

Principios de estudios de fenómenos geotécnicos complejos a través de modelos

Adolfo Camilo Torres Prada*

Fecha de envío: 13 de julio de 2008.
Fecha de aceptación: 29 de agosto de 2008.

RESUMEN

El presente trabajo muestra la necesidad de promover entre la comunidad científica e ingeniería colombiana el desarrollo de estudios en modelos físicos y matemáticos de fenómenos geotécnicos en escenarios complejos. Se presentan las tendencias mundiales y los registros históricos de congresos específicos de experiencias en ésta rama de las ciencias. Se presentan algunos fundamentos teóricos de los métodos de modelación matemática por FEM y física por la técnica de materiales equivalentes. Se realiza una breve descripción del laboratorio de Modelos geotécnicos GeoLab de la Universidad de La Salle y se establecen algunas necesidades particulares para el contexto colombiano.

Palabras clave: geotecnia, modelos numéricos, modelos a escala, Colombia.

FUNDAMENTALS OF STUDIES OF GEOTECHNICAL COMPLEX PHENOMENA THROUGH MODELS.

ABSTRACT

This paper presents the need to promote among the scientific community and colombian engineering the development of studies in physical and mathematical models. This paper also shows worldwide trends and historic records of specific congresses with experience in this branch of science. Some fundamental theories of models of the mathematical modeling by FEM and the technique of equivalent materials by physical models are shown. A brief description of the laboratory of geotechnical models GeoLab of La Salle University is presented and it is possible to find some particular needs for the Colombian context.

Key Words: Geotechnical, Numerical models, small scale physical model, Colombia

* Profesor de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad de La Salle. Correo electrónico: atorres@unisalle.edu.co

INTRODUCCIÓN

El siglo XXI depara para la humanidad grandes retos para garantizar su propia conservación, algunos de estos desafíos están relacionados con el desarrollo sustentable, la preservación del medio ambiente y el óptimo empleo de los recursos. Actualmente, las grandes ciudades del mundo presentan una elevada dinámica en el aprovechamiento del espacio subterráneo como elemento fundamental de un desarrollo urbano eficiente, la necesidad de construcción de estos espacios subterráneos ha generado un impulso de las ciencias y los métodos de investigación, dando como resultado importantes avances en tecnología, nuevos materiales, simulación de fenómenos complejos y desarrollo de procesos.

Bogotá, capital colombiana, hoy con una población de aproximadamente ocho millones de habitantes soporta graves problemas, producto de su desbalanceado crecimiento, que ponen en riesgo su futura participación y desarrollo en los campos que exigen los actuales mercados globalizados. Por ello se hace necesario la construcción de importantes proyectos de infraestructura, entre estas las obras subterráneas y túneles.

En Bogotá se están construyendo importantes obras subterráneas con la utilización de nuevas tecnologías desarrolladas en otras latitudes, esta importación tecnológica debe ser validada para las condiciones particulares geotécnicas y de densidad de espacio construido de la capital, de no ser así, se incide en un riesgo potencial que puede ocasionar retrasos en las etapas de construcción e incluso el colapso de las nuevas estructuras o de las adyacentes a estas.

Para poder permitir un rápido y seguro desarrollo de los nuevos proyectos subterráneos en especial de los túneles de servicio, es preciso que se realicen monitoreos e investigaciones bajo las condiciones su-
generis de la capital, complementados con métodos

analíticos, modelación física y matemática en centros especializados para este tipo de investigaciones, y, de esta manera, producir guías y recomendaciones de construcción propias y, en el futuro, contar con una normatividad clara en cuanto al uso y desarrollo del subsuelo urbano. Los grupos de investigación y las empresas deben unir esfuerzos en búsqueda de alcanzar estas metas.

