Capítulo 1. Introducción

1.1 Objetivos y motivación

Tradicionalmente la docencia de la geotecnia que se ha desarrollado en las escuelas de ingeniería civil y arquitectura no se ha adaptado a los libros existentes, como lo demuestra la publicación de apuntes por muchos profesores. Además no existen libros en lengua castellana que desarrollen los últimos avances en investigación incorporados de forma más o menos generalizada en la docencia, como pueden ser los modelos de estado crítico que son especialmente útiles para entender el comportamiento tensión-deformación de los suelos. Esto es un problema ya que los estudiantes universitarios todavía presentan poca soltura para leer fluidamente en inglés, aunque es de esperar que esta situación mejorará en el futuro.

Por otra parte los profesionales que requieren ampliar sus conocimientos de geotecnia no encuentran libros que les permitan recordar los conocimientos adquiridos durante su etapa de estudio y, a su vez, los actualicen al nivel docente actual. No permitiéndoles, de esta manera, mejorar sus conocimientos de forma genérica o poder acceder en condiciones a la lectura de textos especializados, manuales y artículos, en los que se desarrollan las técnicas más avanzadas de su interés, si lo que requieren es ampliar sus conocimientos en alguna área específica de la geotecnia.

Es por todo ello que la presente tesina tiene como principal objetivo sentar las bases para la redacción de un nuevo libro de geotecnia, que se adapte a la realidad docente y profesional de la ingeniería civil y la arquitectura, definiendo sus contenidos, el orden de éstos y el enfoque de las explicaciones.

El objetivo anterior obliga a plantearse previamente dos objetivos más: el análisis de la adecuación de los estudios universitarios a la realidad laboral de estas profesiones, en cuanto a conocimientos de geotecnia se refiere, y el estudio de si es posible la existencia de libros de esta materia útiles, a la vez, para la formación de ingenieros civiles y de arquitectos.

El estudio conjunto de ingeniería civil y arquitectura es debido, lógicamente, a que con pequeñas diferencias de envergadura, los problemas geotécnicos más habituales en ambas profesiones son similares: mayoritariamente el proyecto y construcción de estructuras de cimentación y de contención y la mejora del terreno a través de su compactación. Este hecho obliga a pensar, a priori, que la docencia de esta materia en ambas carreras debe ser igual. Quizá sorprenda la exclusión en este estudio de la profesión de aparejador o arquitecto técnico. Ello se debe a que sus competencias se centran en el control de la ejecución material de las obras de edificación, para lo cual si se requieren unos conocimientos geotécnicos son mínimos en comparación a los necesarios para realizar tareas de proyectista y de director de obra (este cargo, reservado básicamente a arquitectos, junto con el de director de ejecución material, reservado a arquitectos técnicos, es en los que divide la legislación actual la dirección facultativa de obras de edificación).

La consecución de los objetivos planteados en este trabajo es especialmente interesante en la actualidad, porque se desarrolla en una época en la que se están consolidando dos cambios muy importantes en el mundo de la geotecnia. En primer lugar el entendimiento de la ampliación del campo de actuación de ésta, clásicamente centrada en la construcción de obras civiles, pero hoy en día extendiéndose por otros campos como la preservación y mejora del medio ambiente. En segundo lugar cambios en las herramientas de resolución de problemas, se está en el final de la etapa de consolidación de los métodos numéricos, generalizándose su uso en los despachos profesionales, hasta el momento sólo se empleaban ampliamente en los entornos de investigación. La docencia de la geotecnia no puede permanecer inmóvil frente estos cambios, debe reaccionar estudiando si éstos implican replantear sus métodos y/o sus contenidos tradicionales y, en caso afirmativo, actuar en consecuencia. Evidentemente estas cuestiones también han surgido y se han analizado en el presente trabajo.

