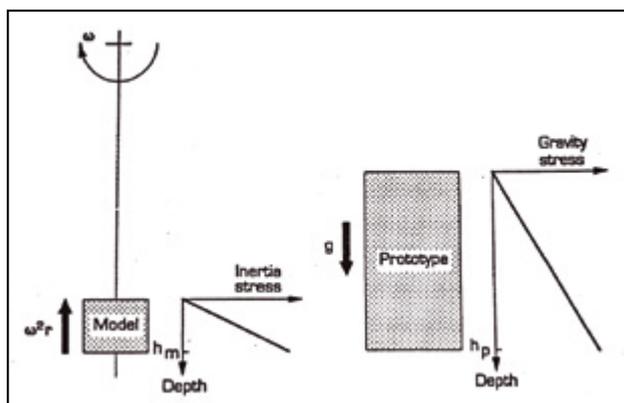
$$\sigma_{vm} = \rho \cdot N \cdot g \cdot h_m$$

En el prototipo, la tensión vertical indicada por el subíndice  $p$ , será:

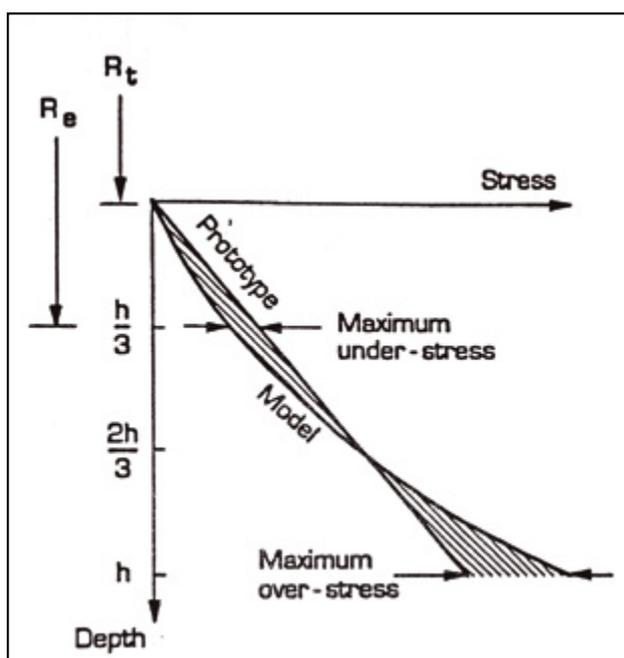
$$\sigma_{vp} = \rho \cdot g \cdot h_p$$

Según lo explicado anteriormente la relación de tensiones entre el modelo y el prototipo debe ser unitaria por lo que  $\sigma_{vm} = \sigma_{vp}$ . De esta manera  $h_m = h_p \cdot N^{-1}$  y el factor de escala entre modelo y prototipo es lineal  $1:N$ . Partiendo de que el modelo es una representación lineal de la realidad, su desplazamiento también tendrá un factor de escala de  $1/N$ . Las deformaciones tendrán una relación de  $1:1$  por lo que la curva de tensión-deformación del modelo será exactamente igual a la del prototipo.

La gravedad de la Tierra es uniforme en el rango de profundidades con las que trabaja un ingeniero geotécnico. Cuando se usa una centrífuga para generar un campo de alta aceleración en la modelización centrífuga, se genera una ligera variación en la aceleración a través del modelo. Esto es debido a que el campo de aceleración inercial viene dado por  $\omega^2 \times r$  donde  $\omega$  es la velocidad angular y  $r$  es el radio de cualquier elemento en el modelo de suelo. La distribución de la tensión vertical en el modelo y en su prototipo correspondiente viene explicada en la figura 5. Esta distribución es comparada directamente en la figura 6 donde se ha correlacionado con la profundidad.



**Figura 5.** Tensión inercial en una modelización centrífuga inducida por rotación sobre un eje fijo correspondiente a la tensión gravitacional en el prototipo (Taylor, 1995).



**Figura 6.** Relación de tensión con la profundidad de un modelo con su prototipo correspondiente (Taylor, 1995).

La figura 6 ilustra la variación no lineal de la tensión con la profundidad en el modelo. En cambio en el prototipo se cumple la linealidad entre tensión y profundidad. Los únicos puntos donde las tensiones del prototipo y del modelo coinciden son en la superficie y a  $2/3$  de la profundidad del modelo. De la superficie al punto situado a  $2/3$  de la profundidad del modelo, las tensiones son menores a las del prototipo, alcanzando la máxima divergencia a  $1/3$  de la profundidad del modelo. A partir de  $2/3$  de la profundidad la tendencia cambia y las tensiones del modelo son mayores a las del prototipo, divergiendo hasta llegar a la profundidad total del modelo donde se obtiene la máxima separación entre las dos tensiones. En definitiva, la elección del factor de escala afecta a las dimensiones del modelo, por lo que podemos disminuir las dimensiones de nuestro modelo si podemos aumentar el factor  $N$ , sin exceder la capacidad máxima de la centrífuga.

