



REPUBLICA DE VENEZUELA
MINISTERIO DE TRANSPORTE Y COMUNICACIONES
INSTITUTO NACIONAL DE CANALIZACIONES

curso interamericano de ingeniería del dragado

Maracaibo, Noviembre 1980 y Geomec, N. 2. Caracas, Agosto 1981

CARACTERIZACION INGENIERISTICA DE ROCAS Y MACIZOS ROCOSOS

DR. GIANFRANCO PERRI A. (*)

(*) PROFESOR DE MECANICA DE ROCAS EN LA UNIVERSIDAD CENTRAL
DE VENEZUELA.

INSTITUTO NACIONAL DE CANALIZACIONES

Caracas - Venezuela

PRIMER CURSO INTERAMERICANO DE
INGENIERIA DEL DRAGADO

INTRODUCCION

En el 1966, mientras se realizaba en Lisboa el Primer Congreso de la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas, 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".

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 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 minera a cielo abierto; 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".

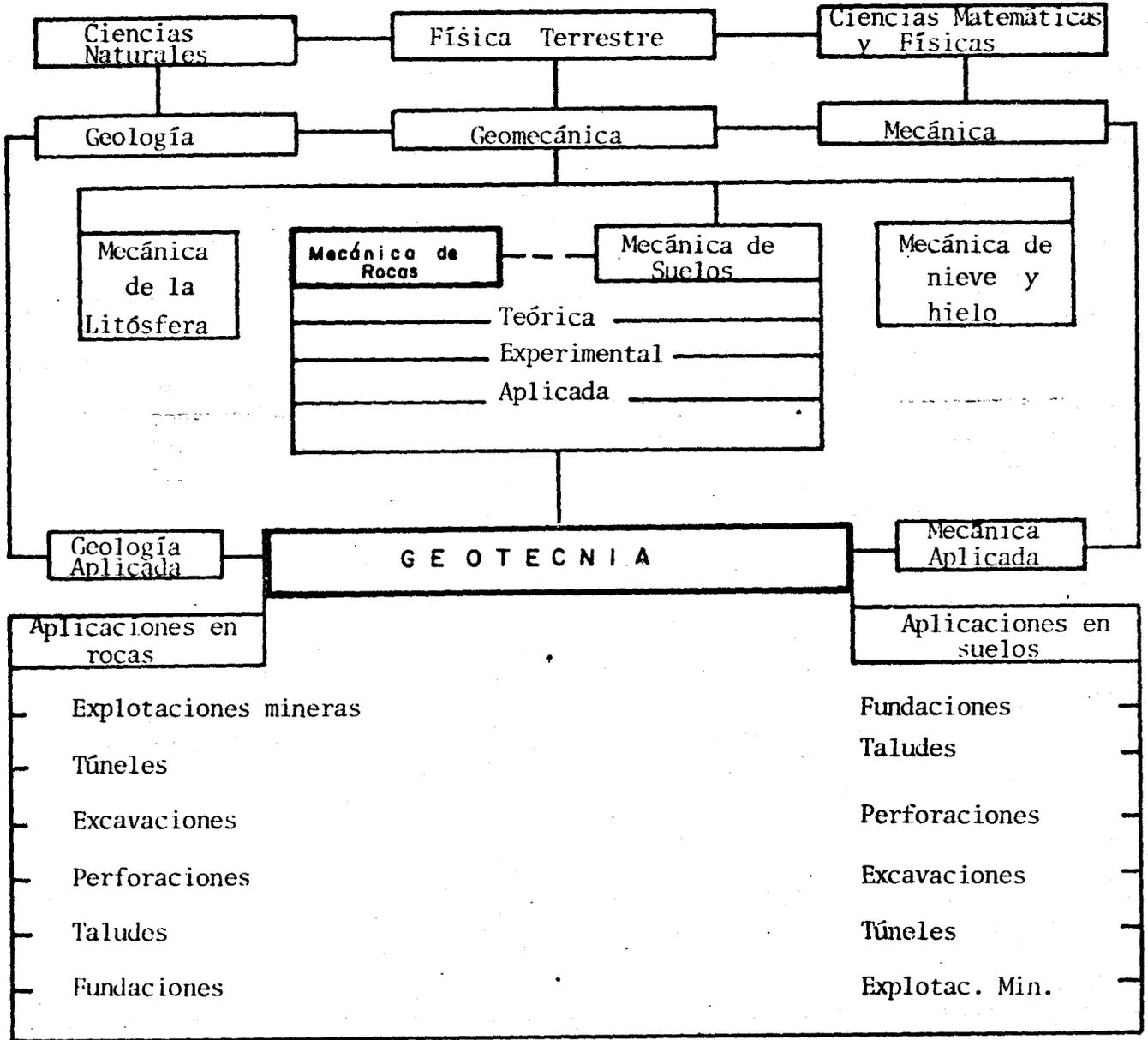
De la geomecánica hacen parte las dos ramas centrales de la tabla que son la "mecánica de rocas", y la "mecánica de suelos", donde rocas y