1.2 Contenido

Para lograr los objetivos presentados en el apartado anterior los análisis previos a la definición de la futura publicación no pueden centrarse únicamente en el estudio de las asignaturas geotécnicas de las carreras universitarias, que permiten el ejercicio de la ingeniería civil y la arquitectura, y en los conocimientos geotécnicos necesarios para el ejercicio de estas profesiones. Estos aspectos adquieren sentido y justificación en marcos de referencia más amplios. Por ello se deben tomar previamente en consideración los sucesivos marcos de referencia que los engloban. Este capítulo de introducción finaliza con dos apartados en este sentido. El primero presenta los campos de actuación de las disciplinas que estudian el terreno con fines ingenieriles, mostrando así la ampliación de estos campos en los últimos años. En este apartado también se

define geotecnia, mecánica de suelos e ingeniería geotécnica. No es el objetivo de esta tesina establecer unas definiciones universales de estos términos pero es necesario hacerlo para emplearlas a lo largo de ella asegurando un entendimiento homogéneo por todos los lectores. El último apartado es un resumen de la historia de la geotecnia y de su docencia. El estudio histórico de una ciencia tiene valor para el docente ya que le ayuda a plantear y conocer mejor los trabajos anteriores y a prever las tendencias futuras.

El capítulo 2, *Situación actual de la docencia de la geotecnia*, muestra el número de créditos y los contendidos de las asignaturas geotécnicas impartidas en las carreras de ingeniería técnica de obras públicas, ingeniería de caminos, canales y puertos y arquitectura de las universidades españolas. También, como marco de referencia a lo anterior, se analizan los planes de estudio en los que se desarrollan estas asignaturas. Teniendo presente el momento de transición hacia un espacio universitario europeo se han presentado las perspectivas futuras sobre los temas abordados. El capítulo finaliza con una comparación entre las diferentes titulaciones.

Este segundo capítulo resume y analiza toda la información recogida en los tres primeros anejos de esta tesina. Cada uno de ellos, dedicado a una titulación, reúne para todas la universidades que imparten la carrera correspondiente su plan de estudios, un resumen de las asignaturas geotécnicas ofertadas en el plan y la información disponible de ellas (objetivos, temario, bibliografía).

El capítulo 3, *Necesidades de conocimientos geotécnicos por parte de los profesionales*, desarrolla, para las profesiones tratadas, las competencias de cada una de ellas y las diferentes formas de ejercerlas y, posteriormente, los conocimientos geotécnicos necesarios para poder actuar en cada una de las formas de ejercicio profesional. Por último, centrándose en los conocimientos geotécnicos requeridos, se comparan las profesiones y se analiza la adecuación de los estudios a la realidad profesional. Para la redacción de este capítulo, entre otras actuaciones, se han realizado varias entrevistas a profesionales de la ingeniería civil y de la arquitectura recogidas en los anejos IV y V.

El capítulo 4, *Análisis de la necesidad de redactar nuevos libros de Geotecnia*, define en primer lugar, de forma separada para ingeniería civil y para arquitectura y con la información presentada en los dos capítulos anteriores, los puntos básicos a cumplir por un libro que verifique los objetivos planteados en la presentación. En segundo lugar, se analiza si es posible verificarlos con una única publicación para ambas titulaciones. Y finaliza, tras verificar si las publicaciones existentes se adaptan a los condicionantes establecidos, justificando la escritura de un libro destinado principalmente a ingenieros civiles, profesionales y estudiantes, de utilidad para profesionales de la arquitectura.

El capítulo 5, *Pautas para la redacción de un nuevo texto de geotecnia para ingenieros*, define los contenidos y su ordenamiento, llegando a presentar una propuesta de índice de la futura publicación que verifique todos los objetivos y condicionantes previamente establecidos a lo largo de los capítulos anteriores.

Como trabajo previo y fundamental a la redacción de los capítulos 4 y 5, se ha realizado un análisis profundo de una parte representativa de la bibliografía existente de libros de

geotecnia. Este análisis se presenta en el anejo VI. En él, para cada una de las obras tratadas se presenta su índice, un análisis de sus contenidos, de su ordenamiento y de su enfoque, entre otros aspectos.

En el capítulo 6, con el que finaliza este trabajo, se resumen todas las conclusiones obtenidas en los anteriores capítulos.

