



# Aspectos que condicionan las modelaciones físicas en la predicción del comportamiento de estructuras geotécnicas reales

## Aspects that condition physical modeling in the prediction of the behavior of real geotechnical structures

---

CT. Camilo Andrés Fino Vela<sup>a</sup>

*Facultad de Ingeniería Civil*

CT. Diego Andrés Lozano<sup>b</sup>

*Facultad de Ingeniería Civil*

Tutor: Ing. Juan Carlos Ruge C.<sup>c</sup>

*Facultad de Ingeniería Civil*

---

**RESUMEN.** El uso de modelos reducidos a escala para reproducir el comportamiento de estructuras geotécnicas es la técnica con mayor aceptación hoy en día para modelar apropiadamente un problema geotécnico. La metodología más completa para modelar adecuadamente este tipo de escenarios es la centrífuga geotécnica, la cual permite ensamblar modelos reducidos a la escala necesaria e induce en el modelo un campo de gravedad proporcional a la escala seleccionada. De acuerdo con leyes de escalamiento establecidas, diferentes cantidades pueden ser extrapoladas desde el modelo reducido a una estructura a escala real. No obstante, varios aspectos que deben ser considerados en detalle inciden en los resultados, de manera que se deben analizar de manera concienzuda para que la dispersión de resultados entre las mediciones y lo previsto sea lo menor posible, o, en caso contrario, se pueda identificar con confiabilidad cuál fue el aspecto que más influyó en la alta dispersión de los resultados. Esta investigación describe estos efectos con exactitud con el fin de que sean tenidos en cuenta cuando se realice este tipo de análisis de predicción en estructuras geotécnicas.

**PALABRAS CLAVE:** centrífuga geotécnica; efectos de escala; leyes de escalamiento; modelación física.

---

a Contacto: [camilocafv@gmail.com](mailto:camilocafv@gmail.com)

b Contacto: [ing.ici.lozano@gmail.com](mailto:ing.ici.lozano@gmail.com)

c Contacto: [jcruge@gmail.com](mailto:jcruge@gmail.com)

**ABSTRACT.** The use of reduced scale models to reproduce the behavior of geotechnical structures is the most accepted technique today to model a geotechnical problem adequately. The most complete methodology for properly modelling this type of scenario is the geotechnical centrifuge, which allows assembling reduced models to the necessary scale and induces in the model a field of gravity proportional to the selected scale. According to established scaling laws, different quantities can be extrapolated from the reduced model to a real-scale structure. Several aspects, which must be considered in detail, affect the results obtained. The analysis of these aspects should be done in a conscientious manner so that the dispersion of results between the measured and the expected is as low as possible, or otherwise the aspect that most influenced the high dispersion of the results can be identified with reliability. This research describes these effects accurately, so that they are taken into account when performing this type of prediction analysis in geotechnical structures.

**KEYWORDS:** geotechnical centrifuge; physical modelling; scale effects; scaling laws.

## Introducción

Predecir de manera acertada el comportamiento de una estructura geotécnica es el reto actual de la ingeniería geotécnica, debido a que no es posible realizar simulaciones de escenarios futuros mediante ensayos a escala real porque resulta muy complejo económica y técnicamente. Los modelos reducidos en centrífuga tienen un papel importante en estas tareas predictivas, ya que se pueden realizar diferentes variaciones en el modelo, ya sea propias del geomaterial (suelo), como de factores externos que pueden impactar en el comportamiento mecánico de la estructura geotécnica (lluvia, sismos, viento, etc.).

Una de las utilidades claramente establecidas para la elección de modelos a escala es cuando las demás técnicas (analíticas o numéricas) son incapaces de simular apropiadamente el problema (efecto 3D) o cuando existen especificidades propias de la naturaleza del problema geotécnico que impiden usar las leyes constitutivas tradicionales que reproducen el comportamiento del suelo (Caicedo, Velásquez & Monroy, 2003).

Algunas investigaciones incluyen modelos reducidos, pero sin usar la centrífuga geotécnica. Los resultados de estas técnicas deben ser analizados exclusivamente de manera cualitativa, ya que no es correcto transferir los datos a un problema geotécnico de escala natural. Por tal razón, el único instrumento con el cual se pueden predecir resultados y asegurar una buena aproximación al ensayar modelos físicos es la centrífuga geotécnica, pues tiene una gran ventaja: reproduce ciertos estados de modelos a gran escala gracias a que el incremento del campo de gravedad permite conocer el nivel de esfuerzos de un prototipo (ensayo a escala real) con un modelo reducido.

