

Il "Notiziario" è lieto di poter pubblicare il testo della conferenza - prolusione tenuta dal Consocio Ing. Gianfranco Perri il 29 ottobre 1975, in occasione dell'apertura del 17° anno della "Escuela Superior Politecnica del Litoral" di Guayaquil in Ecuador, grato all'Autore per averlo cortesemente messo a disposizione. La pubblicazione ha luogo nella lingua originale, ritenendo che lo spagnolo possa essere compreso da tutti i lettori.

La conferenza ha come scopo essenziale di presentare la Geotecnica e costituisce di fatto una introduzione ai diversi corsi di carattere geotecnico-geomeccanico che si vanno un po' ovunque sviluppando nel campo ingegneristico civile e minerario; appunto per questo fatto il "Notiziario" la ritiene interessante per i suoi lettori.

A riguardo si deve però rilevare che nella conferenza il termine "Geotecnica" viene usato nel suo significato più ampio di scienza comprendente la meccanica delle terre, la meccanica delle rocce, e tutti gli insegnamenti applicativi conseguenti, diversamente da quanto è consueto in Italia, dove è usualmente inteso nel significato di disciplina che studia i problemi teorici ed applicati afferenti essenzialmente alla meccanica delle terre.

GEOTECNIA: UNA CIENCIA TEORICA Y APPLICADA EN CONTINUO DESARROLLO

Gianfranco Perri

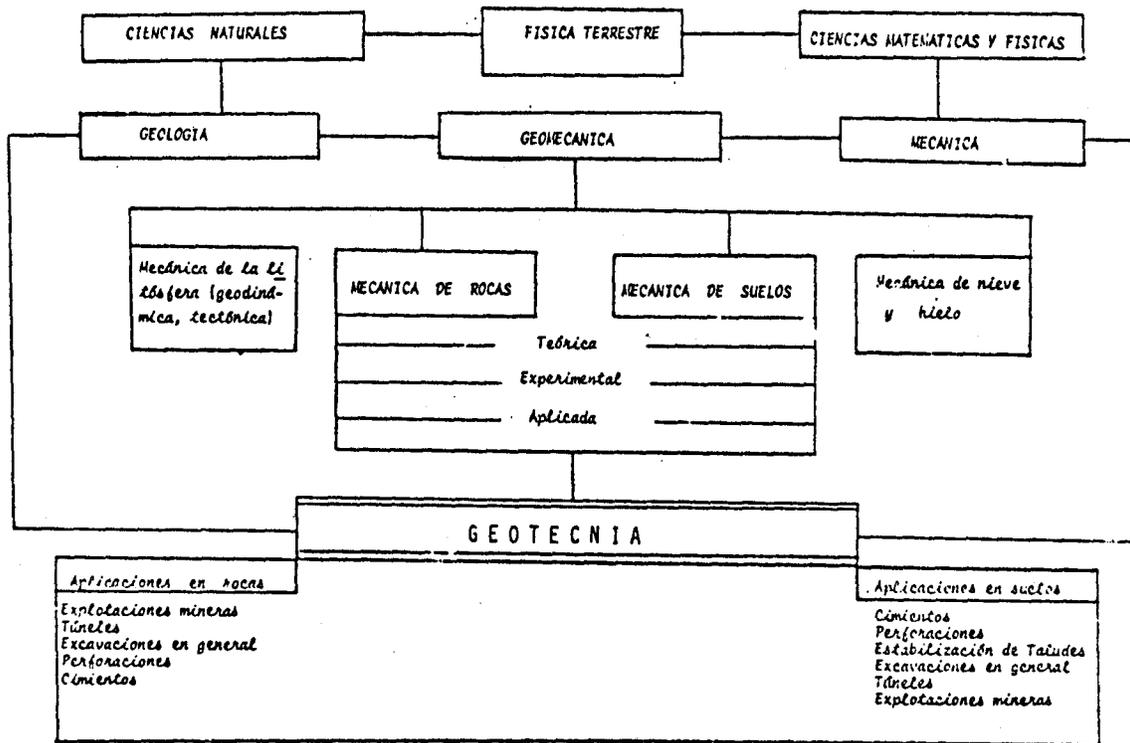
1. La definición más amplia y más general de Geotecnica se puede deducir directamente del mismo nombre: Geotecnica es la ciencia que se ocupa de todo cuanto se refiere a cuestiones técnicas que tienen como objeto o sujeto la corteza terrestre.

