
TERZAGHI Y LA MECANICA DE SUELOS

Jorge E. Alva Hurtado, PhD

- ***Profesor Principal***
Facultad de Ingeniería Civil
Laboratorio Geotécnico del CISMID
Universidad Nacional de Ingeniería

- ***Consultor en Ingeniería Geotécnica***
HIDROENERGIA Consultores en
Ingeniería SRL.

MAYO 1996

TERZAGHI Y LA MECANICA DE SUELOS

INTRODUCCION

Los constructores han sido conscientes desde hace muchos siglos que las condiciones del terreno debían ser consideradas para que sus edificaciones no se asienten, inclinen o colapsen. La construcción antigua se realizaba en base a la experiencia del constructor. Sin embargo no fue sino hasta 1776, cuando Coulomb introdujo sus teorías de presión de tierras, que se aplicaron los métodos analíticos. En 1871 Mohr presentó una teoría de falla para materiales idealmente plásticos, que en combinación con el trabajo de Coulomb, produjo la expresión muy conocida de resistencia cortante de suelos, $\tau = c + \sigma \tan \phi$.

Recién con el trabajo realizado por Terzaghi, la Mecánica de Suelos fue reconocida como una disciplina principal de la Ingeniería Civil. Este término y el de Geología Aplicada a la Ingeniería, fueron introducidos en su libro pionero “Erdbaumechanik auf Bodenphysikalischer Grundlage” publicado en 1925. El reconocimiento internacional de esta disciplina se logró con la Primera Conferencia Internacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Cimentaciones, llevada a cabo en la Universidad de Harvard en junio de 1936. Esta conferencia, presidida por Terzaghi, fue organizada por el Profesor Casagrande. Un hito principal en la Mecánica de Suelos fue la publicación en 1943 del libro “Theoretical Soil Mechanics” de Terzaghi, el que hasta ahora permanece como una importante referencia. Este libro fue seguido por “Soil Mechanics in Engineering Practice” de K. Terzaghi y R.B. Peck en 1948 y por trabajos posteriores de otros investigadores.

La Mecánica de Rocas fue una disciplina desarrollada y practicada durante muchos años por ingenieros y geólogos en la industria petrolera y minera. Esta no fue reconocida como parte de la Ingeniería Civil sino hasta 1960, en el Primer Congreso de la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas en Lisboa. El término Ingeniería Geotécnica fue lanzado con la revista Geotechnique en 1948 por la Institución de Ingenieros Civiles de Gran Bretaña, siendo utilizado el término desde entonces en Europa y Sudamérica. La Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (ASCE) adoptó el término de Ingeniería Geotécnica en 1974 para una de sus Divisiones y su revista correspondiente de publicación mensual. En la actualidad este último término incluye la mecánica de suelos, ingeniería de cimentaciones y mecánica de rocas, e implica una fuerte relación con la geología aplicada a

la ingeniería.

El amplio espectro de las numerosas contribuciones de Karl Terzaghi a la mecánica de suelos, hoy denominada ingeniería geotécnica, es asombroso. Muchas de dichas contribuciones permanecen como la base de muchos elementos de este arte - ciencia. Algunas de las contribuciones más importantes son: el principio de los esfuerzos efectivos y la teoría de la consolidación que datan de 1920, y el concepto de módulo de reacción de subrasante en 1955. Terzaghi desarrolló criterios de diseño para el soporte de túneles en roca en base a una evaluación empírica de la calidad de la roca en 1946 y fue uno de los primeros investigadores en reconocer el significado de la inestabilidad del fondo marino en 1956. El número total de publicaciones del Profesor Terzaghi supera los 280, lo que demuestra el amplio rango de sus intereses y contribuciones a la mecánica de suelos.

En esta ocasión presentaré un resumen de la biografía de Terzaghi, la cual ha sido publicada por su más cercano colaborador, el Profesor Arthur Casagrande, tanto en el libro Aniversario (1960) como en su artículo de la revista Geotechnique (1964) después de la muerte de Terzaghi. Seguidamente describiré brevemente las principales contribuciones de Terzaghi a la Ingeniería Civil, tal como han sido narradas por sus colaboradores y amigos en las distintas publicaciones revisadas. Finalmente presentaré el mensaje de Karl Terzaghi respecto a los requerimientos para la práctica de la mecánica de suelos aplicada y lo que debe ser un consultor en ingeniería geotécnica.

VIDA Y LOGROS DE TERZAGHI

Karl Terzaghi nació el 2 de octubre de 1883, en Praga, entonces provincia bohemia de Austria, donde su padre, Anton von Terzaghi, estaba temporalmente asignado como oficial del ejército. Se esperaba que Karl siguiera la carrera militar de sus antecesores, pero cambió sus planes cuando descubrió, a los 14 años, que un pequeño defecto de visión le impediría alistarse en el ejército austriaco. Estudió, en cambio, ingeniería mecánica en la Universidad Técnica de Graz, graduándose en 1904. Como estudiante se dedicó más a asistir a cursos de geología, astronomía y filosofía, que a los propios de su carrera. Había ya comenzado la búsqueda de algo que satisficiera su intensa curiosidad y su deseo de explorar más allá de los límites del conocimiento de su época. Con todo, sus años de estudiante fueron un período borrascoso. Sin estrella que lo guiara ni mano firme que sostuviera el timón, estuvo al borde del naufragio. Es verdad que hubo miembros de la

Facultad que reconocieron en la suya una mente bien dotada y potencialmente creadora, siendo uno de ellos F. Wittenbauer, Profesor de Mecánica, que también era poeta y dramaturgo. Se dice que él defendió a Terzaghi cuando la Facultad quería expulsarlo por excesiva "libertad académica". En dicha ocasión el Profesor Wittenbauer recordó a sus colegas que los tres estudiantes que hasta entonces habían sido expulsados de la Universidad Técnica de Graz habían llegado a ser hombres eminentes - uno de ellos, Nicola Tesla.

