

Aspectos que condicionan las modelaciones numéricas en la predicción del comportamiento de estructuras geotécnicas reales*

TUTORES:

ST. JOSÉ LUIS SARMIENTO ESCALANTE^a

PHD. ING. JUAN CARLOS RUGE C.^b

SEMILLEROS:

ALF. YOMIRA ALEXANDRA GUZMÁN R.^c

ALF. SERGIO ALEJANDRO RINCÓN G.^d

* Escrito resultado del proyecto de investigación institucional titulado Evaluación de las mezclas asfálticas en estructuras de pavimentos con materiales alternativos militares para la construcción de obras en unidades del Ejército Nacional.

a Coordinador de investigación de la Facultad de Ingeniería Civil de la Escuela Militar de Cadetes "General José María Córdova". sarmi31090@hotmail.com

b Asesor de investigación de la Facultad de Ingeniería Civil de la Esmic. jcruge@gmail.com

c Estudiante alférez de séptimo nivel, integrante del semillero Ingemil, de la Facultad de Ingeniería Civil de la Esmic. yomy.ale@hotmail.com

d Estudiante alférez de séptimo nivel, integrante del semillero Ingemil, de la Facultad de Ingeniería Civil de la Esmic. sergioadmonobras@hotmail.com



RESUMEN. En la tendencia de la geotecnia actual, intentar predecir y/o validar el comportamiento de una estructura geotécnica, empleando tanto modelos físicos como simulaciones numéricas, se ha convertido en un reto de los investigadores de la geotecnia a nivel mundial, puesto que los resultados obtenidos en *benchmarking* de investigaciones de este tipo demuestran una alta dispersión de datos en las modelaciones, antes de conocer los valores reales del comportamiento del material, en ensayos a gran escala monitoreados y medidos prolijamente. Lo anterior, debido a que la eficiencia de los resultados depende de muchas variables inherentes al suelo, que en la mayoría de los casos son difíciles de modelar, como lo son: condiciones iniciales, efectos capilares, historia geológica, comportamiento histerético, dilatancia, creep, colapso, relajación, entre otros. En este trabajo se analizarán detalladamente cada uno de estos factores que influyen las predicciones en este tipo de estructuras, así como experiencias obtenidas en modelos computacionales basados en teorías constitutivas modernas del comportamiento del suelo. Esto, con el fin de conocer los pormenores de estos aspectos y lograr aminorar los efectos negativos, cuando se pretende prever los resultados finales, al modelar estructuras geotécnicas condicionadas por estas particularidades.

PALABRAS CLAVE: hipoplasticidad; modelo computacional; simulación numérica.

ABSTRACT. In the current trend of geotechnics, trying to predict and/or validate the behavior of a geotechnical structure, using both physical models and numerical simulations, has become a challenge for researchers in geotechnics worldwide, since the results obtained in research benchmarking of this type, demonstrate a high dispersion of data in the modellings, contrasting with real values of the behavior of the material, in large-scale trials monitored and measured neatly. This is because the efficiency of the results depends on many variables inherent to the soil, which in most cases are difficult to model, such as: initial conditions, capillary effects (suction), geological history, hysteretic behavior, dilatancy, creep, collapse, relaxation, among others. This paper will analyze in detail each of these factors that influence predictions on this type of structures, as well as experiences obtained in computational models based on modern constitutive theories of soil behavior. In order to know the details of these aspects and to reduce the negative effects, when it is intended to predict the final results, to model geotechnical structures conditioned by these particularities.

KEYWORDS: computational model; hypoplasticity, numerical simulation.

INTRODUCCIÓN

La modelación física y numérica de estructuras geotécnicas es la herramienta más empleada por investigadores a nivel mundial. Su utilidad está fundamentada en el hecho de que su uso es importante cuando se intenta reproducir comportamientos del suelo que generan alguna incertidumbre debido a cualquier situación que dificulte obtener una solución por métodos tradicionales, o incluso, para complementar una simulación numérica. Los modelos a escala o reducidos son pertinentes cuando la capacidad de cálculo disponible es insuficiente debido a la complejidad de la geometría del problema tratado (efecto 3D) o porque el problema geotécnico no se puede modelar correctamente con una ley constitutiva (Caicedo et al., 2003).

Cuando se implementan modelos físicos a escala, es importante conocer que solo se encuentran afectados por la fuerza de la gravedad, por lo cual los resultados que se obtienen solo deben ser analizados desde un punto de vista cualitativo, ya que es imposible extrapolar los datos de salida y compararlos con un ensayo a escala natural o un problema geotécnico real.