En la realidad el término Geotecnica indica una materia que trata de problemas técnicos en un campo más pequeño y, siempre en términos generales, se puede decir que es la rama de la ingeniería que estudia, sea el comportamiento físico-mecánico de los materiales que constituyen la corteza terrestre, sea las diferentes estructuras subterráneas y superficiales, naturales y artificiales, las cuales están hechas entre, sobre o por tales materiales (un túnel de mina, un túnel hidroeléctrico, como de autopista o ferrocarril; una excavación-minera al aire; un talud natural o artificial; las fundaciones de una presa, de un puente, de un edificio; una presa de tierra; el pavimento de una carretera; una estructura de retención o sostenimiento; etc.).

La tabla adjunta (*), presenta el intento de establecer la posición de la Geotecnica entre las varias disciplinas desde las cuales ella deriva o que en ella convergen.

En la parte alta, a la derecha y a la izquierda, están las "ciencias matemáticas y físicas" y las "ciencias naturales", tales disciplinas son el punto de origen, o sea son las ciencias básicas para el estudio de las propiedades físicas de la tierra de las cuales se ocupa la "física terrestre".

(*) semejante a aquella presentada en la primera lección del curso de "Principi di geomeccanica" dado por el Profesor Lelio Stragiotti en el "Politecnico" de Torino.



Del aporte de las ciencias exactas físico-matemáticas, desde las cuales deriva directamente la ingeniería (y en particular la “mecánica”) y de las ciencias naturales de las cuales hace parte la “geología”, nace la “geomecánica”. Esto es en un término general que puede comprender desde la “mecánica de la litósfera”, entendida como mecánica de los fenómenos naturales que interesan a la corteza terrestre como estructura (los fenómenos de la geodinámica interna y externa y de la geotectónica), hasta campos muy especializados y muy particulares como por ejemplo la “mecánica de la nieve y del hielo”.

De la geomecánica hacen parte las dos ramas centrales de la tabla que son la “mecánica de rocas” y la “mecánica de suelos”, donde rocas y suelos (*) son exactamente los materiales que constituyen la corteza terrestre y de los cuales se hablaba al principio. Tal distinción en dos ramas no es casual sino, como se verá más adelante, una exigencia de carácter práctico aplicativo, aunque también debida a cuestiones de tipo histórico y académico. Desde la confluencia y fusión de esas dos ciencias nace la Geotecnia la cual por su característica conserva contacto activo y directo con la geología y la mecánica.

Además, que con las ciencias geológicas y matemático-físicas la geotecnia tiene afinidad y ligamento con las enseñanzas tradicionales, sea naturalísticas (mineralogía, petrografía, geología estructural, etc.) sea ingenierísticas (ciencia y técnica de las construcciones hidráulicas, geofísica, geología y litología aplicadas, técnicas mineras, etc.).

(*) En Geotecnia los materiales que constituyen la corteza terrestre son divididos en suelos y rocas, pero la línea de confin es necesariamente arbitraria y en naturaleza existen muchos agregados de partículas minerales que es arduo clasificar. Los suelos en cambio de las rocas, son aquellos materiales hechos por partículas que no tienen ligaduras estables entre ellos o que pierden tales ligaduras con un más o menos largo contacto con el agua.

En la parte baja de la tabla está una doble lista que se refiere a los diferentes campos de las aplicaciones geotécnicas en rocas y en suelos. Se puede bien observar que los componentes de las dos listas son iguales pero puestos en orden diferente y particular en orden contrario; la idea con la cual se han hecho así las listas, ha sido la de poner los puntos en orden de importancia desde el punto de vista de la difusión cuantitativa estadística. Tal orden no pretende ser exacto, pero da una idea clara del hecho que, por ejemplo, la mayor parte de los trabajos de explotación minera se efectúan en ambiente y sobre materiales rocosos, en cambio la mayor parte de los cimientos de obras de ingenierías están realizados en materiales que se pueden encuadrar casi completamente en la categoría de los suelos.