De acuerdo con lo anterior, la centrífuga geotécnica es importante cuando se pretende modelar ciertos estados en suelos parcialmente saturados —como asentamientos, flujo capilar de agua o efecto rigidizante en algunos suelos por la acción de la succión— con el fin de tener argumentos válidos para descifrar por qué las predicciones de modelos reducidos tienen alta dispersión respecto a las mediciones realizadas en campo.

Específicamente, este trabajo detalla los aspectos que influyen en la construcción, medición e implementación de modelos físicos en centrífuga, con el fin de que otros profesionales los consideren en profundidad cuando analicen los resultados en este tipo de técnicas.

## ¿Por qué no se puede predecir acertadamente resultados de ensayos a gran escala?

La modelación de las condiciones iniciales de un problema geotécnico es un factor preponderante para predecir los resultados, ya que existen aspectos implícitos que los influyen. Entre estos aspectos se encuentra la historia geológica del suelo; la consolidación, compactación e hincado de elementos geotécnicos, así como las secuencias de construcción, excavaciones y rellenos, que son difíciles de modelar física y numéricamente, debido a las connotaciones especiales que poseen estos aspectos, en especial los que dependen de factores geológicos y del tiempo (Guzmán, Rincón, Sarmiento & Ruge, 2017; Negro, 2009).

Además de estos factores, los efectos de escalamiento que se producen cuando se modela en centrífuga —como son el campo de aceleración no uniforme, el tamaño de grano, la aceleración de Coriolis, los efectos de frontera, los efectos de arco en celdas de carga, entre otros— hacen de las predicciones un campo de investigación en pleno desarrollo y en el que surgen muchos interrogantes, dada la dispersión de los resultados que se obtienen al intentar predecir el comportamiento de una estructura geotécnica real, como se ha mencionado anteriormente.

## Modelación física en centrífuga

En la mecánica de suelos, los esfuerzos geostáticos que actúan en una masa de suelo son producidos por su propio peso, de manera que pueden ser modelados eficazmente mediante una centrífuga geotécnica, como se mencionó anteriormente.

Un ejemplo que permite explicar el concepto de la centrífuga puede ser cuando se implementa un modelo cien veces menor que la estructura geotécnica que funge como prototipo. En ese caso, para poder igualar los esfuerzos del prototipo con el real, este debe ser ensayado teóricamente en la centrífuga geotécnica a un campo de gravedad de cien veces la gravedad terrestre. Los esfuerzos y desplazamientos que se obtienen en el modelo pueden ser extrapolados mediante leyes de escalamiento al prototipo o ensayo a escala natural (tabla 1).

## Efectos que afectan las mediciones en centrífuga

El rango y la magnitud de las posibles limitaciones que exponen las leyes de escalamiento pueden ser descritas como efectos de escala. Es importante enfatizar que estos se deben estudiar para asegurarse de que no afectarán en gran medida la interpretación de los datos del modelo físico. Algunos de los efectos mencionados son: campo de aceleración no uniforme, tamaño de grano de la muestra, aceleración de Coriolis y efectos de borde (debido a la pequeña escala) y efecto de arco en celdas de carga.

**Tabla 1.** Leyes de escalamiento en centrífuga para un campo de  $n$  gravedades

Magnitud física	Símbolo	Modelo / Prototipo
Longitud	L	1/n
Desplazamiento	U	1/n
Área	A	1/n <sup>2</sup>
Volumen	V	1/n <sup>3</sup>
Deformación	ε	1
Fuerza	F	1/n
Esfuerzo	Σ	1/n <sup>2</sup>
Peso específico	Γ	1/n <sup>3</sup>
Masa	M	1/n
Aceleración	A	N
Velocidad	V	1
Frecuencia	F	N
Energía	E	1/n <sup>3</sup>

Fuente: Stuit (1995).

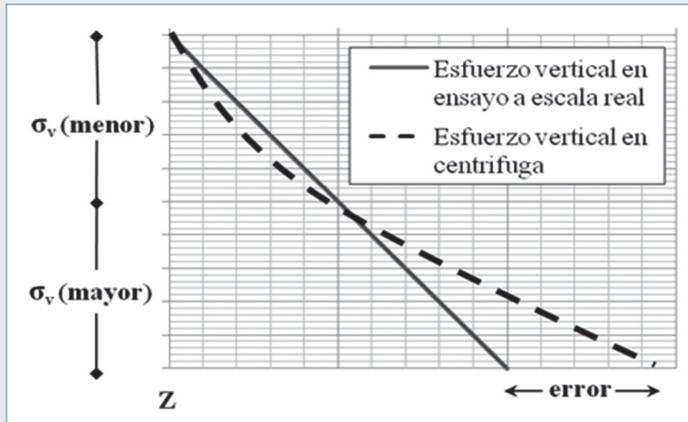
### ***Campo de aceleración no uniforme***

La aceleración que produce la centrífuga no es uniforme, por lo cual el modelo físico ensayado no será influenciado por un campo de gravedad constante. Es decir, este campo varía en la longitud del modelo de acuerdo con la distancia del eje de rotación; este efecto se puede minimizar cuando se utilizan centrífugas con un radio de brazo mayor (tabla 2). Además, es importante señalar que, al iniciar el ensayo, la centrífuga es activada desde una velocidad inicial nula, hecho que es totalmente diferente al de una estructura geotécnica real, la cual está influenciada por la gravedad terrestre, presente en todo momento (figura 1).