ACTUALIDAD DE LA MODELACIÓN EN EL ESTUDIO DE FENÓMENOS GEOTÉCNICOS

Una práctica mundial que se ha difundido en las últimas décadas en la ingeniería civil es la construcción de simulaciones de la propuesta estructural y del proceso constructivo en modelos físicos y matemáticos que refuerzan y optimizan los cálculos analíticos de diseño de proyectos para la construcción de obras complejas. Algunos países incluso reglamentan que para fases preliminares de diseño y respectiva aprobación de estructuras subterráneas en zonas urbanas, se deben generar simulaciones en modelos.

Los resultados de monitoreos en estados naturales entregan la información real acerca de los casos estudiados. Sin embargo, su realización exige un difícil manejo operativo y altos costos. Algunos experimentos son improbables de realizar en condiciones naturales (por ejemplo, llevar una construcción real hasta su destrucción en una prueba de carga).

Las investigaciones en modelos son más fáciles de organizar, son menos costosas y demandan menos trabajo. En los modelos se pueden reproducir, posibles e imposibles situaciones del mundo real (por ejemplo, condiciones extremas en los materiales y en las estructuras analizadas).

Una limitante de las investigaciones en modelos es la “idealización” o simplificación de la realidad existente. Lo importante radica en que todos los eventos

que suceden en el modelo y en el objeto real, en tiempo y espacio cumplan con las mismas leyes físicas y describan las mismas relaciones matemáticas.

De esta manera, las investigaciones en modelos combinados con estudios a escalas naturales, son un medio para analizar diferentes fenómenos de la naturaleza, y en las construcciones civiles permite analizar el comportamiento de la estructura con su entorno.

MODELACIÓN FÍSICA DE FENÓMENOS GEOTÉCNICOS

La modelación física en el mundo actual se ha convertido en parte esencial del diseño de estructuras y en las investigaciones del fenómeno de interacción entre estructuras y masa de suelo o roca.

Desde el año 1981 se han organizado en congresos mundiales la socialización de los resultados de estas investigaciones, así, la Sociedad Internacional de Mecánica de suelos e Ingeniería Geotécnica (ISSMGE), con su Comité Técnico (TC2), bajo la dirección británica de Andrew Scholfield organizó en el año 1985 las primeras conferencias de investigaciones en centrifugas. Durante los años 1998 a 2001, bajo la dirección de Kenji Ishihara la ISSMGE extendió y modificó el nombre de TC2 por el de “Ensayos en Modelación Física y Centrifuga”, creándose desde entonces la Conferencia Internacional en Modelación Física en Geotecnia (ICPMG). Otros eventos de importancia en el tema se registran en la Tabla 1.

En el último encuentro ICPMG celebrado en Hong Kong en el año 2006 y organizado por la Universidad de Ciencia y Tecnología de Hong Kong (HKUST), se presentaron 239 artículos y ponencias de investigaciones en el área, de 30 países del mundo. La próxima conferencia 7th ICPMG se llevarán a cabo en el año 2010 en la ciudad de Zurich.

TABLA 1. EVENTOS INTERNACIONALES DE INVESTIGACIÓN CON MODELOS FÍSICOS EN GEOTECNIA

Eventos	Año	Lugar
Small Conference on Centrifuge Testing	1985	Inglaterra
Centrifuge 88 1st International conference	1990	París
Centrifuge 91 2nd International conference	1991	Boulder
Centrifuge 94 3rd International conference	1994	Singapore
Centrifuge 98 4th International conference	1998	Tokyo
ICPMG' 02 International Conference on Physical Modelling in Geotechnics	2002	New-foundland
ICPMG' 06 International Conference on Physical Modelling in Geotechnics	2006	Hong Kong

FUNDAMENTOS BÁSICOS EN LA MODELACIÓN FÍSICA POR EL MÉTODO DE MATERIALES EQUIVALENTE

La teoría de análisis dimensionales entre sistemas se encuentra definida en el teorema de Buckingham: “Si una ecuación es dimensionalmente homogénea, ella puede ser reducida a una relación entre un completo conjunto de productos dimensionales”. Lo cual fue demostrado por una rigurosa demostración matemática por Langhaar (1951).