Después de graduarse, Terzaghi sirvió un año en el ejército, durante el cual, en su abundante tiempo libre, tradujo al alemán la obra "Outline of Field Geology", de A. Geikie. Esa fue su primera publicación, de una lista de más de 280 publicaciones. En el Volumen Aniversario de Terzaghi se incluye una bibliografía completa hasta 1960.

Desde estudiante ya se había dado cuenta que no le agradaba la ingeniería mecánica. Por lo tanto, pasado su año de servicio militar, regresó a su "alma mater" para otro año de estudio, concentrándose sobre todo en geología. A continuación trabajó tres años con una firma austriaca de ingeniería y construcciones civiles, aprendiendo en ella, en una serie de proyectos, el lado práctico de la profesión. En aquel entonces aceptó gustosamente la oportunidad de encargarse de un levantamiento hidrográfico y geológico para un proyecto hidroeléctrico en las montañas Karst de Croacia, disfrutando con los extensos trabajos de campo. Al final de los dos años que duró el trabajo escribió un muy completo artículo sobre la morfología y las aguas subterráneas en la región de Karst, sede del proyecto, artículo que aún hoy se considera como actualizado sobre la geología del fenómeno kárstico.

Durante la preparación del artículo, un amigo le habló de las dificultades que habían surgido en la cimentación de un edificio grande en San Petersburgo. Terzaghi se ofreció para encargarse del proyecto, siendo aceptado su ofrecimiento y logrando controlar la peligrosa situación. Durante este trabajo se le puso claramente de manifiesto el estado altamente insatisfactorio del arte de la ingeniería de cimentaciones. Consideró este asunto como un reto a su imaginación, por lo que decidió sacrificar sus ahorros y su tiempo para compilar y correlacionar todos los conocimientos disponibles sobre cimentaciones, con la esperanza que ese trabajo permitiera un ataque racional para predecir el comportamiento de los suelos en obras de tierra y cimentaciones. Permaneció todavía por un lapso corto en Rusia, en una atmósfera muy atractiva en lo profesional, social y financiero; estimulado por

los problemas que observó en Rusia, preparó algunas valiosas contribuciones al diseño de concreto armado, las cuales publicó luego en varios artículos y en un pequeño libro del que fue coautor con T. Pöschl, usando parte del material de su tesis doctoral que presentó a la Universidad Técnica de Graz, recibiendo allí, en 1912, el grado de Doctor en Ciencias Técnicas. Pocas semanas después estaba ya camino a los Estados Unidos.

Terzaghi tenía la impresión que el mayor avance en obras de tierra se había hecho en los Estados Unidos y que el U.S. Reclamation Service era en esto uno de los precursores. En consecuencia, visitó en Washington a F.H. Newell, que era el Director del Servicio en esa época, y le pidió información de donde se habían presentado problemas difíciles en ingeniería de obras de tierra. Permaneció en Washington lo suficiente para estudiar la geología de estos sitios, publicada por el U.S. Geological Survey, y procedió después a visitar los sitios, uno tras otro. Para completar sus escasos fondos aceptaba trabajo de cualquier clase: ingeniero, supervisor de perforación y hasta perforista. De esta manera llegó a conocer las arcillas blandas aluviales del delta del Mississippi, los suelos de las regiones semiáridas del suroeste y oeste, y las arcillas de Oregon y Washington, que son causa de inestabilidad de taludes; observando también con interés los nuevos procedimientos de construcción de obras de tierra. Hacia el fin de 1913 regresó a Austria, desanimado por haber fracasado en su objetivo, y mientras estaba estudiando la pequeña cantidad de material útil que había obtenido, estalló la primera guerra mundial.

Después de participar brevemente en la lucha del frente Servio, pidió traslado a la fuerza aérea austríaca que se estaba organizando entonces, permaneciendo en ella dos años como comandante de la estación de ensayos aeronáuticos de Aspern, cerca de Viena, donde estuvo asociado a Theodor von Karman y Richard von Mises. El trío se encontró de nuevo en los Estados Unidos muchos años después.

En esa época, el Profesor Philip Forchheimer, que había sido maestro de Terzaghi en la Universidad Técnica de Graz, estaba ayudando al gobierno turco a reorganizar la enseñanza de la ingeniería en Turquía. Necesitando un hombre competente y enérgico, y sin ni siquiera consultar a Terzaghi, pidió que lo nombraran Profesor de Ingeniería de Cimentaciones en la Escuela Imperial de Ingeniería de Constantinopla (después Estambul). Así comenzó, a la edad de 33 años, su estadía de diez años en Turquía durante la cual la rama de mecánica de suelos fue concebida y fundada. En su tiempo libre comenzó una compilación sistemática de toda la literatura inglesa, alemana y francesa sobre ingeniería de

cimentaciones y obras de tierra para el período de 1860-1917, utilizando principalmente las bibliotecas de Viena durante sus visitas a esa ciudad. Como consecuencia de este trabajo y del que había llevado a cabo en los Estados Unidos, concluyó que era desalentador el intento de condensar los conocimientos empíricos en un sistema apropiado, donde se carecía de medios para describir claramente y medir cuantitativamente las propiedades estructurales de la vasta gama de los suelos. Como esos medios no existían, era un intento inútil tratar de encontrar relaciones entre las condiciones del subsuelo y el comportamiento de las estructuras. Una vez que afirmó en su mente tal conclusión, no perdió más tiempo tratando de encontrar la clave mediante el estudio de conocimientos empíricos, sino que comenzó a experimentar sistemáticamente con suelos, empezando por arenas. Con cajas de tabaco y piezas diversas, usando instrumentos de medición prestados, construyó aparatos con los que rápidamente obtuvo resultados significativos de ensayos de presión de tierras.

