



El modelamiento numérico en la resolución de problemas geotécnicos

Autor: **Roberto Jesús Cier Honores** / rcier@srk.com.pe, roberto.cier@pucp.pe
Ingeniero Consultor, SRK Consulting (Peru)
Pre-Docente TPA, Pontificia Universidad Católica del Perú

Introducción

La ingeniería geotécnica es una de las ramas más desafiantes de la ingeniería civil, debido a que se desarrolla en torno al suelo y las rocas, materiales altamente complejos en la definición de sus características y propiedades. Debido a esto, la resolución de los problemas en esta disciplina puede llegar a ser una labor bastante complicada en algunas ocasiones en las que diversos factores influyen en el comportamiento de los materiales involucrados. No obstante, esta ardua tarea se ha visto simplificada de sobremanera desde la aparición de los métodos numéricos para la resolución de casos especiales de ingeniería. ¿Qué condujo a su utilización? ¿Cómo se han visto beneficiados los procesos de solución de problemas? ¿Cuál es el futuro en materia de modelamiento numérico para la ingeniería geotécnica? Este artículo buscará dar respuesta a estas interrogantes a fin de establecer un panorama general que ayude a conocer más los avances en este tema.

Los problemas en ingeniería geotécnica

Es innegable que los problemas en la ingeniería, así como en otras áreas del conocimiento, se han ido complejizando con el paso de los años, no solo por el aumento del número de problemas a los que esta se enfrenta, sino también por las exigencias de las solicitaciones a las que se ve confrontada, con estructuras cada vez más sofisticadas y de mayor envergadura. Al respecto, la ingeniería geotécnica no es una excepción, sino todo lo contrario: desde su formalización – gracias al aporte de Terzaghi a fines de los años 30 e inicios de los años 40 – ha estado íntimamente relacionada con

ABSTRACT

El presente artículo es una reseña sobre los avances presentados hasta la actualidad en el campo del modelamiento numérico en la resolución de problemas geotécnicos. Se muestran algunos de los problemas a los que se enfrenta la ingeniería geotécnica en la actualidad, y cómo es que el modelamiento numérico se ha convertido en una alternativa efectiva de solución ante problemas complejos en los proyectos en geotecnia. Además de ello, se presenta un ejemplo en el que el modelamiento numérico sirve como herramienta para la validación de métodos analíticos tradicionales en mecánica de suelos. Por último, se presentan algunos de los futuros avances que se esperan sean alcanzados a fin de mejorar los resultados que, hoy en día, son obtenidos con este método de resolución.

Palabras claves

Modelamiento numérico, geotecnia computacional, modelos constitutivos, parámetros geotécnicos, Plaxis.

métodos y modelos muy complejos para la solución de los diversos problemas relacionados a los fenómenos ocurridos en los suelos y las rocas.

En el primer congreso internacional de mecánica de suelos, Terzaghi (1936) señaló que uno de los mayores desafíos que, en ese entonces, presentaba la ingeniería de suelos era la falta de una teoría sólida que sustente todo el conocimiento empírico que se tenía hasta esa época. Hoy en día, no obstante, el problema persiste, pero de una forma distinta, pues si bien la mecánica de suelos adquirió una solidez teórica importante a pesar del corto tiempo de desarrollo que posee, muchas de esas ideas o métodos suponen también simplificaciones que, para los desafíos

actuales, pueden traducirse en un alto riesgo; es aquí donde el modelamiento numérico de los problemas a los que nos enfrentamos a diario se hace un lugar en esta disyuntiva teórico - práctica.

Los métodos numéricos en la geotecnia

Los métodos numéricos aparecieron como una alternativa de solución diferente a la de los métodos analíticos convencionales, como resultado de la problemática expuesta anteriormente y respaldados por el desarrollo informático (razón por la cual también pueden ser llamados métodos computacionales, aunque en estricto no se refieran a lo mismo). De hecho, mientras que un método analítico arroja una expresión obtenida como resultado de una serie de suposiciones sobre la base de un problema en particular, un método numérico engloba todas las variables involucradas en el problema y establece una solución a través de relaciones entre estas, lo cual permite obtener un número como resultado.

