

LA MATEMÁTICA Y LA ENSEÑANZA DE LA GEOTECNIA

Alejo O. Sfriso

Rivadavia 755 2° 10° - C1002AAF – Buenos Aires – Argentina. mailto: asfriso@members.asce.org

RESUMEN

Los estudiantes de ingeniería necesitan más matemática que la que aprendió nuestra generación (nacidos en los '60) y las anteriores. Entre otras, las razones son: la capacidad de aprendizaje crece con la complejidad del lenguaje que se domina; los métodos electrónicos de cálculo desplazan progresiva e irreversiblemente a las técnicas manuales; y la orientación que están tomando los programas de estudio de las universidades americanas. De acuerdo con esta tendencia, los cursos de geotecnia deben profundizar el estudio de las propiedades de los materiales y su modelización, resignando algo del tiempo que se dedica a la enseñanza de las técnicas analíticas y gráficas de diseño. Pero, para hacer este cambio en la enseñanza de la geotecnia, se necesita que profesores y alumnos sepan más matemática.

PALABRAS CLAVE: matemática aplicada, enseñanza, ecuaciones constitutivas.

ABSTRACT

Engineering students need more math than what our generation (from the '60s) and former ones learned. Among others, arguments are: the ease of learning grows with the complexity of the language used; electronic design tools replace progressively and irreversibly the by-hand design methods; and the guidelines being followed by american universities. According to this tendency, courses in geotechnics should emphasize the study and modeling of material behavior, reducing part of the time dedicated to the analytic design techniques. But, to enforce this change in the teaching of geotechnics, it is required that both teachers and students know more math.

KEYWORDS: applied math, teaching, constitutive equations.

INTRODUCCIÓN

Durante el segundo semestre del 2002 se desarrolló un seminario sobre Resistencia de Materiales en la Universidad de La Plata. El impulsor, coordinador y primer expositor fue Luis Lima, especialista en estructuras de hormigón, profesor y ex-presidente de la Universidad. En una de las presentaciones, el autor habló sobre ecuaciones constitutivas y métodos numéricos de cálculo en geotecnia. La exposición terminó con el planteo de la necesidad de mejorar la matemática que se enseña en las carreras de ingeniería (Sfriso 2002).

Previsiblemente, no hubo preguntas acerca de métodos numéricos ni ecuaciones constitutivas, pero sí hubo una viva discusión acerca de cuanta matemática necesita un ingeniero. Un año después E. Núñez expuso sobre el mismo asunto en una mesa redonda denominada "¿Cuanta matemática tienen que estudiar los estudiantes de ingeniería?" (Núñez 2003). El obvio interés que despertó el tema, junto con la oportunidad de discutir la cuestión con muchos de los profesores de geotecnia de la nación, son las razones que llevaron al autor a presentar este trabajo. En los párrafos que siguen se ofrecen algunos argumentos que respaldan la tesis de que los estudiantes de ingeniería necesitan más matemática.

LAS SAGRADAS ESCRITURAS

En el prólogo de la primera edición de su *Mecánica de Suelos en la Ingeniería Práctica*, Terzaghi (Terzaghi 1943, 1996) escribió:

“Desafortunadamente las actividades de investigación en mecánica de suelos... distrajeron la atención de muchos investigadores y docentes de las múltiples limitaciones impuestas por la naturaleza a la aplicación de la matemática a los problemas de ingeniería de tierras... En la inmensa mayoría de los casos no se necesita más que una predicción grosera, y si dicha predicción no puede ser realizada con medios simples, no puede ser realizada en absoluto”.

Como en toda disciplina científica, su texto fundacional evoluciona con el tiempo y las nuevas interpretaciones. En su tercera edición, Peck incluyó el párrafo de Terzaghi, y comentó:

“En el medio siglo que transcurrió desde que se escribieron estas palabras, la investigación sobre muestreo y ensayo (de suelos) ha permanecido inalterada, y se ha acumulado una vasta literatura referida a las propiedades de los suelos... Durante ese tiempo, avances considerables en los procedimientos electrónicos de cálculo han posibilitado predicciones teóricas para problemas complejos... Por lo tanto, hoy puede no ser cierto que si una predicción no puede ser realizada con medios simples, no puede ser realizada en absoluto. Como contrapartida de este progreso, es cada vez más importante que la elección de las propiedades de los suelos usadas en el análisis esté basada en un conocimiento fundamentalmente correcto del comportamiento de los suelos”.