Al terminar la guerra, la Escuela Imperial despidió a los profesores de las naciones derrotadas y Terzaghi aceptó una cátedra en el American Robert College de Estambul, hoy Universidad de Bogazici, que había visitado antes en varias ocasiones. A pesar de sus abrumadoras obligaciones de docencia (principalmente materias de termodinámica y de ingeniería mecánica), comenzó inmediatamente a formar un laboratorio de suelos, utilizando materiales que rescataba del basurero del instituto. Careciendo de fondos para un extensómetro de precisión, inventó uno, basado en el espaciamiento de los anillos de Newton que se forman cuando se comprime agua entre dos planchas de vidrio. La arcilla la obtenía de las riberas del Bósforo. Noche tras noche trabajó con su equipo primitivo, descubriendo así la mecánica de la consolidación de la arcilla y otros principios importantes que forman la base de la moderna mecánica de suelos. En 1923 publicó la ecuación diferencial fundamental para el proceso de consolidación, para la que también estableció su analogía matemática con la transferencia del calor. A pesar de que este artículo recibió poca atención en esa época, representó un hito alcanzado en el punto medio de su vida. Según sus propias palabras: "Los resultados de mis esfuerzos excedieron mis esperanzas". A partir de entonces, vio claro el rumbo de su futura misión, la cual ejerció con notable constancia hasta su muerte, cuarenta años después.

En 1924 presentó su teoría de "consolidación de arcillas" (para la cual también usaba el nombre de "teoría de esfuerzos hidrodinámicos"), en el Primer Congreso Internacional de Mecánica Aplicada, en Delft, Holanda. La audiencia lo acogió entusiastamente y después de la sesión, Forchheimer estrechó la mano a Terzaghi y le dijo:

"Hoy ha nacido usted al mundo científico". El año siguiente apareció su primer libro, un clásico de la mecánica de suelos, titulado "Erdbaumechanik auf bodenphysikalischer Grundlage". La publicación de ese libro (en 1925) marca el comienzo de la Mecánica de Suelos. El libro llamó la atención de John R. Freeman, de Rhode Island, conocido especialista en hidráulica que se ocupaba entonces de divulgar en Estados Unidos los adelantos de los laboratorios hidráulicos europeos; Freeman sugirió al Profesor Charles M. Spofford, por esa época jefe del departamento de ingeniería civil del Instituto Tecnológico de Massachusetts, que invitara a Terzaghi como conferencista. Puesto que en ese momento los grandes y continuos asentamientos de los nuevos edificios del M.I.T. eran motivo de preocupación, la subsiguiente invitación no fue toda motivada por el deseo de fomentar la enseñanza de esta nueva materia.

Terzaghi llegó a M.I.T. en el otoño de 1925, para iniciar su segunda estadía en los Estados Unidos, que debía terminar en el otoño de 1929. Este período fue el de más rápido ascenso de su carrera y de importancia vital en la aceptación de la mecánica de suelos por el gremio de ingenieros. En su pequeña oficina de M.I.T. comenzó inmediatamente a preparar el equipo para ensayos de suelos y fue allí en mayo de 1926 que construyó un aparato de consolidación en miniatura. En este período conoce al Dr. Arthur Casagrande, un compatriota suyo y se inicia una estrecha relación de amistad y de trabajo profesional. En el verano de 1926 Casagrande trabajó como ayudante de Terzaghi en Washington y desde diciembre como asistente de investigación en M.I.T.

A medida que aumentaba su reputación como consultor, se buscó su consejo en muchos países y él, para familiarizarse con los suelos tropicales, buscó trabajos en América Central. Su curso de dos semestres de mecánica de suelos en M.I.T. atrajo muchos estudiantes y dio una norma para su enseñanza, que fue gradualmente aceptada por otras universidades.

A pesar de lo valioso que le fue este período en M.I.T. para su desarrollo profesional, Terzaghi no pensó entonces en establecerse en los Estados Unidos permanentemente. Cuando se le ofreció una cátedra de ingeniería civil en la Universidad Técnica en Viena, le entusiasmó la perspectiva de regresar a su patria, además que dicho ofrecimiento implicaba un reconocimiento eminente de sus realizaciones y de su estatura profesional. Terzaghi sugirió a su asistente Casagrande que tomara un permiso por seis meses y lo acompañara a Viena, para organizar un laboratorio de suelos y adiestrar a sus

nuevos ayudantes.

Terzaghi comenzó a enseñar en Viena en 1930 y pronto sus cursos y sus investigaciones empezaron a atraer estudiantes e ingenieros de muchos países, llegando su departamento a ser un centro renombrado de mecánica de suelos. Sus servicios tenían también mucha demanda como conferencista y consultor en proyectos importantes en toda Europa, Norte de Africa y Rusia. Dondequiera que iba despertaba un gran interés entre los ingenieros locales por la mecánica de suelos. En 1935 permaneció tres meses como conferencista en la Universidad Técnica de Berlín.

Harvard lo invitó para participar en el primer semestre de 1936, e inmediatamente después actuó allí como Presidente de la Primera Conferencia Internacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Cimentaciones, la que tuvo lugar en Pierce Hall. En esa ocasión se fundó la Sociedad Internacional, y Terzaghi fue elegido su primer Presidente, puesto que ocupó hasta la Cuarta Conferencia Internacional de 1957, en Londres.