En relación con la simulación numérica, es definitivamente la herramienta predilecta por los ingenieros geotecnistas,

Se ha demostrado que los modelos constitutivos hipoplásticos son realmente eficientes cuando intentan predecir los resultados de determinado problema.

ya que presenta relativamente un bajo costo, el consumo de recursos humanos y económicos es reducido, está al alcance de la mano, entre otros aspectos. Sin embargo, una modelación de este tipo posee diversos factores que afectan los resultados obtenidos, los cuales se analizarán a lo largo del trabajo (Rondón, 2008; Ruge, 2004).

En este documento se analiza una serie de experiencias en simulaciones numéricas y los factores que afectan las mediciones, con el fin de pormenorizar estos aspectos y lograr una modelación de alta calidad y veraz en los resultados.

MODELACIÓN NUMÉRICA

Cuando se usa una herramienta de este tipo para abordar la simulación de un problema geotécnico, el investigador debe ser consciente de que existen innumerables aspectos que van a influir directamente en los resultados de la modelación, en especial porque las estructuras geotécnicas en una gran parte de sus componentes presentan una configuración controlada por procesos naturales que la mayoría de las veces se producen al azar y no tienen una especificación definida (Negro et al., 2009).

Por tal razón, se analizan diferentes aspectos que un geotecnista debe tener en cuenta a la hora de enfrentarse a la modelación numérica de determinada estructura geotécnica.

Escogencia del modelo constitutivo

Como se mencionó anteriormente, el comportamiento mecánico de los suelos es extremadamente complejo, por tal razón es una tarea difícil optar por una ley constitutiva que simule todas las condiciones presentes en un problema geotécnico.

Kolymbas (2007) plantea unas preguntas que todo investigador se debe hacer antes de escoger un modelo constitutivo para su simulación.

- ¿Cómo se puede definir la calidad de un modelo constitutivo?
- ¿Cuáles son las limitaciones del modelo?
- ¿Cómo comprobar si el modelo seleccionado es el indicado?
- ¿Cómo implementar un modelo promisorio en un código adecuado para el ámbito empresarial?
- ¿Qué clase de recurso numérico debe ser programado para obtener una solución correcta en problemas de contorno desde un punto de vista matemático (definición de deformaciones, calibración, condiciones iniciales)?

Definición de las deformaciones

Muchas de las leyes constitutivas calculan desplazamientos basados en teorías de pequeñas deformaciones, sin embargo existen problemas en la geotecnia donde pueden presentarse grandes deformaciones, *i.e.* en un muro de contención y la excavación de un túnel, por lo cual se necesitaría aplicar otro tipo de formulaciones. También es importante analizar la manera como algunos modelos asumen la descomposición de la deformación en una parte elástica y otra plástica, donde la parte elástica se considera reversible, es decir, se tendrían deformaciones elásticas siempre en ese rango.

No obstante, es sabido que el suelo solo presenta este comportamiento elástico a muy pequeñas deformaciones, como se puede observar en la figura 1, donde se muestra que la no linealidad es un factor relevante cuando se quiere analizar la evolución de las deformaciones en determinado problema.

Condiciones iniciales

Existen condiciones inherentes al suelo que son extremadamente complicadas de asumir en un modelo numérico, debido al carácter natural que tiene el suelo en cuanto a su formación pedogenética, por lo cual esa característica histerética hace que aspectos como la historia geológica, *creep*, relajación, colapso, saturación parcial, entre

otros, controlen la correcta modelación de las condiciones iniciales.

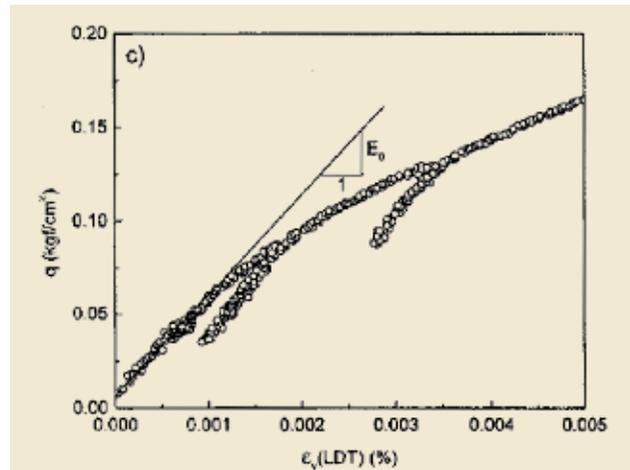


Figura 1. Resultados de deformación en una grava densa Fuente: Tatsuoka et al. (1997).

