

DE UNA CLASE DE INTRODUCCION AL CURSO DE MECANICA DE ROCAS.

Por Ing. Gianfranco Perri^(*)

En el 1966, año del primer congreso de la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas realizado en Lisboa; en Washington el "Comité de Mecánica de Rocas de la Academia Nacional de Ciencias" publicó la siguiente definición:

"Mecánica de Rocas es la ciencia teórica y aplicada del comportamiento mecánico de las rocas; es aquella rama de la mecánica relacionada con la respuesta de las rocas sujetas a campos de fuerzas de distinta naturaleza".

(*) Profesor de Mecánica de Rocas en la Universidad Central de Venezuela.

En la realidad la mecánica de rocas comprende 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 rocosos 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-mirra al aire; un talud natural o artificial; las fundaciones de una presa, de un puente, de un edificio, etc.).

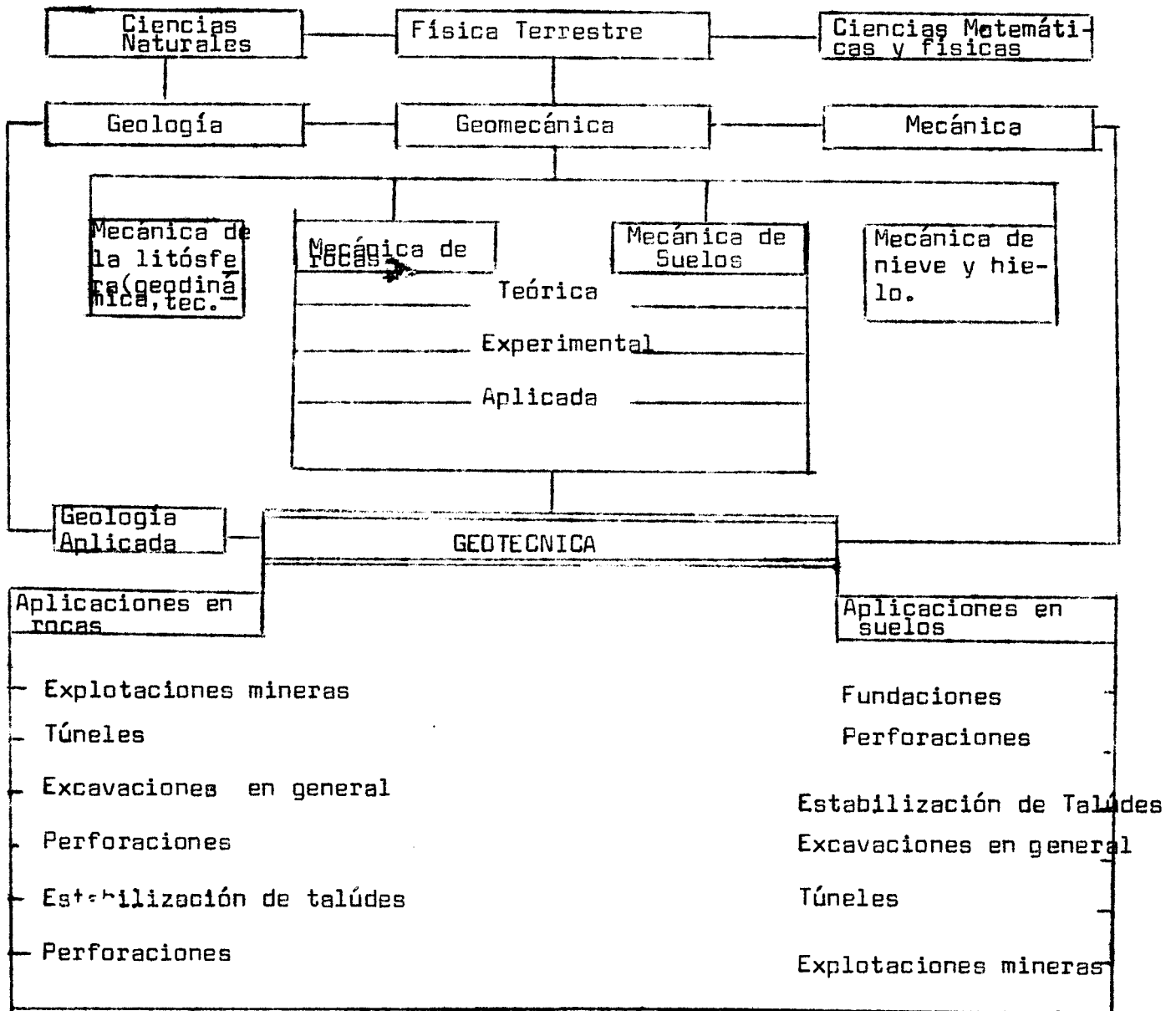
La tabla adjunta, presenta el intento de establecer la posición de la Mecánica de Rocas entre las varias disciplinas desde las cuales ella deriva o que en ella convergen.