2. Alrededor de hace 50 o 60 años se puede localizar el período en el cual por primera vez, y de manera concreta se sentó la necesidad de conocer mayormente la naturaleza geológica y las características mecánicas de los terrenos que eran objeto de aquellas construcciones de ingeniería que asumían siempre magnitudes más grandes y que por lo tanto presentaban mayores problemas técnicos; nació o sea, un nuevo interés de parte de las disciplinas exactas, por algunos aspectos de las disciplinas naturalísticas y tal interés se desarrolló gradualmente hasta culminar en una nueva materia de estudio: "la mecánica de suelos". Esta nueva ciencia se originó por el hecho que el desarrollo alcanzado de los problemas prácticos del suelo no estaba seguido de un igual desarrollo de los instrumentos medios y estudios científicos a disposición de los ingenieros; los intentos para remediar esta situación empezaron contemporáneamente en los Estados Unidos y Europa y fueron tales que produjeron en poco tiempo una cantidad enorme de material informativo. Entre los máximos protagonistas del desarrollo de la mecánica de suelos es casi superfluo recordar el nombre del Checoslovaco Terzaghi (1883 - 1963) el cual dedicó los primeros años de su carrera profesional a la búsqueda de un método racional para abordar los problemas de la ingeniería de suelos y cimentaciones. Sus esfuerzos se vieron coronados con la publicación en el año 1925, de su famoso libro "Erdbaumechanik" que se considera en la actualidad como el nacimiento de la mecánica de suelos.

Más ardua resulta la tarea para quien quiera establecer fechas y nombres, o sea datos exactos, sobre los orígenes y el nacimiento de la mecánica de rocas; tales dificultades están debidas al hecho que tales orígenes están muy diluídos y muy aislados en el tiempo y por eso, sólo hoy en día han obtenido el justo reconocimiento como ciencia verdadera y han logrado un volumen y un nivel teórico y experimental comparable a los de la mecánica de suelos.

En efecto una de las actividades humanas más antigua fué la de la explotación de los recursos naturales del suelo y luego del subsuelo, o sea la extracción de minerales, esto quiere decir que prácticamente desde "siempre" el hombre se ha encontrado con problemas de excavación y luego estabilidad de las mismas en materiales que eran rocosos. En el año de 1556, Georgius Agricolas en su tratado sobre el trabajo minero "De Re Metálica", describe interesantes métodos de sustentamiento de paredes y techo de túneles, pozos y trabajos mineros en general. Porsupuesto, con esto no se quiere afirmar que la mecánica de rocas como ciencia es tan antigua y en efecto se tiene que esperar hasta el siglo XIX para que se empiece a encontrar los primeros informes técnicos en la materia. Tales informes a menudo eran cualitativos, basados sobre observaciones visuales, conteniendo a veces, informaciones cuantitativas como por ejemplo los que se refieren a los fenómenos de subsidencias superficiales y sobre la convergencia de techo y piso en los trabajos subterráneos Young y Stoks escribieron el "Subsidence Resulting from Mining" publicado en el año 1916 conteniendo una lista de 100 casos preparados en los 60 años

precedentes sobre el mecanismo de subsidencia en los campos de carbones europeos.

En las primeras décadas de este siglo se han producido una notable cantidad de informes técnicos sobre las rocas desde el punto de vista de los materiales de construcciones, de las excavaciones de minas y de trabajos de ingeniería; estos informes técnicos comprenden informaciones sobre las propiedades mecánicas de las rocas, criterio de rotura, excavación de rocas, etc. Además se han desarrollado estudios de laboratorio sobre la fotoelasticidad y modelos rocosos y se han buscado generalizaciones teóricas y empíricas que se refieren al estudio del estado de tensiones sobre las superficies de aberturas subterráneas en rocas.

En las últimas cuatro décadas, la producción de estudios científicos sobre las propiedades de las rocas y sobre el proyecto y la estabilidad de estructuras, en rocas, se ha incrementado rápidamente. En el año 1951 se hizo la primera Convención Internacional sobre la presión de las rocas y sobre los sustentamientos subterráneos en Liege (Bélgica) y en el año de 1966 se celebró el primer Congreso de la Sociedad Internacional de Mecánica de rocas en Lisboa donde se presentaron más de 300 informes técnicos.

3. Como se ha dicho los primeros estudios de Geotecnia fueron basados sobre metodología empírica y semiempírica y esencialmente sobre las observaciones intuitivas de los fenómenos físicos que gobernaban en el comportamiento de los varios materiales de la litósfera en los diferentes casos. En efecto, resultó pronto muy difícil establecer leyes de comportamiento y clasificaciones exactas y generales, cuando el objeto en examen era constituido por la corteza terrestre que, casi por su definición intrínseca, es heterogena y queda fuera del orden matemático, un campo o sea, el cual desde siempre fué dominio de una de las más clásicas ciencias naturales: la geología. Por esto al comienzo, se encuentran trabajos y estudios en los cuales falta una teoría general y en donde muchos estudiosos han buscado la forma de encontrar soluciones que se podrían adaptar en cada caso a particulares condiciones técnicas.