A continuación se han mostrado (tabla 1) las leyes de escala más comunes asociadas a la modelización física con centrífuga. Estas son obtenidas a través de un análisis dimensional de las ecuaciones que rigen determinado

fenómeno, o de los principios de similitud entre el modelo y el prototipo.

**Tabla 1.** Algunas leyes de escala usadas en ensayos con centrífuga (Ng et al., 2014)

Parámetro	Factor de escala (Modelo / Prototipo)
Aceleración	$N$
Longitud	$1/N$
Áreas	$1/N^2$
Volumen	$1/N^3$
Tensión	$1$
Deformación	$1$
Masa	$1/N^3$
Densidad	$1$
Peso específico	$N$
Fuerza	$1/N^2$
Momento flector	$1/N^3$
Momento flector / Unidad de longitud	$1/N^2$
Rigidez a la flexión / Unidad de longitud	$1/N^3$
Tiempo (Dinámico)	$1/N$
Tiempo (Consolidación y Difusión)	$1/N^2$
Tiempo (Reptación)	$1$
Velocidad del fluido entre los poros	$N$
Concentración	$1$
Velocidad (Dinámica)	$1$
Frecuencia	$N$

## 4.2. Efectos de escala

En los estudios de modelización física, es extraño poder replicar todos los detalles del prototipo con precisión, por lo que se debe recurrir a aproximaciones. Pero es importante conocer la magnitud del efecto de escala que provoca dicho problema. Existen efectos de escala (Taylor, 1995) como la no linealidad del campo de tensiones en el interior del modelo, las dimensiones de las partículas sólidas del suelo, la aceleración de Coriolis o los problemas constructivos.

Estos efectos están muy bien estudiados en la literatura. A continuación, se detallarán los más significativos, los cuales no pueden ser menospreciados cuando se realiza un modelo en centrífuga.

### 4.2.1. Influencia del tamaño de partícula

La pregunta más común entre los trabajadores en centrífugas es cómo puede ser justificado que el tamaño de las partículas del suelo no puedan ser reducidas por el factor  $N$ . Como primera idea, podríamos decir que un aumento de la escala del modelo desembocaría en un aumento del tamaño de grano. Pero ocurre que una arena fina que podría representar una grava en el prototipo, no tiene el mismo comportamiento tenso-deformacional. Esto podría ocurrir si se realiza el modelo a una alta aceleración y por lo tanto el tamaño del modelo se reduciría demasiado respecto al prototipo.

Este efecto se minimiza si cuando realizamos el modelo se tiene en cuenta que el comportamiento tenso-deformacional del material es similar al material del prototipo.

#### 4.2.2. Campo de aceleración rotacional

Una centrífuga es un método muy conveniente para generar una gran aceleración gravitacional artificial, pero se crean problemas por la rotación en el eje fijo. La aceleración inercial radial es proporcional al radio, lo que conduce a una variación con la profundidad en el modelo.

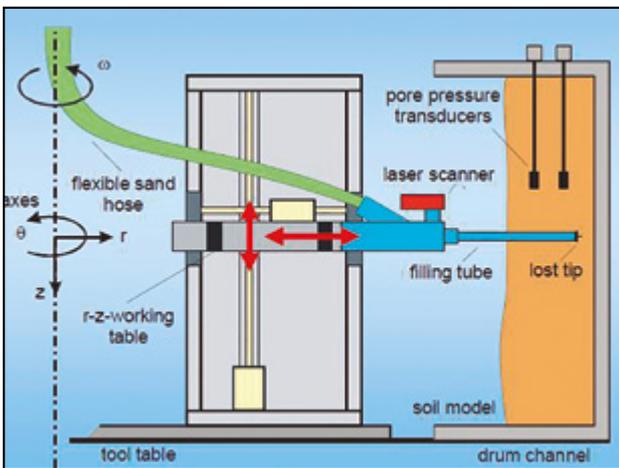
#### 4.2.3. Efecto de aceleración de Coriolis

También está causado por el campo de aceleración creado por la rotación. La aceleración de Coriolis se genera cuando hay un movimiento del modelo en el plano de rotación.