El método de materiales equivalentes desarrollado desde los años 30, consiste en utilizar materiales artificiales dentro de un modelo que en escala reducida tengan un comportamiento mecánico similar al del suelo en escala natural; desde el modelo se podrán

extrapolar resultados para poder predecir comportamientos del objeto real en estudio.

El paso del objeto real al modelo físico debe realizarse con determinadas reglas. Estas reglas fundamentan la teoría de la Semejanza.

La pregunta acerca de las condiciones de semejanza es una de las más importantes en los modelos físicos.

Fenómenos semejantes son aquellos que suceden en sistemas geométricos semejantes; es decir, si los procesos suceden en todos los puntos similares geométricos, en momentos similares del tiempo con una relación más o menos constante de magnitud.

Para la modelación de cualquier fenómeno mecánico es suficiente establecer el valor de magnitud de tres unidades fundamentales: longitud, tiempo y masa.

Una vez establecidas las magnitudes de estos tres parámetros, es muy fácil obtener los demás parámetros de la modelación (fuerza, cargas, esfuerzos, velocidad, etc.).

La semejanza geométrica se establece a través del factor de escala con la relación entre la dimensión del modelo y el objeto real:

$$l_n / l_m = a_l \tag{1}$$

Donde: l_n y l_m son las medidas longitudinales natural y en el modelo respectivamente. Similarmente la semejanza cinemática o temporal se da con la relación de tiempos:

$$t_n / t_m = a_t \tag{2}$$

La semejanza material se da con la relación entre densidades ρ que incluye a las masas y a los volúmenes.

$$\rho_n / \rho_m = a_\rho \tag{3}$$

Utilizando las anteriores magnitudes se pueden obtener las relaciones de semejanza para cualquier parámetro del sistema mecánico (Tabla 2).

El más general de los casos, del cual todos los demás se derivan como casos particulares, es el caso de semejanza simple. Las ecuaciones fundamentales que rigen la semejanza simple en condiciones estáticas son:

$$\begin{aligned} a_p / a_E \cdot a_l^2 &= 1; & a_M / a_E \cdot a_l^3 &= 1; & a_v \cdot a_l / a_E &= 1; \\ a_q / a_E &= 1; & a_u / a_l &= 1; & a_\phi \cdot a_l / a_E &= 1; \end{aligned} \tag{4}$$

Donde a_E expresa el factor de escala de los módulos elásticos, a_m es el factor de escala entre momentos, a_r es la relación entre pesos específicos, a_p es la relación entre fuerzas, a_q es la relación entre cargas distribuidas, a_u es la relación de desplazamientos y a_ϕ es la relación de fuerzas volumétricas.

Las seis anteriores ecuaciones contienen ocho escalas, por consiguiente, dos escalas se pueden elegir arbitrariamente y las demás deben ser determinadas a partir de las ecuaciones (4), generalmente se seleccionan las escalas a_l y a_p arbitrariamente.

La escala a_l se define por la capacidad dimensional de las paredes de prueba donde se construye el modelo del objeto real.

Si se define con antelación la escala, a_p se hace necesario diseñar y caracterizar las diferentes mezclas de suelo artificial y crear una curva donde se especifiquen las propiedades mecánicas de cada mezcla, es decir, se deben determinar los cambios en las propiedades físico mecánicas de mezclas de suelos artificiales en dependencia con la proporción de los materiales que las constituyen, en donde los suelos

artificiales se asemejen a las características mecánicas de un suelo real para su modelación física, respe-

tando las leyes de semejanza en el campo gravitacional de 1g (una gravedad).

