

LA EVOLUCIÓN A LARGO PLAZO DE LA INGENIERÍA GEOTÉCNICA¹

Ricardo J. Rocca²

Resumen: La Ingeniería Geotécnica es analizada en sus tendencias fundamentales mediante el triángulo geotécnico de Burland (1987) que es expandido a tetraedro mediante las ideas de Vick (2002). La parte esencial es la interacción existente entre los paradigmas de la teoría y de la práctica con su pasado y presente y una probable evolución futura basada en la opinión de relevantes personalidades de la Ingeniería Geotécnica. Se valora la importancia de la escuela de Terzaghi en el siglo XX y su método observacional y como se extenderá en el futuro. Se consideran asimismo algunas opiniones discrepantes que plantean la necesidad de cambios. Se comentan algunos aspectos institucionales como la relaciones entre las Sociedades Federadas en la FIGS y la importancia de la educación en la formación de los futuros ingenieros geotécnicos. Se incluyen aspectos pedagógicos, como las ideas de Kolb y la situación institucional en los países centrales que están en proceso de transformación en la última década.

Palabras claves: FIGS, geotécnica, paradigma de teoría y práctica, teoría de Kolb, triángulo de Burland.

THE LONG TERM EVOLUTION OF GEOTECHNICAL ENGINEERING

Abstract: Geotechnical Engineering is analyzed in their fundamental trends through the geotechnical triangle of Burland (1987) which is expanded into a tetrahedron following the ideas of Vick (2002). The essential part is the interaction between the paradigms of the theory and practice with its past and present and a probable future evolution based on the views of relevant personalities of the Geotechnical Engineering community. The importance of the school of K. Terzaghi in the twentieth century and its observational method and how it will be extended in future is valued. Also, some discrepant views posed the need to changes. It is discussed some institutional issues such as the relationship between the Federated Societies in FIGS and the importance of education in the training of the geotechnical engineers of the future. Teaching aspects, such as Kolb ideas and institutional situation in the principal countries that are in a transformation process the last decade are included.

Keywords: Burland's triangle, FIGS, geotechnical engineering, Kolb's theory, theory and practice paradigm.

INTRODUCCIÓN

La Ingeniería Geotécnica (IG) constituye una de las principales ramas de la Ingeniería Civil y como tal, presenta facetas que han sufrido el mismo derrotero que esta última a través del tiempo y a lo largo de la evolución de la civilización. Hasta principios de la década de 1960, los especialistas en IG estaban agrupados en la ISSMFE (“International Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering”). Luego aparecieron nuevas sociedades como la ISRM (“International Society for Rock Mechanics”) en 1962 y la IAEG (“International Association of Engineering Geology”) en 1970.

Esta compilación de pensamientos de la IG trata de documentar las ideas principales que reflejan el pensamiento de los ingenieros geotécnicos. La bibliografía empleada en este trabajo no es exhaustiva, pero si indicativa. En el título quedan reflejados dos aspectos: uno es estacionario y comprende la esencia la IG que debería ser invariante y mantenerse a largo plazo. El otro aspecto es una prognosis proyectando los conocimientos y las tecnologías actuales hacia el futuro mediato. Esta tarea fue planteada recientemente por un Panel del National Research Council EE.UU.

¹ Artículo recibido el 13 de octubre de 2008 y aceptado el 25 de enero de 2009.

² Profesor Titular, F.C.E.F.N., Universidad Nacional de Córdoba, Avenida V. Sarsfield 1611, 5016 Córdoba. Argentina. E-mail: rjrocca@efn.uncor.edu

(2006) y por Simpson y Tatsuoka (2008) en el número especial evocativo del 60 aniversario de la revista técnica *Geotechnique*.

LA DUALIDAD DE LA GEOTECNIA

La ISSMGE (“International Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering”) es el nuevo nombre al que mudó la ISSMFE. Algo similar sucedió con algunas publicaciones como la de la ASCE.

En el nombre societario se observa una dualidad consistente en una rama científica, teórica y otra aplicada, experimental. Peck (1962) lo señala como la dualidad entre Ciencia Ingenieril (paradigma de la teoría) y Práctica Ingenieril (paradigma de la práctica).

La evolución de la IG puede ser analizada desde el punto de vista epistemológico (Vick, 2002). Como en otras ciencias experimentales, se pueden observar la existencia de paradigmas que son importantes para enmarcar a la IG. Un paradigma de una profesión se construye alrededor de sus teorías reveladas en libros, conferencias, ejercicios de laboratorio, etc., que son aceptadas por el conjunto de los profesionales.

Los paradigmas de la teoría y los de la práctica coexisten y tienen explicaciones subyacentes. Una es la dualidad entre la teoría y el criterio o juicio ingenieril. El paradigma de la teoría mantiene preceptos deductivos, mientras que el del criterio es subjetivo.

La recientemente creada Federación Internacional de Sociedades Geo-ingenieriles (FIGS) señala la interacción entre las sociedades hermanadas que tienen incidencia en la IG: ISSMGE (suelos), ISRM (rocas) e IAEG (geología). Han formulado un esquema (Figura 1) que describe actividades que finalizan en la estructura ingenieril y como paso previo, en el triángulo geo-ingenieril (sensu stricto), ambos marcados con un círculo en la Figura 1.

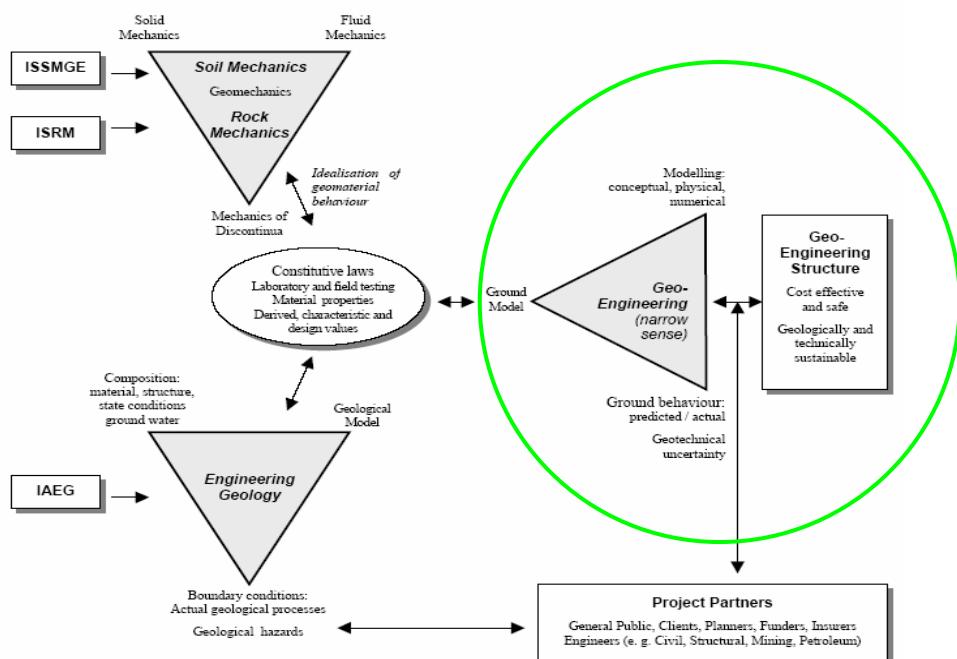


Figura 1: Esquema de las interrelaciones de la IG en las sociedades geo-ingenieriles. El círculo señala las actividades hacia donde confluyen las distintas disciplinas (Bock, 2006).

Este triángulo es una expresión del Triángulo Geotécnico postulado por Burland (2007) desde 1987 como una ayuda educacional (Figura 2) y a su vez con raíces en publicaciones de Karl Terzaghi, KT (1925).

En este esquema del triángulo, co-existen cuatro aspectos distintos pero relacionados entre sí (Burland, 2007):

1. El perfil del terreno, con las condiciones de agua subterránea.
2. El comportamiento observado o medido del terreno.

3. Las predicciones usando métodos apropiados.

4. Procedimientos empíricos, criterio o juicio basado en precedentes y la bien ganada experiencia.

Los tres primeros pueden ser descriptos como constituyendo los vértices de un triángulo y el empirismo ocupando el centro. Una idea similar ha sido desarrollada por Vick (2002), aunque a pesar de ser contemporáneos y afirmar lo mismo, no se citen con Burland, entre sí, en sus textos.

Se puede apreciar que en realidad el Triángulo Geotécnico de Burland es la proyección de un tetraedro, en donde el triángulo representa una de las caras, la del paradigma de la teoría/análisis y en el vértice posterior se ubica el paradigma de la práctica. La IG se encuentra en el interior del tetraedro (Figura 3).

Esto permite visualizar mejor la interrelación entre los paradigmas de la teoría y de la práctica en la IG. Según Vick (2002), la dualidad teoría/práctica implica la coexistencia de formas de pensar diferentes. Mientras que a priori puede plantearse una asociación del tipo: Teoría = Método Deductivo, Práctica = Método Inductivo, la realidad indica que la interrelación es más profunda y que existe siempre la inducción inicial.

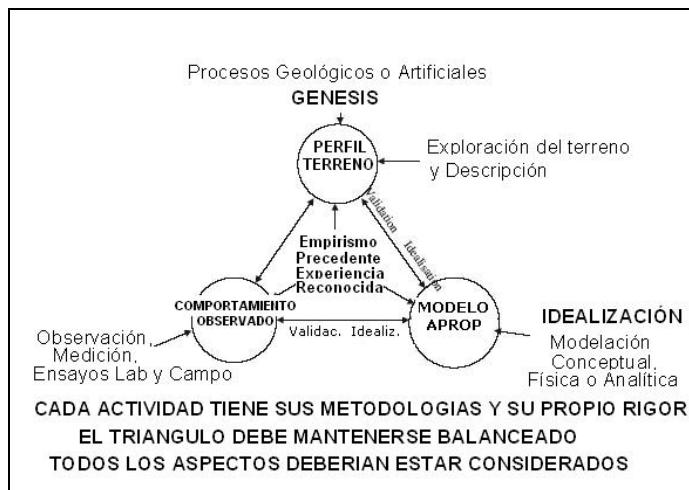


Figura 2: El triángulo geotécnico de Burland (2007).

En gran parte del diseño geotécnico, como muros, zapatas, pilotes, taludes de presas, excavaciones y túneles en rocas, es esencial el uso de casos precedentes. La teoría sirve para verificarlos (Hendron, 1990).

La teoría y análisis, una vez aceptados, son la base del sistema deductivo. Constituyen los primeros principios desde los cuales se obtienen conclusiones y se hacen predicciones, que son el corazón de la IG.