Este efecto puede ser significativo en ensayos de sísmos, donde se producen movimientos horizontales en la base del contenedor. Para intentar eliminar este efecto, muchas centrífugas son diseñadas para que el plano vertical mayor del modelo sea perpendicular al plano de rotación.

#### 4.2.4. Efectos constructivos

Es muy difícil excavar o construir mientras la centrífuga está rotando. El suelo es muy pesado y la instrumentación debe ser pequeña, ligera, resistente y a menudo ingeniosa. En la figura 7 se observa la instalación de una columna de grava en un modelo de una centrífuga de tambor mientras la máquina está rotando (Laue, 2011).



**Figura 7.** Instalación de columnas de grava en una centrífuga de tambor en movimiento (Laue, 2011).

Algunos centros de investigación con centrífuga, han desarrollado tolvas que pueden ser usadas para construir un terraplén hecho de arena seca mientras la máquina está rotando.

## 5. DESCRIPCIÓN DE LA MÁQUINA CENTRÍFUGA Y LOS ENSAYOS

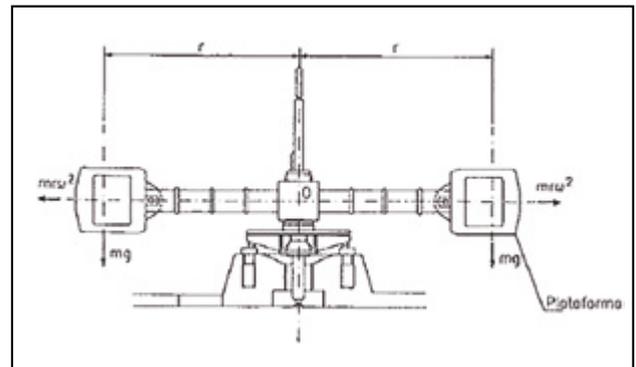
### 5.1. Configuración de la máquina

Sin excepción, todas las máquinas actualmente, operan en un plano horizontal con un sistema que actúa sobre un

eje de rotación vertical. Dentro del grupo de centrífugas existentes que trabajan en el plano horizontal, se pueden separar en subgrupos según su configuración:

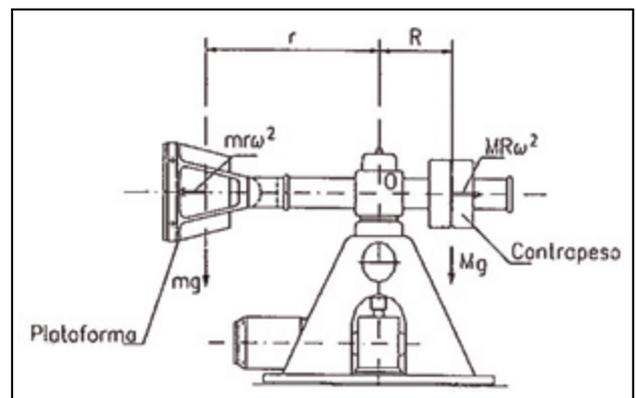
- Brazo giratorio:
  - Según la distribución de pesos:
    - Simétrico
    - Asimétrico
  - Según la movilidad del contenedor:
    - Fijo
    - Basculante
    - Híbrido
- Tambor giratorio

La mayor parte de máquinas son del tipo brazo giratorio. Muchos de los diseños antiguos están basados en una configuración simétrica, de viga balanceada con la posibilidad de usar los dos modelos simultáneamente (figura 8).



**Figura 8.** Dibujo de centrífuga de brazo giratorio simétrico de contenedor basculante (Portugal, 1999).

Dichos modelos deben ser semejantes tanto en tamaño como en peso, colocados en cada extremo del brazo giratorio. Las máquinas de brazo giratorio prácticamente siempre operan con un contrapeso inerte de la misma magnitud que el modelo, por lo que el brazo es asimétrico (figura 9). Para ello se recurre al diseño de un brazo asimétrico con un mayor radio en la parte donde se coloca el contenedor, donde se dispone la muestra, y un contrapeso mayor en la parte de brazo menor.



**Figura 9.** Dibujo de una centrífuga de brazo giratorio asimétrico de contenedor basculante (Portugal, 1999).

Al igual que en el diseño de brazo balanceado, en éste también es posible, hoy en día, ajustar el balance de cargas bajo condiciones estáticas antes de que la centrífuga comience a rotar. De esta manera se pueden controlar mejor las posibles inestabilidades moviendo las pesas del contrapeso mecánicamente o a través de bombas hidráulicas.