INSTITUTO NACIONAL DE CANALIZACIONES

Caracas - Venezuela

PRIMER CURSO INTERAMERICANO DE
INGENIERIA DEL DRAGADO

- 2 -



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

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.

(*) 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 cómo 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.

INSTITUTO NACIONAL DE CANALIZACIONES

Caracas - Venezuela

PRIMER CURSO INTERAMERICANO DE
INGENIERIA DEL DRAGADO

- 4 -

La definición de mecánica de rocas, transcrita al comienzo, puede parecer a primera vista que realza el papel de la mecánica, ignorando el de la geología; lo que puede resultar por lo menos extraño para quien, desde siempre, ha oído hablar de las rocas prevalentemente, y quizá exclusivamente, en términos geológicos.

En efecto todos recuerdan los términos de rocas sedimentarias, magmáticas y metamórficas, que individualizan las tres grandes familias de rocas y que las diferencian justamente en base a su origen o génesis geológica.

Por otros lados, los ingenieros que se ocupan de mecánica de rocas han reconocido frecuentemente lo inadecuado de un sistema de identificación de este tipo, advirtiendo al menos que rocas del mismo origen pueden presentar una gama extraordinariamente amplia de propiedades físico - mecánicas, que son las que efectivamente revisten un mayor interés.

Sin embargo no se trata de extremizar: el papel y la importancia de la geología son evidentes; todos los materiales a ser tratados son rocas situadas en un entorno geológico o extraídos de él. Los materiales poseen ciertas características físicas que son función de su origen y de los procesos geológicos posteriores que han actuado sobre ellos. El conjunto de estos fenómenos en la historia geológica de una cierta zona conduce a una litología particular, a una determinada serie de estructuras geológicas y a un estado tensional in situ característico. Regionalmente se producen variaciones de estas condiciones y pueden también producirse localmente, aún con mayor importancia, dentro del emplazamiento de una obra determinada.

La litología de una roca hace referencia a su mineralogía, textura y fábrica, junto con un nombre o término descriptivo de algún sistema de clasificación reconocido, por ejemplo pizarra bituminosa, caliza oolítica, granito, gneis, esquisto, etc. (*). Aunque, como ya se di

(*) Quizás sería necesario y justo dedicar unas lecciones a la introducción o revisión de los principios básicos de la geología en sus diversas ramas más directamente involucradas con la Mecánica de Rocas. Sin embargo debido a las grandes restricciones de tiempo y en consideración del hecho que el desarrollo siguiente de la materia puede ser aprovechado, en forma casi completa sin el conocimiento inmediato de aquellas naciones geológicas, se exhorta a los ingenieros para los cuales fuese necesario, a refrescar y revisar sus conocimientos básicos de geología, y en particular de litología y geología estructural, que en algún momento de sus estudios deben haber encontrado y que muy probablemente han sucesivamente olvidado.