Entonces, la principal ventaja de estos métodos es que permiten modelar los problemas geotécnicos con un alto nivel de complejidad por diversos aspectos. En primer lugar, las propiedades mecánicas de los materiales involucrados pueden ser mejor representadas, debido a que este método de solución permite la utilización de modelos constitutivos más precisos, donde las relaciones entre los esfuerzos y las deformaciones reflejan con mayor exactitud lo que sucede en la realidad. En segundo lugar, es posible representar los procedimientos constructivos involucrados en el proyecto analizado gracias a este método; así es posible, asimismo, evaluar estados intermedios que pueden presentar comportamientos completamente diferentes al estado final del problema. Finalmente, se cuenta con la posibilidad de analizar problemas en un estado bidimensional o tridimensional de esfuerzos; este último es altamente recomendable en proyectos de gran envergadura y/o inversión.

Analicemos como ejemplo un proyecto de la estabilidad de un talud en un proyecto de construcción de una carretera (Plaxis B.V., 2010). La Figura 1 muestra la sección típica de este problema, en la que se ha proyectado un corte del talud a fin de construir una vía de doble sentido de 8 m de ancho.

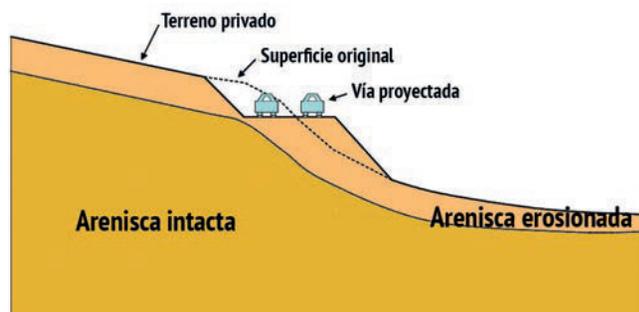


Figura 1.- Vista de sección de la vía construida (Fuente: Plaxis B.V., Curso de Geotecnia Computacional, Lima, PUCP. 2010)

La estabilidad de este talud podría ser determinada haciendo uso de una de las clásicas fórmulas de estabilidad de taludes. La sección puede simplificarse para tal fin y las propiedades pueden ser estimadas o determinadas a partir de correlaciones simples de algún ensayo en campo. ¿Pero qué sucedería si el problema ya no es tan simple?. ¿qué se podría hacer si, por ejemplo, aparecieran variaciones estacionales del nivel freático, si se propusiera algún sistema de estabilización del talud y se quisiera conocer los esfuerzos presentes en los componentes del mismo, o simplemente se quisiera calcular las deformaciones en el talud al final de un evento sísmico? Los métodos computacionales pueden resolver estos problemas sin necesidad de establecer un número grande de suposiciones, sin reducir la geometría a una configuración más simple y sobre todo, con la posibilidad de utilizar parámetros geotécnicos calibrados a partir de ensayos especiales en un laboratorio, a fin de que los resultados a ser obtenidos se encuentren más cercanos a los que realmente se presentarían en el proyecto.

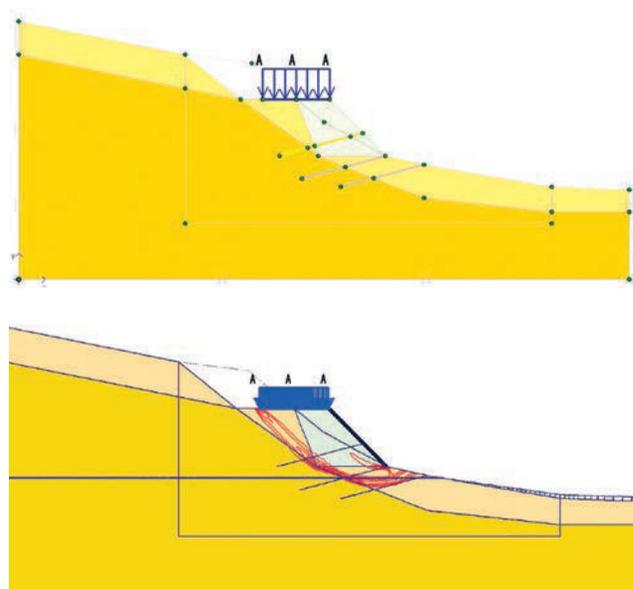


Figura 2.- Configuración del problema en Plaxis (izq.) y mecanismo de falla después de la construcción (der.) (Fuente: Plaxis B.V., Curso de Geotecnia Computacional, Lima, PUCP. 2010)