Con cualquiera de los dos diseños explicados anteriormente es posible usar, en el extremo del brazo, la disposición de contenedor o plataforma fija, basculante o híbrida (figura 10).

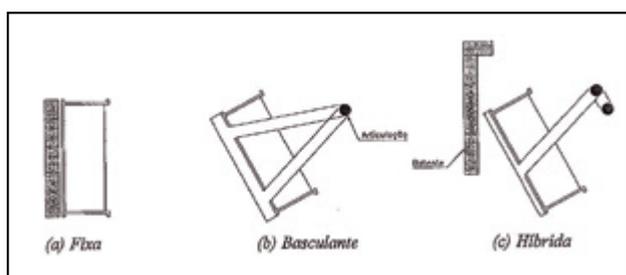


Figura 10. Distintos tipos de contenedores (Portugal, 1999).

Mucho más común, que la máquina de brazo giratorio rígido, dentro de centrífugas tanto simétricas como asimétricas, es la que lleva el contenedor montado sobre una plataforma oscilante añadida al final del brazo rotor a través de bisagras o articulaciones. De esta manera cuando la centrífuga comience a rotar la aceleración gravitacional y la aceleración centrífuga tendrán la resultante en el mismo plano.

La máquina alternativa a la de brazo giratorio es la del tambor giratorio (figura 11) en la cual la muestra de suelo es colocada a lo largo de todo el perímetro del cilindro. Este tipo de máquinas han sido usadas minoritariamente y su potencial debe ser estudiado más a fondo. Los problemas basados en modelos de dos dimensiones montado en un plano de rotación, claramente pueden ser estudiados con un contenedor circular teniendo en cuenta que se puede aumentar una dimensión del modelo la cual puede ser considerada virtualmente infinita en varios aspectos.

Los modelos estudiados con tambor giratorio fueron, inicialmente, usados para analizar problemas de estabilidad de taludes (por ejemplo, Cheney y Oskoorouchi,

1982). Las máquinas eran pequeñas con un radio menor a 1 m que giraban sobre un eje horizontal.

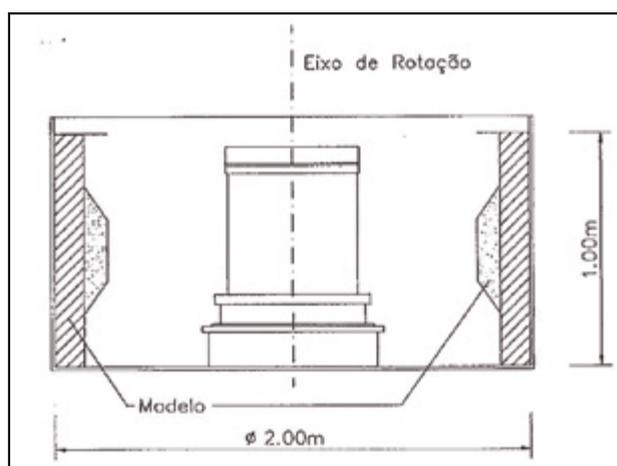


Figura 11. Dibujo de centrífuga de tambor giratorio (Portugal, 1999).

## 5.2. Características del dispositivo de centrífuga

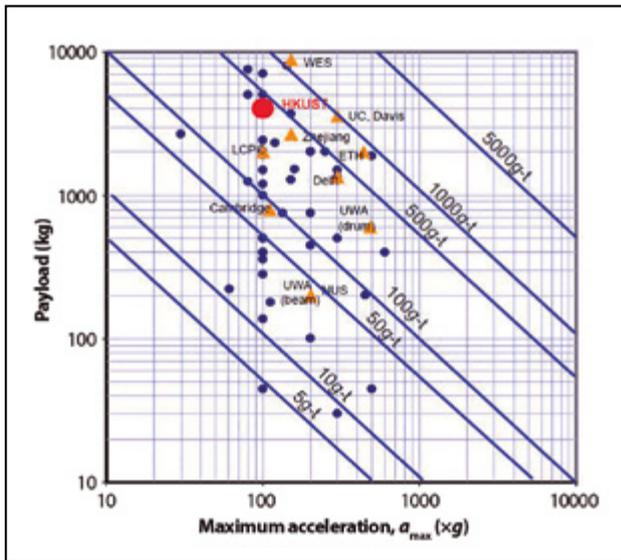
La modelización centrífuga se usa en el ámbito tanto académico como profesional para conocer el comportamiento de los suelos. Concretamente, es importante conocer el estado tenso-deformacional del mismo. Cuando realizamos un modelo a escala de un prototipo real debemos reproducir con exactitud tanto las tensiones como las deformaciones a las que está sometido el prototipo. De esta manera el comportamiento del modelo será una representación real de lo que le ocurriría al caso existente. El rango de aceleraciones usado en centrífugas geotécnicas puede situarse entre 10 g y 1000 g según se observa en el resumen de la tabla 2.