En la primavera de 1938, después que Hitler ocupó Austria, Terzaghi se estableció con su familia temporalmente en Francia, que le era conveniente para sus actividades de consultor. El y su esposa consideraron establecerse permanentemente en los Estados Unidos, informando a Casagrande que estaría interesado en una cátedra a medio tiempo que le dejara suficiente libertad para sus otras actividades. Casagrande persuadió al decano Westergaard de la Universidad de Harvard para que invitara a Terzaghi como conferencista y durante el segundo semestre de 1938-39 enseñó Geología Aplicada a la Ingeniería por primera vez en la Escuela de Postgrado de Ingeniería de Harvard. Durante la primavera de 1939 cumplió su promesa de dar una serie de conferencias en el Imperial College de Londres, y ofreció además la Conferencia James Forrest en la Institución de Ingenieros Civiles, siendo el segundo ingeniero no británico en recibir tal honor (el primero fue Marconi) desde 1890, año en que se creó la Conferencia. Sus conferencias en Londres estimularon mucho el crecimiento rápido de la mecánica de suelos en Inglaterra.

En la Universidad de Harvard, Terzaghi encontró un ambiente intelectual muy de su agrado, disfrutando de los contactos con colegas de otras facultades; para mencionar sólo algunos: Harold M. Westergaard, a quien había conocido en Washington D.C. cuando ambos eran consultores del Bureau of Public Roads; su compatriota Richard von Mises; Lionel Marks, y Percy Bridgman, de Física. En el escritorio de su oficina, en el tercer piso

de Pierce Hall (que ocupó de 1938 a 1960, cuando su estado físico lo obligó a trabajar en su casa), escribió más que en ninguna otra oficina que ocupara en su vida: dos libros, más de cien artículos y numerosos informes de su trabajo de consultoría. La Biblioteca Gordon McKay era su favorita, por tener su entrada vecina a su oficina, disfrutando de los eficientes servicios de sus bibliotecarios y de su habilidad para obtenerle libros de otras bibliotecas. A pesar de enseñar sólo un cuarto de tiempo, estableció un segundo curso, "Mecánica de Suelos Aplicada", en el que adoptó el método de casos tomados liberalmente de su experiencia de consultor. Mantuvo su costumbre de dar conferencias en otras universidades y sociedades profesionales en muchos de los países que visitaba como consultor, y aceptó el nombramiento como conferencista e investigador sobre una base más permanente en la Universidad de Illinois, y más tarde también en M.I.T.

En 1946, Harvard le dió el título de Profesor de la Práctica de la Ingeniería Civil, retirándose en 1956 con el calificativo de Profesor Emérito; a pesar de ello continuó disertando sobre geología aplicada a la ingeniería por varios años más. Sus cursos en Harvard, y sus otras actividades centradas en su oficina de Pierce Hall, contribuyeron poderosamente a la espléndida reputación que disfrutó Harvard en Ingeniería Civil durante ese período.

Sus actividades de consultoría se extendieron a muchas partes del mundo, ocupándose sólo de asuntos que lucieran prometedores de obtener información valiosa. La lista de los proyectos en que intervino incluye grandes presas de tierra, estabilización de taludes, cimentaciones para edificios y puentes, problemas especiales surgidos de dificultades de construcción o accidentes, túneles en tierra y en roca dura, ferrocarriles subterráneos y problemas de cimentaciones de muelles. En 1954 fue nombrado Presidente de la Junta Consultora para la Presa Alta de Assuán, en Egipto, pero renunció a la Junta en 1959, cuando la Unión Soviética se encargó del diseño y de la construcción, cambiando el proyecto que se había preparado bajo su dirección.

Los logros de Terzaghi fueron producto de muchas y relevantes características personales; a su visión integral, su brillante mente analítica, y la insaciable curiosidad indispensable a un gran físico, unió dotes y afición para la observación paciente y cuidadosa de la naturaleza, indispensables al geólogo competente. A una extraordinaria capacidad de actividad mental, que desafiaba el cansancio en largas horas de trabajo, unida a un envidiable poder de concentración y gran habilidad para rechazar asuntos que

interfirieran con su interés principal (pero siempre con gentileza que rara vez producía resentimientos), se debe el enorme volumen de trabajo que produjo en su vida. Su espléndida memoria fue de gran ayuda para compendiar y retener la gran cantidad de datos geológicos y de observación que siempre se acumulan en proyectos grandes de obras de tierra y cimentaciones, teniendo además la capacidad de reconocer rápidamente los elementos esenciales en la masa de datos.

Para su muy desarrollado talento literario, escribir era una actividad fácil y placentera. Cuando alguien, a la terminación de una investigación larga y complicada, compadeció a Terzaghi por tener por delante "la parte más difícil del trabajo", es decir, la preparación del informe, Terzaghi contestó: "¡Pero si ésta es la mejor parte!". El cuadro que está indeleblemente impreso en la memoria del Profesor Casagrande, es el de Terzaghi sentado en su escritorio, escribiendo por horas, con sólo pausas ocasionales para ordenar sus pensamientos y para reponer, por medio de un buen cigarro, la cortina de humo en que habitualmente se envolvía. Tenía también facilidad para el dibujo, que usaba ventajosamente en las muchas figuras que ilustran sus informes y artículos.

Hasta edad avanzada gozó de vigor físico y magnífica salud. Geólogos jóvenes, acostumbrados al campo, difícilmente lo podían seguir en las montañas a la edad de 70 años, y hasta los 75 mantuvo un tren de trabajo y de viajes que hubiera agotado a muchos hombres de menor edad. Estaba dotado de una voz cálida y resonante, que alcanzaba con facilidad los rincones más remotos de auditorios grandes. Hasta sus últimos años dictó conferencias que duraban bastante más de una hora, sin hacer uso de notas, y tanto sus disertaciones como su conversación estaban salpicadas de un humor fresco y a veces de agudezas mordaces. Así mantenía fascinada a su audiencia, aún cuando describía detalles tediosos; en cualquier reunión social su personalidad magnética y su brillante verbo lo hacían rápidamente el centro de atracción.