**Tabla 2.** Centrífugas geotécnicas en el mundo

Centrífuga (Universidad / Instituto)	Radio brazo (m)
RPI Geotechnical Centrifuge Research Center (Francia)	3.00
Delft University (Holanda)	1.10
LCPC (Francia)	5.50
Schofield Centre Cambridge (UK)	4.12
Universidad de los Andes (Colombia)	1.30
Universidad Militar Nueva Granada (Colombia)	3.00
University of Maryland Center for Geotechnical Centrifuge Modelling (USA)	1.50
University of California, San Diego (USA)	2.00
Department of Civil Engineering, University of Western Australia	1.76

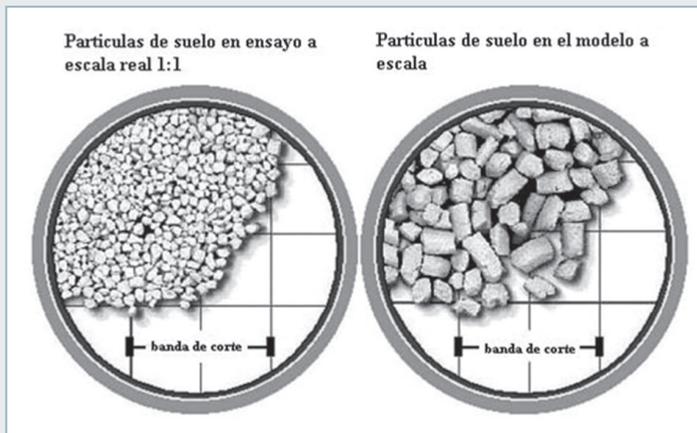
Fuente: elaborado por los autores.



**Figura 1.** Efecto de campo de aceleración no uniforme  
Fuente: elaborado por los autores.

### Tamaño de grano

Este es uno de los efectos más notorios y que más produce errores en la precisión de los resultados, puesto que las partículas de suelo no están afectadas por las leyes de escalamiento, como sí lo están otros elementos que son componentes de cualquier estructura geotécnica (figura 2).



**Figura 2.** Partículas de suelo en la estructura geotécnica y el modelo físico  
Fuente: elaborado por los autores.

Para disminuir un poco el efecto de tamaño de grano, así como para procurar que la incertidumbre sea mínima en la interpretación de los datos, es preciso chequear la forma de las partículas (redondeadas o angulares) y su dureza al quebramiento (*crushing*), la cual afectará la dilatancia y también algún efecto de frontera. Como conclusión, se deben escoger suelos para modelar que tengan tamaño de grano de diámetro mayor a  $1/30$  del  $d_{50}$ .

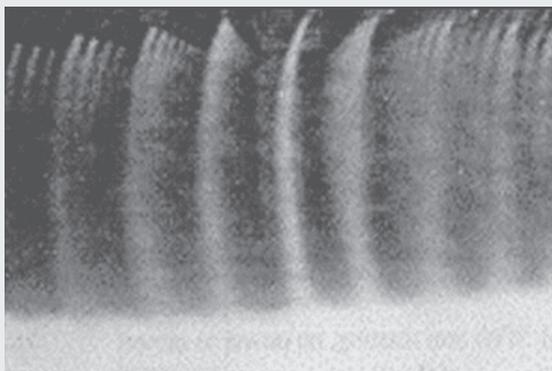
Sin embargo, el efecto de tamaño de grano no es tan significativo en la predicción de resultados, y se puede minimizar usando unas dimensiones de modelo lo suficientemente amplias comparadas con el tamaño de grano del suelo (Ruge, 2004).

En este ítem es importante recalcar que cuando se elaboran los modelos con muestras de suelo *in situ*, estas presentan condiciones naturales imposibles de escalar en el modelo (grietas, discontinuidades, erosión) y pueden generar algún error en la predicción de los datos. Por esta razón, en muchos casos se recomienda construir el modelo en el laboratorio artificialmente, con ayuda de sistemas de pluvitación (muestras de arena), para evitar estas heterogeneidades en el ensayo.