No solo los problemas de aplicación en ingeniería geotécnica se han visto beneficiados con este nuevo método de solución, sino que en la actualidad el método computacional se ha convertido también en una herramienta para la validación de diversos métodos analíticos en la mecánica de suelos y la ingeniería de cimentaciones. A modo de ejemplo, el autor de este artículo trabajó en la validación del método de Schmertmann para el cálculo de asentamientos de zapatas sobre suelos granulares. En 1978, Schmertmann postuló una metodología analítica de cálculo para obtener el asentamiento de zapatas sobre arenas, en la que, entre los diversos puntos a considerar en la solución, señaló que era necesaria la interpolación lineal de algunos factores involucrados en la fórmula de asentamiento en el caso de análisis para zapatas rectangulares. Diversos autores (Terzaghi et al., 1996; Lee et al., 2008) han señalado que

es necesaria una modificación a esta interpolación. El proyecto de este autor consistió en comparar los valores de asentamiento para 17 zapatas rectangulares, a fin de demostrar que la interpolación lineal restaba precisión al método. Para esto, fue utilizado el paquete geotécnico de *Plaxis*, software holandés de modelamiento numérico por el método de elementos finitos. Como resultado de esta investigación, se consiguió afirmar que es necesaria una reformulación de la interpolación, recomendándose un procedimiento logarítmico a partir de las curvas de variación de asentamiento respecto de la relación largo-ancho de la zapata.

Reseña del Autor
Roberto Cier es ingeniero civil egresado de la Pontificia Universidad Católica del Perú. Actualmente, se desempeña como ingeniero consultor del staff de Geotecnia de SRK Consulting (antes SVS Ingenieros), empresa consultora dedicada al diseño de ingeniería de obras civiles y de minería. Además, Roberto es pre-docente a tiempo parcial en la PUCP de los cursos del área de Geotecnia desde 2014 hasta la fecha.

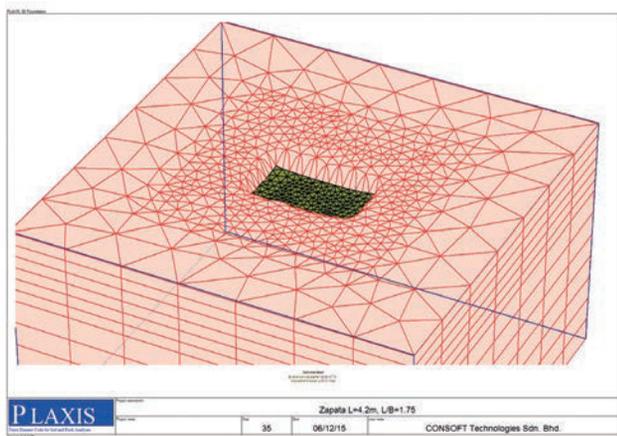
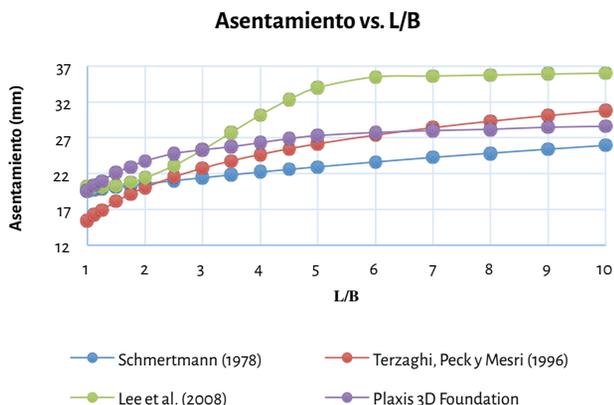


Figura 3.- Valores de asentamiento obtenidos por diversos métodos analíticos y por método computacional con *Plaxis 3D Foundation* (Fuente: Cier, R. "Procedimientos de interpolación en el cálculo de asentamientos sobre suelos granulares usando el método de Schmertmann", Tesis PUCP, 2015)

El futuro del modelamiento numérico en la geotecnia

El avance en los modelos de los materiales, la aparición de métodos numéricos más robustos, el incremento del poder de las computadoras, y de la velocidad de procesamiento y memoria interna, así como el entorno amigable de los paquetes geotécnicos computacionales son algunos de los puntos clave que han llevado al modelamiento numérico computacional a tener el avance que hoy en día presenta (Brinkgreve, 2012). No obstante, existe aún mucho camino por recorrer en el campo del modelamiento y con ello, nuevos riesgos y desafíos aparecen.