Calibración del modelo

En esta fase se tiene que lograr concatenar varios aspectos correctamente, como la alta calidad de los experimentos realizados y los retroanálisis adecuados para la obtención de los parámetros necesarios en la simulación (figura 2).

También la escogencia del modelo constitutivo apto para nuestro problema, así como la distinción que realice dicho modelo entre parámetros del suelo y variables de estado.

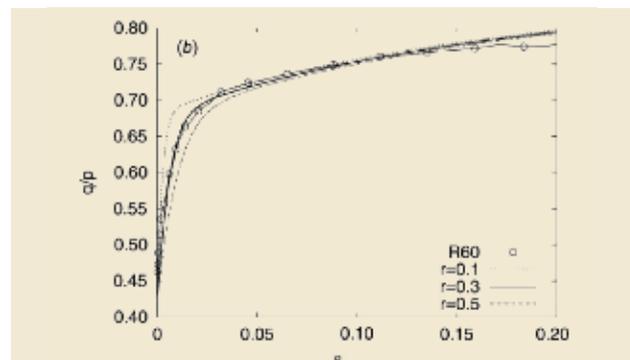


Figura 2. Resultados de la calibración del parámetro r para un modelo constitutivo hipoplástico Fuente: Mašín (2007).

Modelo computacional

Los resultados de una simulación numérica también están influenciados por la forma en que el investigador asume el análisis del modelo computacional. Se debe ser objetivo en ciertos aspectos que generan alguna incertidumbre, como lo que se entiende como simplificación de la realidad, o sea, la elección de variables importantes en la modelación, así como la escogencia adecuada de la geometría del modelo.

La discretización es crucial cuando se asume el tamaño del elemento finito, condiciones de contorno, detalles constructivos, modelos 2D y 3D (figura 3). Por último, algunos programas de elementos finitos presentan algoritmos robustos, que de acuerdo con procesos matemáticos disminuyen los tiempos de integración, esquemas de iteración, para la solución rápida y correcta del problema propuesto.

Validación del modelo

Por último, se debe satisfacer por lo menos desde un punto de vista cualitativo el comportamiento de una estructura geotécnica o un ensayo a escala real. Esto se

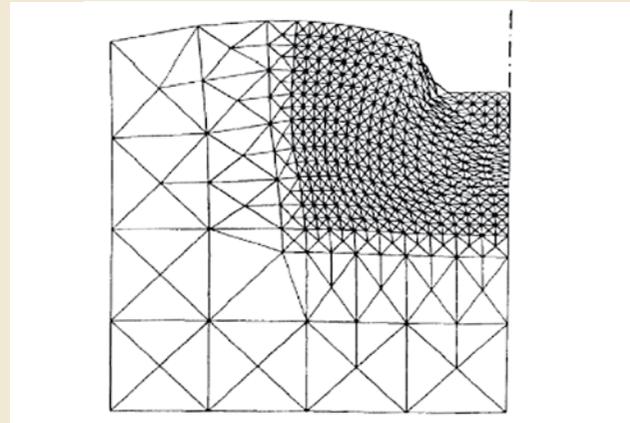


Figura 3. Malla deformada en un programa usando el método de los elementos finitos
Fuente: Kolymbas (2007).

logra siguiendo un control riguroso de todos los aspectos que influyen la modelación numérica. En las últimas investigaciones se ha demostrado que los modelos constitutivos hipoplásticos son realmente eficientes cuando intentan predecir los resultados de determinado problema.

En la figura 4 se pueden observar los resultados de un *benchmarking* realizado sobre un modelo físico a escala

