

## HACIA LA INTEGRALIDAD DE LA ENSEÑANZA Y LA PRÁCTICA PROFESIONAL EN GEOTECNIA\*

*Jorge Alberto Rodríguez Ordóñez\**

**Resumen:** la práctica profesional de la geotecnia requiere afrontar, hoy en día, el reto de dar soluciones prácticas y seguras a problemas que representan cada día mayor dificultad técnica, con recursos cada vez menores. Esto demanda de la ingeniería soluciones cada vez mejores y más efectivas. Los profesionales que se forman deben competir internacionalmente, pero el tiempo para su formación es cada vez menor; por lo tanto, en la enseñanza de la geotecnia es necesario optimizar los recursos. Como alternativa para superar estos retos se plantea un enfoque que gira alrededor del principio unificador de la formulación matemática precisa de la mecánica y la solución, con métodos modernos de los problemas objeto de estudio de la geotecnia. Esto está complementado con un entendimiento integral y, cada día, mejor del comportamiento mecánico de los materiales térreos de nuestro país. Se presentan ejemplos, en el ámbito de la práctica geotécnica en Bogotá, de oportunidades para la aplicación de este enfoque.

**Palabras clave:** práctica de la geotecnia, enseñanza de la geotecnia, Colombia.

**Abstract:** The practice of today's geotechnical engineering faces the challenge of providing practical solutions to problems with ever increasing technical difficulty, with every time more restricted financial resources. This requires better and effective engineering. The professionals have to be prepared for an international market, but the time for its basic formations is being reduced. Therefore there is a need for optimizing the resources applied to the formation of the new professionals. As an alternative to these challenges, an approach based on the integration of the disciplines of geotechnical engineering is presented. This approach is based on a sound mathematical formulation of the mechanics of the geotechnical problems to be solved by modern techniques. This is complemented by an increasingly profound and integrated knowledge of the earth materials in our country. Examples

---

\* *Fecha de recepción: 2 de noviembre de 2004. Fecha de aceptación para publicación: 27 de noviembre de 2004.*

\*\* *Ingeniero civil, Universidad Nacional de Colombia, Master of Science in Civil Engineering, University of North Carolina, Phd in Civil Engineering, North Carolina State University. Profesor asociado, Departamento de Ingeniería civil, Pontificia Universidad Javeriana. Correo electrónico: rodriguezja@javeriana.edu.co.*

of opportunities for the application of this approach in the geotechnical engineering practice in Bogotá are presented.

**Key words:** Geotechnical practice, geotechnical teaching, Colombia

## 1. INTRODUCCIÓN

Las condiciones económicas y políticas nos llevan hacia la integración multinacional y esto implica una alta competitividad profesional. El desarrollo de la práctica de la ingeniería, en este entorno, requiere de mucha eficiencia y una preparación consecuente. Uno de los retos de nuestra ingeniería civil es el desarrollo de la infraestructura de sistemas productivos, de transporte y servicios, lo cual tiene un importante componente de tipo geotécnico, especialmente en un ámbito geológico, tectónico y ambiental tan difícil como el de Colombia. Esta situación va a determinar, decididamente, el enfoque de la preparación básica de profesionales y la educación continua de los profesionales en ejercicio. La tendencia hacia carreras más cortas de formación básica y el énfasis en los programas de postgrado requieren un planteamiento cuidadoso y efectivo de las estrategias de formación para que los programas sean competitivos y eficientes en el logro de sus objetivos.

En el ámbito local, las condiciones de suelos y materiales térreos en el área de la sabana de Bogotá presentan retos especiales para su uso en obras civiles. Los suelos blandos de la sabana son altamente compresibles, de baja resistencia y muy susceptibles a cambios de humedad. Los materiales de préstamo, a su vez, son rocas de relativa baja resistencia y durabilidad. Estas condiciones hacen que los problemas *geotécnicos*, entendidos como el ejercicio de la ingeniería civil aplicada a problemas relacionados con suelos o rocas, sean de especial dificultad y trascendencia en la ciudad.

Frente a los retos que se plantean para la práctica de la geotecnia en Colombia es necesario evaluar la práctica actual y el enfoque de los programas de formación, con el fin de identificar necesidades y oportunidades de mejoramiento en cuanto a eficiencia y adecuación a los requerimientos del país. El presente artículo pretende hacer una reflexión en este sentido y un planteamiento con respecto al enfoque que se puede dar a la práctica de la geotecnia para afrontar los retos del momento. Se presentan consideraciones sobre la formación de los ingenieros geotecnistas y la práctica actual de la geotecnia en el ámbito de Bogotá. Luego, se presenta el enfoque propuesto, se ilustra con aplicaciones al caso de nuestro medio y se presentan las conclusiones que se derivan de este ejercicio.