En primer lugar, todavía existe un marcado divorcio entre el conocimiento empírico y los métodos matemáticos complejos del modelamiento. Lombardi (2000) señala que uno de los males de la geotecnología actual era el fanatismo computacional; este problema tiene una explicación bastante simple: el conocimiento empírico, altamente difundido a través de la ingeniería civil en general, aún se muestra reacio a los nuevos desafíos que implican el uso de herramientas computacionales, ya que representan un cambio generacional importante. En este sentido, lo anterior ha generado que muchos de los diseños que se evalúan en los programas comerciales de geotecnia computacional sean manipulados con gente hábil, pero inexperta, lo que puede llevar a conclusiones erróneas, en muchos casos. Ahora bien, esto puede ser solucionado a partir de una concientización de los profesionales involucrados en el modelamiento, a fin de que tengan en cuenta la importancia del conocimiento del comportamiento real de los materiales, así como también de los ingenieros a cargo de los proyectos, con el objetivo de sacar el máximo provecho de herramientas tan potentes y útiles como lo son los métodos computacionales.

En segundo lugar, uno de los puntos en los que es imperativo el avance del conocimiento para un mejor provecho de las herramientas computacionales geotécnicas es en la caracterización de los suelos regionales, sobre todo en países con un bajo nivel de investigación y registro, tal como sucede con el Perú. Todos los programas computacionales que aparecieron en el mercado fueron creados con la finalidad inicial de resolver un problema en particular, para un único tipo de estructura y/o un solo tipo de suelo, por lo que todos los modelos constitutivos involucrados en él, las herramientas que posee y los resultados que arroja responden a necesidades que, muchas veces, no terminan de coincidir con nuestros requerimientos. Si bien ha existido un sinnúmero de esfuerzos por promover conferencias regionales de suelos, tales como la Conferencia de Suelos de América en el marco del Congreso Panamericano de Viña del Mar, Chile en 1991 (Rocca, 2009), el crecimiento de la geotecnia computacional aún se ve en la necesidad de promover nuevos esfuerzos por establecer un trabajo conjunto, el cual ayude a construir una base de datos con información de campo necesaria y suficiente para una correcta estimación de parámetros geotécnicos.

Finalmente, el futuro del modelamiento geotécnico apunta a que estos modelos puedan reflejar, en algún momento, el comportamiento de los suelos y las rocas de la manera más real posible. Esto va más allá de los modelos constitutivos complejos que puedan ser usados: implica un cambio en la forma en la que es analizado el comportamiento mecánico del suelo. Entonces, el objetivo principal de los desarrolladores de paquetes computacionales geotécnicos es conseguir que el suelo se comporte como un medio continuo o

como un conjunto de partículas independientes entre sí, dependiendo de las condiciones del problema en análisis. Este representaría el mayor logro de la geotecnia computacional; no obstante, depende de sobremanera de los avances tecnológicos e informáticos, ya que involucra formulaciones matemáticas extremadamente avanzadas. Sin embargo, de lograrse, esto significaría un avance sustancial en los métodos de resolución de problemas geotécnicos y, en general, una especie de salto evolutivo en la ingeniería geotécnica.

Conclusiones y comentarios

A lo largo de la historia de esta rama de la ingeniería civil, el modelamiento computacional en geotecnia se ha ido convirtiendo en una poderosa herramienta que ha permitido resolver problemas de gran envergadura, simular procesos constructivos y poder predecir el comportamiento de los materiales involucrados durante el desarrollo de los proyectos. Además de ello, los métodos computacionales están ayudando a validar los diversos métodos analíticos desarrollados en la mecánica de suelos. El futuro en este método de solución tiene aún mucho camino por delante; existe un sinnúmero de desafíos por resolver y todo indica que, mientras el avance tecnológico sea tan acelerado como lo es hoy en día, pronto los modelos computacionales podrán reproducir con mucha mayor exactitud los fenómenos de los suelos y las rocas. Hasta entonces, nuestra tarea debe enfocarse en recolectar la mayor información geotécnica acerca de las condiciones de los suelos nacionales, a fin de generar una base de datos que alimente con suficiencia las exigencias de información requeridas por los modelos constitutivos de los materiales.