Las máquinas centrífugas suelen estar catalogadas según su capacidad de trabajo. Se mide en  $[g \cdot \text{ton}]$  que es la unidad resultante del producto de la aceleración centrífuga, expresada en unidades "g", y el peso del modelo, expresado en toneladas.

En la figura 12 se pueden ver las capacidades de las centrífugas más importantes del mundo. Se puede observar que la capacidad máxima de las máquinas existentes se sitúa alrededor de 1000  $g \cdot \text{ton}$ . El rango de aceleraciones con las que comúnmente se trabaja es de 100 g hasta 500 g. La carga útil del contenedor tiene un rango mucho más extenso, yendo desde los 40 kg hasta 8 toneladas.

Tabla 2. Tipos de máquinas centrífugas (Serrano y Sánchez, 1991)

Tamaño	Diámetro efectivo (m)	Dimensiones del modelo (m x m x m)	Peso máximo del modelo (kg)	Capacidad máxima (g x ton)
Grande	> 10,0	2,0 * 1,5 * 1,0	> 1000	> 500
Medio	6,0	1,0 * 0,8 * 0,5	200	100
Pequeño	1,0	0,5 * 0,4 * 0,3	500	10



**Figura 12.** Capacidades de las mayores centrifugas geotécnicas en el mundo (Ng, 2014).

En la tabla 3 se muestran las abreviaturas de la figura 12 con su correspondiente localización.

**Tabla 3.** Significado de las abreviaturas de la figura 12 (Ng, 2014)

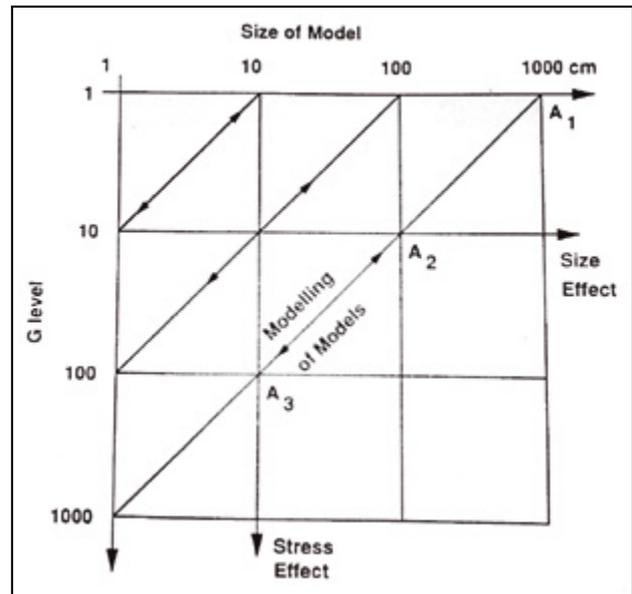
Abreviatura	Localización
WES	Ejército de los EE.UU
HKUST	Universidad de Ciencia y Tecnología de Hong Kong
UC Davis	Universidad de California, Davis
Zhejiang	Universidad de Zhejiang, China
LCPC	Laboratorio Central de Puentes y Caminos, Francia
ETH	Escuela Politécnica Federal de Zurich
Delft	Universidad de Tecnología de Delft
UWA	Universidad del Oeste de Australia
Cambridge	Universidad de Cambridge
NUS	Universidad de Singapur

En definitiva, existen muchos tipos de centrifugas. Las máquinas usadas en geotecnia están caracterizadas por su aspecto robusto, por una gran capacidad de aplicación de carga y por su baja velocidad de operación.

### 5.3. Diseño del ensayo

El principio de “modelización de los modelos” fue expuesto, por ejemplo, por Ko (1988). En la figura 13 se demuestra su teoría.