## 2. MARCO DE REFERENCIA INTERNACIONAL

El marco de referencia internacional más relevante para nuestro medio es el de la práctica estadounidense, pues, además de su cercana influencia, es la que tiende, sobre todo a corto plazo, a determinar nues-

tro entorno debido a los procesos de apertura comercial y de globalización actuales.

La Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (ASCE) ha sido consciente de que las condiciones del mundo moderno representan un desafío fundamental a la forma como se practica la ingeniería civil. Esto se debe al aumento de complejidad de los proyectos con múltiples intereses y actores y a la necesidad de ser competitivos con el mínimo impacto ambiental y social. Por esta razón, la ASCE ha venido estudiando la necesidad de efectuar cambios tanto en la formación como en la práctica profesional.

Los resultados de este trabajo fueron condensados en un informe sobre la manera como la ASCE percibe la preparación en ingeniería civil para afrontar los nuevos retos [ASCE, 2001]. Una de las conclusiones de este estudio es que el programa de cuatro años de formación actual en los Estados Unidos es inadecuado para la preparación y la práctica de la ingeniería civil en el siglo XXI. Como resultado de esta conclusión, la ASCE estableció, en noviembre de 2001, la política 465, con la que soporta el concepto del requisito de formación de maestría o equivalente para otorgar la licencia profesional para la práctica de la ingeniería civil. Además, se designó un comité para definir los requisitos de conocimiento básico (*Body of Knowledge*, BOK) necesarios para la práctica de la ingeniería civil en el siglo XXI. Dicho comité analizó los contextos de *qué* se debe enseñar y saber, *cómo* se debe enseñar y aprender y *quién* lo debe enseñar y aprender [ASCE, 2004].

Acerca de qué se debe enseñar, los once primeros aspectos de los quince contenidos en el BOK coinciden con los requeridos por el Comité Nacional de Acreditación en Ingeniería y Tecnología (ABET). Estos 15 aspectos, sobre lo que se debe enseñar, son los siguientes:

1. La habilidad de aplicar conocimientos en matemáticas, ciencia e ingeniería.
2. La habilidad de diseñar y llevar a cabo experimentos, así como de analizar e interpretar información.
3. La habilidad de diseñar un sistema, componente o proceso para satisfacer necesidades.
4. La habilidad de funcionar en equipos multidisciplinarios.
5. La habilidad de identificar, formular y resolver problemas de ingeniería.
6. Un entendimiento de la ética y la responsabilidad profesional.
7. La habilidad de comunicarse efectivamente.
8. Una educación de amplio contexto que permita entender el impacto de las obras de ingeniería en un contexto social y global.
9. El reconocimiento de la necesidad de mantenerse en un proceso permanente de capacitación a lo largo de toda la vida profesional.
10. Un conocimiento de la realidad contemporánea.
11. La habilidad para entender técnicas, habilidades y herramientas modernas necesarias para la práctica de la ingeniería.

12. La habilidad de aplicar conocimiento en un área especializada relacionada con la ingeniería civil.
13. Un entendimiento de los procesos de manejo de proyectos, construcción y manejo de activos.
14. Un entendimiento de los negocios, políticas oficiales y fundamentos de administración.
15. Un entendimiento de las funciones, así como principios y actitudes de liderazgo.

Acerca del cómo enseñar, la ASCE reafirma la necesidad de que la formación de pregrado esté seguida por la formación de postgrado, por actividades permanentes de educación continua u otras actividades extracurriculares, así como de la experiencia profesional como requisitos para otorgar y mantener la licencia profesional.

Con respecto a quiénes deben enseñar, señala cuatro aspectos fundamentales de éxito que deben describir a los profesores de ingeniería civil. Éstos deben ser académicos que se preocupen por adquirir y mantener un alto nivel de conocimiento en los temas a su cargo, lo cual requiere de un proceso continuo de capacitación y crecimiento profesional. Por otra parte se requiere que sean profesores efectivos, es decir, que sean capaces de comprometer efectivamente a los estudiantes en el proceso de aprendizaje. Este aspecto se considera crítico para el futuro de la profesión. Los profesores de ingeniería deben, además, tener experiencia práctica en los temas que enseñan y ser modelos positivos del papel del ingeniero. Quienes enseñan deben estar conscientes de que son vistos como modelos por los estudiantes, por ello la imagen que ellos proyecten de la profesión será determinante para el carácter de los nuevos ingenieros.