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".

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 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 ro-

cas y suelos (*) son los materiales que constituyen la corteza terrestre.



(*) En Geotecnia los materiales que constituyen la corteza terrestre son divididos en suelos y rocas, pero la línea de confín 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. Desde el punto de vista más práctico y aplicativo se verá como tenga un papel principal para esta distinción, el factor escala; entendido como relación entre dimensiones de la estructura en estudio y dimensiones estructurales del material roca-suelo.

Tal distinción en dos ramas aunque deriva de una exigencia de carácter práctico aplicativo, también es debida quizás principalmente 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 comprendiendo directamente a la geología aplicada.

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

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 particularmente en orden contrario; la idea con la cual se han hecho así las listas, ha sido la de poner los campos 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 las fundaciones de obras de ingeniería están realizadas en materiales que se pueden encuadrar casi completamente en la categoría de los suelos.

Alrededor de hace 50 ó 60 años se puede localizar el período en el cual por primera vez, y de manera concreta se sintió 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 instru

mentos, 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 Checoeslovaco 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 fundaciones. Sus esfuerzos se vieron coronados con la publicación en el año 1925, de su famoso libro "Erdbaumechanik" que se considera en la actualidad como símbolo del 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 comparables a los de la mecánica de suelos.

En efecto una de las actividades humanas más antigua fue 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. Por supuesto, con esto no se quiere afirmar que la mecánica de rocas como ciencia sea tan antigua y en efecto se tiene que esperar hasta el siglo XIX para que se empiecen 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 que Young y Stoks escribieron en "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 produjeron 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 como ya se dijo, 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.

Como ya se ha comentado, los primeros estudios de Mecánica de Rocas fueron basados sobre una metodología empírica y semiempírica y esencialmente sobre las observaciones intuitivas de los fenómenos físicos que gobernaban el comportamiento de los materiales rocosos 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 heterogénea y queda fuera del orden matemático, un campo o sea, el cual desde siempre fue 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 buscaron la forma de encontrar soluciones que se podrían adaptar en cada caso a particulares condiciones técnicas.

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

Los estudios teóricos, se han desarrollado en el sentido:

- a.- De una búsqueda continua de diferentes modelos físicos matemáticos que siempre más podrán 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 en roca. Se ha estudiado así el comportamiento mecánico (tensión-deformación-tiempo) de los 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 elasticidad del equilibrio plástico, de la teoría de la clasticidad, etc. que hoy en día constituyen las bases teóricas de todos los estudios de Mecánica de Rocas.

También para 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 las diferentes rocas con referencia particular, además, que a problemas de microestructura y de permeabilidad, a las relaciones tensión-deformación-tiempo, que constituyen los fundamentos del estudio geingenierístico.

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 las rocas son numerosísimos, a partir del ensayo de resistencia y de deformación a las sollicitaciones 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 sollicitaciones siempre más complejos y completos y en las cuales se realizan 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 las rocas, etc.

El segundo grupo de estudios experimentales comprende varias técnicas de laboratorio ideadas con el fin de analizar sobre modelos, el comportamiento de diferentes estructuras en roca.

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.

- i.- 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;
- ii.- 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).
- iii.- 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.

Ahora bien, aunque ya se ha dado una idea general sobre la complejidad y am

plitud de la materia, se ha llegado al momento de introducir otro fundamental e importante concepto peculiar de la Mecánica de Rocas 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 Mecánica de rocas al lado del concepto de material, 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 físico-mecánicas y superficies geológicas de discontinuidad orientadas de manera diferente en el espacio, que causan un comportamiento mecánico de tipo esencialmente anisótropo. La roca, entendida como material 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 sin un adecuado análisis de las características de la masa natural. Todo esto ha obligado a una ampliación de las metodologías del estudio sea en la rama que se ha definido 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 han 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 para los mecanismos de rotura de los materiales y no tienen absolutamente en cuenta la deformación de los mismos. Estos métodos aunque son muy usados por la facilidad de empleo en el es-

tudio de problemas como son los de estabilidad de taludes, muros de contención, capacidad de carga de fundaciones, revestimiento de túneles, aún presentan muchísimos inconvenientes a causa de la gran simplificación 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 como un problema de mecánica del continuo y usando el método de las tensiones. Tal método es por cierto mucho más completo de los antes citados, 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 tal método analítico de las tensiones presenta sobre los métodos 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, fórmulas resolutivas en forma cerrada y que también en el caso de problemas planos y en las hipótesis de homogeneidad isotropía y elasticidad lineal 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 numerosos métodos experimentales llevados a grandes escalas, 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.

El último fruto (cronológicamente hablando) de los continuos estudios en el campo geoestructural ha sido la introducción y la difu -

sión en el estudio de los problemas de mecánica de rocas, 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 abierta, 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 cuenta un mayor número de factores que tienen influencia sobre el fenómeno de la estabilidad.