1.3 Definiciones relativas al estudio del terreno

Son muchos los sustantivos y locuciones nominales destinados a identificar el conjunto o una parte de la materia que trata el estudio del terreno con fines ingenieriles. Algunas de ellas son ingeniería del terreno, geotecnia, mecánica del suelo, ingeniería geotécnica, mecánica de rocas y geología aplicada. Entre los diferentes especialistas no existe consenso en su significado, llegando por ejemplo a emplearse algunas de ellas como sinónimos por algunos y como palabras con significados diferentes por otros, esto sucede con geotecnia y mecánica del suelo.

No es objetivo de esta tesina establecer definiciones para cada una de estas designaciones, pero sí es necesario para lograr sus propósitos dos actuaciones en este sentido. En primer lugar establecer el ámbito actual de esta materia dedicada al estudio del terreno y, en segundo, concretar el significado de algunas de las palabras destinadas a diferenciar las materias en las que se divide, para poder utilizar esos nombres a lo largo de los sucesivos capítulos, asegurando que no existe ambigüedad en su significado por parte de todos los lectores. En especial de la palabra geotecnia, que forma parte del título del presente trabajo.

1.3.1 Geo-ingeniería o ingeniería del terreno

En noviembre del año 2000 se celebró en Melbourne el Congreso *GeoEng 2000 – An Internacional Conference on Geotechnical & Geological Engineering*, gracias a una iniciativa conjunta de la Sociedad Internacional de Mecánica del Suelo e Ingeniería Geotécnica (ISSMGE), de la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas (ISRM) y de la Sociedad Internacional de Ingeniería Geológica (IAGE). Otras asociaciones técnicamente relacionadas en mayor o menor grado se sumaron al evento: la Sociedad Internacional de Geo-Sintéticos, la Asociación Internacional de Túneles, la Asociación Internacional de Hidrogeólogos, la Comisión Internacional de Grandes Presas, la Asociación Internacional sobre Métodos Computacionales y Avances en Geomecánica y la Unión Internacional de Ciencias Geológicas – Grupo de Geología Ambiental. La palabra "geo-ingeniería" aparece con cierta frecuencia en las memorias de dicho congreso.

En el primer volumen de trabajos invitados a este congreso se recoge la conferencia especial de Norbert R. Morgenstern (2000) titulada *Common Ground*, donde el autor plantea qué hacen, a qué problemas se enfrentan y quienes forman lo que denomina

"familia geotécnica". Se trata de una presentación que resalta más los aspectos que unen que aquellos que distancian a los profesionales o expertos de la denominada "geo-ingeniería". Morgenstern usa a menudo el término ingeniería geotécnica ("geotechnical engineering"), título que en la tradición española resulta específico y poco unificador. En efecto, el área de conocimiento que utiliza el Consejo de Universidades español para definir la especialidad representada por las tres sociedades indicadas es "ingeniería del terreno", término que parece más genérico e integrador que el de ingeniería geotécnica, pero que no cuenta con un equivalente con la misma tradición en lengua inglesa.

Morgenstern recurre a la definición de Anon (1999) aparecida en la revista *Ground Engineering* para definir su "geotechnical engineering", que, en función de lo expuesto anteriormente, en castellano debería traducirse como ingeniería del terreno o, con vocación más internacional, como Geo-ingeniería. Anon define esta disciplina como "la aplicación de las ciencias de la Mecánica del Suelo, de la Mecánica de Rocas, de la Ingeniería Geológica y de otras disciplinas relacionadas, a la construcción en Ingeniería Civil, a las Industrias Extractivas y a la Preservación y Mejora del Medio Ambiente".

Cualquier definición sobre el alcance y contenidos de una disciplina puede ser criticada, unas veces por incompleta, otras por ser demasiado precisa y probablemente excluyente. Por ello conviene añadir a esa definición una lista de los campos de actividad y las habilidades propias de la ingeniería del terreno.

En esta dirección Morgenstern (2000) clasifica las actividades que puede llevar a cabo un geo-ingeniero en la práctica profesional en 5 grandes áreas de trabajo: sistemas de soporte estructural, sistemas de control de fluidos, geo-estructuras subterráneas, geo-estructuras superficiales y mejora del terreno (ver figura 1.1). Esta visión es algo sesgada hacia la construcción en ingeniería civil. Algunos aspectos no ligados directamente a la construcción podrían incluirse en esa lista. Es el caso, por ejemplo, del estudio de riesgo geológico (deslizamientos, zonificación sísmica, etc.) y su gestión.