El desarrollo de la ingeniería civil en Norteamérica está determinado por el liderazgo y el poder de gestión de la ASCE. Esta influencia será determinante, a mediano plazo, para el desarrollo y la competitividad de la profesión en nuestro medio. Los aspectos que se han identificado se deben tomar como aspectos estratégicos básicos para la formación y la práctica de los profesionales en Colombia. Del diagnóstico y de las recomendaciones de la ASCE se deduce la necesidad de la formación integral moderna y competitiva para lograr un adecuado desarrollo profesional. La propuesta que se discute a continuación está enmarcada en este contexto y pretende, desde la perspectiva de la geotecnia, aportar al desarrollo que requiere el país en este campo.

### 3. CONSIDERACIONES SOBRE LA ENSEÑANZA ACTUAL DE LA GEOTECNIA

Todos los programas de ingeniería civil contienen una serie de materias en el área de la geotecnia. Éstos usualmente comienzan con unas bases de geología, mecánica de suelos básica y laboratorio, seguidas por varias materias de aplicación tales como diseño de cimentaciones,

estructuras de contención, estabilidad de taludes y pavimentos, aunque muchas veces no es clara la relación directa que hay entre la geotecnia tradicional y los pavimentos. Posteriormente, en los programas de postgrado se retoman temas básicos como mecánica del continuo, mecánica de rocas y dinámica de suelos. En ocasiones éstas se ofrecen en los programas de pregrado, a través de materias electivas, o también en programas de especialización. En los programas de maestría se abordan de nuevo los temas con mayor profundidad, especialmente en aspectos de aplicación específica, pero sin una conexión clara con la práctica y el diseño.

La secuencia parece lógica si se plantea una fundamentación básica seguida de materias de aplicación. Sin embargo, al estudiar en detalle los programas de varias universidades nacionales y extranjeras se encuentran varias áreas en las que se pueden introducir mejoras. Éstas se refieren a la repetición de temas en diferentes materias, al tratamiento de temas básicos a diferentes niveles, a la falta de integración de los conceptos básicos de la mecánica, al comportamiento de materiales y las técnicas para la solución de estos problemas en las diferentes materias, a la falta de integración de los conceptos de diferentes problemas físicos que ocurren de manera concurrente, a la falta de claridad de las relaciones entre los resultados de observaciones empíricas con los modelos matemáticos que se pueden hacer y, finalmente, a la falta de integración de los conceptos teóricos y analíticos con el diseño y la construcción.

Por ejemplo, en los programas de las materias es normal encontrar que muchos temas se cubren parcialmente en diferentes cursos: en mecánica de suelos se cubren temas como soluciones elásticas, incrementos de esfuerzos y cálculo de esfuerzos y deformaciones que luego se tratan de nuevo en cursos de diseño de cimentaciones; lo mismo ocurre con el cálculo de asentamientos por consolidación. Por otra parte, los temas de esfuerzos laterales en suelos se tratan, usualmente, en el curso de mecánica de suelos, de fundaciones, de estructuras de contención y de estabilidad de taludes, pero en ninguno se le da un tratamiento conceptualmente claro ni se estudia el problema desde el punto de vista mecánico de manera profunda. Con respecto a la integración de conceptos, usualmente se tratan los temas de comportamiento al corte y de compresibilidad volumétrica de los suelos de manera independiente. Lo mismo ocurre con respecto al comportamiento en condiciones drenadas, no drenadas, consolidación y flujo que tienden a tratarse como cuatro temas separados cuando físicamente son inseparables. Los temas de comportamiento bajo cargas dinámicas son igualmente tratados de manera independiente del comportamiento bajo cargas monotónicas. De hecho, el mismo problema físico se trata de manera independiente en diferentes aplicaciones, como es el caso del comportamiento de los pavimentos, de la respuesta dinámica de depósitos durante sismos y de la dinámica de cimentaciones, todos los cuales se rigen por las mismas ecuaciones de la dinámica.

Esta falta de integración en los conceptos hace que los ingenieros no tengan claro el comportamiento de los materiales térreos, lo cual se traduce de manera, no pocas veces, desastrosa en los resultados de las obras. Por otra parte, las propiedades mecánicas de los materiales se determinan de diferentes maneras para diferentes aplicaciones lo que hace que no se aproveche la información disponible de diferentes ensayos para otras aplicaciones. En las aulas se pierde tiempo tratando los mismos temas muchas veces pero sin lograr su tratamiento claro y profundo.