Esta teoría se basa en realizar varios ensayos con diferentes escalas de manera que todos representen el mismo prototipo. En la figura anterior el concepto está bien explicado, donde el tamaño del modelo se ha dibujado en el eje de abscisas y la gravedad en el eje de ordenadas. Todas las representaciones asociadas a 1g son, directamente por definición, consideradas como prototipos. Por ejemplo, un prototipo situado en A1 puede ser representado por un modelo diez veces menor situado en A2 y por otro modelo cien veces menor situado en A3. Los puntos A2 y A3 deben tener el mismo comportamiento que tendría el prototipo.



**Figura 13.** Principio de modelización de los modelos (Ko, 1988).

### 5.4. Propiedades de las muestras ensayadas en centrifuga

La preparación de muestras de suelo es crucial sobre todo desde que la modelización centrífuga está siendo especialmente utilizada para llevar a cabo estudios paramétricos. Es necesario para poder preparar diferentes muestras de suelo donde sus propiedades físicas y mecánicas hayan sido determinadas con anterioridad.

Todas las muestras de suelo usadas en los modelos con centrifuga deben estar perfectamente diseñadas. El uso de muestras inalteradas fue considerado y ensayado por varios laboratorios (Garnier y Canepa, 1991; Gurund et al, 1994), pero abandonaron la idea por las excesivas heterogeneidades locales en las muestras ensayadas. A escala de modelo es muy difícil obtener varias muestras idénticas.

La modelización de las interfaces es un problema complejo tanto en modelización física como en modelización numérica. Para ello se han creado programas de investigación para estudiar dicho efecto, usando enfoques experimentales (ensayos con cajas de corte, ensayos triaxiales, ensayos de torsión y modelos en centrifuga). El principal problema es determinar si la tensión de corte en la zona movilizada depende del tamaño de grano y de las dimensiones de la inclusión. Diferentes variables junto a la longitud como una dimensión (la cual será afectada por la reducción de tamaño del modelo) pueden jugar un papel importante en el comportamiento de la interfaz y tendrían un efecto sobre la tensión de corte pico y sobre su desplazamiento correspondiente:

- Dimensiones de las inclusiones.
- Tamaño de las partículas del suelo.
- Rugosidad de la interfaz.

Un caso particular es la interacción entre la arcilla y columnas de grava, debido a los efectos de instalación, realizado en la centrifuga de tambor giratorio del ETHZ (Instituto Federal de Tecnología de Zurich) (Laue, 2011). Comprobaron que al instalar la inclusión la zona de

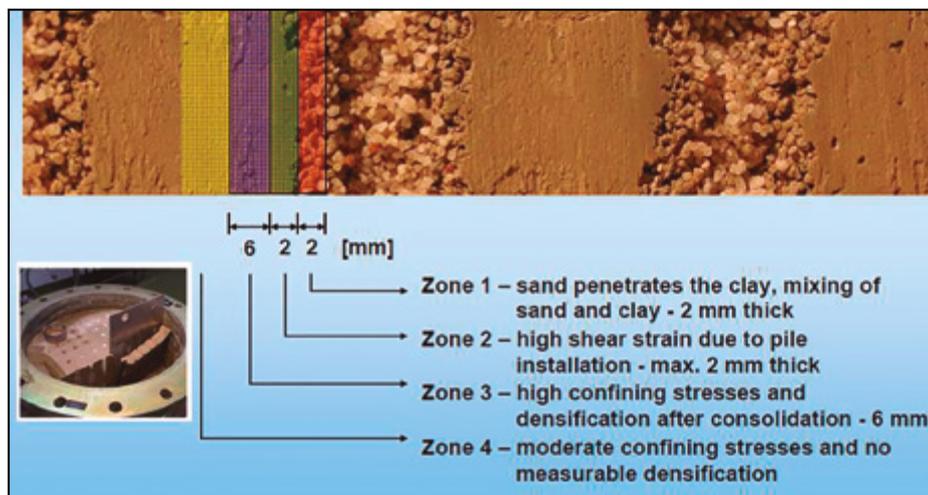


Figura 14. Zonificación en la interfaz debido a los efectos de instalación (Laue, 2011).