INSTITUTO NACIONAL DE CANALIZACIONES

Caracas - Venezuela

PRIMER CURSO INTERAMERICANO DE
INGENIERIA DEL DRAGADO

- 5 -

jo, en muchos casos no existe correlación directa entre la denominación geológica de una roca y sus propiedades mecánicas, existe casi siempre como mínimo una gama de valores para cualquier tipo de roca donde queda comprendido el valor de una cierta propiedad mecánica. Para algunas de estas propiedades y para algunos tipos de rocas este intervalo de variación puede ser desalentadoramente grande; para otras bastante más pequeños. Por ejemplo, la resistencia a compresión simple de una caliza puede variar de 350 a 2.500 Kg/cm²; sin embargo para la sal gema la variación es solamente de 200 a 350 Kg/cm², aproximadamente. Otro ejemplo: la dureza de la cuarcita será elevada y prácticamente constante, mientras que la de una arenisca será muy baja; o muy alta según el tipo y grado de cementación.

En todo caso siempre la composición y estructura de una roca influyen sus características mecánicas; éstas no dependen solamente de las propiedades de cada uno de los cristales constituyentes, sino también de la manera en que aquellos estén entre sí agregados. No es raro observar entre cristal y cristal y también en los mismos cristales, algunos vacíos o alguna microfisura preexistentes. Consecuentemente una descripción de la composición mineralógica y de la textura petrográfica de la roca, que permiten definir, por ejemplo, las eventuales microfisuras existentes, precisando su número y orientación en el espacio, así como su morfología, etc. pueden permitir dar algunas valiosas informaciones sobre su isotropía o anisotropía con respecto sea a las características de deformación como de resistencia.

Por ejemplo, la mayoría de las rocas ígneas tienen una estructura densa, bien compacta y encajada, con muy pequeñas diferencias de dirección en las propiedades mecánicas (con la excepción, por supuesto, de muchas rocas volcánicas superficiales, rocas intrusivas subsuperficiales y algunas intrusivas profundas, como los granitos gneísicos, que presentan una estructura reiolítica en la periferia de la intrusión).

Las rocas sedimentarias como son las pizarras arcillosas, las areniscas y algunas calizas, están estratificadas y por tanto encuentran una anisotropía considerable en las propiedades mecánicas. Otras rocas sedimentarias como la salgema, el yeso y muchas calizas y dolomias, han recristalizados en una textura compacta, presentando únicamente una ligera anisotropía.

Las rocas metamórficas son quizás las más sorprendentes respecto a la anisotropía, la clorita, el talco y el micro-esquisto tienen superficies de exfoliación bien desarrolladas y se componen de minerales de estructura hojosa que dan lugar a grandes diferencias en la resistencia y el módulo de deformación según la dirección del ensayo. Los gneis muestran alguna anisotropía pero en menor grado. La pizarra

también es muy anisótropa debido a su pronunciada estratificación. Otras rocas metamórficas como el mármol, la cuarcita, han recristalizado en una textura compacta, siendo en consecuencia bastante isotropas.

Este tema podría a este punto continuar aún por muchas páginas saliendo pero de los propósitos preestablecidos y limitados a la ilustración de la importancia de los factores geológicos sobre las propiedades de las rocas.

PROPIEDADES MECANICAS DE LAS ROCAS

En el pasado, cuando las ciencias geomecánicas aún no se habían consolidado, las rocas se describían más frecuentemente por medio de sus propiedades físicas y organolépticas además que por su composición mineralógica y química a las cuales se ligaba su denominación litológica.

Se trata de características sin dudas de mucho interés, pero aún no suficientes para los objetivos del ingeniero, o sea para las aplicaciones referentes al diseño de estructuras y al estudio de la estabilidad y resistencia de las obras que tengan a la roca como denominador común.

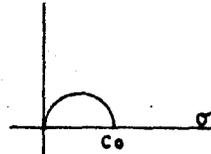
El intento de investigar aquellas propiedades que contribuyeran a permitir la definición de un modelo de comportamiento de la roca bajo las sollicitaciones gravitacionales o aplicadas de afuera (modelo geomecánico) se ha originado de la analogía con lo que se venía actuando en laboratorio para los materiales tradicionales de las construcciones (concreto, acero, metales en general, etc.), obviamente con el aporte de todas las modificaciones ligadas al comportamiento peculiar que poseen la mayoría de las rocas con respecto a aquellos materiales más convencionales.