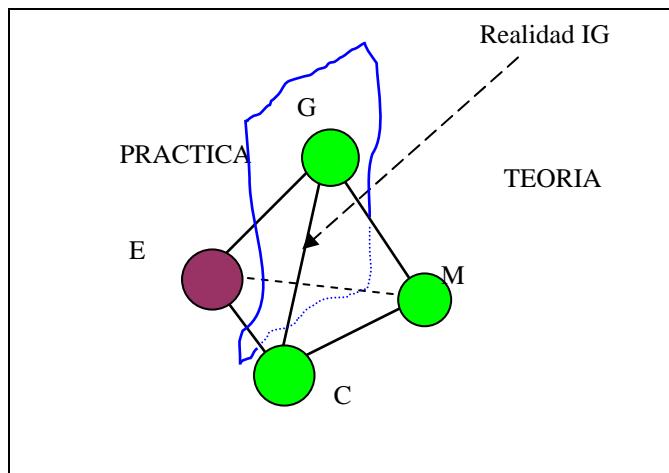


Figura 3: Tetraedro geotécnico a partir de darle una tercera dimensión al triángulo de Burland. Se puede realizar una separación entre el sector correspondiente al paradigma de la teoría y al de la práctica. G: terreno, C: comportamiento, M: modelación, E: empirismo.

Su formulación involucra manipular datos y usar métodos de análisis que son los modelos que incorporan los primeros principios de mecánica y tensiones efectivas. Estos coexisten con el paradigma de la práctica con sus propios protocolos que también usan teoría y análisis pero en otra manera. Aún más, los métodos de razonamientos son diferentes, enfatizando los procesos inductivos en la derivación de predicciones. Así, el empirismo inductivo, usando correlaciones que derivan lo general desde casos específicos observados, puede tener precedencia sobre los primeros principios. La relación inducción-deducción-inducción es representado por la figura con forma de un reloj de arena (Figura 4).

El criterio o juicio ingenieril es el cuerpo que gobierna esos casos específicos que son integrados y sintetizados para formular reglas generales e predicciones individuales. Constituye un campo dentro de las ciencias del comportamiento. Una definición trivial sería decir que es algo que no se puede definir pero todo el mundo sabe qué es. Einstein (1991) habla del uso inteligente de la experiencia. Focht (1994) considera que la experiencia y el criterio están próximos. Algunos toman ambos términos como sinónimos, pero no es lo mismo. Hay numerosos casos de mucha experiencia y poco criterio. Peck (1969) dice que es un atributo vago pero lo relaciona con el sentido de proporción.

El paradigma de la práctica geotécnica no se enseña formalmente y se pasa de generación en generación sin instrucciones escritas. Tiene cuerpo de literatura basada en publicaciones de casos que suelen ser desdeñadas. Por eso no alcanza la legitimación científica que identifica y valida a la teoría.

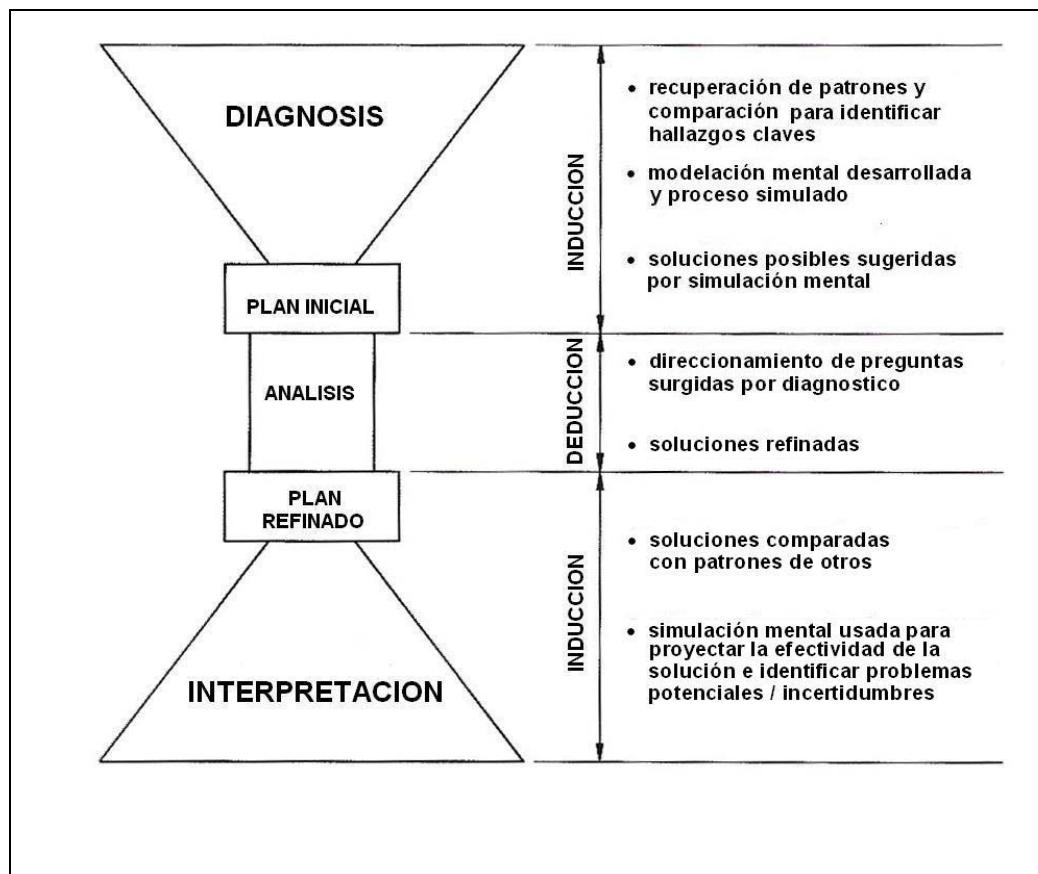


Figura 4: Esquema de las relaciones inductivas y deductivas: Reloj de arena (Vick, 2002).

Focht (1994) pone un ejemplo del uso aplicado al proceso predictivo:

1. El criterio debe ser aplicado al menos dos veces, al comienzo y al final del ejercicio de predicción numérica. En realidad, es necesario a lo largo de todo el proceso.
2. Cada elemento del proceso de predicción es importante, están interrelacionados y todos deben ser compatibles.

3. La predicción debería estar establecida en términos compatibles con la confiabilidad esperada, sin una indicación de mayor precisión que la que contenga.

4. Es mejor estar aproximadamente correcto que ser preciso y errado.

Los elementos subjetivos de inducción, interpretación y criterio siempre permanecen como aspectos que distinguen a la ingeniería de las ciencias exactas.

Viggiani (1999) indica que las ciencias empíricas son en cierto modo similares a las exactas. Son diferentes del conocimiento pre-científico ya que están basadas en métodos experimentales y son desarrolladas por especialistas cuyo trabajo tiene propósitos cognoscitivos puros. Las ciencias empíricas no poseen otro requisito de las ciencias exactas, la estructura deductiva rigurosa. No pueden ser derivados por métodos demostrativos, no pueden ser sino modelos de una fenomenología específica, y sus resultados no pueden ser extendidos a diferentes condiciones. Por esa razón son convenientemente subdivididas por su objeto (por ejemplo, Mecánica de Suelos).

La disputa de Terzaghi-Fillunger de 1936 es tomada como un ejemplo donde se muestra la importancia de lo que se llama regla de correspondencia entre la teoría científica y la realidad física. Está claro que Fillunger fue un pionero en el estudio de la poromecánica, una teoría científica. A su vez, Terzaghi desarrolló una teoría menos general y simple, pero que estaba en correspondencia con la realidad física. Su libro con Frohlich contiene la información práctica que le permitió a Terzaghi primar en el diferendo y con ello, se precipitó el trágico final de Fillunger y su esposa.

En IG hay casos de varias teorías/modelos que predicen resultados compatibles con lo observado en un problema y por lo cual no es posible definir cuál usar. Entonces, no hay una teoría/análisis/modelo singularmente correcto cuando existen alternativas competitivas, por ejemplo, variedad de fórmulas de cálculo de pilotes.

LA EVOLUCIÓN DEL TETRAEDRO GEOTÉCNICO EN EL PASADO Y PRESENTE

Se puede realizar el análisis de la evolución de la IG, mediante la observación de un viaje del Tetraedro Geotécnico en el tiempo (Figura 5), limitado por los paradigmas de la teoría y de la práctica.

El proceso puede compararse con una evolución de un ser natural, tal como la planteó Peck (1969). En este sentido se tienen los ancestros (siglos XVII-XIX), nacimiento (1919), la juventud y la madurez actual.

Una buena reseña histórica se publicó en el volumen Golden Jubilee del XI Congreso de la ISSMFE realizado en San Francisco, California, en 1985. Tiene una primera parte pre-científica hasta 1700 (escrita por Kerisel) y dos partes con el desarrollo científico hasta 1985 (desarrolladas por Skempton y Peck). La primera está recostada en la práctica, mientras que las dos últimas en la teoría. Esto puede ser considerado como un sesgo pro-teoría, ya que los desarrollos tecnológicos han seguido sin interrupción hasta el presente en el campo de las fundaciones.

Estadios pre-científicos

Si se compara cómo ha ido evolucionando la imagen del Tetraedro Geotécnico se observaría que primero apareció y creció el vértice de la práctica y luego se fueron sumando los otros círculos correspondientes con el triángulo de teoría/análisis y sus relaciones (aristas) (Figura 6). Así, en el siglo XIX no existía una aproximación sistemática a los problemas de fundaciones, y hasta había cierta relucencia a aceptar los conocimientos científicos (Glossop, 1968).

Recientemente, en el número del 60° aniversario de Geotechnique, se ha recopilado la influencia de esa publicación en el desarrollo de las ideas geotécnicas, clarificando el estado del arte desde el siglo XIX (Chrimes, 2008).

En este estadio, el peso de la tecnología ha sido muy importante y se continúa en la actualidad (Glossop, 1968). Muchos desarrollos se han realizado empíricamente, para luego ser interpretados teóricamente (Tabla 1).

Hay ejemplos significativos, como la aplicación de la compactación dinámica en suelos finos, que a priori era considerada como imposible por sus propios creadores y donde la experimentación motivó un cambio en la concepción teórica del fenómeno y la formulación de nuevos modelos para entenderlo (Menard y Broise, 1976).