Finalmente, se debe decir que los programas de los cursos básicos se han mantenido prácticamente inmodificados durante los últimos treinta años o más y que, actualmente, son muy similares a como fueron diseñados por los padres de la disciplina [Taylor, 1948]; [Terzaghi, 1943]; [Terzaghi y Peck, 1948]; [Lambe y Whitman, 1969]. Los libros de referencia en los cursos básicos siguen siendo los mismos y no hay, ni siquiera internacionalmente, textos básicos recientes y con enfoques más integrales. De hecho la tercera edición del libro de Terzaghi, Peck y Mesri [1996], si bien presenta una importante actualización del conocimiento básico del tema, mantiene la misma estructura y organización de los temas que tenía la edición original.

En los últimos veinte años ha habido un fuerte desarrollo de las aplicaciones de la mecánica a la geotecnia en términos de avances para la formulación de modelos constitutivos que representan el comportamiento de los suelos y su solución por medio de métodos numéricos teniendo en cuenta el acople con los problemas de flujo, deformación y resistencia para condiciones estáticas y dinámicas. Sin embargo, estos desarrollos sólo se han considerado en estudios de postgrado para los cuales los estudiantes usualmente llegan mal preparados. Estos enfoques son los que se están aplicando en países desarrollados para el análisis y el diseño. Esta situación evidencia un alto grado de obsolescencia en el conocimiento básico que se imparte en la geotecnia.

Finalmente, existe una brecha entre la realidad de la práctica y el enfoque que se utiliza en la enseñanza en cuanto a la formulación de los problemas y los ejercicios que se plantean a los estudiantes. Esto ha sido reconocido como una limitación de la enseñanza de la ingeniería y existen varias propuestas y programas, a manera de prueba, en los que se está buscando que los estudiantes se vean expuestos al análisis de casos reales incluyendo la caracterización de materiales, la selección de parámetros, la formulación de los problemas y, finalmente, su análisis para poder hacer diseños de ingeniería. Usualmente, en los casos de estudio que se les plantean a los estudiantes se parte de la base de que el problema ya ha sido formulado y se dan los parámetros relevantes. El estudiante sólo necesita aplicar modelos o fórmulas circunscritos al tema de estudio en el momento, pero sin cubrir los aspectos fundamentales de identificación y formulación del problema y caracterización de los materiales [Vick, 2002]. Estos aspectos son, justamente, los más importantes para una práctica exitosa de la ingeniería. La inadecuada preparación de los estudiantes en esta área puede tener graves consecuencias en la práctica al no poder identificar éstos los aspectos verdaderamente rele-

vantes de los problemas. Por lo tanto, para cerrar la brecha entre la práctica y la enseñanza es necesario incorporar en los cursos el estudio de casos reales, el análisis que lleva al diagnóstico de los problemas, su idealización para la modelación y cálculo y la caracterización de los parámetros con base en información real.

Las situaciones planteadas ponen de manifiesto la necesidad de una reorganización de los programas, particularmente en el pregrado, de manera que se puedan integrar y unificar los conceptos básicos de la mecánica relevantes en diferentes aplicaciones, así como el uso de los resultados reales de los ensayos para la caracterización de los materiales.

#### 4. CONSIDERACIONES SOBRE LA PRÁCTICA ACTUAL DE LA GEOTECNIA EN BOGOTÁ

Los problemas geotécnicos de mayor relevancia en la ciudad están relacionados, principalmente, con las cimentaciones, excavaciones, pavimentos y problemas de estabilidad de taludes. Estas condiciones hacen que el diseño de estas obras sea difícil y de alto riesgo como se ha podido observar en las recientes fallas presentadas en grandes obras como los pavimentos del sistema de Transmilenio o el eje ambiental de la calle 13, entre otros, y, tradicionalmente, en problemas tales como el asentamiento de edificios y las fallas de excavaciones de los cuales se podrían enumerar incontables casos.

Con respecto al diseño de pavimentos y al uso de materiales para los mismos, la tendencia mundial, recientemente adoptada en el reglamento vial del IDU [2002], es hacer estudios y diseños de tipo mecanicista que parten de la base de la evaluación mecánica y del comportamiento relevante de los materiales mediante ensayos de laboratorio. Estos ensayos son relativamente sofisticados y costosos pero aportan información fundamental para el entendimiento del comportamiento de los materiales y los diseños geotécnicos correspondientes. Estos diseños se hacen mediante la aplicación de modelos mecánicos para el análisis dinámico o pseudo-estático de los pavimentos.