La figura 1 presenta la esquematización de una serie de ensayos de laboratorio que hoy en día son de rutinaria aplicación, por lo menos en los laboratorios más equipados.

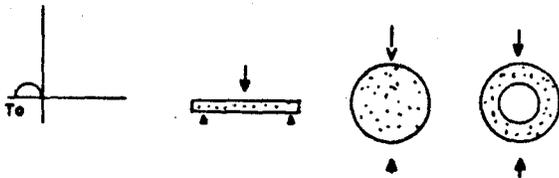
Se trata de los ensayos necesarios para la determinación de las principales características mecánicas de las rocas: las características de resistencia (compresión simple " C_0 ", tracción simple " T_0 ", cohesión " c ", fricción " ϕ ") y las características de deformabilidad (módulo de elasticidad longitudinal " E ", módulo de elasticidad transversal " ν ").

Así mismo existe un gran número de ensayos complementarios para la definición de características menos rutinarias que hacen referencia al comportamiento de las rocas bajo cargas cíclicas, cargas dinámicas,

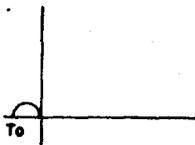
Ensayo de compresion simple



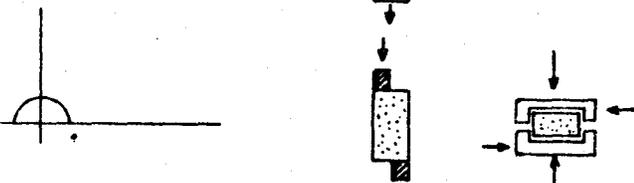
Ensayos de tracción indirecta



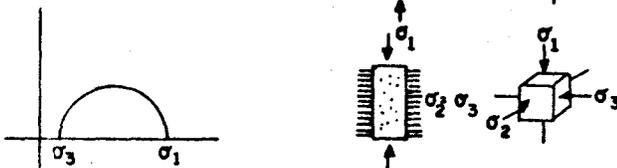
Ensayo de tracción directa



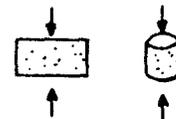
Ensayo de corte



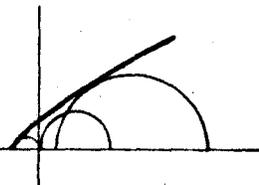
Ensayos poliaxiales



Ensayo de punzonado (ensayo Franklin)