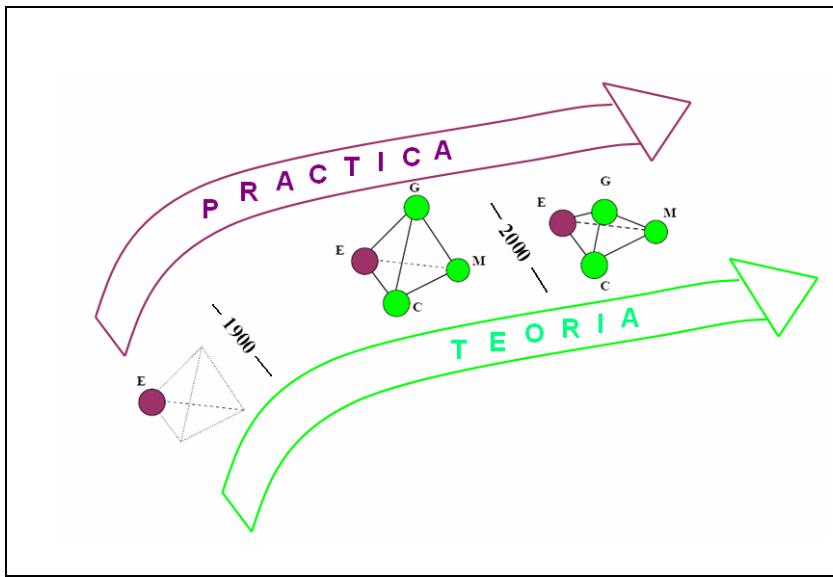


Figura 5: El Tetraedro en el pasado, presente y probable futuro. Las flechas representan los paradigmas de la teoría y de la práctica. Los tetraedros tienen distintos desarrollos e interacciones.

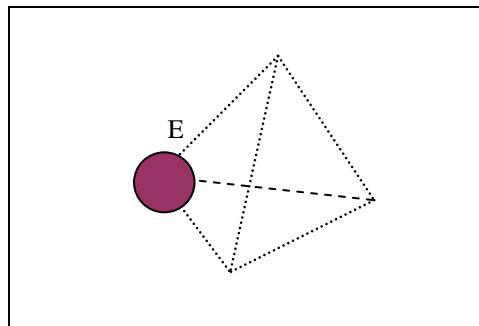


Figura 6: Desarrollo del tetraedro geotécnico en siglos anteriores al XX. El círculo E representa el empirismo (la práctica) y los otros círculos tienen escaso desarrollo y no se han dibujado.

El desarrollo de la IG en el siglo XX

Gran parte de la evolución de la IG en el inicio del siglo XX está centrado en Terzaghi y se continuó en sus seguidores: Casagrande, Peck, Bjerrum y Skempton. Ellos participaron activamente en el libro conmemorativo de los 80 años de Terzaghi (“From Theory to Practice in Soil Mechanics”, 1960). Sobre la figura de Terzaghi existen asimismo dos libros biográficos recientes, Goodman (1999) y De Boer (2005).

Goodman ha documentado cuidadosamente la trayectoria de Terzaghi y su libro puede ser visto como una visión interna desde la IG. De Boer, desde fuera, ataca los fundamentos de la Mecánica de Suelos de Terzaghi y sus seguidores, tildándola de escaso rigor científico. Defiende a Fillunger a quien le atribuye seguir los conceptos clásicos de la mecánica y afirma que luego de su final trágico fue ignorado por la IG.

Tabla 1: Avances tecnológicos o de procesos geotécnicos (previos a 1930).

AÑO	DESARROLLO	FUENTE
1779	Coulomb inventó el cajón a aire comprimido	Glossop 1968
1802	Berigny inventó la inyección en aluviones con arcilla y cal hidráulica	Glossop 1968
1802	Rennie utilizó vapor en piloteadora	Hussein & Goble 2004
1811	Telford aplicó precarga para reducir asentamientos en arcilla	Glossop 1968
1827	Telford introdujo la idea del núcleo arcilloso en presas.	Glossop 1968
1830	Cochrane empleó el cajón con la válvula de aire	Glossop 1968
1835	Pilotes con camisa de acero en Inglaterra	Hussein & Goble 2004
1839	Primer ensayo de carga de pilotes en USA	Hussein et 2004
1841	Triger estudió efectos del aire comprimido sobre la salud	Glossop 1968
1843	Naysmyth inventó el martinete a vapor (Escocia)	Hussein & Goble 2004
1846	Clarke, Freeman y Varley usaron martinete a aire comprimido en Inglaterra	Hussein & Goble 2004
1852	Michoux estudió el congelamiento de suelos	Glossop 1968
1860	Se funda Keller (Alemania)	Keller
1865	Tratamiento de pilotes de madera con creosota en USA	Hussein & Goble 2004
1866	Jacob: presas con taludes 3:1 para aguas arriba y 2:1 para taludes aguas abajo	Glossop 1968
1867	Hawkesley introdujo la inyección con cemento para presas en roca	Glossop 1968
1867	Vulcan desarrolló su martinete a vapor en USA	Hussein & Goble 2004
1883	Stephenson aplicó el rebatimiento de agua subterránea por medio de pozos	Glossop 1968
1888	Formula Engineering News para pilotes hincados	Hussein & Goble 2004
1893	Grandes Cajones excavados a mano en Chicago	Hussein & Goble 2004
1893	McKiernan-Terry construyó el martinete de doble acción (USA)	Hussein & Goble 2004
1893	Raymond usó pilotes hormigonados in situ en USA	Hussein & Goble 2004
1896	Hennebique usó pilotes prefabricados en Francia	Hussein & Goble 2004
1908	Raymond empleó pilotes prefabricados en USA	Hussein & Goble 2004
1908	Bethlehem introdujo pilotes H de acero en USA	Hussein & Goble 2004
1908	Frankignoul inventó el pilote Franki en Bélgica	Hussein & Goble 2004
1910	Primer ensayo estático de pilares en Chicago	Hussein & Goble 2004
1913	ASCE creó el Comité de Fundaciones	Hussein & Goble 2004
1926	Delmag inventó el martinete a explosión (mezcla de benzol)	Hussein & Goble 2004

Esencia del cambio de paradigma planteado por Terzaghi

Terzaghi planteó en 1925 un proto-tetraedro basado en los tres objetivos y la conexión con la práctica. La Figura 3 es el tetraedro resultante luego de la maduración de la IG.

El Cambio de Paradigma que produce Terzaghi ha sido descripto con obsesión en numerosas publicaciones retrospectivas (1936, 1951, 1957, 1958, 1961). Terzaghi lo llama el Viejo Código a las ideas que había a principios del siglo XX (Tabla 2).

Numerosas veces Terzaghi ha mencionado la desconexión entre los Códigos y Normas y las fundamentaciones técnicas y hasta de su origen que los respaldan. Esto es explicable desde el punto de vista epistemológico. Al carecer las ciencias experimentales de validación absoluta, los especialistas tienden a acordar sobre ideas relativamente bien probadas en la práctica, constituyen un paradigma y todos lo siguen hasta que al final lo codifican y quedan como un quasi-dogma. (Cabría preguntarse si no se está haciendo lo mismo ahora, cuando se confía en normas de instituciones tales como el USACE, USBR, EUROCÓDIGO, etc.)

El impacto de la IG se trasladó a otras ramas de la Ingeniería Civil, en el modo de pensar, y en el enfoque con el que se encaran el estudio, proyecto, dimensionamiento y construcción de obras civiles, en particular sobre las limitaciones

en la exactitud obtenible y la necesidad de instrumentar y seguir el comportamiento de las obras para conocer su verdadera respuesta y compararla con la prevista en el proyecto (Moretto, 1984).

Tabla2: El “viejo código” prevaleciente a principios del siglo XX (Terzaghi, 1961).

- El asentamiento de una zapata corrida es independiente del área cubierta por la zapata.
- El asentamiento de una fundación con pilotes es igual al asentamiento de un pilote individual bajo la misma carga por pilote.
- Las constantes de la ecuación de Coulomb para la resistencia al corte de los suelos cohesivos son independientes del tiempo.
- La presión de tierras sobre soportes laterales es independiente de la magnitud de fluencia lateral del soporte.
- La influencia de la presencia del agua en la resistencia al corte es causada por el efecto lubricante del agua.

Si se planteara cuán habilidosos son los ingenieros actuales para resolver los problemas ingenieriles, se pueden tener relativamente buenas respuestas en general. Nuñez (2007) ha abordado el tema en su Conferencia Casagrande fijando algunos límites de precisión en los resultados, del orden del 30%, siempre que haya validación en la práctica.

Resultados, discusiones y polémicas.

El éxito de la IG en el siglo XX se debió a las necesidades mutuas de comitentes, ingenieros y contratistas en la necesidad de establecer guías de diseño y desarrollar procedimientos analíticos para: a) dar al comitente la confianza necesaria para usar conceptos nuevos en los proyectos y, b) proveer al ingeniero con las herramientas para implementar un concepto, si lo aprobaba el comitente. A pesar de muchos beneficios, la aplicación de innovación geotécnica enfrenta muchas barreras dictadas por consideraciones técnicas, prácticas, legales, políticas, educacionales, institucionales y psicológicas. (Munfakh, 2004).

Por su parte Lombardi (2000) ha resaltado y ejemplificado algunas prácticas actuales que parecieran estar ocultas dentro de buenas intenciones (Tabla 3). Es de destacar que si bien están referidas a geoingenieros, parecen aplicables a otras ramas de la ingeniería.

Tabla 3: Las “plagas actuales” de la geoingeniería (Lombardi, 2000).

Plaga:	Debido a:	Consecuencias:
1. Fanatismo computacional	Falta de espíritu crítico, credulidad, ignorancia de nociones básicas	
2. Control de calidad formalista	Burocracia ignorante de las incertidumbres intrínsecas a la geoingeniería	<ul style="list-style-type: none"> – Diseño no óptimo – Fallas mayores o menores
3. "Transferencia tecnológica" mal entendida	Falta de conocimientos de las condiciones reales, por ejemplo económicas	<ul style="list-style-type: none"> – Construcción no óptima – Disputas costosas – Desperdicio de energía – Costos adicionales inútiles
4. Exigencia e ilusión de precisión excesiva	Ignorancia de las incertidumbres reales y de la esencia misma de la geoingeniería	
5. Líos legales excesivos	Consecuencia de las otras plagas	

La invisibilidad de los geotécnicos

Poulos (2006) ha publicado una nota: “La invisibilidad de los Ingenieros Geotécnicos”. Uno de los principales obstáculos para incrementar la influencia y el reconocimiento es que se trata de una actividad que es invisible, subestimada e incomprendida. Poulos atribuye gran parte de la culpa a los propios ingenieros geotécnicos.

Posiblemente la situación actual corresponda al estadio de madurez (Vick, 2002):

- En los primeros estadios del desarrollo de un área, la sociedad reclama soluciones de la profesión y en la respuesta predomina el pragmatismo y el sentido común. Luego, la teoría asiste y explica lo que ya se ha aprendido. La Tabla 4 muestra como algunas necesidades de la sociedad producidas por accidentes, determinación política o guerras han tenido financiamiento y respuesta por parte de los ingenieros geotécnicos.
- Cuando el área madura, como en la IG, los problemas urgente no presionan y los miembros se vuelcan hacia soluciones más sofisticadas de teoría y técnica. Es el estatus de la ciencia común, donde los miembros están comprometidos en articular y confirmar el paradigma prevaleciente. A medida que se va madurando, comienza una introspección y aislamiento y los miembros son los únicos en la audiencia y son juzgados entre ellos. Los desafíos son internos, impuestos para el incremento de la precisión y alcance de la teoría.