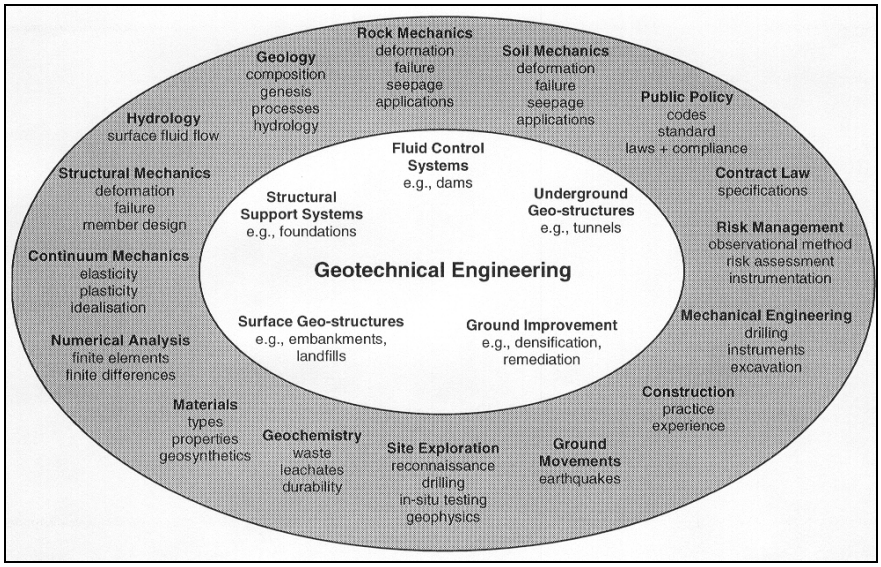

Fig. 1.1 Áreas de trabajo de la "geotechnical engineering", junto con las habilidades o conocimientos que requiere según Morgenstern (2000).

Como referencia en la confección de la lista de los campos de actividad de la ingeniería del terreno puede emplearse la relación de comités que se han creado dentro del Geo-Institute. Esta organización, de reciente creación desde la Asociación de Ingenieros Civiles de Estados Unidos (ASCE), tiene como objetivo integrar en una organización tanto a expertos en el área de la geo-ingeniería (ingenieros, geólogos, hidrogeólogos, etc.), como a fabricantes o técnicos con experiencia en la "geo-industria" (Geo-Institute, 2001). La lista de comités es la siguiente:

- Aplicaciones computacionales.
- Cimentaciones profundas.
- Estructuras de contención.
- Presas de materiales sueltos y taludes.
- Ingeniería Geológica.
- Geotecnia medio-ambiental.
- Ingeniería Geofísica.
- Geosintéticos.
- Hidrología subterránea.
- Inyecciones.
- Pavimentos.
- Mecánica de rocas.
- Cimentaciones superficiales.
- Dinámica de suelos.
- Mejora del terreno.
- Propiedades del suelo y modelización.
- Reconocimiento del terreno para edificación.
- Desarrollo sostenible.

La génesis de este instituto es sin duda novedosa, lo cual puede interpretarse como un síntoma de la vitalidad de la denominada geo-ingeniería. Los comités surgidos pueden ser una indicación de los temas de interés en Estados Unidos, aunque cubren casi todo el espectro de la geo-ingeniería.

Estas reflexiones permiten enmarcar la actividad dentro de la ingeniería del terreno. Aunque en sus orígenes ha sido una disciplina muy ligada a la actividad constructora de la ingeniería civil, en las últimas décadas se ha abierto a otros campos como los indicados anteriormente. Esto debe tenerse en cuenta en la docencia incluyéndolos en la medida de lo posible, aunque sólo sea en ejemplos o ejercicos, para, aunque de forma indirecta, concienciar al alumno de esta realidad.