Alimentó de joven el deseo de hacerse explorador, deseo que siempre se mantuvo latente. En sus extensos viajes aprovechaba siempre las oportunidades de apartarse de la ruta específica de su trabajo; por ejemplo: excursiones a las selvas de Guatemala y Panamá, las ruinas mayas de Yucatán, montañismo en los Montes Garibaldi, en la Columbia Británica. Tales excursiones le proporcionaban material para sus afamadas charlas no-profesionales, que ilustraba con sus propias transparencias a colores.

Poseía otras cualidades personales que fueron esenciales para su gran éxito como consultor, particularmente aceptación de la responsabilidad, autoridad, valor para imponer soluciones nuevas y una notable habilidad para diagnosticar relaciones y causas ocultas. Esta última cualidad se basaba no sólo en su intuición y juicio excelentes, sino también en un cuidadoso análisis de cada detalle de información. A veces detalles aparentemente triviales le proporcionaban pistas valiosas, que él proseguía con programas bien pensados de exploración y observación adicionales.

En su biografía en el Volumen Aniversario, el Profesor Casagrande (1960) describe las contribuciones más importantes de Terzaghi hasta sus 75 años; en sus últimos cinco años de vida se ocupó especialmente de los siguientes tres grupos de temas, que se reflejan en sus publicaciones últimas (Casagrande, 1964) :

- 1) El primer grupo contiene una descripción detallada de problemas de mecánica de suelos y su solución, en conexión con proyectos de grandes presas de tierra en los que actuó como consultor principal. Estos artículos documentan su creencia que las lagunas existentes, tanto en mecánica de suelos como de rocas, sólo pueden ser eliminadas en base a observaciones e investigaciones de campo completas y pacientes, antes que por medios teóricos y de laboratorio.

- 2) El segundo grupo comprende artículos dedicados a "la mecánica de suelos en acción". En su amplísima experiencia de mecánica de suelos, Terzaghi tuvo oportunidad de observar los muchos tropiezos que acechan al consultor de suelos, siendo el principal el de no dársele la oportunidad para verificar personalmente sus hipótesis de diseño con las condiciones expuestas durante la ejecución del trabajo. Insistía que un consultor "...se verá convertido en el primer chivo expiatorio...", aún cuando los proyectistas hayan ignorado por completo sus recomendaciones. Otra fuente de dificultades es la dependencia en la teoría sin una experiencia práctica adecuada. Terzaghi adquirió en sus primeros años de ejercicio aversión a la teoría que no estaba complementada por experiencia práctica. Terzaghi indicó que los peores enemigos de la mecánica de suelos no serían los que negaban la validez de sus principios básicos, porque éstos a su tiempo morirían; el peor daño ocurriría cuando los teóricos puros descubrieran la mecánica de suelos, porque la actividad de esos hombres podría socavar su propio objetivo.

- 3) El tercer grupo se refiere a la mecánica de rocas. A sus visitantes de los últimos años expresó su temor que la excesiva tendencia a la teoría y la poca atención a la realidad de las observaciones de campo, podían retardar seriamente el avance de la mecánica de rocas.

Así, en sus últimos años, Terzaghi usó su energía y su visión en tratar de proteger a las jóvenes generaciones de ingenieros de suelos de las acechanzas que enfrentaban, y de guiarlos sabiamente. En ningún momento trató, como creen algunos, de desanimarlos en el uso de la teoría o en sus esfuerzos por desarrollarla, ni tampoco trató de disuadir al ingeniero joven de ejercer la mecánica de suelos, como algunos han creído interpretar en sus opiniones. El, que creó la mecánica de suelos, y que retuvo en este campo una preeminencia indiscutida, trató hasta el fin de su vida de compartir su sabiduría con aquellos que quisieran escucharle.

Los eminentes logros de Terzaghi se reflejan en nueve doctorados "honoris causa" y en los muchos galardones y premios de sociedades científicas y de ingeniería. Fue el único ingeniero que recibió cuatro veces la medalla Norman, el más alto honor de la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (ASCE), en 1930, 1943, 1946 y 1955. Fue también miembro honorario de esa sociedad y de otras en muchos países. En 1960, la ASCE anunció la creación del Premio Karl Terzaghi, con un fondo inicial de \$20,000, contribuido por miembros de la Sociedad; un recordatorio digno del gran hombre. El apreció profundamente todos los honores y disfrutó con el gran número de felicitaciones de todas partes del mundo en su octogésimo cumpleaños; pero su mayor satisfacción fue asistir en vida a la completa y entusiasta aceptación universal de la mecánica de suelos.

El Profesor Casagrande (1964), acerca de la trayectoria vital de Terzaghi, encuentra que es similar a la de muchos grandes hombres que dejaron su huella en el tiempo, incluyendo a Goethe, que la describió en términos simbólicos en el drama de "Fausto". De joven, Terzaghi pasó por un período turbulento e infeliz, atormentado por la interrogación del significado de la vida; momentos de disipación se alternaban con remordimiento y abatimiento. Este período se refleja patéticamente en los ensayos inéditos escritos en esa época y en las notas de su diario. Al término de sus estudios se dio con entusiasmo a sus primeros trabajos de ingeniero, que combinó frecuentemente con investigaciones geológicas, pero siempre buscaba incansablemente empresas más dignas de esfuerzo. Así se encontró un enorme vacío en la Ingeniería Civil, que era un desafío a su imaginación.

Sus primeros esfuerzos en ese territorio incógnito consistieron en años de viajes y búsqueda en bibliotecas, que le sirvieron, sin él saberlo, para encontrar la vía verdadera, seguidos por seis años de agotadora labor precursora y de sacrificios, en los que sentó los principios básicos de la mecánica de suelos. A la mitad de su vida, a los cuarenta años de edad, vio que había triunfado; desaparecieron sus frecuentes conflictos internos y la segunda mitad de su vida fructificó en una prodigiosa actividad productiva. Gracias a su genio, su energía y sus infatigables esfuerzos, la mecánica de suelos es hoy día una parte vital del currículum de ingeniería, y no se emprende ningún proyecto importante de obras de tierra o cimentación sin hacer uso sustancial de la ciencia creada por Terzaghi.