Con respecto a los problemas de cimentaciones y excavaciones, la práctica local ha podido desarrollar un relativo buen conocimiento de las condiciones de suelos y el comportamiento de sistemas de construcción y de cimentación con base, fundamentalmente, en la experiencia. Esta experiencia reposa en cabeza de los principales consultores que tienen su práctica en la ciudad. Sin embargo, ha sido muy poco el éxito en poder modelar y predecir el comportamiento de estas obras mediante análisis.

El ejercicio de la aplicación de las metodologías tradicionales de mecánica de suelos e ingeniería de cimentaciones a estos problemas en Bogotá resulta en predicciones que varían en rangos muy amplios dependiendo de las suposiciones que se hagan. Por otra parte, existe una alta incer-

tidumbre sobre el comportamiento mecánico de los suelos blandos de Bogotá, ya que sus características particulares no han sido estudiadas en profundidad. Este estudio requiere de ensayos sofisticados y validación con el comportamiento en el terreno. Estas condiciones hacen que, para propósitos prácticos, el poder de predicción de los modelos tradicionales sea prácticamente nulo. Dicha situación es delicada, en especial para poder predecir y diseñar obras o sistemas de construcción que se salen de lo que ya se ha hecho en el medio y requieren del desarrollo de nuevo conocimiento por medio del sistema de prueba y error, que es, en general, un enfoque de muy alto riesgo.

Por otra parte, este tipo de enfoque no permite capitalizar el conocimiento, ya que la única forma de diseñar se da con base en la experiencia que sólo pocos consultores pueden tener. Capitalizar experiencia mediante la aplicación de modelos mecánicos para hacer análisis cada vez más rigurosos que permitan reducir las suposiciones y aproximaciones que se tienen que hacer con los métodos tradicionales podría ser una alternativa a esta situación. Estos análisis mecánicos con base en los principios básicos de la mecánica de suelos pero con fundamentos matemáticos más claros y sólidos pueden ser calibrados con mediciones en obras reales y se puede incorporar en ellos información confiable de ensayos de campo y laboratorio sobre el comportamiento de los materiales. Este enfoque podría permitir la realización de análisis y diseños mucho más racionales. Con este tipo de modelos es posible hacer extrapolación a casos de proyectos sin precedentes o nuevos procesos constructivos —que continuamente se están requiriendo en la ciudad—, y capitalizar la experiencia adquirida.

Finalmente, en años recientes se ha tomado conciencia de la relevancia de una amenaza sísmica para las obras de la ciudad. Esto ha dado lugar a los trabajos y posterior reglamentación de la microzonificación sísmica de la ciudad y los estudios particulares de efecto de respuesta sísmica que se han venido realizando para complementar o precisar los requisitos de diseño de la microzonificación sísmica para proyectos particulares. Este tipo de estudios requieren de ensayos de campo y laboratorio que, como en el caso de los pavimentos, son relativamente sofisticados y costosos pero que, igualmente, aportan información básica muy valiosa sobre el comportamiento mecánico de los suelos. Esta información se incorpora en modelos mecánicos de propagación de ondas para el análisis de la respuesta de los depósitos de suelos ante la acción sísmica. Los modelos geotécnicos que se hacen para este tipo de estudios son completos y se pueden aplicar para el diseño de las cimentaciones y excavaciones. Sin embargo, esta integración normalmente no se hace y se pierde la oportunidad de realizar análisis de cimentaciones mucho más completos.

## 5. ENFOQUE PROPUESTO PARA LA INTEGRALIDAD EN LA PRÁCTICA

El panorama descrito permite identificar varios aspectos comunes que se quieren plantear como la base para la integralidad del ejercicio de la geotecnia:



1. La caracterización del comportamiento mecánico de los materiales térreos mediante ensayos estáticos y dinámicos de campo y laboratorio que se interpreten de manera integral.
2. El uso de modelos matemáticos integrales, lo más completos posibles, de la mecánica de los problemas de interés.
3. La verificación de las predicciones con las observaciones para calibrar modelos y parámetros y para poder desarrollar metodologías de tipo racional que permitan capitalizar el conocimiento y permitan hacer predicciones y diseños más confiables.