Tabla 4: Ejemplos de avances de la IG debido a accidentes, determinación política y guerras.

Año	Incidente	Solución
1913	Deslizamientos laderas en Suecia	Creación de Laboratorio de Geotecnia. Métodos suecos
1936	Deslizamiento de presa de Fort Peck	Estudios de arenas por A. Casagrande
1939-1945	Segunda Guerra Mundial	Electroósmosis por Leo Casagrande (Alemania) Aeropuertos por Arthur Casagrande (USA)
1957	Rotura de Malpasset (Francia)	Desarrollo de Mecánica de Rocas
1963	Deslizamiento de Vajont (Italia)	Desarrollo de Mecánica de Rocas
1964	Sismos de Niigata y Anchorage	Desarrollo de Ingeniería Geotécnica Sísmica
1960/7	Campaña Lunar	Investigación en técnicas de campo y laboratorio
1976	Rotura de Teton Dam	Cambios en procedimientos de diseño
2005	Huracán Katrina	Investigación sobre comportamiento de defensas
2008	Roturas en cuenca del Mississippi	Investigación sobre diseño de malecones (“levees”)

Según Burland (2007), se ha fallado en transmitirle al público la realidad que involucra la IG. Las publicaciones técnicas no reflejan el desafío y drama del trabajo de los geotécnicos. Las responsabilidades son inmensas y se está sirviendo a la comunidad y trabajando con el frágil ambiente. A esto hay que sumarle el hecho de que la IG es una profesión con mayores riesgos personales y profesionales.

La estacionariedad de los métodos propios

El método Observacional

Karl Terzaghi ha legado gran parte del pensamiento geotécnico esencial a través de sus discursos, metodologías de trabajos y escritos relacionados con la misión de los ingenieros geotécnicos. La principal contribución fue el reconocimiento y formulación del principio de tensión efectiva y su influencia en análisis de asentamiento, resistencia, permeabilidad y erosión de suelos.

A diferencia de los ingenieros estructurales que pueden diseñar con los libros de texto, los ingenieros de suelos necesitan una gran cantidad de trabajo cerebral original antes de poder aplicar los conocimientos de los libros (Terzaghi, 1961).

Preocupado por la dificultad de conocer suficiente sobre la morfología de los sitios y propiedades para diseñar soluciones, Terzaghi seguía el progreso de obras y observaba su comportamiento durante la construcción, transformándose en un proponente y practicante, junto con Peck del Método Observacional (MO) que está centrado en el interior del Tetraedro Geotécnico y en el vértice de la experiencia práctica (Tabla 5).

Otros autores han tratado de realizar distintos tipos de aportes, aunque a veces lo confunden agregándole elementos propios del Círculo de la experiencia empírica. El MO tiene una limitación importante: no es aplicable si el carácter del proyecto es tal que el diseño no puede ser alterado durante la construcción. De otra manera, existe potencial de ahorro de grandes sumas de tiempo o dinero. El MO trabaja mejor donde ocurre el mecanismo de falla dúctil y provee una oportunidad para el monitoreo del desarrollo de la falla y de planes de contingencia si es necesario. Para los estados frágiles el MO sólo puede limitar o localizar la falla de manera de minimizar el riesgo o severidad (Nicholson 1994).

Santamarina (2003) ha vinculado el MO con otras actividades creativas, con el método científico, el método de diseño de Torroja y el de análisis de casos históricos de Leonard. Santamarina (2006) identifica los aportes de las TICs al desenvolvimiento futuro del MO.

La actualización bayesiana en el diseño y construcción puede ser considerada como una formalización de la aproximación observacional.

Tabla 5: El método observacional (Peck, 1969)

- a) Exploración suficiente para establecer al menos la naturaleza general, patrones y propiedades de los depósitos, pero no necesariamente en detalle.
- b) Evaluación de las condiciones más probables y las desviaciones más desfavorables concebibles de esa condición. En esta evaluación la Geología juega un rol mayor.
- c) Establecimiento de un diseño basado en las hipótesis de trabajo del comportamiento anticipado bajo las condiciones más probables.
- d) Seleccionar las cantidades a ser observadas a medida que progrese la construcción y calcular los valores anticipados en base a las hipótesis de trabajo.
- e) Cálculo de valores bajo las condiciones más desfavorables compatibles con los datos disponibles concernientes a las condiciones sub-superficiales.
- f) Selección anticipada de un curso de acción o modificación de diseño para cada desviación significativa pronosticada de los hallazgos observacionales de aquellas predichas en base a las hipótesis de trabajo.
- g) Medición de cantidades a ser observadas y evaluadas de las condiciones reales.
- h) Modificación de diseño para adaptar las condiciones reales.

Aportes metodológicos de la actividad profesional

Las metodologías de trabajo de profesionales con distintos niveles de experiencias han sido tratado por Vaughan (1994). Parte del Triángulo Geotécnico de Burland y reconoce que hay dos maneras de aplicarlo de acuerdo con la madurez del ingeniero (Figura 7). La senda de la derecha está basada en la experiencia y el conocimiento que son aplicados directamente. Si esta aproximación está fundamentada en el entendimiento de los mecanismos del comportamiento, no es empírica. Es el camino que usan los expertos, cuyas cualidades describe Vick (2002). Como ejemplo, Terzaghi usó ecuaciones en forma extensa durante los primeros años, pero al final resolvía los problemas sin cálculos elaborados.

El camino de la izquierda involucra el uso de la ciencia ingenieril en una mayor extensión. Para ser exitoso, debe también reconocer e incluir experiencia previa de campo y debería interactuar para establecer los patrones del comportamiento del suelo. En particular, las suposiciones deben ser físicamente razonables, las predicciones deben ser testeadas contra las observaciones de campo y los métodos deben ser modificados para mejorar el desempeño (Vaughan, 1994).

Focht en su Conferencia Terzaghi de 1994 analizó el concepto de predicción en los proyectos. Discutió los defectos de procedimientos en el proceso predictivo e identificó algunas clases de predicciones para la cual el éxito será limitado. Algunas de estas consideraciones se basan en estadísticas y otras en el criterio o juicio ingenieril.

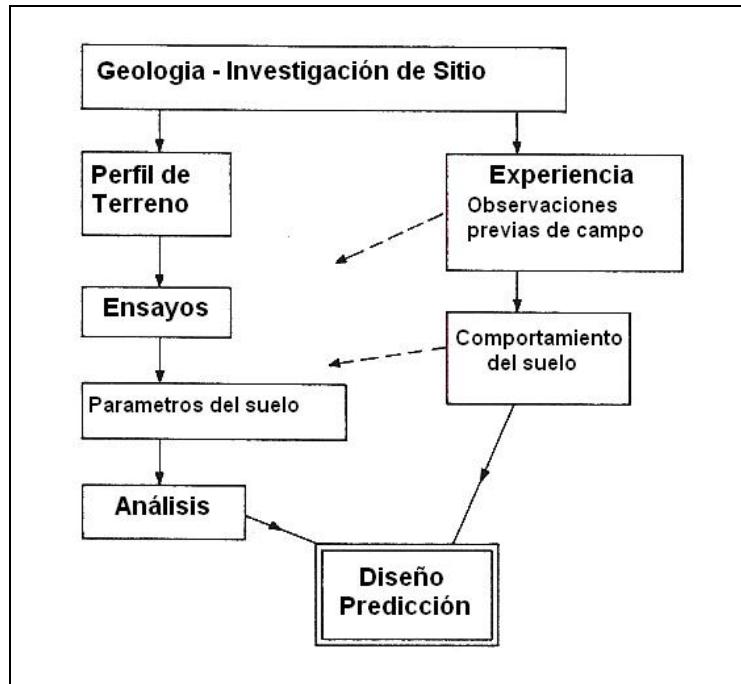


Figura 7: Uso del triángulo geotécnico de acuerdo con la madurez de los ingenieros. El camino de la izquierda es el de los ingenieros jóvenes y el de la derecha de los expertos (Vaughan, 1994).

Por su parte Marr (2006) realizó una apología del criterio o juicio ingenieril con el aporte de las nuevas tecnologías. La práctica de la IG requiere trabajar con datos limitados en ambientes complejos donde las condiciones cambian en cortas distancias y tiempos. Se usan principios de interpolación, extrapolación, deducción e inferencia juntos con su juicio para extender la información limitada a un modelo generalizado del subsuelo de un proyecto. Por eso habla de conceptos de Gerenciamiento de Procesos que Marr espera que dentro de 50 años, también se siga usando. Hay entonces cinco etapas a recorrer en un buen programa geotécnico: Información, Análisis, Predicción, Observación y Evaluación. Todos requieren la aplicación de pensamiento crítico. Este se ha asociado con el criterio o juicio. Las herramientas de nuevas tecnologías proveen más y más información y mejores medios de análisis.

Fracasos y cuestionamientos

Errores y fallas

En Ingeniería Forense existen algunos estudios donde se plantea el rol de las fallas en la Ingeniería. Sowers (1993) definió como falla a la ruptura o colapso de partes significativas de un proyecto o cuando su operatividad causa daños significativos a otros. Examinó unos 800 casos, de los cuales 500 tienen suficiente información. El 88% de las fallas tienen una causa humana, no entender la tecnología contemporánea, o no usarla cuando se la entiende. Este porcentaje desafía a la profesión.

Hay tres caminos para reducir un 30% de las fallas debidas a la ignorancia. Primero, el control profesional. Segundo, incrementar la advertencia a los ingenieros de realizar decisiones involucrando conocimiento especializado o multidisciplinario. Tercero, añadir el conocimiento a los ingenieros a medida que se desarrollan. En este tema tienen importancia las reuniones de las Sociedades de pares y la educación continua. Por su importancia en las fallas, se ha tratado de incorporar el comportamiento humano al estudiar la confiabilidad (Bea, 2006).

Predicción y performance

Si bien en el diseño existe una inmensa cantidad de obras ejecutadas con comportamiento acorde con lo predicho, implícita o explícitamente, se ha podido constatar que los concursos de predicciones de tipo A (antes del evento) tienen un elevado grado de error que varía entre un 30 y un 80%, de acuerdo al tipo de predicción (Morgenstern, 2000; De Mello, 1994; 1999).

Cuestionamientos a las teorías

Reconocidas personalidades de la IG han planteado algunas críticas, sin que se pueda afirmar que se trata de cambios paradigmáticos.

De Mello (1994, 1999) hace una crítica profunda sobre sistemas de clasificación-identificación, perfilado directo sin ninguna visualización de muestras, análisis de equilibrio límite, tanto en general como aplicado a presas, comportamiento de fundaciones superficiales, entre otros.

Schofield (2001, 2005) ha cuestionado de los aportes de Terzaghi y sus seguidores, haciendo hincapié en el desarrollo de los trabajos de Taylor, que se proyectan a través de la modelación del Estado Crítico de la Escuela de Cambridge. Critica tanto el concepto de plano de deslizamiento de Coulomb como el de cohesión verdadera y fricción de Terzaghi resistiendo el deslizamiento.