Karl Terzaghi falleció el 25 de octubre de 1963 en Winchester, Massachusetts, la ingeniería perdió una de sus eminentes y pintorescas personalidades. En el prefacio del Volumen Aniversario de 1960, los editores L. Bjerrum (Noruega), A.W. Skempton (Gran Bretaña), R.B. Peck y A. Casagrande (Estados Unidos) dicen: “Pocos hombres han ejercido en sus profesiones durante su vida una influencia comparable a la de Karl Terzaghi en la Ingeniería Civil y la Geología Aplicada a la Ingeniería. Sin embargo, sus trabajos y sus escritos son tan diversos, han cubierto tan largo período y se originaron en tantos países, que aún sus más íntimos allegados no tienen todavía una idea completa de la amplitud de su carrera”.

PRINCIPALES CONTRIBUCIONES DE TERZAGHI

Una de las principales contribuciones de Terzaghi a la Ingeniería Civil es el desarrollo del Principio de Esfuerzos Efectivos, que en sus propios términos dice (Skempton, 1960):

“Los esfuerzos en cualquier punto de una sección de una masa de suelo pueden calcularse de los esfuerzos principales totales σ_1 , σ_2 y σ_3 que actúan en ese punto. Si los vacíos del suelo están llenos de agua con un esfuerzo u , los esfuerzos totales principales consisten de dos partes. Una parte, u , actúa en el agua y en el sólido en todas direcciones con igual intensidad. Se denomina presión de poros. La diferencia $\bar{\sigma}_1 = \sigma_1 - u$; $\bar{\sigma}_2 = \sigma_2 - u$ y $\bar{\sigma}_3 = \sigma_3 - u$; representa un exceso sobre la presión de poros y ocurre exclusivamente en la

fase sólida.

Esta fracción de los esfuerzos totales principales, será llamada esfuerzos efectivos principales... Un cambio en la presión de poros no produce cambio de volumen y prácticamente no influencia los esfuerzos en la falla... Los materiales porosos (arena, arcilla y concreto) reaccionan a un cambio en u como si fueran incompresibles y como si su fricción fuera igual a cero. Todos los efectos medibles de un cambio de esfuerzo, tales como compresión, distorsión y un cambio de resistencia cortante son exclusivamente debidos a cambios en los esfuerzos efectivos $\bar{\sigma}_1, \bar{\sigma}_2$ y $\bar{\sigma}_3$. Por lo tanto, cualquier investigación en la estabilidad de un cuerpo saturado de suelos requiere el conocimiento de tanto el esfuerzo total como la presión de poros”.

El Principio de Esfuerzos Efectivos es de fundamental importancia en el desarrollo de la mecánica de suelos. En 1923, fecha en que Terzaghi utilizó la ecuación $\bar{\sigma} = \sigma - u$, se considera el inicio de la Mecánica de Suelos.

Otra contribución importante de Terzaghi fue su ejemplo de vida, con un entusiasmo incesante para enfrentar nuevos desafíos como un INGENIERO de decisiones prácticas para PROBLEMAS DE IMPORTANCIA. Además, Terzaghi propuso desarrollar un ciclo de experiencia formado por ajustes sucesivos de predicción, prescripción, diseño y funcionamiento de las obras. Para continuar con el desarrollo de la mecánica de suelos e ingeniería de cimentaciones, Terzaghi propuso el método de observación de casos estudiados donde existiera una buena instrumentación para evaluar y analizar los resultados de las mediciones. Estos conceptos fueron desarrollados posteriormente por R.B. Peck (1969) en su Método de Observaciones; A. Casagrande (1964) en su Riesgo Calculado y T.W. Lambe (1972) en su Proyecto Integrado. Estos métodos fueron presentados en distintas Conferencias en Honor a Rankine y Terzaghi.

MENSAJE A LOS INGENIEROS GEOTECNICOS

Terzaghi (1958) indica que un Consultor es una persona que supuestamente sabe más que su cliente sobre una determinada materia. Cuando un Consultor adquiere una reputación y descubre que sus servicios están en demanda, su carrera futura dependerá de lo que desea conseguir en la vida: si desea adquirir prestigio y dinero, deberá establecer una

organización de ingeniería y luego convertirse en su esclavo. Sus ingresos aumentarán pero también sus preocupaciones. Será un ejecutivo y hombre de negocios, con condiciones para adquirir úlceras en el estómago. Por otro lado, si decide practicar el arte de la ingeniería, desistirá de establecer una organización y se concentrará en ampliar sus conocimientos en el campo de su elección. Para lograr lo anterior deberá utilizar por lo menos la mitad de su tiempo en investigación y evaluación de sus observaciones de campo. De esta manera su capacidad económica será limitada, pero tendrá menos preocupaciones y mayor libertad de acción. Terzaghi admite que su opción en la vida fue la segunda.

Terzaghi (1958) concluye que en base a los riesgos involucrados en la falta de contacto entre los departamentos de diseño y construcción en las grandes obras de tierra, las organizaciones serias deben incluir un departamento de mecánica de suelos. Durante el diseño ese departamento supervisa los sondajes y ejecuta los ensayos de laboratorio. Durante la construcción verifica los materiales encontrados y supervisa la compactación, adaptándola a los cambios de materiales. También compara lo encontrado con lo supuesto y realiza las modificaciones pertinentes.