Los estudios sistemáticos han procedido a lo largo de dos metodologías fundamentales, paralelas e integradas. La una con la otra, o sea se han desarrollado estudios que se pueden definir como de tipo teórico y experimental.

Los estudios teóricos, se han desarrollado en el sentido:

- a. De una búsqueda continua de diferentes modelos físicos matemáticos que siempre más podrían acercarse al comportamiento real de los diferentes materiales de la litósfera; y
- b. En el sentido de la búsqueda de las metodologías matemáticas más aptas al estudio de los problemas prácticos, o sea al estudio de las diferentes estructuras geotécnicas.

Se ha estudiado así el comportamiento mecánico (tensión-deformación-tiempo) de materiales elástico, lineal y no lineal, viscoelástico, elastoplástico, rigidoplástico, introduciendo modelos reológicos que a partir del sencillo resorte de Hooke, se han hecho siempre más complejos llegando a representaciones analíticas de ellos verdaderamente tan difíciles y complejas que todavía es dudosa una aplicación sucesiva cualquiera de las mismas.

Contemporáneamente, se han desarrollado diferentes teorías matemáticas para el estudio de algunos problemas particulares; así existen los grandes capítulos de la teoría de la consolidación, del equilibrio plástico de los terrenos de la teoría de la elasticidad, etc. que hoy en día constituyen las bases teóricas de todos los estudios geotécnicos.

También por lo que se refiere a los estudios de tipo experimental, se pueden localizar dos ramas. La primera que comprende toda una larga serie de ensayos de laboratorio con el intento de determinar el comportamiento físico mecánico de los

diferentes materiales con referencia particular, además, que a problemas de granulometría y de permeabilidad, a las relaciones tensión-deformación-tiempo, que constituyen a los fundamentos del estudio geotécnico.

En este campo la metodología y la tecnología han llegado a niveles verdaderamente excepcionales y los tipos de ensayos que se hacen en laboratorio sobre los materiales geotécnicos son numerosísimos, a partir del ensayo de resistencia y de deformación a las solicitaciones sencillas de comprensión, tracción y corte, hasta llegar a los ensayos más complejos de las pruebas triaxiales y poliaxiales en las cuales los materiales están sujetos a estados de solicitaciones siempre más complejos y completos y en las cuales se levantan medidas que permiten analizar de manera completa la influencia de factores como el tiempo, la permeabilidad, la velocidad de aplicación de las cargas, los efectos de cargas cíclicas y dinámicas sobre el comportamiento mecánico de los materiales, etc.

El segundo grupo de estudios experimentales en el campo geotécnico, es el que se refiere a varias técnicas de laboratorio ideadas con el fin de analizar sobre modelos, el comportamiento de diferentes estructuras geotécnicas.

Tales métodos experimentales fueron empleados por largo — tiempo y de manera casi exclusiva antes del empleo de las grandes computadoras, entre ellos se pueden recordar:

- a. Los que utilizan modelos equivalentes o sea, modelos que reproducen la obra en escala reducida utilizando materiales que son exactamente los mismos que componen la estructura real o otros que tienen un comportamiento equivalente;
 - b. Los que utilizan modelos analógicos o sea que se sirven de analogías fenomenológicas (por ejemplo estudio de problemas de flujo en rocas mediante circuitos eléctricos);
 - c. Los que al fin utilizan los principios de la fotoelasticidad, o sea métodos que usan modelos de gelatina planos y tridimensionales con la ventaja respecto a los métodos analíticos, de tratar estructuras geoméricamente complejas, de simular operaciones de excavaciones, de tener en cuenta los efectos de la gravedad, que son de particular interés en los estudios de estructuras en rocas.
4. Aunque ya se ha dado una idea general sobre la complejidad y amplitud de lo que quiere decir geotecnia y estudios geotécnicos, se ha llegado ahora al momento de introducir otro fundamental e importante concepto peculiar de las ciencias geotécnicas y, en consecuencia del cual, el campo del estudio y la dificultad y complejidad del mismo aumentan notablemente.