Fellenius (1999, 2006) ha negado la validez de las hipótesis para el cálculo de capacidad de cargas en zapatas y pilotes. Ha propuesto el abandono de la modelación usada en pilotes siguiendo los criterios tradicionales de Terzaghi, Meyerhoff y otros. Directamente asume el uso de ensayos in-situ. Tiene como principal validación la interpretación de cientos de ensayos de pilotes usando la celda Osterberg.

LA EVOLUCIÓN DEL TETRAEDRO GEOTÉCNICO EN EL FUTURO

El futuro en el pasado

En varias oportunidades se han formulado ideas sobre el desarrollo futuro de la IG, tal como en Terzaghi (1925, 1957, 1961), Peck (1985, 2000), Xeidakis (1994), Clough (2000), Morgenstern (2000), Santamarina (2006), NRC (2006), Simpson y Tatsuoka (2008).

En estos trabajos se plantean miradas retrospectivas hacia el pasado y un brillante futuro. Dentro de esa línea hay otras que comparten argumentos que podrían considerarse como invariantes y entrar dentro de las tendencias a largo plazo.

En un congreso del ASCE dedicado a las Nuevas Tecnologías, Santamarina (2006) expuso una visión tecnológica de las herramientas disponibles y en vías de desarrollo. Las nuevas tecnologías pueden ser medios para cambios de paradigmas no solo en la IG sino también en la Ingeniería Civil.

NRC (2006) es una publicación donde se plantea lo valioso que puede ser invertir en desarrollos de la Geomecánica. Por esa razón su visión es relativamente optimista destinada a desarrollar áreas de vacancia y tópicos a estudiar.

Simpson y Tatsuoka (2008) estiman que la sociedad tiene aspiraciones que son provistas por la Ingeniería Civil y las naciones continuarán mejorando la infraestructura. Se espera avances en todas las formas de construcciones geotécnicas, incluyendo túneles y fundaciones. Particularmente importante serán los refuerzos y mejoramientos de los terrenos. Habrá nuevas técnicas de mejoramiento de sitios de repositorios de residuos. Tendrán una gran importancia la producción, almacenamiento y el uso de la energía.

Prognosis de la evolución del tetraedro geotécnico

La evolución futura puede plantearse opinando sobre los vértices del Tetraedro y la interrelación entre ellos. Una hipótesis muy probable sería una continuación de la forma actual con deformación de los vínculos (Figura 8). El círculo del terreno se aproxima al círculo del comportamiento debido a procesos de acoplamiento de resultados.

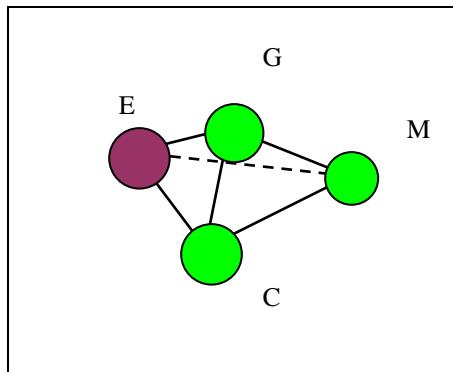


Figura 8: Evolución del tetraedro a largo plazo. Acercamiento de los círculos del terreno y del comportamiento con tendencia a colapsar y fusionarse. G: terreno, C: comportamiento, M: modelación, E: empirismo.

El vértice del terreno

La complejidad de la naturaleza ha hecho que el avance del entendimiento haya sido limitado a pesar de las nuevas herramientas con la que se dispone en los métodos exploratorios. Se puede comentar acerca de algunos temas que sirven de marco de referencia. Los terrenos tienen tres niveles de heterogeneidad (Uzeli et al, 2007):

- Estratigráfico: procesos a la escala del sitio
- Litológica: inclusiones dentro de una masa relativamente uniforme
- Variabilidad inherente: de una posición espacial a otra dentro de la masa geotécnicamente homogénea.

Se pueden hacer proyecciones desde lo general hasta lo particular.

Mejores abstracción de los ambientes geológicos (Geología Total)

El estudio de los distintos ambientes geológicos pensando encontrar en la génesis alguna explicación que sirva para interpolar entre sondeos o prospecciones ha sido generalizado por Fookes et al (2000). Sigue premisas familiares en IG, como el MO. Se proponen alrededor de tres docenas de modelos clasificados como Tectónicos, Geológicos y Geomorfológicos. En cada uno de ellos se planten esquemas descriptivos, características litológicas, problemas que se generan y ejemplos de sitios. Se espera que en un futuro mediato en todo el planeta exista este tipo de información global que permita un encasillamiento de un terreno en particular, en este tipo de esquemas.

Mejores definiciones de tipos de perfiles

La mayoría de las prospecciones se basan en perfiles unidimensionales verticales. Se deberían esperar mejores definiciones de los 7 tipos existentes de perfiles, con sus subvariantes definidos por Knill (2002).

El modelo geológico se construye desde el conocimiento de las características de materiales y macizos y el proceso geológico. Los perfiles deberían tener en cuenta la génesis del proceso.

En ambos casos el progreso que se puede plantear está basado en cambios de escala, lo que es común a otras geociencias. Al análisis va pasando de escalas macro a micro, dentro del mismo objeto de estudio.

Variabilidad espacial. Modelación estocástica vs Estimación

Cuando se analizan los datos de un sitio, debido a la extensión y al limitado número de datos, es necesario plantear cómo extrapolar los resultados de prospección en esos pocos lugares, a otros situados en zonas sin datos (Whitman, 2000).

Este problema se puede resolver mediante distintos procedimientos, tales como las estimaciones geoestadísticas o por simulación estocástica del terreno. Es interesante señalar que esta disyuntiva ya ha sido estudiada en algunas geociencias, en ambientales, en minería y en la edafología. Su uso en IG tiende a incrementarse en el presente y continuará en el futuro (Uzeli et al. 2007; Baecher y Christian, 2003).

Implementación de mejores técnicas de búsqueda de anomalías en sitios

Como decía Glossop (1968), hay que saber qué buscar cuando se programa una prospección de un sitio. Para encontrar singularidades como estratos débiles, licuables, cavidades de disolución, canales, etc. ya está desarrollada la Teoría de Búsqueda con algoritmos probabilísticos. Una descripción extensa se encuentra en Baecher y Christian (2003). Se espera que la tendencia a la masificación de su uso crezca lentamente, como otros métodos probabilísticos.

El vértice de Comportamiento

Obtención de propiedades mediante ensayos de laboratorio y de campo

En la actualidad la elección de aparatos y sistemas de laboratorio es muy compleja, con sistemas universales que le permite realizar cualquier tipo de ensayo (Marr, 2000). Algunos ensayos como el de consolidación tienen reducción de tiempo, ya que el sistema determina automáticamente cuando finaliza la consolidación primaria.

En los ensayos in-situ continuará el uso de SPT, CPT, presiómetros y dilatómetros. Habrá mejores correlaciones basadas en la nueva información, con inclusión de anisotropía, nolinealidad, efectos de historia de tensiones o deformaciones.

Progresará el uso de ensayos no destructivos in-situ, incluyendo técnicas de sensores remotos para capturar las propiedades elásticas en un área más grande o una masa mayor. Adicionalmente a los ensayos derivados de los parámetros in-situ, métodos geofísicos como la tomografía 3D son también relevantes y aumentará su uso.

Es también posible imaginar la exploración remota por medio de robots, tal como los usados en exploración interplanetaria y en las profundidades marinas. No se espera a mediano plazo mejoramientos sustanciales de la calidad de muestreo de suelos.

El desarrollo de investigaciones del comportamiento con costos razonables seguirá con la meta de capturar las propiedades de los estratos en forma detallada y precisa. Esto se logrará introduciendo nuevos métodos de ensayos, y mejorando el hardware, software e interpretación de datos (Simpson y Tatsuoka, 2008).

Los sistemas de monitoreo serán más robustos y económicos, siguiendo no sólo los parámetros convencionales sino también nuevos componentes, tales como químicos, biológicos y nucleares.

La fibra óptica será usada para monitorear deformaciones y las fotografías satelitales serán más confiables para monitorear desplazamientos superficiales. Las estructuras inteligentes monitorearán durante la vida útil tanto el terreno como la estructura. Estos desarrollos serán importantes en prevenir fallas geotécnicas relacionadas con terremotos, deslizamientos, etc. Los MO serán más confiables y populares.

El uso intensivo de bases de datos geotécnicas tenderá a generalizarse en muchas zonas urbanas cuando sean accesibles. Esto requerirá la aceptación política y el desarrollo de bases confiables llevará años y nunca terminará por las continuas actualizaciones. Las bases podrán unirse por medio de Internet, poniendo la información disponible a los ingenieros. Serán necesarios procesos adecuados de computación para encontrar la información relevante, categorizar la calidad e interpretarla.

Mejoramiento en el conocimiento de suelos regionales (“natural soils”)

En los últimos años se han realizado importantes reuniones dedicadas a Suelos Regionales, empleando este nombre para indicar características particulares de determinada zona geográfica. Esto es algo que Terzaghi propuso en su discurso inaugural (“Opening Address”) de 1948.

En 1991 en el Congreso Panamericano de Viña del Mar, Chile, se presentó una Conferencia de Suelos de América.

La ISSMGE ha contribuido al establecer “Heritage Lectures” en cada uno de sus Congresos. Se han realizado dos simposios en los últimos años (2002, 2006) que han producido cuatro volúmenes con descripción muy detallada de distintos tipos de suelos, con sus características regionales. La continuidad de esta tendencia puede llevar a largo plazo a completar el mapa terrestre y plantearse una fragmentación de la Mecánica de Suelos Clásica en ramas regionales.

Asimismo, puede haber un gran acercamiento del Vértice del Terreno con el Vértice del Comportamiento, debido a que las prospecciones tenderán a hacerse en base a propiedades y al comportamiento de los geomateriales.

Cambios de escala con nuevos protagonistas.

Santamarina (2006) plantea su visión sobre la IG en la era de las Tecnologías Informáticas. Esencialmente trata de vincular el comportamiento macroscópico con el micro y nano. A tal fin se requieren nuevos sistemas de medición y de definición de propiedades a medir.

Asimismo, el estudio de microorganismos como agentes de mejoramiento de terrenos tiene una perspectiva con gran desarrollo (Mitchell y Santamarina, 2005).

Incorporación de conceptos estadísticos y probabilísticas en el comportamiento

El tema del Riesgo en IG ha sido planteado por Casagrande (1965), Whitman (1984), Morgenstern (1995, 2000), entre otros numerosos autores.

Una de las fortalezas del MO para el gerenciamiento del riesgo en IG es el énfasis en los tópicos dominantes. Es una filosofía de diseño flexible, capaz de alcanzar beneficios sustanciales, si se provee de adaptación que puede ser acomodada tanto en los procedimientos como en los arreglos contractuales.