Si la organización de ingeniería contrata un Consultor y ésta tiene un departamento de mecánica de suelos que mantiene un buen contacto con el departamento de diseño y la obra, las relaciones entre el Consultor y el Cliente serán sin fricciones y satisfactorias. El Consultor podrá rendir el máximo servicio con el mínimo de tiempo necesario, puesto que el departamento de mecánica de suelos lo mantendrá informado sobre lo asumido en el diseño y lo encontrado en la construcción. Por otro lado, en la mayoría de organizaciones de ingeniería el diseño y la supervisión de la construcción permanecen divorciados, aunque con un camuflaje de un pequeño laboratorio de suelos que proporciona solamente datos básicos para el diseño. Si se invita a un Consultor a participar en la etapa de diseño, éste debe tener cuidado. Deberá desistir de participar si es que la asignación no significa un contacto activo con el proyecto hasta el final de la construcción y puede inspeccionar los trabajos cuando considere conveniente. Debe recibir informes detallados semanalmente, preparados por un ingeniero de suelos competente, que permanezca todo el tiempo en la obra. En segundo lugar el Consultor debe averiguar si la inspección de obra funciona, en caso contrario debe renunciar, dejando en claro las razones de su renuncia.

En su artículo “Mecánica de Suelos en Acción”, K. Terzaghi (1959) indica que: “el autor nunca ha fallado en señalar en los prefacios de sus libros en mecánica de suelos, que

sus contenidos deberán utilizarse solamente como guías para un juicio ingenieril. Ellos no pueden utilizarse satisfactoriamente a menos y hasta que el lector haya adquirido capacidad de juicio, y esta capacidad tan solo puede obtenerse en años de contacto con las condiciones de campo”.

Terzaghi presentó las calificaciones necesarias para la aplicación de la mecánica de suelos de forma satisfactoria:

- 1.- Adecuado conocimiento de fundamentos
- 2.- Conocimiento adquirido por experiencia
- 3.- Sentido común
- 4.- Apropiada observación
- 5.- Iniciativa
- 6.- Imaginación

El Prof. Casagrande (1959) complementó las recomendaciones propuestas por Terzaghi, con el objeto de animar a los ingenieros jóvenes a desarrollar una posición correcta frente a esta materia.

El ingeniero joven que quiere alcanzar un alto nivel de realización en su profesión, debe aprender a comprender que su educación formal, aún a nivel de postgrado, no puede inculcarle juicio ingenieril. Este juicio es una combinación de años de experiencia y sentido común innato; sin embargo, el proceso puede acelerarse si se busca la oportunidad de desarrollar experiencia, particularmente trabajando en una variedad de problemas difíciles en mecánica de suelos aplicada, bajo la guía de ingenieros de suelos que hayan adquirido una madurez de juicio. En este sentido el desarrollo de un ingeniero de suelos tiene un gran parecido con el desarrollo profesional de un cirujano. Por supuesto que en cada profesión existen personas que han alcanzado la cima solas por su propio esfuerzo, pero éste es un camino más lento y menos seguro.

La siguiente lista presenta los requisitos que un ingeniero de suelos debe cumplir para asegurar una aplicación confiable de la mecánica de suelos a los problemas difíciles de obras de tierra y cimentaciones.

- | | | |
|------------|----|---|
| Debe tener | 1. | Buen conocimiento de la teoría (mecánica de suelos + geología aplicada a la ingeniería) |
| | 2. | Buen juicio (sentido común + experiencia). |
| | 3. | Conocimiento profundo de propiedades y métodos de exploración, muestreo y ensayos de suelos. |
| Debe hacer | 4. | Insistir en exploración, muestreo y ensayos confiables. Si el proyecto se localiza en áreas no conocidas para él, debe revisar la información sobre geología local existente. |
| | 5. | Introducir todas las cantidades en el análisis en términos de rangos posibles y obtener los resultados en los mismos términos. |
| | 6. | Insistir en una evaluación continua de toda la información que esté disponible durante la construcción. |

Los tres primeros requisitos se aplican a todas las ramas de la ingeniería. Sin embargo, la relativa importancia de los mismos entre sí es distinta entre las especialidades. Un ingeniero de suelos con un excelente comando de la teoría, pero sin experiencia e inadecuado conocimiento de los suelos en estudio, puede entrar fácilmente en dificultades.

Se presenta a continuación lo que el ingeniero de suelos debe hacer :

Debe insistir en la ejecución de programas de exploración y ensayos confiables. Es difícil verificar personalmente que todo se haya realizado conforme a lo especificado; sin embargo el ingeniero de suelos no debe olvidar las serias consecuencias que se producirán si los programas no han sido satisfactorios.

En contraste con otras ramas de la ingeniería, como la de estructuras, el ingeniero de suelos debe tratar de evaluar cada cantidad en términos de rango posible, analizar el caso utilizando esos rangos para producir resultados en los mismos términos y no en números únicos. El futuro ingeniero de suelos, desde su formación, debe ser consciente de esta importante diferencia entre la ingeniería estructural y la ingeniería de suelos, debiendo ser entrenado desde el principio en el hábito de apreciar realísticamente los posibles rangos de todas las cantidades que entran en la solución de un problema particular.

El último requisito enfatiza en la necesidad de mantener una vigilancia constante

durante la construcción para obtener nueva información de las condiciones del subsuelo, que permitan una eventual revalidación y modificación del diseño. El grado de énfasis en este requisito depende principalmente de la geología local. Como fuera indicado por Terzaghi, el ingeniero de suelos tiene grandes obstáculos en sus esfuerzos para estar en contacto con la fase de construcción, debido al divorcio que existe entre el diseño y la construcción de las obras.