1.3.2 Geotecnia, mecánica de suelos e ingeniería geotécnica

La geo-ingeniería o ingeniería del terreno, como se ha visto en el apartado anterior, es una amplia disciplina, por lo que se ha dividido en áreas de estudio específicas. Una primera clasificación tradicional ha sido separar los estudios centrados en rocas de los de suelos. Evidentemente esta separación no da dos conjuntos disjuntos ya que en la

frontera entre suelo y roca hay una amplia zona con cantidad de terrenos de transición y existen teorías que son útiles a la vez para rocas y para suelos, sin necesidad de grandes cambios. Además, aparte de estos dos conjuntos de disciplinas, existen otras que discurren aparte sin diferenciar el tipo de terreno, como por ejemplo la geofísica.

No existe consenso en el significado de la palabra geotecnia pero en esta tesina se utilizará para designar aquella parte de la ingeniería del terreno que aborda los estudios sobre terrenos formados por suelos. Ésta no es su definición más aceptada, ya que normalmente se define geotecnia sin excluir el estudio de las rocas, pero la mayoría de temarios de asignaturas y libros denominados geotecnia solamente abordan el estudio de los suelos, tratando únicamente aspectos relacionados con las rocas en aquellos temas en los que las teorías de suelos son útiles también en ese material.

La geotecnia, así entendida, se puede dividir en dos partes, la mecánica de suelos y la ingeniería geotécnica. La primera trata del estudio tenso-deformacional del suelo sometido a cualquier tipo de fuerza. Y la ingeniería geotécnica emplea los conocimientos desarrollados por la mecánica de suelos a los fines propios de la ingeniería del terreno, como pueda ser el cálculo de cimentaciones.

1.4 Breve resumen de la evolución de la geotecnia y su docencia

El estudio histórico de una ciencia puede tener valor, no sólo como simple curiosidad científica o como elemento de interés para el historiador, sino también como enseñanza para el docente e incluso para el profesional. Este tipo de estudios suele ayudar a plantear y conocer mejor los trabajos anteriores y a prever las tendencias futuras.

Uno de los trabajos más completos sobre la historia de la geotecnia es el volumen publicado al efecto en el XI Congreso Internacional de Mecánica del Suelo e Ingeniería Geotécnica de San Francisco (ICSMFE, 1985), que incluye tres conferencias de Kérisel, Skempton y Peck.

La primera de dichas exposiciones, de Jean Kérisel, trata de la historia de Ingeniería del Terreno hasta 1700. Obviamente no se puede hablar de una determinada tecnología geotécnica antes del siglo XVIII, sino de conocimientos empíricos y realizaciones concretas. A pesar de que existen trabajos sobre la técnica constructiva en la época romana o en la Edad Media, hasta el siglo XVIII la técnica del “maestro de obras” se guía fundamentalmente por el empirismo y es transmitida en el interior de los gremios.

La segunda conferencia, de A.W. Skempton, considera el periodo 1700-1925. Esta separación no es arbitraria. Empieza en los inicios del siglo XVIII, con el avance del racionalismo y con el desarrollo de los institutos y escuelas técnicas de ingenieros, cuando la ciencia comienza a tener una importancia básica en la tecnología hasta entonces desarrollada únicamente a escala artesanal. Y finaliza con la publicación de la obra de Terzaghi (1925), que constituye el inicio de una nueva etapa para la geotecnia. Las fechas fundamentales de esta época corresponden a desarrollos analíticos de importancia, relacionados con teorías de cálculo. En el periodo indicado Skempton

distingue cuatro etapas diferenciadas: pre-clásica, clásica primera fase, clásica segunda fase y moderna. La primera fase de lo que se entiende por mecánica del suelo clásica, comienza con los trabajos de Coulomb (1776) sobre empuje de tierras y va hasta la publicación del libro de Rankine (1857) con sus teorías sobre el tema. Con los medios disponibles en esta etapa era preciso simplificar bastante el complejo comportamiento del suelo, alejándose de su comportamiento real. Durante la segunda fase de esta mecánica de suelos clásica, Skempton incluye los trabajos de Darcy, Boussinesq (1885) y los de O. Reynolds (1885 y 1886) sobre la dilatancia de los suelos. Todos ellos recurren principalmente a técnicas experimentales para estudiar el comportamiento del terreno. Finalmente, entre 1919 y 1925 se produce un gran avance sobre el conocimiento de las propiedades de la arcilla, incluyendo los estudios de Atterberg, de Fellenius y de sus colegas suecos sobre estabilidad de taludes y el inicio de los trabajos de Karl Terzaghi.