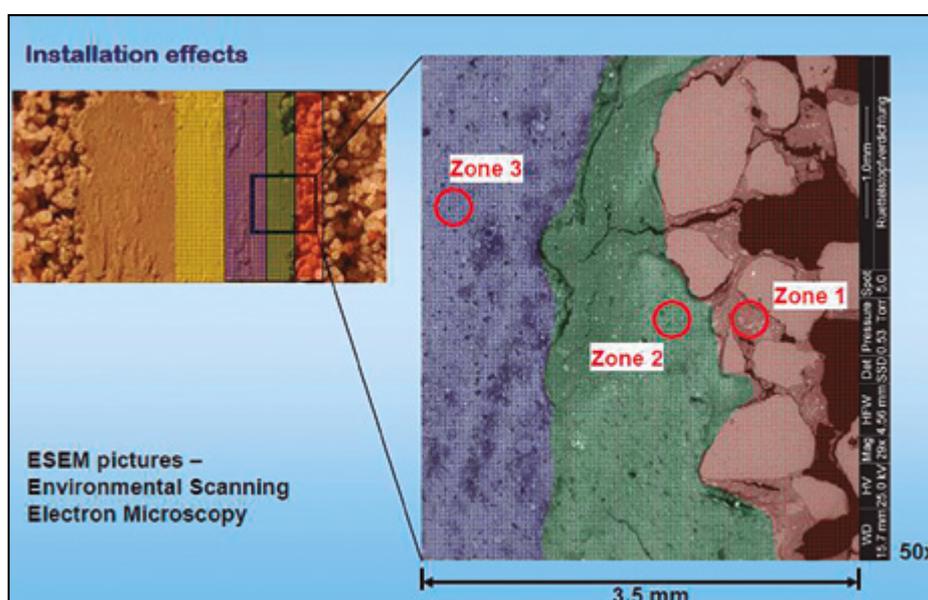


Figura 15. Zonificación de la interfaz vista a microscopio electrónico (Laue, 2011).

contacto o interfaz entre los dos materiales estaba zonificada. En las fotos (figura 14 y figura 15) se observa la complejidad y la heterogeneidad de los problemas de efecto de instalación, lo cual conlleva a una zonificación de los estratos y una influencia de instalación en las arcillas (“smear effects”).

## 6. CONCLUSIONES

- Existen tres formas diferentes de abordar un problema geotécnico: auscultación geotécnica, modelización numérica y modelización centrífuga.
- La modelización centrífuga ocupa una posición relevante dentro del campo de investigación de la ingeniería geotécnica, encontrándose en una continua evolución.
- La modelización centrífuga completa los análisis numéricos más convencionales y optimiza tanto los costes de investigación como el tiempo requerido para la investigación geotécnica.
- Las aplicaciones principales de una centrífuga geotécnica son: modelizar el prototipo, investigar nuevos fenómenos geotécnicos, realizar estudios pa-

ramétricos, validar resultados obtenidos de métodos numéricos, etc.

- El modelo es una versión reducida del prototipo y una modelización centrífuga es una reducción del problema real.
- Si un suelo con idénticas características de densidad, fricción interna y cohesión, es utilizado en la realización de cuerpos geoméricamente similares: uno, el prototipo a escala natural, y otro el modelo a escala  $1/N$ , será necesario acelerar centrífugamente  $N$  veces este último para conseguir estados tensionales similares.
- Si existe correspondencia entre la distribución de presiones intersticiales de modelo y prototipo, todos los procesos de flujo primario subsiguientes son correctamente modelizados, después de un tiempo  $t_m$  (en el modelo) menor que  $t_p$  (en el prototipo), cumpliendo la relación:

$$\frac{t_m}{t_p} = \frac{1}{N^2}$$

- En un ensayo estático, donde un objeto es fijado al contenedor, se puede decir que la velocidad angu-

lar es constante, por lo tanto la expresión que rige el comportamiento es la siguiente:

$$N \cdot g = r \cdot \omega^2$$

Por lo tanto el valor N es proporcional al radio de la centrífuga. Cuando la máquina está rotando con velocidad angular constante ( $\omega$ ), la aceleración centrífuga es igual a la gravedad terrestre (g) multiplicada por el factor de escala de gravedad (N).