Este enfoque permite optimizar la información y los métodos de análisis en la medida en que los diferentes problemas sean regidos por los mismos principios de la mecánica y utilicen la misma información. Actualmente, por ejemplo, se realizan diferentes tipos de ensayos para comportamiento del suelo, pero que generalmente no se relacionan entre sí y para los cuales, en ocasiones, ni siquiera se aprovecha toda la información disponible dentro de un mismo proyecto. Algunos ejemplos de ellos son los siguientes:

- Ensayos geofísicos de *down hole*, *cross hole* o refracción sísmica: se efectúan para la medición de velocidad de propagación de ondas a muy bajas deformaciones. Permiten obtener los módulos de rigidez a muy bajas deformaciones en estudios de respuesta dinámica o en estudios para determinar espesores de suelos.
- Ensayo de *bender element*: se realizan para la medición de velocidad de propagación de ondas a muy bajas deformaciones en una cámara de compresión triaxial. Permite obtener los módulos de rigidez a muy bajas deformaciones para estudios de respuesta dinámica.
- Módulo de resiliencia: es un ensayo triaxial cíclico de carga controlada a bajas deformaciones para establecer el módulo de rigidez para aplicación en problemas de pavimentos.
- Ensayo de columna resonante: permite la medición del módulo de rigidez y amortiguamiento a bajas deformaciones en estudios de respuesta dinámica.
- Ensayo triaxial cíclico: se realiza para la medición del módulo de rigidez y amortiguamiento para deformaciones en el rango 0,1% a 10% en estudios de respuesta dinámica. Tradicionalmente se ejecutan ensayos de deformación controlada para definir curvas de variación de la rigidez y el amortiguamiento con la deformación y de carga controlada para evaluación del potencial de licuación. Sin embargo, en ambos casos se está observando el mismo comportamiento del suelo. Si los ensayos se realizan a deformaciones altas, mayores del 1%, también se está evaluando la resistencia del suelo en carga cíclica. En el ensayo se pueden o no medir o reportar las presiones de poros generadas en la muestra durante el ensayo.
- Ensayo triaxial con carga monotónica: es un ensayo de deformación controlada en un sólo ciclo de carga hasta la falla (deformaciones entre 0,1 y 10%). Puede ser drenado o no drenado dependiendo de la

velocidad de aplicación de la carga con respecto al tipo de suelo. En el ensayo se puede o no medir o reportar la presión de poros.

- Ensayo NAT: es un ensayo de compresión triaxial cíclico de carga controlada, sin presión de confinamiento y con temperatura controlada. Puede realizar ensayos de compresión o de tracción indirecta (la carga se hace diametralmente sobre la muestra) sobre muestras cilíndricas de mezclas. Puede realizar ensayos de *creep*, en los que se mide la deformación de la muestra a carga constante.
- Ensayo de consolidación unidimensional: es un ensayo de compresión triaxial drenado de carga controlada sobre muestras confinadas sin deformación lateral. Permite evaluar la compresibilidad volumétrica y el *creep* de suelos arcillosos. Este tipo de ensayos también se puede realizar en el equipo triaxial.

Como se puede deducir, todos estos ensayos, realizados en ocasiones para el mismo proyecto sobre muestras similares pero para diferentes usos, corresponden, en realidad, a la medición del mismo comportamiento de los materiales, es decir, su relación esfuerzo-deformación, la cual es dependiente del nivel de deformación y de la tasa de carga.

Al entender estas relaciones, se puede aprovechar mejor la información y optimizar el uso de ensayos costosos superando, en parte, las limitaciones de los diferentes tipos de ensayos. A continuación se discuten varias aplicaciones de esta observación.

### 5.1. CARACTERIZACIÓN DE SUBRASANTES Y MATERIALES PARA VÍAS

La relación entre los ensayos geofísicos, de los que se obtiene el módulo de elasticidad a muy bajas deformaciones, y el módulo de resiliencia de la subrasante, que corresponde al módulo de elasticidad a bajas deformaciones, se puede establecer con facilidad conociendo la variación del módulo con la deformación y la tasa de carga. Las mediciones geofísicas son no invasivas rápidas y se pueden realizar extensivamente para una caracterización detallada a bajo costo de los suelos de subrasante. El hecho de que no requiere obtener muestras y mide directamente las condiciones del material en el terreno evita las grandes incertidumbres y dificultades de obtener muestras que se puedan ensayar en el laboratorio y que sean representativas de las condiciones del terreno. Los ensayos geofísicos pueden cubrir una amplia extensión del terreno con el costo equivalente al de sólo un ensayo de laboratorio de módulo de resiliencia.