Un último método numérico que consiste en una sola aproximación física es el método de los elementos finitos. Zienkiewicz ha dado una completa descripción del método y de su aplicación detallada en muchos artículos y en el libro "The finit elements method in structural and continium mechanisch" Mc Graw Hill, Londres 1967.

Se comienza por subdividir el medio continuo que representa la estructura en regiones más pequeñas a cada una de las cuales se pueden asignar diferentes propiedades elásticas o incluso anelásticas. Cada uno de estos elementos está conectado con los demás mediante "nudos" donde participa de una serie de desplazamientos comunes.

Suponiendo el sistema de desplazamiento en el interior de cada elemento definido en función de los desplazamientos nudales, se pueden relacionar los desplazamientos nudales con una serie de fuerzas ficticias aplicadas en los nudos. El conjunto de elementos y la solución final sigue los esquemas habituales de cálculo estructural, disfrutando en todo momento de una cierta visión física del problema. Para citar algu-

nas de las características peculiares de E.F.M.: se presenta particularmente versátil para el estudio de estructuras con geometría compleja, de biéndose en cada caso solamente elegir elementos cuya forma se adapte mejor a reproducir la estructura dada; del momento que la estructura está descompuesta en elementos y que para cada uno de ellos se efectúa independientemente el cálculo mecánico, es posible tratar con extrema simplicidad estructuras no homogéneas; el estudio de una estructura anisótropa no presenta mayor dificultad que una isótropa; el método puede ser extendido teóricamente sin dificultades a materiales a comportamiento no lineal, elasto plástico, y se puede adaptar a representación de particulares propiedades de las masas naturales como material no resistente a tracción, consideración de estratificaciones, fracturas, fallas, con o sin relleno, problemas de flujo, etc.

En definitiva se puede decir que tal método numérico es capaz de resolver la mayoría de los problemas si se plantean adecuadamente.

De hecho puede decirse que, en el momento actual la capacidad a este respecto excede al conocimiento de los materiales con los que se trata. Por lo tanto, es obvio que deben emplearse el razonamiento y el sentido común ingenieril para aplicar tal método a los problemas prácticos, aunque el costo del cálculo mecanizado desciende cada año, no es de esperar que los casos sencillos se puedan estudiar por tal método de forma rutinaria. Su aplicación estará limitada en general al estudio de estructuras importantes, o al desarrollo de métodos para casos repetidos.

Por esto siguen teniendo gran valor práctico, los métodos más antiguos y más aproximados antes mencionados, y siempre, la experiencia acumulada con la práctica del trabajo.

Para completar este cuadro, muy resumido de los varios campos de estudio de la Mecánica de Rocas, falta dar una nota sobre los tipos de investigaciones, estudios y mediciones que se hacen in situ sobre las masas naturales.

Ya se ha dicho de la diferencia sustancial que existe casi

siempre, entre el comportamiento geomecánico de una roca y lo que se ha definido como masa rocosa natural o formación in situ. Esto implica las necesidades y la existencia de investigaciones in situ, que en línea de principio, siguen paralelamente los ensayos de laboratorio en el sentido que tienen como fin el de estudiar las características de comportamiento mecánico (tensiones-deformaciones-tiempo) de las rocas, pero en una dimensión más natural y por esto existen toda una serie de pruebas y mediciones que se hacen sobre las masas naturales rocosas.

La intención con la cual se ha escrito estas notas han sido las de explicar los varios métodos de estudio y de las investigaciones en la Mecánica de Rocas, sino sólo la de presentar una idea sobre la amplitud y el grado de desarrollo y especialización que una ciencia tan moderna (en parangón con muchas otras) ha logrado y es, seguramente gracias al empuje de la necesidad técnica de construir obras siempre más grandes y funcionales (presas que alcanzan los 300 metros de altura, túnel de minas cuya profundidad supera los 3000 metros, etc.).

Y por esto no es un caso que la tendencia moderna, en los proyectos y realizaciones de las obras de la ingeniería civil y minera, es la de efectuar el trabajo en equipo con el concurso de diferentes especialistas; tal tendencia es en efecto una necesidad cuando se trata de trabajar en el campo geotécnico donde es prácticamente imposible resumir en una sola persona capacidad a suficiente nivel sea en la geología, como en la Mecánica de Rocas, como en la ingeniería estructural.

En un cuadro tan amplio, es el ingeniero geotécnico especializa en Mecánica de Rocas que está en la mitad entre lo que concierne al geólogo puro y lo que interesa al ingeniero calculador; es este ingeniero que además de ser un especialista en sus materias debe tener suficientes conocimientos de geología para comprender y aprovechar y seleccionar las informaciones que el geólogo puro puede ofrecer, y al mismo tiempo debe tener un buen conocimiento de la ingeniería estructural y de las técnicas de canteras para poder individualizar cuales son los factores geotécnicos de mayor importancia y necesidades para efectuar un buen proyecto.