Otros autores reconocidos han contribuido a la difusión como por ejemplo, De Mello (1994, 1999), Duncan (2000), Vick (2002), Baecher y Christian (2003) y Christian (2004). Ha habido importantes simposios como el organizado por ASCE (1996) y NRC (1995). El desafío es cómo usar los métodos. Whitman (2000) ha planteado que en el MIT hay una gran tradición en la enseñanza, investigación y aplicación desde hace décadas. Sin embargo, los egresados no emplean los métodos probabilísticos.

El Vértice de la Modelación

Simpson y Tatsuoka (2008) destacan que el desarrollo de modelos tenso-deformacionales de suelos, principalmente por el uso de FEA ha sido el rasgo principal de investigación en los últimos 60 años. Los modelos usados son relativamente simples: Mohr-Coulomb elásticos, CAM CLAY modificado y sus extensiones y desarrollos de los modelos hiperbólicos. Otros más complejos tienen menos uso debido a que requieren muchos parámetros difíciles de obtener. Existe una brecha entre lo que puede ser entendido en principio y lo que puede ser aplicado en la práctica, por las limitaciones en las propiedades deformacionales y en la resistencia de los suelos.

Las tendencias actuales para predecir desplazamientos se dirigen hacia análisis complejos no-lineares, elasto-viscoplásticos, la inclusión de cargas cíclicas, efectos químicos, efectos de envejecimiento y efectos térmicos, hacia una consideración creciente de efectos acoplados entre esos efectos, y un mayor desarrollo de la mecánica de suelos no-saturada.

La idea de fusión entre las distintas ramas de la geomecánica tiene algunos problemas de objetivos. En los ámbitos académicos para alcanzar originalidad, se tiende a la especialización en tópicos estrechos. En la práctica, los ingenieros tratan con una gran variedad de geomateriales, requiriendo tanto detalles micro como macro.

El cambio más significativo a observar en el futuro se refiere a la modelación de medios discretos como partículas de suelo o bloques de rocas. En general, los geomateriales están formados por partículas pero se lo modela como continuo como por ej. FEM (“Finite Element Method”). El DEM (“Discrete Element Method”) se ha estado popularizando. Las limitaciones son computacionales. En un metro cúbico hay 10^9 mm³. Actualmente se modelan 105 partículas pero se puede alcanzar a 1011 para 2020, o sea que los suelos reales requieren de mayor número y potencia computacional.

La idea de modelar partícula por partícula parece remota. Se ha planteado usar factores de escala y modelar situaciones prácticas como taludes, aunque hay dificultades en la localización de bandas de corte y flujo de agua.

Tendencia a la unicidad tal como existe en Ingeniería Estructural e Hidráulica.

A lo largo del tiempo la IG ha resultado un campo fértil para la enunciación de teorías y modelación de problemas. Algunos de ellos, como la estabilidad de taludes, presentan en algunos casos indeterminaciones que se prestan a

métodos que difieren en hipótesis iniciales. Otros como en la modelación de pilotes o fundaciones superficiales tienen amplia gama de métodos.

Desde el punto de vista conceptual, no existe forma de validar en forma absoluta los distintos procedimientos. Con tantos métodos se debe arribar a un acuerdo entre los profesionales y privilegiar al que sea más conveniente. Esta arbitrariedad tiende a constituir los paradigmas. A tal fin se requiere que exista unicidad de criterios. En otras ramas de la Ingeniería es bastante frecuente encontrarla. Eso se pregunta De Mello en su conferencia de 1999, aunque es difícil vislumbrar cambios de tendencias en un futuro cercano.

Cambio de valoración de la seguridad

Es muy común el trabajo mancomunado de los ingenieros estructuralistas con los geotécnicos, y también frecuente algunas discrepancias. Uno de los principales conflictos radica en una mayor preponderancia de razonamiento inductivo en los geotécnicos por las variaciones naturales de terrenos, mientras que predomina la deducción en los estructuralistas.

Los nuevos códigos estructurales tienden a condicionar la forma del cálculo de las fundaciones y eso ha llevado a valorar la seguridad brindada desde la geotecnia.

Actualmente conviven las valoraciones de la seguridad mediante el tradicional FS (Factor de Seguridad) y mediante LRFD (“Load and Resistance Factor Design”). La proyección claramente muestra una inclinación hacia esta última. El concepto básico de LRFD es familiar a muchos ingenieros geotécnicos. La idea esencial es que el diseño debería comenzar por identificar los estados límites, límites de falla, tal como la inestabilidad de taludes, o límites de serviciabilidad, como el asentamiento admisible.

Se aplican factores parciales a los componentes de diseño para incrementar las cargas y disminuir las resistencias. Los factores parciales se usan en lugar de un FS global. Esto no es nuevo: en el libro de Taylor (1948) se presenta una discusión sobre el uso de factores parciales en estabilidad de taludes. Actualmente se está investigando los valores apropiados de factores parciales. Están basados en análisis probabilístico de la confiabilidad.

Di Maggio (2004) ha comparado los desarrollos en la práctica de Fundaciones Profundas en USA desde 1980 y predice hasta 2023 aproximadamente. La medida del éxito para un proyecto de 1980 era sencillo: cumplir con los requerimientos de cargas en términos de tensión de trabajo y aplicar factores globales de seguridad. Actualmente se usan criterios de cargas y performance con combinaciones complejas incluyendo eventos extremos. Asimismo se estudian deformaciones verticales y laterales. Confirma también la tendencia hacia LRFD para fundaciones estructurales y muros de retención.

Se piensa que LRFD tendrá un impacto en USA. El Eurocódigo 7 ya prescribe procedimientos equivalentes en la práctica europea. Esta también en estudio en Asia y Canadá.

Propensión hacia el uso de probabilidades en la modelación

El Prof. Peck menciona en el trabajo de la NRC (2006):

“Vemos que los ingenieros geotécnicos están desarrollándose en dos diferentes entidades: una parte todavía trata con los problemas tradicionales tales como fundaciones, presas, y estabilidad de taludes, y otra parte trata con problemas sísmicos, taludes naturales, y más recientemente, con geotecnia ambiental. Los practicantes en el primer grupo no han adoptado la Teoría de Confiabilidad, principalmente porque los métodos tradicionales han sido exitosos y los ingenieros se sienten confortables con ellos. En contraste, los practicantes en geotecnia ambiental y hasta cierta extensión en ingeniería off-shore requieren nuevas, y más astringente asistencia de confiabilidad que llama a una aproximación diferente. No es sorprendente que esos ingenieros trabajando en problemas de ambiente y off-shore sean los más receptivos a las nuevas aproximaciones, y no debería sorprendernos que ellos sean los diseminadores hacia las áreas tradicionales”.

Se podría agregar a esta lista la evaluación y remediación de facilidades existentes, como presas, originalmente diseñadas por métodos tradicionales. Algo similar está en el pensamiento de Whitman (2000) y Duncan (2000). Éste concluye en su trabajo desmitificador de los métodos probabilísticos que la Teoría de Confiabilidad puede ser aplicada

en IG a través de procedimientos simples que no requieren mayores datos que en el análisis determinístico y es suplementario al uso de FS.

El vértice de la práctica.

Todo indica que el derrotero del vértice de la práctica seguirá imperturbable con nuevos desarrollos tecnológicos en el campo de las fundaciones y de la remediación. El tratamiento del flujo calórico aparece como una idea promisoria.

La robustez del Método Observacional

El desarrollo rápido de la electrónica y de las comunicaciones facilitará grandes avances en equipamiento de laboratorio y terreno, en las aproximaciones de monitoreo y observacional y la posibilidad de reconocimiento remoto de sitios. La experiencia y el empirismo continuarán siendo esenciales en el diseño geotécnico (Simpson y Tatsuoka, 2008).

El principal baluarte, el MO, va a contar con refuerzo sustancial de las nuevas tecnologías y del uso creciente de las probabilidades que posibilitará el empleo de la actualización bayesiana.

El control de calidad y mediciones del Eurocode siguen etapas que están basadas en la filosofía del MO.

Asimismo, con la inclinación a licitar grandes proyectos con la ingeniería incluida se verá favorecido ya que el MO requiere de flexibilidad que no la da el sistema proyecto – construcción en forma separada.

El diseño y el proceso constructivo

El proceso de diseño geotécnico usualmente envuelve la asimilación de datos, una revisión de la experiencia de casos, códigos de práctica y datos empíricos y algunos cálculos conducentes a las decisiones de diseño. El proceso no se espera que cambie pero sí en rasgos en los que se espera más desarrollos. Será más dependiente en computadoras como fuentes de datos y cálculo. No está claro hasta dónde la inteligencia artificial y el proceso computarizado de análisis de riesgo podrían reemplazar la experticia del ingeniero humano. Existe el riesgo de que los ingenieros se vuelvan inhábiles sin adecuado reemplazo (Simpson y Tatsuoka, 2008).

Es de destacar que los cambios más significativos se ven en la socialización de la información (Simpson y Tatsuoka, 2008). Hasta hace poco tiempo los conocimientos tecnológicos eran transmitidos en tres maneras: palabra escrita en papel (por ejemplo, “journals”), conferencias y clases y transferencia entre colegas.

Con el advenimiento de las comunicaciones el conocimiento basado en la Web se ha vuelto incrementalmente importante, especialmente para los jóvenes. Hay también foros temáticos.

Los “journals” con revisión de pares seguirán siendo fuentes confiables y de control para la investigación.

La evaluación de las propiedades del terreno, sin dudas el más importante aspecto del diseño geotécnico, no se puede reducir fácilmente a un código de práctica. De esta manera, los códigos tienden a actuar como una guía de chequeo, dando pautas sobre procedimientos.

Los procesos confían en el conocimiento humano y experticia, pero puede ser que el desarrollo de bases de datos y de inteligencia artificial permita que los mismos sean realizados por una computadora.

Está en debate la importancia relativa de la serviciabilidad y los estados límites últimos en el diseño geotécnico; si los factores parciales de seguridad deben ser lógicamente aplicados, la parte que debe jugar el análisis probabilístico, y el rol del diseño basado en performance.

La ingeniería civil usa grandes cantidades de energía. La economía en el diseño es esencial, afectada por las magnitudes de los factores de seguridad. La sociedad necesita códigos de práctica que adopten los mínimos aceptables factores de seguridad, los que conducen al progresivo refinamiento de los códigos.

EL ROL DE LA EDUCACIÓN EN LA FORMACIÓN DEL INGENIERO GEOTÉCNICO

La educación es un tema esencial en el análisis de tendencias. Se puede plantear como hipótesis que una parte de la negación del avance teórico se debe a un problema cultural en la educación de los ingenieros geotécnicos.