Esta última época (1919-1925), definida según la evolución del desarrollo de los conocimientos geotécnicos, en la docencia se alarga aproximadamente unos veinte años más. En ella, pese a los avances, las enseñanzas transmitidas son básicamente conocimientos empíricos, pero se inicia la transmisión de procedimientos analíticos de cálculo. De éstos los preferidos de la época eran los apoyados en la estática gráfica (ver figura 1.2), cuya evolución según Jiménez (1971) llegó a refinamientos decadentes.

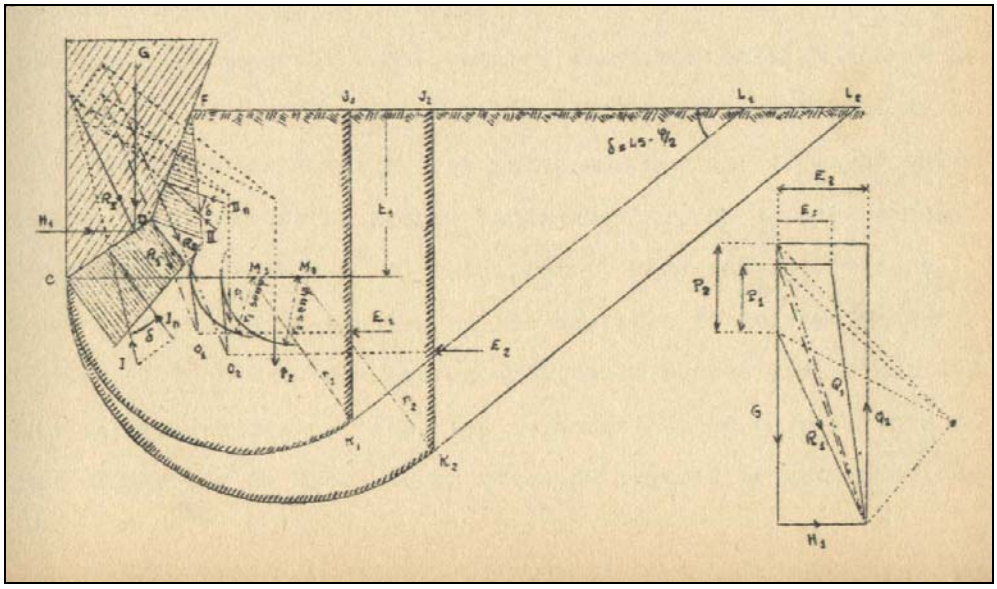

Fig. 1.2 Cálculo a través de un método gráfico de los cuchillos y paredes de un cajón de aire comprimido. Tomado de Entrecanales (1936).

Estos conocimientos se transmiten en las escuelas de ingeniería, originalmente militares y posteriormente civiles. La primera escuela de ingeniería civil del mundo es la École Nationale des Ponts et Chaussées, fundada en 1747 en París. En España se habrá de esperar a 1802, y las materias que durante ese primer año se explicaron, de acuerdo con el programa inicial, fueron: mecánica, hidráulica, geometría descriptiva y cálculo de empujes de tierras y bóvedas, así como estereotomía de las piedras y maderas (Sáenz, 1993). Pero a lo largo de esta época las enseñanzas geotécnicas no consiguen

constituirse como cuerpos de docencia independientes, sino que se explican conjuntamente con las enseñanzas de estructuras o puentes.

Cabe destacar que durante esta época se inicia la publicación de textos docentes con los apuntes de las enseñanzas transmitidas en las escuelas y la edición de revistas a través de las cuales los ingenieros civiles dispersos por el territorio se transmiten sus experiencias, muchas de ellas relacionadas con la forma de superar problemas relacionados con el terreno. En España destacan los textos de Ribera (1925, 1929, 1931 y 1932) y Entrecanales (1936) y la publicación periódica *Revista de Obras Publicas*.