TABLA 2. ESCALAS DE MODELACIÓN PARA DIFERENTES PARÁMETROS EN ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Parámetro	Unidad de Medida	Convención	Dimensión	Escala
Dimensiones geométricas	<i>m</i>	<i>l</i>	<i>L</i>	a_l
Tiempo	<i>s</i>	<i>t</i>	<i>T</i>	a_t
Densidad	$N \cdot s^2 / m^4$	ρ	$P \cdot L^{-4} \cdot T^2$	a_ρ
Fuerza Puntual	<i>N</i>	<i>P</i>	<i>P</i>	$a_p = a_\rho \cdot a_l^4 / a_t^2$
Carga Repartida	N / m^2	<i>q</i>	$P \cdot L^{-2}$	$a_q = a_\rho \cdot a_l^2 / a_t^2$
Presión, Modulo Elástico, Esfuerzo	<i>Pa</i>	<i>Q, E, σ</i>	$P \cdot L^{-2}$	$a_Q = a_E = a_\sigma = a_\rho \cdot a_l^4 / a_t^2$
Coefficiente de Poisson	-	<i>v</i>	<i>l</i>	a_v
Deformación Relativa	-	ϵ	<i>l</i>	a_ϵ
Peso Volumétrico, Fuerzas Volumétricas	N / m^3	γ, Φ	$P \cdot L^{-3}$	$a_\gamma = a_\Phi = a_\rho \cdot a_l / a_t^2$
Desplazamientos	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>L</i>	$a_u = a_l$
Periodo de oscilación	<i>s</i>	<i>To</i>	<i>T</i>	$a_{To} = a_t$
Velocidad de desplazamientos, velocidad de propagación de onda	m / s	<i>V, C</i>	$L \cdot T^{-1}$	$a_V = a_C = a_l / a_t$
Ángulo de Fricción Interna	°	Φ	<i>l</i>	a_ϕ
Coefficiente de fortaleza	-	<i>f</i>	<i>l</i>	a_f

Fuente: Golitzinkiy *et al.*, 1995.

Para la ejecución de un modelo físico por el método de materiales equivalentes de un proceso geotécnico o de una estructura en particular se requieren de laboratorios especiales dotados con paredes o marcos de prueba y provistos de los instrumentos de medida necesarios y de registro de datos, para almacenar los cambios de los parámetros estudiados, los marcos deberán tener dimensiones determinadas para garantizar la escala geométrica seleccionada.

FUNDAMENTOS BÁSICOS EN LA MODELACIÓN NUMÉRICA

Los métodos numéricos son una herramienta moderna para la solución de problemas de alta complejidad (ej. relaciones no lineales y dependientes del tiempo), como lo son los fenómenos naturales, donde numerosos factores intervienen. Se deben mencionar las soluciones a éste tipo de problemas, mediante la técnica de los métodos numéricos, en especial, por los métodos de las diferencias finitas y de los elementos finitos (FEM).

Gracias al avance en los equipos de computo y de los sistemas, en la actualidad se cuenta con un amplio listado de programas basados en FEM para el análisis del estado esfuerzo-deformación de estructuras en geotecnia (Robot millennium de Francia, Cosmos de Inglaterra, Phases de Canadá, Geo5 de la República Checa, Fok de Rusia, Plaxis 3D de Holanda, entre muchos otros), sin embargo, a veces el procedimiento de construcción de los modelos numéricos puede

complicarse y el análisis de resultados se debe realizar con mucha cautela.

En los problemas geotécnicos analizados por el método de elementos finitos, el terreno se modela discretizándolo en elementos de forma variable que constituyen una malla y que están interconectados mediante puntos llamados nodos. A cada uno de estos elementos se les otorga unas propiedades y se define unas condiciones de contorno e iniciales y aplicando la teoría más acorde al comportamiento esperado (elástico, plástico, elasto-plástico, etc.) se determina la matriz de rigidez a partir de la cual se calculan los desplazamientos en cada nodo y los esfuerzos en ellos.