El mundo tecnológico cambia tan rápido que los actuales estudiantes de ingeniería van a vivir y trabajar en un mundo diferente de aquel para lo que fue diseñada su educación. Factores como la declinación de recursos naturales, el crecimiento poblacional, la globalización, el deterioro del ambiente, las comunicaciones instantáneas, la rápida aceleración del desarrollo económico, etc., hacen necesario la continua adaptación de los programas de educación a las nuevas condiciones del mundo (Xeidakis, 1994).

Terzaghi (1957) afirmaba que: "...luego que el estudiante haya absorbido la Teoría de Estructuras, Mecánica de Suelos y Geología Ingenieril en su cabeza y haya pasado los exámenes finales, comienza su desarrollo real..." (paradigma de teoría)

...“el resultado final depende enteramente de las calificaciones innatas y del entorno. El entrenamiento profesional puede transformar a un individuo en un técnico o en un ingeniero de primera clase...” (paradigma de práctica)

Hay algunos temas generales que merecen destacarse debido a su conexión con la IG. Santamarina et al. (2003) ha realizado una compilación referida al ingenio y la creatividad, colocando énfasis en los hallazgos más relevantes a la profesión, en especial en la Ingeniería Civil. La Ingeniería es la aplicación creativa de los principios científicos. Sin embargo, la naturaleza del ingenio y creatividad permanecen elusivas, y no se promocionan en el sistema educacional.

Aportes de especialistas en geotecnia

En publicaciones recientes se han reflejado algunos de los temas que más preocupan a los profesores que enseñan IG (Marcuson et al., 1991; Mitchell, 1999).

Clough (2000) hizo una reseña de lo que sucede en los Estados Unidos. En la década de 1930 la IG se ofrecía en dos universidades. Actualmente ha proliferado siendo esto relacionado con la evolución de la práctica geotécnica. Todos los geotécnicos están pensando para ayudar a definir la currícula y los programas del futuro. Parece que la tendencia se encamina a ofrecer maestrías de tres tipos: Especialista Geotécnico, Geoambiental y Generalista Geotécnico.

Townsend (2005) observa el panorama muy optimista, teniendo en cuenta que la globalización alcanzará a todos los países y el mercado de la ingeniería civil se verá favorecido.

Hay una evolución hacia nuevas formas pedagógicas, por ejemplo, Internet aunque es importante la interacción personal, particularmente a nivel de grado. El modelo será dictado por la demanda. Por ejemplo, para la educación continua por Web y para los graduados, de tipo residencial. Las universidades élite puede copar la Web, aunque no será exclusivo.

Seco e Pinto (2007) planteó la visión europea. Actualmente la integración se ha llevado a cabo a través de Protocolos y Conferencias especiales. El más importante corresponde al Tratado de Bologna (1999) donde 29 países europeos que tiende a unificar las currículas de países europeos en ciclos. El Primer Ciclo dura 3 años conducentes a un bachillerato (“Bachelor”) con salida laboral. El Segundo Ciclo debe conducir a Maestría y Doctorado.

A su vez en Estados Unidos existe la intención de tener el grado de “Master” como el primer título habilitante para la Ingeniería Geotécnica y Geoambiental. Esto está auspiciado por el ASCE que ha formulado la Declaración 465 en Octubre de 1998 donde avala esa intención.

Asimismo, la ISSMGE creó en 1990 un grupo de Tareas en Educación en Geotecnia en cooperación con las Sociedades Hermanas para relevar las currículas y educación en varios países y el tema se ha discutido en numerosos congresos.

Herramientas disponibles para el mejoramiento de la enseñanza de Geotecnia

Seco e Pinto (2007) indica que las necesidades educacionales representan un desafío para el futuro y pueden ser cubiertas por el uso de modelos físicos que podrían ser usados para despertar el interés de los alumnos para el trabajo

experimental. En caso de falta de equipamiento, se pueden usar videos u otros medios. El uso de Internet y otras facilidades de computación contribuyen a estimular a los estudiantes para el acceso a las fuentes de información.

Empleo de casos de ingeniería en el aula

Una de las mejores maneras de mejorar el aprendizaje con casos ingenieriles es la discusión en la clase. Es muy importante el modo de interacción entre estudiante-instructor. El principal propósito de este aprendizaje es cambiar el desempeño del estudiante en ciertas situaciones y dar a los estudiantes información acerca del cuerpo de conocimiento y entrenarlos a responder en una manera prescripta a tipos específicos de problemas.

Uso de la experiencia en la enseñanza

Wartman (2006) indica que el uso de herramientas experimentales en la enseñanza de IG, empleando modelación física se está comenzando a emplear tanto en la práctica como en la educación. En este campo se emplea en problemas de capacidad de carga, presión lateral de suelos, estabilidad de taludes y flujo a través de medios porosos.

Se propicia el uso de centrífugas educacionales para tratar modelos físicos que encuadran mecanismos geotécnicos no-lineares y fenómenos que son difíciles de visualizar.

Con ellos por medio de la observación geotécnica del modelo a escala, los estudiantes desarrollan intuición y sentido físico de los mecanismos fundamentales que gobiernan el comportamiento de suelos.

Los modelos a escalas pueden ser llevados al colapso permitiendo a los estudiantes observar mecanismos de falla. Asimismo permiten visualizar la desviación entre la performance predicha y real de sistemas geotécnicos.

Como proceso pedagógico se emplea la Teoría de Aprendizaje de Kolb expuesta en 1985 como la teoría de aprendizaje experimental. Está basada en cuatro elementos de aprendizaje que se arreglan en un círculo (Figura 9).

Hay que seguir el orden y cuando se finaliza se puede comenzar de nuevo a mayor profundidad. El modelo es más un espiral que un círculo. El modelo de aprendizaje es análogo a los modelos basados en mecanismos usados para representar sistemas ingenieriles.

El ciclo de aprendizaje de Kolb está basado en las dicotomías en la manera que los individuos perciben y procesan información. Las dicotomías están arregladas ortogonalmente en el ciclo de aprendizaje y reflejan las preferencias personales del estilo de aprendizaje.

El eje vertical de aprendizaje tiene dos extremos en la percepción de la información. Unos prefieren la experiencia concreta (experimentos de laboratorio) mientras otros la conceptualización abstracta y análisis (desarrollando analogías).

Este eje une los carriles de la práctica y de la teoría representados en la Figura 5.

El eje horizontal muestra dicotomías en la forma en que la información es procesada. En un extremo unos procesan a través de experimentación activa (simulación) mientras que otros por observación reflexiva (discusión).

Kolb (1985) calificó a los estudiantes en cuatro grupos de acuerdo a cómo entran en su ciclo, de acuerdo a las preferencias por percibir (CE a AC) y procesar (AE a RO) información. Generó un sistema de puntuación, donde: 1. Divergentes (CE y RO), 2. Asimiladores (RO y AC), 3. Convergentes (AC y AE), usualmente los ingenieros civiles y 4. Acomodadores (AE y CE).

Si bien se puede aprender en cualquier cuadrante, se refuerza si se ejercitan los cuadrantes menos favorecidos naturalmente. Los cursos de IG oscilan pendularmente entre los cuadrantes 2 (dictado) y 3 (deberes). Desgraciadamente esta aproximación no promueve el aprendizaje comprensivo. Si se incorporan CE y RO como demostración de modelos físicos y experimentos se puede asegurar que los estudiantes son entrenados en los cuatro cuadrantes del ciclo de aprendizaje.

Como un ejemplo de aplicación, Wartman (2006) plantea un ejemplo de capacidad de carga. Si no se dispone de facilidades experimentales se pueden bajar de Internet los experimentos.

PRACTICA



TEORIA

Figura 9: Esquema de aprendizaje según Kolb. Los carriles del Paradigma de la práctica y de la teoría tienen el mismo significado de la Figura 5, (adaptado de Wartman, 2006).

CONCLUSIONES

Todo indica que la Ingeniería Geotécnica está en un estadio maduro. La evolución es explicable con el Triángulo de Burland expandido tridimensionalmente (Tetraedro). Si se la combina con las ideas de Vick, donde se clarifica la dualidad teoría-práctica, es posible realizar un paseo desde el pasado hacia el futuro.

La prognosis está supeditada al curso que tome la civilización, en especial la forma de satisfacer necesidades básicas como la energía. La mayoría de los especialistas son optimistas, aunque con opiniones sesgadas hacia el éxito.

La asociación con ciencias naturales, en el estudio del terreno, incrementa la necesidad de razonamiento inductivo, muy superior a otras ramas de la Ingeniería Civil. Asimismo, la complejidad de la naturaleza traslada a la IG una gran cantidad de incertidumbres que favorecería la adopción de métodos probabilísticos de las propiedades relacionados del terreno.

La solución ingenieril a casos complejos que siempre ha existido, se ha formalizado a través del Método Observacional. Su aplicación tiene asegurado el futuro dentro de las TICs, aunque está muy supeditada a condiciones contractuales flexibles y su éxito, al tipo de falla (dúctil).

Los problemas culturales de los ingenieros pueden ser abordados con métodos educativos que abarquen mayor experimentación y entren tangencialmente en el mundo de la práctica ingenieril.

Si se examina el Tetraedro y la función del sistema educativo se puede inferir que una gran parte del sistema de transmisión de la experiencia funciona a través de vínculos no formales, tales como las reuniones entre colegas.

Esta posiblemente sea la principal misión de las geo-sociedades y la razón de subsistencia dentro del mundo de las TICs.

En un mundo plano abunda información que no necesariamente es conocimiento. Las publicaciones tienden a tener sesgo exitista al no contarse de igual modo los fracasos. Gran parte de lo escrito corresponden al paradigma de la teoría

y unas pocas tratan de transmitir experiencias. Por esa razón son singularmente importantes los Congresos donde los especialistas discuten sobre sus experiencias.

AGRADECIMIENTOS

Esta presentación se ha visto enriquecida por las discusiones realizadas con especialistas y no-especialistas en IG, como R.E. Terzariol, E.R. Redolfi, J.J. Galarraga, M. Herz, M.E. Zeballos, C.A. Prato, L.A. Godoy y F.M. Francisca, a quienes se agradece sus comentarios.