Con estas afirmaciones, Peck reconoció que el campo de investigación más fértil se trasladó desde las herramientas simples de predicción grosera hacia el estudio de las propiedades de los materiales y su modelización. Interpretando el texto sagrado y a su primer apóstol, se postula que la enseñanza de la geotecnia en la Argentina también debe adaptarse a este progreso. Pero para poder hacerlo, es necesario que profesores y alumnos conozcan el lenguaje con el que se operan los medios electrónicos de cálculo.

Núñez (Núñez 2003) escribió:

“El ingeniero debe educar su capacidad de abstracción de los fenómenos del mundo físico y el instrumento para este proceso es la matemática... A su vez, hay que diversificar el grado de preparación para este ejercicio, porque lo mismo ocurre en el espacio de las realizaciones humanas, en donde el mejor dominio de un idioma permite mayor precisión en la expresión y agudeza de razonamiento, pero no es posible que el buen uso de un lenguaje obligue a cada uno a convertirse en filólogo. También entre los ingenieros no puede exigirse, ni es conveniente, obligar a todos aquellos con capacidad inventiva y de realización, con imaginación creativa y disciplina para la organización de empresas colectivas, al estudio y dominio de las abstracciones más avanzadas del mundo de las matemáticas... solamente con una rigurosa formación matemática nuestros ingenieros podrán participar en el seguimiento del desarrollo de las ingenierías, y en la creación misma de la ingeniería. Y tratando, en todo lo posible, alcanzar la formación que les permita participar en la solución científica y tecnológica de los problemas del mundo moderno, el cual, sin este soporte, no puede sustentarse ni ampliarse”.

Cierra su exposición con la propuesta de que la enseñanza directa de las matemáticas abarque 832 horas – aula, aproximadamente el 22% del total de horas – aula de un estudiante de ingeniería en la UBA (estas horas no incluyen clases de consulta y corrección de ejercicios).

SE DEBE CONOCER EL LENGUAJE MÁS POTENTE DISPONIBLE

Si se domina un lenguaje potente, la capacidad de abstracción crece y el tiempo que se requiere para aprender un concepto nuevo disminuye notoriamente. Sea, por ejemplo, la ley de atracción gravitacional: *“La fuerza que atrae a dos puntos materiales entre sí es proporcional a sus masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que los separa”.* Dicha con palabras no se entiende ni se puede utilizar. Su expresión matemática es

$$\vec{F}_2 = -\vec{F}_1 = K m_1 m_2 \frac{\vec{X}_1 - \vec{X}_2}{\|\vec{X}_1 - \vec{X}_2\|^3} \quad (1)$$

que luce algo complicada, aunque se refiere únicamente a dos puntos materiales. ¿Cómo se predice el movimiento de todos los cuerpos celestes de un sistema de cientos de puntos materiales? Se entran de una vez y para siempre las coordenadas de cada punto en una tabla, las masas en otra, y que una computadora haga todo lo demás. La expresión queda

$$\underline{\underline{X}} = \begin{Bmatrix} x_1 & \dots & x_n \\ y_1 & \dots & y_n \end{Bmatrix} \quad \underline{\underline{M}} = \{m_1 \quad \dots \quad m_n\} \quad \vec{F}_{ij} = K M_i M_j \frac{\{X_{1,j} - X_{1,i}, X_{2,j} - X_{2,i}\}}{\|\{X_{1,j} - X_{1,i}, X_{2,j} - X_{2,i}\}\|^3} \quad (2)$$

comprensible si se domina el álgebra matricial. La matemática que conoce hoy un alumno medio le permite entender la Ley de Atracción luego de algunas horas de estudio, pero no le permite implementarla en una computadora de manera eficaz. Si maneja una matemática más potente, asimilará el concepto físico con mayor facilidad, y podrá hacerlo operativo.

LA ENSEÑANZA DE LAS PROPIEDADES DE LOS MATERIALES

Sea el siguiente ejercicio intelectual: el mejor alumno de la Argentina tiene que proyectar un pilote de 10 m de largo con la figura 1 en la mano (Lee, 1967). Lo que aprendió es que

$$\sigma_3 = K_0 \gamma Z = 0.4 \cdot 20 \text{ KN} / \text{m}^3 \cdot 10 \text{ m} = 80 \text{ KPa} < 100 \text{ KPa} \rightarrow N_\phi = 5.6 \rightarrow \phi = 44^\circ \quad (3)$$