Otra área en la que se puede aplicar este concepto es en la evaluación de las condiciones de rigidez de los materiales de pavimentos en el terreno. La rigidez de las capas de la estructura del pavimento es determinante de su comportamiento. Para las capas de base, sub-base y concreto asfáltico, su rigidez depende de las condiciones de instalación y de su evolución en el tiempo, en particular, con respecto a condiciones de drenaje, contaminación con finos, efecto de cambios de temperatura y del efecto combinado de las deformaciones de la subrasante y

las capas de pavimento que produce con el tiempo variación de las condiciones de compacidad de los materiales. Por lo tanto, es posible que las condiciones de diseño o especificación de estos materiales no se cumplan desde la construcción o que varíen con el tiempo. Es necesario, por lo tanto, disponer de métodos de ensayo y caracterización de los materiales que permitan la verificación de sus propiedades y condiciones de diseño u operación. En este sentido, se han desarrollado trabajos tendientes a utilizar, por ejemplo, mediciones de dispersión de ondas superficiales para determinar la velocidad de onda de corte a bajas deformaciones en capas de pavimentos a partir de lo cual se obtiene el módulo de elasticidad a bajas deformaciones [Stockoe et al, 1994]. El enfoque planteado permite hacer este tipo de evaluaciones utilizando métodos geofísicos.

## 5.2. CARACTERIZACIÓN DE SUELOS PARA ANÁLISIS DE CIMENTACIONES Y EXCAVACIONES

Los estudios de respuesta sísmica local que se realizan para algunos proyectos requieren de la caracterización del perfil de suelos hasta llegar a la roca o, por lo menos, hasta 50 m de profundidad. Para estos estudios es necesario definir el perfil de velocidad de onda de corte del que se deduce la variación con la profundidad del módulo de rigidez a muy bajas deformaciones. También es necesario establecer la variación del módulo con la deformación.

Esta información es deseable para poder hacer análisis detallados del efecto de cimentaciones y excavaciones, en las que el suelo en cercanías de la obra se ve sometido a niveles relativamente altos de deformación, pero que en profundidad y distancia a partir del sitio se ve sometido a sollicitaciones de deformación progresivamente menores hasta donde el efecto es nulo. La respuesta de la obra corresponde, sin embargo, a la integración de las deformaciones unitarias sobre todo el volumen de suelo afectado.

La alta variación de la rigidez con la deformación y el hecho de que esta variación a bajas deformaciones no se puede observar a partir de ensayos estáticos (Triaxial con carga monotónica) utilizados, tradicionalmente, en análisis de cimentaciones son la principal razón por la que es muy difícil, si no imposible, hacer análisis confiables para predicción de deformaciones en proyectos de cimentaciones en los suelos blandos de Bogotá utilizando métodos tradicionales, o aun análisis de tipo elasto-plástico.

Un problema de excavación y cimentación que es altamente sensible a las condiciones de rigidez de los materiales utilizados es la cimentación de tuberías flexibles. Estas estructuras dependen del soporte lateral de los suelos utilizados en la instalación, el cual está relacionado con los procedimientos de excavación e instalación. La verificación de las condiciones de instalación requiere que se determine la rigidez del material en el terreno. Esta no es una labor fácil de realizar debido a la

dificultad de hacer ensayos en el terreno para medir la rigidez y la falta de correlaciones con ensayos de compactación, u otros, que se puedan hacer de manera rutinaria en el terreno. El enfoque planteado permite explorar posibilidades tales como el uso de métodos geofísicos o el desarrollo de correlaciones con parámetros de ensayos que se puedan realizar con facilidad o que se encuentren disponibles.

Un enfoque basado en la consideración de la variación no lineal de la rigidez con la deformación obtenida a partir de los ensayos ya mencionados, incorporado en un modelo de análisis que la pueda tener en cuenta, tiene la posibilidad de realizar análisis racionales con predicciones razonables de problemas de cimentaciones y excavaciones. Análisis de este tipo han sido presentados por varios autores [Rodríguez, Velandia y Reyes, 2004a y 2004b].

## 6. CONCLUSIONES

En este artículo se plantea una reflexión sobre el estado de la enseñanza y la práctica de la geotecnia en Colombia. Esta reflexión señala varias áreas en las que se requiere un enfoque más moderno e integral para la práctica y enseñanza de esta disciplina que responda a las necesidades actuales y futuras del país y que esté de acuerdo con las tendencias internacionales.