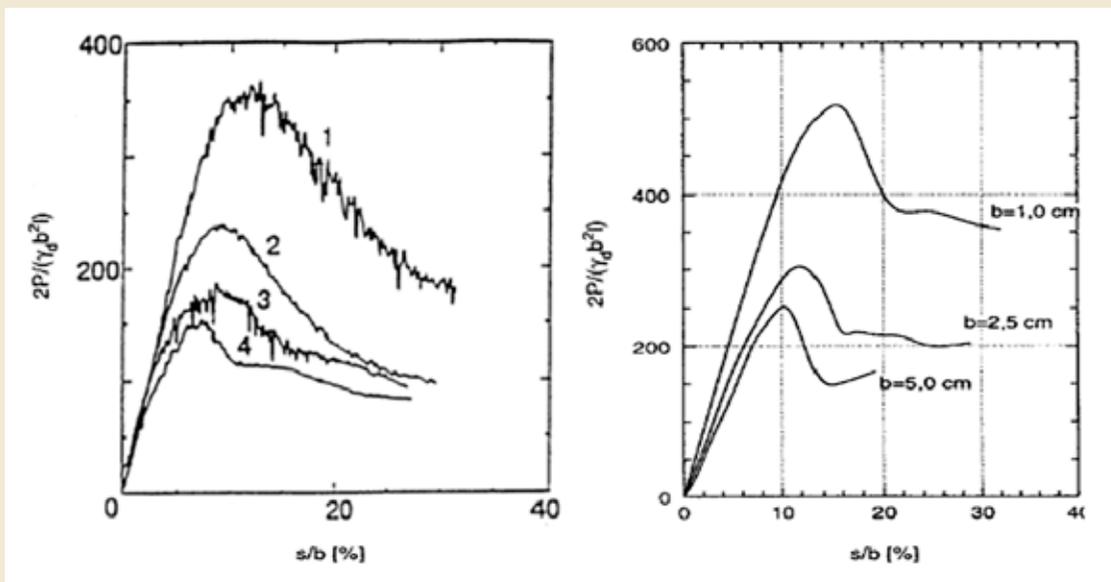


Figura 4. Resultados de la medición y de la predicción en un modelo constitutivo hipoplástico
Fuente: Tatsuoka et al. (1994).

real de una zapata cargada verticalmente, fundada sobre arena. Los mejores resultados, en especial, en el orden cualitativo, los obtuvo la predicción con el modelo hipoplástico.

Finalmente, es preciso recalcar que enfrentarse a una predicción del comportamiento de determinado problema es complicado, ya que la mayoría de las veces no se logra el resultado deseado porque se ha fallado en el análisis de algún factor que gobierna el resultado final de los datos.

CONCLUSIONES

La tendencia de los resultados de modelos físicos en centrífuga y simulaciones numéricas analizadas desde una óptica cualitativa demuestra la amplia capacidad que tiene dicha herramienta para intentar reproducir el comportamiento de diferentes fenómenos de un suelo y su posible interacción con elementos geotécnicos, siendo componentes ambos de lo que se denominó en el documento: estructura geotécnica.

Sin embargo, las dispersiones generadas entre lo previsto numéricamente, con modelos a escala real, se deben a algunos aspectos como la escogencia del modelo constitutivo, cálculo de deformaciones, adopción de condiciones iniciales, calibración de la teoría constitutiva, generación del modelo computacional y, finalmente, la validación del modelo. Todos estos factores deben ser

analizados exhaustivamente con el fin de lograr una predicción aceptable de la estructura geotécnica que se quiere estudiar.

REFERENCIAS

- Caicedo, B., Velásquez R. & Monroy J. (septiembre de 2003). Modelación física en centrífuga. *Tercer encuentro de Ingenieros de Suelos y Estructuras*. Escuela Colombiana de Ingeniería, Bogotá.
- Kolymbas, D. (2007). *Advanced Mathematical and Computational Geomechanics* (Vol. 13). University of Innsbruck.
- Mašin, D. A (2007). Hypoplastic Constitutive Model for Clays with Meta-Stable Structure. *Canadian Geotechnical Journal*, 44 (3), 363–375.
- Negro Jr., A. et al. (2009). Prediction, Monitoring and Evaluation of Performance of Geotechnical Structures. *Ref.: 17th Intl. Conf. Soil Mechanics and Geot. Eng., Alexandria, SOA3*.
- Rondón, H. A. (2008). *Comportamiento de un material granular no tratado en ensayos triaxiales cíclicos con Presión de Confinamiento Constante (PCC) y Variable (PCV)* (Tesis de Doctorado en Ingeniería). Universidad de los Andes, Bogotá, D.C.
- Ruge, J.C. (2004). *Modelación física y numérica de un tablerotacado realizado en Hochstteten (Alemania)* (Tesis de Maestría). Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes, Bogotá, D.C.
- Tatsuoka et al. (1994). Testing Methods and Results of Element Testing Conditions of Plane Strain Model Bearing Capacity Test Using Air Dried Dense Silver Leighton Buzard Sand. *Report prepared for class a prediction of the bearing capacity performance of model surface footing on sand under plane strain condition*. Institute of Industrial Service. University of Tokyo.
- Tatsuoka et al. (1997). Properties of cemented treated soils in Trans-Tokyo Bay Highway. *Ground Improvement, Thomas Telford*, 1(1), 37–58.