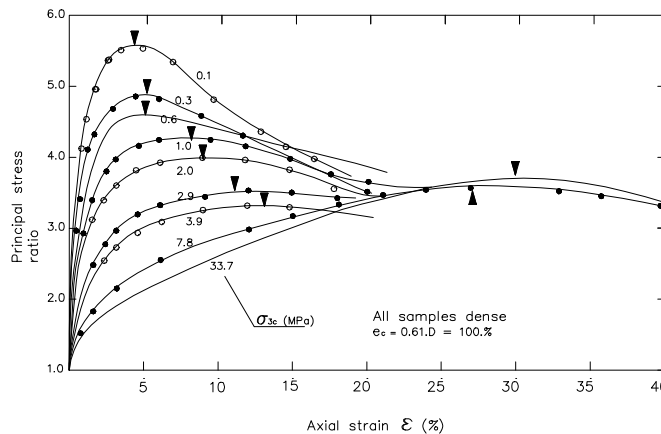


Figura 1: Ensayos triaxiales sobre muestras densas de arena del Río Sacramento.

Obtiene una capacidad de carga por la punta del orden de los 50 MPa. Esto ocurre porque se han invertido al menos dos clases en enseñarle la fórmula de Brinch – Hansen (Brinch Hansen 1961) pero no se le ha enseñado adecuadamente el significado de ϕ en la punta de un pilote, ni el efecto de la presión media sobre la resistencia de pico de una arena.

El acceso a programas de elementos finitos no mejora el problema. ϕ es dato de entrada. Si usa $\phi = 44^\circ$, sobreestima groseramente la capacidad de la punta. Si usa $\phi = 32^\circ$, el ángulo de fricción interna crítica, subestima la resistencia por fricción. Por lo tanto, un joven geotécnico que deba entenderse con una computadora durante toda su vida necesita:

- Conocer los métodos numéricos en el nivel de usuario: cómo fueron pensados, cuáles son sus alcances y limitaciones. Para eso necesita más matemática.
- Conocer algunas ecuaciones constitutivas en el nivel de usuario: para qué materiales fueron desarrolladas, qué cosas pueden predecir y cómo se comportan en un cálculo numérico. Para eso necesita estudiar más las propiedades de los materiales y su modelización.
- Tener una adecuada idea del resultado que debe obtenerse. Eso se logra haciendo unos cuantos ejercicios didácticos de empujes, capacidad de carga y estabilidad de taludes. Son ejercicios didácticos, ¡no el objeto de la asignatura!

Si tiene estos conocimientos, sabrá que la elección de ϕ requiere de algunos cuidados y que depende del método de cálculo que use. Sabrá que en caso del pilote al menos debe dividir la malla en dos, e introducir dos ángulos de fricción diferentes para la misma arena.

En la figura 2 se muestran los modos de falla de una escollera. El programa utilizado no implementa las fórmulas de Terzaghi, Brinch Hansen o Bishop, sino que aplica directamente las teorías de la elasticidad y plasticidad que sirvieron de base para el desarrollo de aquellas expresiones. Un candidato a usuario de un programa como éste debe conocer las bases de su funcionamiento, más que algunos de los resultados que con él pueden obtenerse.

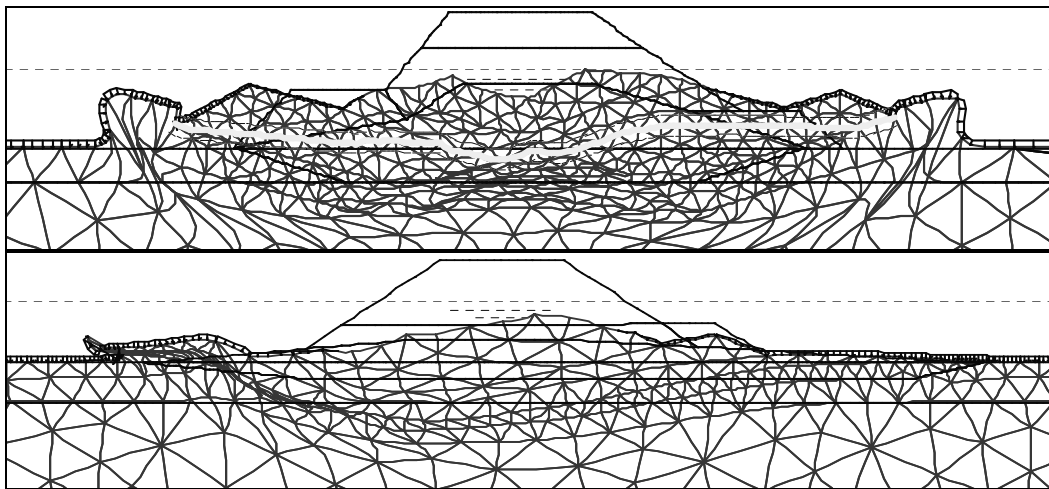


Figura 2: Falla por capacidad de carga y por estabilidad de talud de una escollera.