Torres (2004) concluye sobre las limitaciones del FEM, “El problema ahora radica, no en la laboriosa tarea de cálculo sino entre otros, de la idealización del fenómeno con un buen esquema de cálculo de la estructura, de la apropiada determinación de las condiciones de frontera y de un minucioso e inteligente análisis de resultados, y para ello estos modelos deben ser siempre comparados y enriquecidos con los datos de registro en medios naturales o experimentales”.

A continuación se presentan las características básicas de un laboratorio de modelos geotécnicos que utiliza las técnicas de modelación física por materiales equivalentes y modelación matemática por FEM.

DESCRIPCIÓN DEL LABORATORIO DE MODELACIÓN DE PROCESOS GEOTÉCNICOS GEOLAB

Básicamente se trata de un espacio de carácter científico, de experimentación en modelos del comportamiento de estructuras civiles emplazadas en suelo o roca, se cuenta con la posibilidad de investigación en dos tipos de modelos: físicos, basados en el método de materiales equivalentes y que respetan las leyes de

semejanza, y matemáticos construidos por métodos numéricos empleando las técnicas de las diferencias finitas y los elementos finitos (FEM).

CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DEL LABORATORIO

El Laboratorio de Modelación de Procesos Geotécnicos (GeoLab) está ubicado en el costado suroccidental de la Sede Centro de La Universidad de La Salle en Bogotá, en una edificación de un piso aislada, con acceso controlado independiente lo que contribuye a los procesos logísticos durante las etapas experimentales; tiene un área dividida en dos zonas: la primera destinada a los trabajos de modelación física e instrumentación de medición y la segunda donde se ubica la sala de computo especializado para los trabajos de simulación matemática y de adquisición de señales de la instrumentación.

El laboratorio de modelación de procesos geotécnicos es un elemento adicional del sistema de laboratorios de las facultades de ingeniería, pero que tiene como tarea esencial el desarrollo de trabajos de investigación de carácter estrictamente científico en el campo de la geotecnia.

DESCRIPCIÓN DE LA PARED DE PRUEBAS

La pared de pruebas es donde se construye y prueba el modelo físico a escala reducida, conformándose en la parte esencial del Laboratorio de Modelos Físicos de Procesos Geotécnicos. La pared es una estructura conformada por rígidos pórticos de acero estructural, cimentada sobre una fundación en concreto armado. Esta rigidez estructural es necesaria para eliminar deformaciones en la pared que podrían incidir en errores en los datos de los experimentos. La pared de pruebas tiene el código PP-01 (Figura 1), tiene una capacidad máxima de 12.5 m³, con dimensiones internas de 2.50x2.50x2.0 m, se podrán realizar estudios tanto en tarea plana de esfuerzos, como

en tridimensional. En la pared de pruebas dos de sus caras están conformadas en acrílico reforzado, posibilitando la observación y registro visual durante el experimento.



La PP-01 tiene una gran flexibilidad para la constitución de modelos gracias a su diseño modular, en un futuro cercano será dotada con seudomecanismos de aplicación de cargas verticales sobre el modelo, con instrumental para medición de cambios de presión de agua de poros y de cargas dinámicas.

DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS DE MEDIDA, REGISTRO Y PROCESAMIENTO DE DATOS

Para contar con la capacidad de medición durante las etapas experimentales, el laboratorio se ha dotado de equipos de última generación y se ha realizado trabajos de modernización de instrumentos y equipos de medida que existen en los laboratorios de la Facultad de Ingeniería Civil.

La instrumentación se agrupa en equipos y sistemas para la medición de desplazamientos, deformaciones, fuerzas, esfuerzos, registro audiovisual, fotogrametría de rango corto, tiempo, temperatura, etc., todos ellos son conducidos al equipo de registro de señales.