- La distribución de tensiones con la profundidad, en el modelo, no es lineal. En cambio en el prototipo se cumple la linealidad entre tensión y profundidad. Los únicos puntos donde las tensiones del prototipo y del modelo coinciden son en la superficie y a 2/3 de la profundidad del modelo. De la superficie al punto situado a 2/3 de la profundidad del modelo, las tensiones son menores a las del prototipo, alcanzando la máxima divergencia a 1/3 de la profundidad del modelo. A partir de 2/3 de la profundidad la tendencia cambia y las tensiones del modelo son mayores a las del prototipo, divergiendo hasta llegar a la profundidad total del modelo donde se obtiene la máxima separación entre las dos tensiones.
- La elección del factor de escala afecta a las dimensiones del modelo. Por lo que podemos disminuir las dimensiones de nuestro modelo si podemos aumentar el factor N, sin exceder la capacidad máxima de la centrífuga.
- Las centrífugas geotécnicas, actualmente, se pueden dividir en dos subgrupos bien definidos: (1) las centrífugas de brazo giratorio que las podemos dividir a su vez en simétricas o asimétricas, y (2) las centrífugas de tambor giratorio. Los contenedores o plataformas donde se coloca el modelo a ensayar, pueden ser: (1) Fijas, (2) basculantes y (3) híbridas.
- Las máquinas centrífugas suelen estar catalogadas según su capacidad de trabajo. Se mide en [g \* ton] que es la unidad resultante del producto de la aceleración centrífuga, expresada en unidades "g", y el peso del modelo, expresado en toneladas. La capacidad máxima se sitúa alrededor de 1000 g \* ton. El rango de aceleraciones con las que comúnmente se trabaja es de 100 g hasta 500 g. La carga útil del contenedor tiene un rango mucho más extenso, yendo desde los 40 kg hasta 8 toneladas.
- Todos los modelos ensayados en centrífuga pueden tener réplicas a diferentes escalas de manera que todas ellas representen el mismo prototipo por lo tanto tengan el mismo comportamiento tenso-deformacional.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- Almeida, M. S. S., Davies, M. C. R. y Parry, R. H. G. (1985). *Centrifuge test of embankment on strengthened and unstrengthened clay foundations*. Géotechnique, 35, 4, pp. 425-441.
- Assis e Silva, S. C. (2000). *Modelagem em centrífuga: um caso de aplicação a estabilidade de frente de túneis* (tesis de máster inédita). Universidade de São Paulo, Escola Politécnica.
- Craig, W.H. (2001). *The seven ages of centrifuge modelling*. Workshop on constitutive and centrifuge modelling: two extremes, monte verità, ascona 2001.
- Garnier, J. (2002). *Properties of soil samples used in centrifuge models*. Physical Modelling in Geotechnics: ICPMG 2002, Phillips, Guo y Popescu (eds.), pp. 5-18.
- Garnier, J., Gaudin, C., Springman, S.M., Culligan, P.J., Goodvings, D., Donig, D., Kuttervii, B., Phillips, R., Randolph, M.F. y Thorel, L. (2007). *Catalogue of scaling laws and similitude questions in geotechnical centrifuge modelling*. IJPMG-International Journal of Physical Modelling in Geotechnics, 3, pp. 01-23.
- Jiménez García, E. (2014). *Aplicación de ensayos de centrífuga en distintas técnicas de mejora del terreno* (tesis de máster inédita). Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), Madrid.
- Laue, J. (2011). Modelling of ground improvement in a drum centrifuge. *Modèles Physiques en géotechnique*, ETHZ.
- Leth, C. T., Krogsboll, A. y Hededal, O. (2011). *Centrifuge facilities at Technical University of Denmark*.
- Madabhushi, G. (2011). Principles of centrifuge modelling. *Tna workshop on centrifuge modelling*, University of Cambridge.
- Madabhushi, G. (2015). *Centrifuge modelling for civil engineers*. Taylor and Francis Group.
- Ng, C. W. W. (2014). *The state-of-the-art centrifuge modelling of geotechnical problems at HKUST*. J. Zhejiang University-Science A, 15, N° 1, pp. 1-21.
- Ng, C.W.W., Van Laak, P., Tang, W.H., Li, X.S. y Shen, C.K. (2013). *The Hong Kong geotechnical centrifuge and its unique capabilities*. University of Science and Technology of Hong Kong.
- Portugal, J. M. C. S. (1999). *Modelação física com centrífuga-dora*. Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad Técnica de Lisboa (IST).
- Serrano, C.H. y Sánchez, F.J. (1991). *Algunas aplicaciones geotécnicas de la modelización en centrífuga*. Ingeniería Civil, 79, pp. 65-73.
- Taylor, R.N. (1995). *Geotechnical centrifuge technology*. Blackie Academic and Professional.
- Weber, T.M., Plötze, M., Laue, J., Peschke, G. y Springman, S.M. (2010). *Smear zone identification and soil properties around stone columns constructed in-flight in centrifuge model tests*. Géotechnique, 60 (3), pp. 197-206.
- Wilson, D.W., Boulanger, R.W., Feng, X., Hamann, B., Jermic, B., Kutter, B.L., Ma, K-L., Santamarina, C., Spratt, K.S., Velinsky, S.A., Weber, G. y Yoo, S.J.B. (2004). *The NEES Geotechnical Centrifuge at UC Davis*. En: 13<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Paper N° 2497.