En relación a la necesidad de ejecutar análisis matemáticos exactos en la mecánica de suelos, Terzaghi indicó en el prefacio de uno de sus libros “si una predicción no puede hacerse por métodos simples, ésta definitivamente no puede hacerse”. Una manera muy reveladora acerca del juicio ingenieril de un ingeniero de suelos es la manera como usa las matemáticas en la mecánica de suelos aplicada. Si utiliza cálculos refinados que van mas allá de lo garantizado cuando se considera las variaciones en las condiciones de los suelos del proyecto y si utiliza constantes únicas con tres decimales en vez de rangos realistas, el ingeniero de suelos demuestra que todavía no ha desarrollado el juicio ingenieril que es prerequisite para un manejo satisfactorio de problemas difíciles en obras de tierra y cimentaciones.

REFERENCIAS

- Bjerrum L. (1960), "Some Notes on Terzaghi's Method of Working", From Theory to Practice in Soil Mechanics. Selections from the Writings of Karl Terzaghi, pp 22-25, John Wiley, New York.
- Casagrande A. (1959), "Discussion of Requirements for the Practice of Applied Soil Mechanics", Memorias del Primer Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos y Cimentaciones, Mexico, Vol III, pp 1029-1037.
- Casagrande A. (1960), "Karl Terzaghi-His Life and Achievements", From Theory to Practice in Soil Mechanics. Selections from the Writings of Karl Terzaghi, pp. 3-21, John Wiley, New York.
- Casagrande A. (1964), "Karl Terzaghi 1883-1963", Traducción hecha al artículo del Prof. Casagrande aparecido en Geotechnique XIV, N° 1 por el Ing. Gustavo Pérez Guerra, Boletín de la Sociedad Venezolana de Mecánica del Suelo e Ingeniería de Fundaciones, N° 16, Julio-Agosto-Setiembre, pp. 3-11.
- Casagrande A. (1964), "Role of the Calculated Risk in Earthwork and Foundation Engineering", Terzaghi Lectures, 1963-1972, ASCE, New York, 1974, pp 72-138.
- Dunicliff J. y Deere D.U. (1984), "Judgment in Geotechnical Engineering. The Professional Legacy of Ralph B. Peck", John Wiley, New York.
- Lambe T.W. (1972), "The Integrated Civil Engineering Project", Terzaghi Lectures, 1963-1972, ASCE, New York, 1974, pp 314-335.
- Peck R.B. (1965), "Reflections on Dr. Karl Terzaghi", Proc. 6th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Montreal, pp 77-78.
- Peck R.B. (1969), "Advantages and Limitations of the Observational Method in Applied Soil Mechanics", Geotechnique, Vol 19, N° 2, London.
- Peck R.B. (1973), "Soil Mechanics in Engineering Practice. The Story of a

Manuscript, 1942-1948", Terzaghi Memorial Lectures, S.S. Tezcan y A.S. Yalcin Editores, Bogazici University, Istanbul, pp 50-77.

- Peck R.B. (1975), "Karl Terzaghi and the Chicago Subway", American Society of Civil Engineers, EI4, Vol 101, pp 477-484.
- Romero I. (1975), "Seminario en Honor del Profesor Karl Terzaghi", Boletín de la Sociedad Venezolana de Mecánica del Suelo e Ingeniería de Fundaciones, N° 40, Marzo, pp. 37-44.
- Skempton A.W. (1960), "Significance of Terzaghi's Concept of Effective Stress", From Theory to Practice in Soil Mechanics. Selections from the Writings of Karl Terzaghi, pp 42-53, John Wiley, New York.
- Terzaghi K. (1925), "Erdbaumechanik auf Bodenphysikalischer Grundlage", Vienna, Deuticke, 399 pp.
- Terzaghi K. (1936), "A Fundamental Fallacy in Earth Pressure Computations", Journal of the Boston Society of Civil Engineers, Vol 23, pp 71-88.
- Terzaghi K. (1936), "The Shearing Resistance of Saturated Soils and the Angle Between Planes of Shear", Proc. First International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Cambridge, Massachusetts, Vol 1, pp 54-56.
- Terzaghi K. (1936), "Presidential Address given at the First International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering at Harvard University, Cambridge.
- Terzaghi K. (1943), "Theoretical Soil Mechanics", John Wiley, New York.
- Terzaghi K. (1946), "Rock Defects and Loads on Tunnel Supports", R.V. Proctor y T.L. White, Rock Tunneling with Steel Supports, Youngtown, Ohio, Commercial Shearing and Stamping Co.
- Terzaghi K. (1950), "Mechanics of Landslides", Geological Society of America,

Engineering Geology, Berkeley Volume, November.

- Terzaghi K. (1952), "Permafrost", Journal of the Boston Society of Civil Engineers, Vol 79, Separate 262, 32 pp.
- Terzaghi K. (1953), "Anchored Bulkheads", American Society of Civil Engineers, Vol 79, Separate 262, 32 pp.
- Terzaghi K. (1955), "Evaluation of Coefficient of Subgrade Reaction", Geotechnique, Vol 5, N°4, pp 297-326.
- Terzaghi K. (1957), "Varieties of Submarine Slope Failures", Texas Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Houston.
- Terzaghi K. (1958), "Consultants, Clients and Contractors", Journal of the Boston Society of Civil Engineers, Vol. 45, N° 1 pp. 1-15, January.
- Terzaghi K. (1959), "Soil Mechanics in Action", Civil Engineering, ASCE, vol 29, N° 2, pp 69-70.
- Terzaghi K. y Peck R.B. (1948), "Soil Mechanics in Engineering Practice", John Wiley, New York.
- Terzaghi K. y Leps T.M. (1960), "Design and Performance of Vermilion Dam, California", American Society of Civil Engineers, Vol 84, SM 3.
- Terzaghi K. y Lacroix Y. (1964), "Mission Dam. An Earth and Rock Fill Dam on a Highly Compressible Foundation", Geotechnique, Vol 14, N° 1, Marzo.