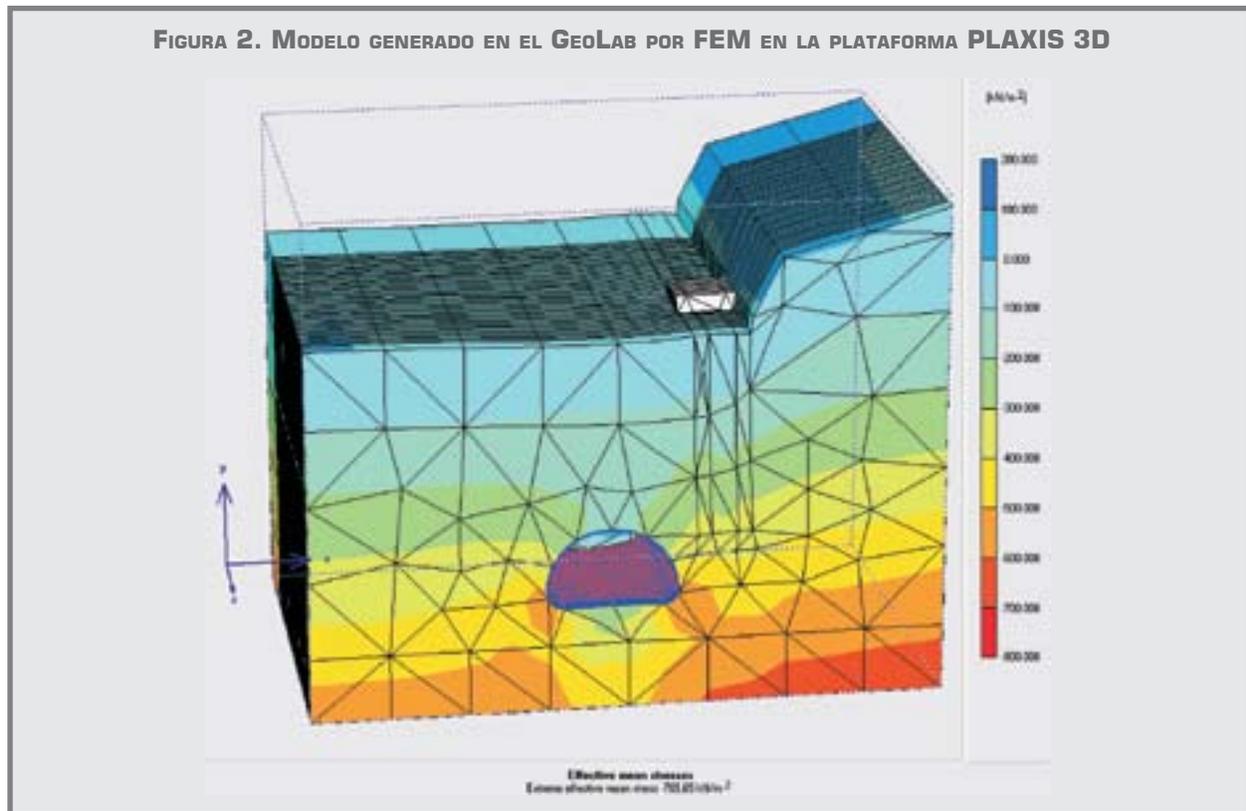
Se cuenta con una interface digital para la adquisición de las señales de la instrumentación de medidas desde la pared de pruebas. La interface tiene la capacidad de registrar 32 señales de equipos electrónicos de medida y guardar los datos de manera simultánea e instantánea en un computador. (Torres, 2008).

DESCRIPCIÓN DE LA PLATAFORMA DE MODELACIÓN MATEMÁTICA

PLAXIS® es un *software* de elementos finitos diseñado específicamente para la realización de análisis del estado esfuerzo-deformación. El programa utiliza una interface gráfica que permite a los usuarios generar rápidamente un modelo geométrico y una malla de elementos finitos basada en una sección transversal vertical representativa del problema en estudio.