Al contrario de lo que sucede en todos los otros campos de la ciencia de las construcciones, en geotecnia al lado del concepto de material (suelo y rocas) común a casi todos los otros materiales que se estudian en la Ingeniería (acero, concreto, madera, plástico, vidrio, etc.) se encuentra el concepto de masa natural, formación in situ, o masa rocosa. Con estos términos se entiende la entidad natural en la cual o encima de la cual se quiere construir una estructura. De esta manera, en las masas naturales no hay una global homogeneidad, sino masas de materiales con diferentes características físicas-mecánicas y superficies geológicas de discontinuidad orientados de manera diferente en el espacio, que causan un comportamiento mecánico de tipo esencialmente anisótropo. La roca, o el suelo entendidos como materiales es en cambio una muestra representativa de las diferentes zonas de homogeneidad. De lo antes dicho, se puede ya intuir como las informaciones que se obtengan sobre el comportamiento de los materiales, aunque son muy útiles, no pueden en general ser directamente empleadas, en los proyectos de estructuras geotécnicas sin un adecuado análisis de las características de la masa natural. Todo esto ha implicado una ampliación de las metodologías del estudio geotécnico sea en

la rama que se ha definida teórica, sea en la experimental.

En el campo de los estudios teóricos, todas las teorías clásicas de las cuales se ha hablado antes, bien pronto ha presentado todos sus límites a medida que los problemas que se iban a encontrar se hacían siempre más técnicamente complejos.

Los métodos de estudios basados sobre el modelo rígido-plástico, emplean en el cálculo de estructuras los teoremas límites de plasticidad, o los métodos de cálculo del equilibrio límite global y se basan sobre determinadas hipótesis por los mecanismos de rotura de los materiales y no tienen absolutamente en cuenta la deformación de los mismos. Estos métodos son muy usados por la facilidad de empleo en el estudio de problemas como son estabilidad de taludes, cálculos de terraplenes, muros de contención, capacidad de carga de cimientos, revestimiento de túneles, aún presentan muchísimos inconvenientes a causa de la gran sencillez y aproximación que se introducen con las varias hipótesis que se toman a fundamento de los métodos de cálculo. Un notable salto cualitativo representa el empleo de todos los métodos analíticos que se basan sobre las otras diferentes teorías de comportamiento de los materiales (elasticidad, viscosidad...) y que estudian las estructuras geotécnicas como problema de mecánica del continuo y usando el método de las tensiones. Tal método es por cierto mucho más completo de lo antes citado, además que por el tipo de informaciones que puede dar, (tensiones y deformaciones en cada punto de la estructura) también por la naturaleza de las diferentes condiciones que es posible tener en cuenta en la solución de un problema.

Aunque sea evidente el salto cualitativo que tales métodos analíticos de las tensiones presentan sobre los del equilibrio límite plástico, se tiene que admitir que con los métodos analíticos se hace siempre referencia a problemas ideales que encuentran limitadas aplicaciones prácticas. Los métodos analíticos en efecto permiten obtener para el cálculo de las tensiones y de las deformaciones, formulas resolutivas en forma cerrada y que también en el caso de problemas planos y en las hipótesis de homogeneidad isotropía y elasticidad, son difícil de obtenerse o imposible de obtenerse en la mayoría de las aplicaciones prácticas donde se trata generalmente de estudiar estructuras muy complejas sea por la geometría sea por el comportamiento físico-mecánico de los materiales.

También los métodos experimentales presentan diferentes dificultades de aplicación: son a menudo muy costosos y las informaciones que ellos pueden ofrecer son muy limitadas a menos de utilizar complejas elaboraciones analíticas de los resultados de laboratorio.

5. El último fruto (cronológicamente hablando) de los continuos estudios en el campo geotécnico, ha sido la introducción y la difusión en el estudio de los problemas de mecánica de rocas y de suelos, de los métodos de cálculo numérico, permitido por el rápido desarrollo y difusión de las modernas computadoras electrónicas. Los métodos numéricos pueden ser utilizados en diferentes maneras, por ejemplo en la solución de un dado problema puede ser necesario, en el caso se hayan obtenido relaciones matemáticas en forma obierta, buscar una solución aproximada, esto es el caso por ejemplo de la solución de una ecuación integral.

Otro método es lo que permite transformar las ecuaciones fundamentales de la mecánica del continuo, con dadas condiciones de contorno, en un sistema de ecuaciones lineales algebraicas, este procedimiento de aproximación matemática se llama método de las diferencias finitas. Además el empleo de métodos numéricos ha permitido considerar otra vez actuales algunos de los métodos del equilibrio límite mediante el empleo de procedimiento de cálculo que ofrecen una notable precisión y la posibilidad de tener en