### ***Aceleración de Coriolis***

Esta aceleración es una fuerza ficticia que experimenta una partícula de suelo cuando está girando dentro de un sistema de referencia en rotación. Además, debido a que los humanos formamos parte del sistema, esta aceleración es imperceptible en el planeta Tierra (Bhatnagar & Hallan, 1983).

Sin embargo, cuando un modelo físico rota dentro de un sistema de referencia como el que impone la maquina centrífuga, el modelo se ve mucho más afectado por el efecto Coriolis. Para el observador, el efecto es mucho más notorio cuando en el modelo ocurren eventos de desplazamiento, *i.e.* secuencias de excavación, hincado de pilotes, pluvitaciones, entre otros (figura 3).



**Figura 3.** Efecto Coriolis presente en una pluvitación de arena durante un ensayo en centrífuga  
Fuente: Stuit (1993).

### **Efecto de borde**

Cuando se desea modelar estructuras geotécnicas que presenten un amplio estado de esfuerzos sobre el suelo, es importante optar por unas dimensiones adecuadas del modelo, es decir, que estén acordes con las condiciones de frontera que presente el prototipo, con el fin de que las superficies rígidas del contenedor que recibe del modelo no interfieran con posibles deformaciones, bulbos de esfuerzos, superficies de falla, entre otros (figura 3).

## Conclusiones

Las modelaciones físicas en centrífuga son una herramienta útil para predecir escenarios futuros que afectan una estructura geotécnica en particular. Esta técnica debe ser enseñada o implementada en los cursos básicos de diseño de fundaciones o geotecnia de los programas de ingeniería civil, puesto que el futuro de la ingeniería geotécnica se basa en este tipo de técnicas para resolver problemas geotécnicos cada vez más exigentes en el mundo moderno.

Las dispersiones que se generan entre las mediciones físicas y los modelos a escala real se deben a efectos como el tamaño de grano, aceleración no uniforme, efectos de borde, entre otros. Como se mencionó en el artículo, existe una manera de minimizar estos efectos, pero no es posible desaparecerlos por completo, ya que son intrínsecos del geomaterial como tal o de la técnica adoptada.

Cualquiera que sea la técnica adoptada de predicción, ya sea numérica, analítica, matemática o física, los aspectos que inciden en los resultados deben ser analizados en detalle, ya que de esto depende el éxito de la comparación y el estudio de dispersión de los resultados.

## Agradecimientos

Los autores agradecen a la Escuela Militar de Cadetes "General José María Córdoba".

## Declaración de divulgación

Los autores declaran que no existe ningún potencial conflicto de interés relacionado con el texto.

## Financiamiento

Los autores no declaran fuente de financiamiento para la realización de este artículo.

## Sobre los autores

**CT. Camilo Andrés Fino Vela** es estudiante de la Facultad de Ingeniería Civil de la Esmic. Pertenece al Semillero de Investigación "IngeMil".

**CT. Diego Andrés Lozano** es estudiante de la Facultad de Ingeniería Civil de la Esmic. Pertenece al Semillero de Investigación "IngeMil".

**Juan Carlos Ruge C.** es ingeniero, docente de la Facultad de Ingeniería Civil de la Esmic y perteneciente al Semillero de Investigación "IngeMil".

## Referencias

- Bhatnagar, K. B. & Hallan, P. P. (1983). The effect of perturbations in Coriolis and centrifugal forces on the nonlinear stability of equilibrium points in the restricted problem of three bodies. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 30, 97-114.
- Caicedo, B., Velásquez, R. & Monroy, J. (2003). *Modelación física en centrífuga*. Trabajo presentado en el Tercer Encuentro de Ingenieros de Suelos y Estructuras. Escuela Colombiana de Ingeniería, Bogotá, D. C.

- Guzmán Y., Rincón, S., Sarmiento, J. & Ruge, J. C. (2017). Aspectos que condicionan las modelaciones numéricas en la predicción del comportamiento de estructuras geotécnicas reales. *Revista Brújula Semilleros de Investigación*, 10 (5).
- Negro Jr., A., Karlsrud, K., Srithar, S., Ervin, M. & Vorster, E. (2009). Prediction, monitoring and evaluation of performance of geotechnical structures. En *Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. Alexandria.
- Ruge, J. C. (2004). *Modelación física y numérica de un tablestacado realizado en Hochstteten (Alemania)* (Tesis de Maestría). Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes, Bogotá, D. C.
- Stuit, H. G. (1995). *Sand in the geotechnical centrifuge* (Tesis de Doctorado). Delft University of Technology, Holanda.