El libro de Terzagui, *Erdbaumechanik auf bodenphysikalischer Grundlage*, publicado en 1925 se considera como el punto de partida de la nueva ciencia geotécnica. Sin embargo este trabajo no parece decisivo para los procedimientos constructivos ni para los métodos de cálculo. Pero sin duda su labor provoca el comienzo de una etapa de desarrollo espectacular para la geotecnia. La característica que hace especial a esta obra y a su autor es la plenitud de la aplicación del método experimental (padre de la ciencia moderna) a los problemas del terreno. La difusión de sus trabajos desencadenaría el comienzo de una nueva etapa en la historia de la geotecnia.

La tercera conferencia del volumen que sirve de pauta al desarrollo de este apartado, describe brevemente los últimos 60 años de la geotecnia en el mundo. En realidad, a principios del siglo XX, la práctica de la ingeniería geotécnica se reducía al uso de códigos y normas sancionados por la experiencia. Sin embargo a partir de 1925, además del trabajo personal de Terzaghi, varias instituciones en los países más desarrollados (Estados Unidos, Inglaterra, Alemania y países nórdicos) llevan a cabo numerosas investigaciones en mecánica del suelo. Y tras la Segunda Guerra Mundial surge un desarrollo sin precedentes, que tiene una de sus manifestaciones en la organización de forma sistemática de congresos internacionales y regionales, y en la publicación periódica de numerosas revistas especializadas. El avance es tan rápido que los desarrollos de Terzaghi pueden considerarse clásicos a partir de 1960.

Esta etapa se traduce a la docencia en la constitución de las cátedras destinadas exclusivamente a la geotecnia. Sumándose esta materia a los pilares de la formación de los ingenieros civiles junto con las estructuras y la hidráulica, que ya lo eran. En el caso español, en la escuela de Madrid, este paso no llega hasta 1960, año en el que se retira José Entrecanales Ibarra y su cátedra ("Cimientos y puentes de fábrica") se desglosa en "Puentes y obras de fábrica" que pasa a ser ocupada por Carlos Fernández Casado y en "Geotecnia y cimientos" de la que se hace cargo José Antonio Jiménez Salas (Sáenz, 1993). La docencia en esta época se centra en la comprensión de los fenómenos que caracterizan el comportamiento del terreno y en la exposición de métodos analíticos para poder abordar el cálculo de estructuras geotécnicas.

La expansión de la Geotecnia ha sido espectacular en los últimos veinte años, en los que se ha trabajado en aspectos aparentemente diversos, pero íntimamente relacionados entre sí. Una de las razones de esta evolución, entre otras muchas comunes con el resto de ciencias y disciplinas de la ingeniería, ha sido la facilidad al acceso de la informática, primero con las consolas y, posteriormente, con los ordenadores personales, que han desterrado los macroordenadores de los centros de cálculo. Ello ha hecho factible la

generalización del uso de los métodos numéricos en la investigación. Generalización hoy ya consolidada y que está llegando rápidamente a los despachos profesionales.

No obstante, no debe pensarse que la aplicación de los métodos numéricos a la geotecnia sólo tiene veinte años de historia. En 1938, Southwell describe los métodos de relajación para resolver, prácticamente a mano, la ecuación de flujo en un medio poroso (Faure, 2000). Los primeros cálculos sistemáticos aparecen en la década de los 60, utilizando en general el método de las diferencias finitas. Otra fecha importante antes de la generalización de la aplicación de métodos numéricos a la geotecnia, es la publicación de la primera aplicación del método de los elementos finitos, atribuida al trabajo de Zienkiewicz y Cheung (*Butters dams in complex rock formations*, Water Power, vol.16, 193,1964).

Así en un futuro la docencia de la geotecnia debe probablemente pasar a centrarse en la explicación de los fenómenos que controlan el comportamiento del terreno, relegando los métodos analíticos de cálculo a simples instrumentos docentes para facilitar la compresión de esos fenómenos y para que los alumnos y futuros ingenieros posean unas herramientas para obtener los órdenes de magnitud de los problemas a los que se enfrentan. Además también deben introducirse, en la medida de lo posible, los métodos numéricos aplicados a la geotecnia. Aunque nunca se debe olvidar que el papel de los métodos numéricos no es reinventar la geotecnia. Los conceptos de mecánica del suelo y de ingeniería geotécnica son en general independientes de los métodos numéricos, y es necesario conocerlos previamente para ser capaz de usar con criterio esas herramientas.