Se propone un enfoque sobre la base de manejar integralmente los problemas a partir de formulaciones matemáticas mecánicas precisas, del uso de técnicas modernas de solución y de la capitalización del conocimiento. Esta capitalización se hace mediante la integración del conocimiento adquirido sobre el comportamiento de los materiales derivados de los ensayos de campo y laboratorio y de las observaciones del comportamiento de las obras mediante instrumentación. Esta integración se debe hacer en la práctica, pero también en las aulas presentándoles a los estudiantes el estudio de casos y resultados reales.

El enfoque propuesto permite integrar y optimizar el análisis de problemas de contorno en áreas tales como cimentaciones, excavaciones, análisis de respuesta dinámica, estabilidad de taludes y pavimentos. Se trata de aprovechar información de campo y laboratorio para caracterizar de manera unificada los materiales térreos definiendo sus relaciones esfuerzo - deformación y su variación con diferentes parámetros de estado para tener una descripción de su comportamiento utilizable para diferentes problemas. Con base en lo anterior, se desarrollan análisis y diseños que utilicen propiedades compatibles con el estado del suelo y sus solicitaciones, junto con soluciones numéricas adecuadas. Estos análisis se pueden hacer para problemas cotidianos y, sobre todo, para proyectos especiales o técnicas novedosas de construcción que representen altas inversiones, o condiciones sin precedentes. La caracterización y análisis se calibran o verifican mediante mediciones de comportamiento en casos reales. Este tipo de enfoque permite capitalizar conocimiento que se pueda ver reflejado en futuras normas y en la formación de los ingenieros civiles.

A partir de estas consideraciones se hace necesario revisar el enfoque y el contenido de los programas y cursos actuales de geotecnia para lograr una mejor capacitación de los estudiantes con un uso más efectivo del tiempo y de los recursos disponibles. En la formación es necesario tener en cuenta los requisitos básicos de la base del conocimiento necesario para los ingenieros civiles identificados por la ASCE, así como considerar seriamente la forma como se está planteando la forma de enseñarlo y los requisitos para quienes se encargan de esta enseñanza. Se hace necesaria la integración de la enseñanza y la práctica para lo cual se sugiere exponer a los estudiantes el estudio del diagnóstico, de la caracterización, de la modelación y del diseño de casos y materiales reales, para lo que es necesario que los profesores tengan buen nivel académico, carisma, liderazgo y experiencia práctica.

## REFERENCIAS

- AMERICAN Society of Civil Engineers, ASCE (2004), Civil Engineering Body of Knowledge for the 21<sup>st</sup> century, disponible en: <http://www.asce.org/raisethebar>.
- \_\_\_\_\_, (2001), Engineering the Future of Civil Engineering, disponible en: <http://www.asce.org/raisethebar>.
- INSTITUTO de Desarrollo Urbano (2003), Reglamento técnico para la ejecución de obras en el sector vial de Bogotá, D.C., Bogotá.
- LAMBE, T.W., R. V. Whitman (1969), Soil Mechanics, New York, John Wiley and Sons.
- RODRÍGUEZ, J., E. Velandia, F. Reyes (2004a), Análisis del efecto de excavación en un depósito del Piedemonte de Bogotá. X Congreso Colombiano de Geotecnia, Sociedad Colombiana de Geotecnia.
- \_\_\_\_\_, (2004b), Caracterización de suelos blandos para modelos de plasticidad. X Congreso Colombiano de Geotecnia, Sociedad Colombiana de Geotecnia.
- STOKOE, K., et al. (1994), Characterization of Geotechnical Sites by SASW, en: Woods, R.D. (editor), *Geophysical Characterization of Sites*, Rotterdam, AA. Balkema.
- TAYLOR, D. W. (1948), Fundamentals of Soil Mechanics, New York, John Wiley and Sons.
- TERZAGHI, K. (1943), Theoretical Soil Mechanics, New York, John Wiley and Sons, Woods.
- \_\_\_\_\_, (1948), Soil Mechanics in Engineering Practice, New York, John Wiley and Sons.
- \_\_\_\_\_, G. Mesri (1996), Soil Mechanics in Engineering Practice, 3<sup>rd</sup> Edition, New York, John Wiley and Sons.
- VICK, S. (2002), Degrees of Belief – Subjective Probability and Engineering Judgement, Reston: ASCE Press.