El desarrollo de PLAXIS® se inició en el año de 1987 en la Universidad Tecnológica de Delft (Países Bajos). Después de la creación de la compañía PLAXIS B.V., formada en 1993, se lanzó en 1998 el primer programa PLAXIS® 2D bajo Windows® para el análisis de esfuerzos – deformación en problemas de ingeniería geotécnica. Finalmente en el año 2001, se desarrolló bajo el lenguaje Kernel PLAXIS® 3D, diseñado para el análisis de estructuras geotécnicas en tres dimensiones, actualizándose en su segunda versión en el año 2007.

PLAXIS® no es sólo un programa computacional, al adquirir la licencia el GeoLab ha adquirido acceso a la Asociación Internacional de Usuarios de PLAXIS®, un grupo muy activo de apoyo internacional que regularmente, por medio de foros, boletines, publicaciones y demás medios de divulgación a nivel internacional, fortalecen y contribuyen continuamente al desarrollo de esta herramienta fundamental para la investigación de procesos geotécnicos.



CONCLUSIONES

El desarrollo de Bogotá debe tener en cuenta el elemento urbano del subsuelo. Se debe avanzar en unir la experiencia adquirida en la construcción de dicho espacio con la investigación, tecnología y desarrollo de la ingeniería. En la actualidad, en la ciudad de Bogotá, se presenta una valiosa oportunidad para realizar el seguimiento en campo de fenómenos geotécnicos complejos, ya que se están construyendo grandes obras de infraestructura civil, estos proyectos se constituyen en laboratorios a escala real, de donde se puede adquirir datos básicos para iniciar el desarrollo de modelos propios para las condiciones de la ciudad.

Las investigaciones en modelos junto con los monitoreos de proyectos a escala natural, se presentan como un poderoso medio de estudiar diferentes fenómenos geotécnicos complejos.

Si el modelo físico se realiza de manera correspondiente con la teoría de la semejanza, con mucha seguridad, los resultados de la investigación realizada sobre el modelo, podrán ser extrapolados al objeto real; por el contrario, si el modelo no satisface las condiciones de la teoría de la semejanza, entonces los resultados de la investigación son falsos y de ellos no se debe hacer ninguna conclusión de los condiciones del objeto real.

Para el estudio del estado esfuerzo – deformación de estructuras o procesos geotécnicos existe una gran variedad de programas especializados en geotecnia para la construcción de modelos por el método de elemento finitos. Además también se pueden emplear modelos físicos, por ejemplo a través de la técnica de materiales equivalentes, donde se requiere de laboratorios especializados dotados con paredes o marcos de prueba y provistos de adecuados equipos de medida que registren las variaciones de los parámetros en estudio.

BIBLIOGRAFÍA

- Barták, Hrdina, Romancov & Zlámal. *Underground Space – the 4th Dimension of Metropolises*. London: Taylor & Francis Group, 2007.
- Brinkgreve R. *PLAXIS Versión 8. Manual de Referencia*. Delft University of Technology & PLAXIS b.v. 2004.
- Golitzinkiy D., Svitin V., Sokolov M., Ibañes T. *Fundamentos de la Investigaciones científicas*. San Petersburgo: PGUPS, 1995.
- Langhaar H. *Dimensional analysis and theory of models*. New York: John Wiley, 1951.
- Riascos L., Rincón M., Torres D., Torres A. “Evolución histórica, actualidad y tendencia de explotación del espacio subterráneo en Bogotá – Colombia”. *Revista Épsilon* 8. (2007): 57 - 70.
- Torres A. “Consideraciones de la respuesta de túneles profundos construidos en suelos blandos ante un evento sísmico”. *Revista Aicun* 33. (2004): 16 - 19.
- Torres C. La importancia de los estudiantes de fenomenos geotécnicos complejos en espacios urbanos a través de modelos. Memorias del Congreso Colombiano de Geotécnia (2008). CDROM.
- Wood D. *Geotechnical Modelling*. Eastbourne, Taylor & Francis Group, 2005.
- Zhang Ng., Wang. *Physical Modelling in Geotechnics – 6th ICPMG '06*. London: Taylor & Francis Group, 2006.