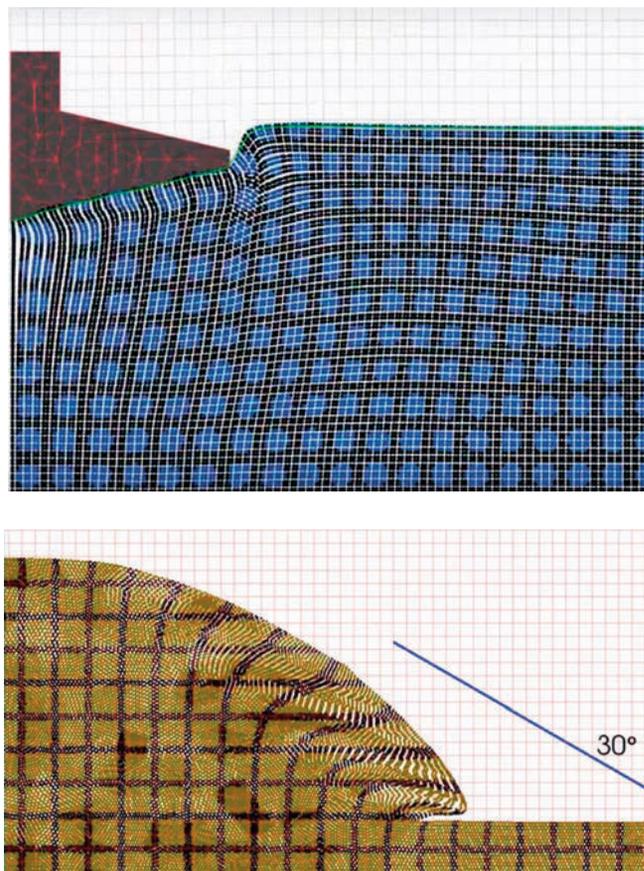


Figura 4.- Modelos numéricos que se esperan desarrollar en el futuro (Fuente: Plaxis B.V., "The Evolution of Plaxis 2D", 2014)

REFERENCIAS

- » Brinkgreve, R. B. (2012, March). The future of the finite element method in geotechnics. En *Geoteknik fran stort till smatt: Grundlaggningsdagen 2012, Stockholm, Sweden, 8 March 2012*. Svenska Geotekniska Foreningen.
- » Cier, R. (2015). "Procedimientos de interpolación para el cálculo de asentamientos sobre suelos granulares usando el método de Schemmrtmann". Tesis para optar por el título de Ingeniero Civil. Lima, Perú.
- » Lee, J., Eun, J., Prezzi, M., & Salgado, R. (2008). Strain influence diagrams for settlement estimation of both isolated and multiple footings in sand. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 134(4), 417-427.
- » Lombardi, G. (2000). "Los problemas actuales de la geo-ingeniería", Discurso del 22 Nov. 2000, Academia Nacional de Ingeniería, Buenos Aires, Argentina.
- » Peck, R.B. (1969). "Advantages and Limitations of the Observational Method in Applied Soil Mechanics", 9th Rankine Lecture, *Geotechnique*, Vol. 19, pp. 171-187.
- » Plaxis B.V. (2010). "Slope stability for a road construction project". Curso de Geotecnia Computacional. Lima, Perú, 12 a 15 de Julio de 2010.
- » Plaxis B.V. (2014). The Evolution of PLAXIS 2D. Junio, 2016. Referencia: <https://www.youtube.com/watch?v=eyRWI6Kbyys>
- » Terzaghi, K. (1936). Limitaciones y objetivos de la mecánica de suelos. Conferencia inaugural del Primer Congreso Internacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Cimentaciones. Harvard, EE.UU., junio de 1936.
- » Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G. (1996). *Soil mechanics in engineering practice*. John Wiley & Sons.
- » Rocca, R. J. (2009). La evolución a largo plazo de la ingeniería geotécnica. *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*. Vol. 9.