REFERENCIAS

- Baecher, G.B and Christian, J.T. (2003). “*Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering*”, Wiley, Chichester, U.K.
- Bea, R. (2006). “Reliability and Human Factors in Geotechnical Engineering”, *Journal Geotechnical Geo-Environmental Engineering*, Mayo 2006, ASCE, Vol. 132, No. 5, pp. 631-643.
- Bock, H. (2006). “Common ground in engineering geology, soil mechanics and rock mechanics: past, present and future”, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Vol. 65, No. 2, pp. 209-216.
- Boer, R. de, (2005). “The engineer and the scandal”, A piece of Science History, Springer-Verlag, pp. 293, Berlin.
- Burland, J. (2007). “Terzaghi: back to the future”, *Bulletin of Engineering Geology and Environment*, Vol. 66, No. 1, pp. 29-33.
- Casagrande A. (Julio 1965). “Role of the “Calculated Risk” in Earthwork and Foundation Engineering”, *Journal of the Soil Mechanic and Foundation Division*, ASCE, Vol. 91, SM4, pp. 1-40.
- Clough, G.W. (2000). “A view of the Future of Geotechnical Engineering”, En: Judgement and Innovation, the heritage and future of the Geotechnical Engineering, F.Silva y E. Kavazanjian, ed., ASCE Geotechnical Special Publication, No. 111, pp. 1-12.
- Christian, J.T. (2004). “Geotechnical Engineering Reliability: How well do we know what are doing?”, *39th Terzaghi Lecture, Journal Geotechnical Geo-Environmental Engineering*, ASCE, Vol. 130, No. 10, pp. 985-1003.
- Chrimes, M. (2008). “Geotechnical publication before Geotechnique”, *Geotechnique*, Vol. 58, No 5, pp. 343-355.
- De Mello, V.F.B. (1994). “Revisiting our origins. Terzaghi Oration”, XIII International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, New Delhi, India, Vol. 6, pp. 13-34.
- De Mello, V.F.B. (1999). “Geotechnical Engineering for the Third Millenium. Seeking a Renewed Start”, Proceeding, XI Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Iguazu, Vol. IV, pp. 119-157.
- Duncan, J.M. (2000). “Factors of Safety and Reliability in Geotechnical Engineering”, ASCE, *Journal Geotechnical Geo-Environmental Engineering*, Vol. 126, No. 4, pp. 307-316, Closure, Vol. 127, No. 8, pp. 700-721.
- Einstein H.H. (1991). “Observation, Quantification, and Judgement: Terzaghi and Engineering Geology”, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 117, No. 11, pp. 1772-1778.
- Fellenius, B.H. (1999). “Bearing Capacity of Footing and Piles-A Delusion?”, Proceedings Deep Foundation Institute Annual Meeting, October 14-16, Dearborn, Michigan.
- Fellenius, B.H. (2006). “*Basics of Foundation Design*”, E-Book, pp. 275.
- Focht, J.A. (1994). “Lessons Learned from Missed Predictions”, *29th Terzaghi Lecture, Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 120, No. 10, pp. 1653-1683.
- Fookes, P.G., F.J. Baynes and J.N. Hutchinson. (2000). “Total Geology History: a Model Approach to the Anticipation, Observation and Understanding of Site Conditions”, *Geo Eng 2000*, Vol. 1, Invited Papers, pp. 370-470.
- Glossop, R. (1968). “The rise of geotechnology and its influence on engineering practice”, *8th Rankine Lecture, Geotechnique*, Vol. 18, pp. 107-150.
- Goodman, R.E. (1999). “Karl Terzaghi-The Engineer as Artist”, ASCE Press, Washington, pp. 340.
- Hendron, A.J. (1990). “The rol of Precedent, Soil Mechanics and Rock Mechanics in Geotechnical Practice”, in Duncan JM, HB Seed Memorial, Vol. 2, pp. 83-110.
- Hussein, H and G. G. Goble. (2004). “A Brief History of the Application of Stress-Wave Theory to Piles”, en J.A. DiMaggio and M. H. Hussein (ed.), *Current Practices and Future Trends in Deep Foundations*, ASCE Geotech, Special Publ. No. 125, pp. 186-201.
- Knill J. (2002). “Core values: The First Hans Cloos Lecture”, Proceeding 9th Congress International Asociation of Engineering Geology, Vol. 1, pp. 1-46.

- Lombardi, G. (2000). "Los problemas actuales de la geo-ingeniería", Discurso del 22 Nov. 2000, Academia Nacional de Ingeniería, Buenos Aires, Argentina.
- Marr, W.A. (2000). "Advances and Retreat in Geotechnical Measurements", En: Judgement and Innovation: the heritage and future of the Geotechnical Engineering, F. Silva y E. Kavazanjian ed. ASCE Geotechnical Special Publications 111, pp. 42-60.
- Marr, W.A. (2006). "Geotechnical Engineering and Judgment in the Information Age", GeoCongress 2006 Geotechnology in the Information Age. DJ De Grout, JT De Jong, JD Frost, LG Baise, Eds, 1-17.
- Marcuson, W.F., R. Dobry, J.D. Nelson, R.D. Woods and T.L. Youd. (1991). "Issues in Geotechnical Engineering Education", *Journal of Professional Issues in Engineering Education and Practice*, ASCE, Vol. 117, pp. 1-9.
- Menard, L. and Broise Y. (1976). "Theoretical and practical aspects of dynamic consolidation", Ground Treatment by deep compaction, Institution of Civil Engineers, LONDON, pp. 3-18.
- Mitchell, J.K. (1999). "Education in Geotechnical Engineering- Its evolution, Current Status and Challenges for the 21th Century", XI Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Iguazu, Vol. 4, pp. 167-174.
- Mitchell, J.K. and J.C. Santamarina, (2005). "Biological Considerations in Geotechnical Engineering", *Journal Geotechnical Geo-Environmental Engineering*, ASCE, Vol. 131, pp. 1222-1233.
- Moretto, O. (1984). "Impacto de la Mecánica de Suelos en la Ingeniería Civil", Proc. 8º Congreso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Fundaciones. Neuquen, Vol. 3, pp 883-926.
- Morgenstern, N.R. (1995). "Managing Risk in Geotechnical Engineering. 2nd Casagrande Lecture", Proceedings, X Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Guadalajara. Vol. IV, pp. 102-126.
- Morgenstern, N.R. (2000). "Performance in Geotechnical Practice. The Inaugural Lumb Lecture", Hong Kong.
- Munfakh, G.A. (2004). "Geotechnical innovations in transportation projects", ASCE Geo Trans 2004, Vol. 1, pp. 1-17.
- National Research Council. (2006). "Geological and Geotechnical Engineering in the New Millennium", The National Academy Press, Washington, 206 pp.
- Nicholson, D.P. (1994). "Preface. The Observational method in Geotechnical Engineering", Ninth Geotechnique Symposium in Print, *Geotechnique*, Vol. 44, pp. 613-618.
- Nuñez, E. (2007). "Uncertainties and Approximations in Geotechnics", *6th Casagrande Lecture. XIII Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Margarita, Venezuela, Vol. 1, pp. 26-39.
- Peck, R.B. (1962). "Art and Science in Surface Engineering", *Geotechnique*, Vol. XII, pp. 59-66.
- Peck, R.B. (1969). "Advantages and Limitations of the Observational Method in Applied Soil Mechanics", *9th Rankine Lecture, Geotechnique*, Vol. 19, pp. 171-187.
- Peck R.B. (1985). "The last sixty years", Proceeding XI International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering Golden Jubilee, Volume, pp. 123-133.
- Peck, R.B. (2000). "Are the glory days all behind us?", En: Judgement and Innovation: the heritage and future of the Geotechnical Engineering, F. Silva y E. Kavazanjian, ed., ASCE Geot. Sp. Publ 111, pp. 61-64.
- Poulos, H.G. (2006). "The invisibility of the Geotechnical Engineer", *Geostrata*, Vol. 6, pp. 10-11.
- Santamarina, J.C. (2003). "Creativity and Engineering-Education Strategies", Proc. Int. Conference on Engineering Education in Honor of J.T.P Yao, Texas A&M, pp. 91-108.
- Santamarina, J.C. (2006). "Geotechnology: Paradigm shifts in the Information Age", GeoCongress 2006 Geotechnology in the Information Age. DJ De Grout, JT De Jong, JD Frost, LG Baise, Eds.
- Schofield, A. (2001). "Re-appraisal of Terzaghi's Soil Mechanics", Invited Conference, *International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Istambul.
- Schofield, A. (2005). "Disturbed Soil Properties and Geotechnical Design", T. Telford, London, pp. 219.
- Seco e Pinto P.S. (2007). "Future of Higher Education in Europe", IV Pan. Am. Conf. Enseñanza y Aprendizaje de Ingeniería Geotécnica, La Habana, Cuba.
- Simpson, B. and Tatsuoka, F. (2008). "Geotechnics: the next 60 years", *Geotechnique*, Vol. 58, pp. 357-368.
- Sowers, G.F. (1993). "Human Factors in Civil and Geotechnical Engineering Failures", *28th Terzaghi Lecture, Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 119, pp. 238-256.
- Terzaghi, K. (1925). "Principles of Soil Mechanics. VIII-Future Development and Problems". *Engineering News Record*, Vol. 95, No. 27, pp. 1064-1068.

- Terzaghi, K. (1936). "Relation between soil mechanics and foundation engineering", Presidential Address, Proceedings. I International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Cambridge, Mass, Vol. 1, pp. 54-56.
- Terzaghi, K. (1951). "The Influence of Modern Soil Studies on the Design and Construction of Foundations", Building Research Congress, London, Div. 1, Part III, pp. 139-145.
- Terzaghi, K. (1957). "Presidential Address", IV International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, London, United Kingdom, Vol. 3, pp. 55-58.
- Terzaghi, K. (1958). "Consultants, clients and contractors", *Boston Society of Civil Engineers Journal*, Vol. 45, No. 1, pp. 1-15, Harvard Soil Mechanics Series, 54.
- Terzaghi, K. (1961). "Past and Future of Applied Soil Mechanics", *Boston Society of Civil Engineers Journal. April. Harvard Soil Mech*, Series No 62.
- Townsend, F.C. (2005). "Challenges for Geotechnical Engineering Graduate Education", *Journal Professional Issues in Engineering Education and Practice*, ASCE, Vol. 131, Issue 3, pp. 163-166.
- Uzielli, M., Lacasse, S., Nadim, F. and Phoon, K.K. (2007). "Soil variability analysis for geotechnical practice", Characterization and Engineering Properties of Natural Soils, Tan, Phoon, Hilt and Leroueil (Eds) Taylor and Francis, London.
- Vaughan, P.R. (1994). "Assumption, prediction and reality in geotechnical engineering", *34th Rankine Lecture, Geotechnique*, Vol. 44, pp. 573-609.
- Vick, S.G. (2002). "Degrees of Belief. Subjective Probability and Engineering Judgement", ASCE Press, pp. 455.
- Viggiani, C. (1999). "Does engineering need science?", En D. Kolymbas Ed. Constitutive Modelling of Granular Materials, pp 25-36. Springer-Verlag, Berlin.
- Wartman, J. (2006). "Geotechnical Physical Modelling for Education: Learning Theory Approach", *Professional Issues in Engineering Education and Practice*, Vol. 132, Issue 4, pp. 288-296.
- Whitman R.V. (1984). "Evaluating Calculated Risk in Geotechnical Engineering", *19th Terzaghi Lecture, Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 110, pp. 145-188.
- Whitman, R.V. (2000). "Organizing and Evaluating Uncertainty in Geotechnical Engineering", ASCE J.GGE, Vol. 126, No 7, pp. 583-593.
- Xeidakis, G. (1994). "Future directions of civil engineering education", *European Journal of Engineering Education*, Vol. 19, issue 2, pp. 141.