SE DEBE COPIAR A LOS MEJORES

Cuatro clases sobre teoría de la plasticidad permiten que un alumno comprenda cabalmente el concepto de líneas características, y que aplique sobre ellas fuerzas actuantes con dirección o magnitud conocidas. Las líneas características son:

- Las bandas de corte que aparecen en un ensayo triaxial.
- La línea recta que limita el triángulo de Coulomb.
- La espiral logarítmica de Terzaghi.
- La figura de rotura que siempre acompaña a las fórmulas de capacidad de carga. En realidad, a todas las “líneas de rotura”, aún las de las losas de hormigón.

Luego de las cuatro clases sobre plasticidad, el empuje de suelos, la estabilidad de taludes y la capacidad de carga pueden ser ejercicios de una misma guía de trabajos prácticos. ¡Son casi el mismo problema!

Si conocen suficiente matemática, los alumnos de Argentina podrán disponer de una lista de materias relacionadas con la geotecnia como la de Universidad de Illinois en Urbana Champaign, donde enseñó Peck:

Grado de bachiller (primeros cuatro años): *Comportamiento de los materiales – Introducción a la mecánica de suelos e ingeniería de fundaciones – Ingeniería geotécnica – Modelización en ingeniería con incertidumbre – Mecánica de suelos y comportamiento de los suelos – Mecánica de suelos aplicada – Métodos computacionales en ingeniería civil.*

Grado de maestro (siguientes dos años): *Método de los elementos finitos en mecánica del sólido y estructural – Ingeniería sísmica – Presión de tierras y estructuras de sostenimiento – Presas de tierra y problemas relacionados – Análisis avanzado de la consolidación de arcillas – Análisis avanzado de la resistencia al corte de los suelos – Ingeniería de fundaciones – Comportamiento y diseño de fundaciones profundas – Mecánica de rocas, I – Mecánica de rocas, II – Ingeniería sísmica geotécnica y dinámica de suelos.*

CONCLUSIONES

La enseñanza de matemáticas en ingeniería debe ser más profunda que la que hasta hoy se imparte. Con una matemática más sólida, el tiempo medio de aprendizaje de conceptos técnicos disminuye, lo que permite acortar las carreras y simultáneamente incrementar la capacidad científica y operativa de los egresados.

Con un mejor lenguaje para la comunicación entre profesores y alumnos, la geotecnia puede concentrarse en el estudio teórico y experimental de las propiedades de los materiales y en su modelización. Los métodos de cálculo analíticos, que hoy constituyen el núcleo de las “geotecnias” pueden pasar parcialmente al plano de ejemplos didácticos.

La implementación de estos conceptos demorará más de diez años. Requerirá del entrenamiento de profesores y del cambio de algunos programas. Parece imposible pero, viendo que otros ya lo han hecho, parece también la única manera de que los alumnos del futuro puedan seguir yendo a sus postgrados en el extranjero, sigan siendo considerados estudiantes de primera categoría, y puedan leer las revistas especializadas con relativa fluidez.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- BRINCH HANSEN, 1961. A general formula for bearing capacity. Bulletin 11, Danish Geotechnical Institute.
- LEE, K. y H. B. SEED, 1967. Drained strength characteristics of sands. Journal of SMFD, ASCE, SM6, 117-148.
- NÚÑEZ, E. 2003. ¿Cuanta matemática tienen que estudiar los estudiantes de ingeniería?. En: II Congreso Internacional de Matemáticas Aplicadas a la Ingeniería y Enseñanza de la Matemática en Ingeniería IN-MAT 2003, Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires.
- SFRISO, A., 2002. La resistencia de materiales del futuro, ¿Ejercicios didácticos?. En: Seminario sobre resistencia de materiales, FI, UNLP. www.unlp.edu.ar.
- TERZAGHI, K., R. PECK Y G. MESRI, 1996. Soil mechanics in engineering practice. Wiley, 496 p, New York.
- UIUC, DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL, 2002. Programas de curso de grado y posgrado en ingeniería civil. En: <http://cee.uiuc.edu>.