Curva intrinseca



PRINCIPALES ENSAYOS MECANICOS DE LABORATORIO EN ROCAS

FIG.-1-

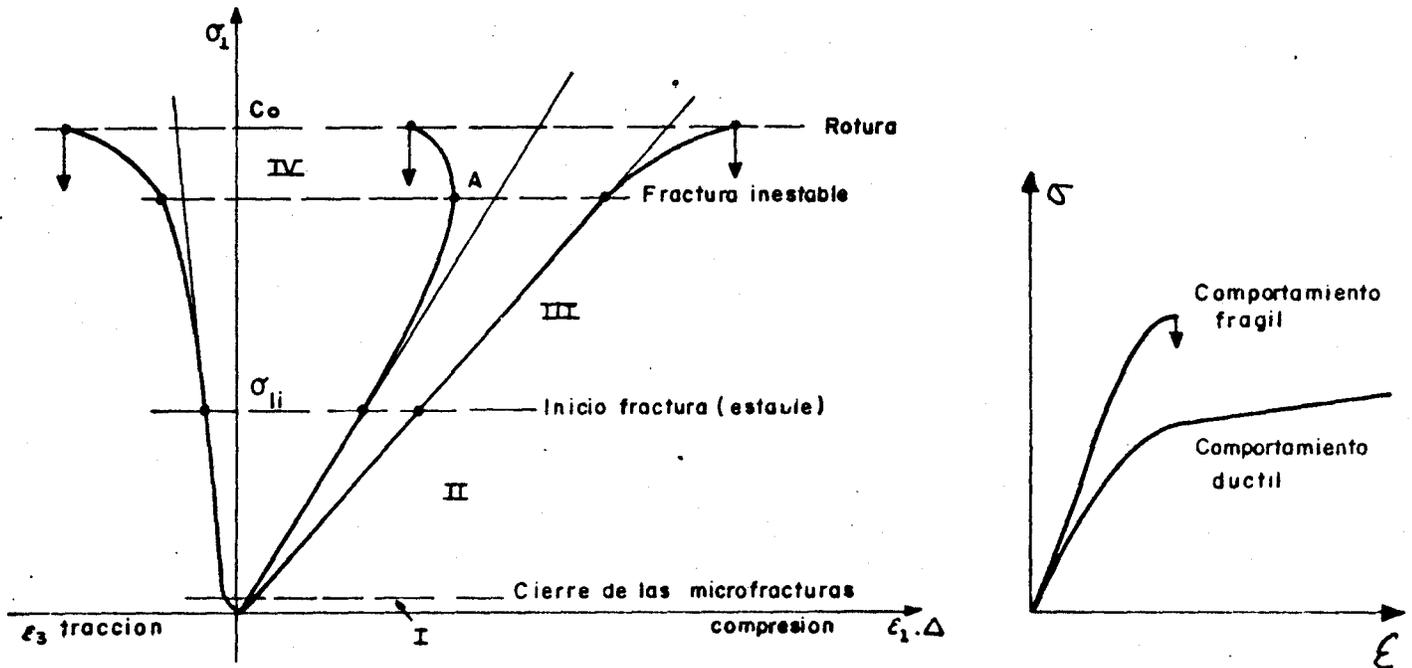
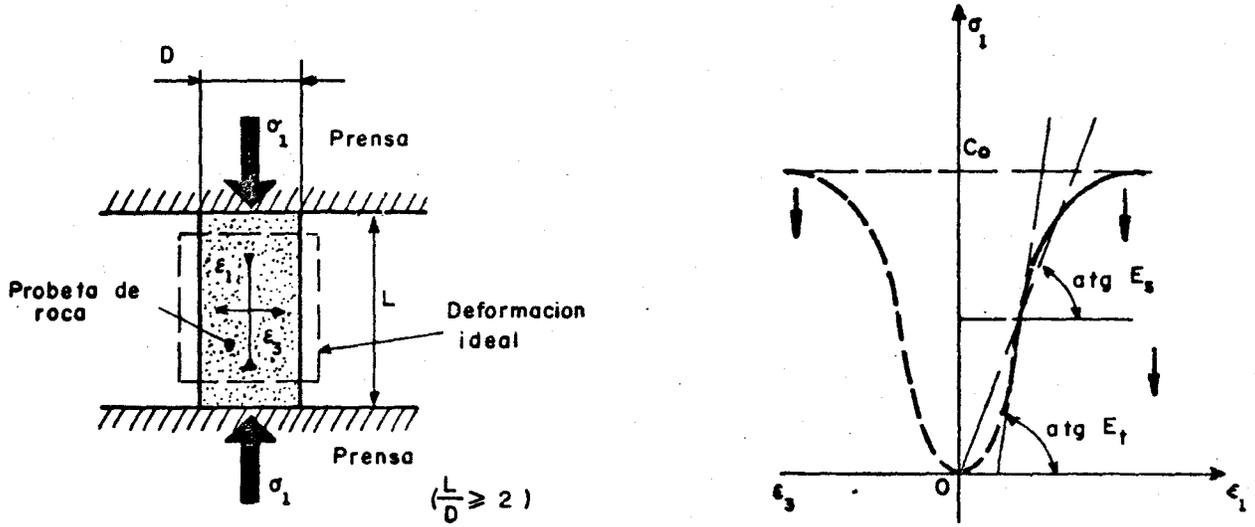
cargas en el tiempo, en presencia de agua, etc. Por otro lado las rocas presentan comportamiento francamente anisótropo lo que determina, la variación de las mencionadas propiedades según la dirección de aplicación de las cargas y por lo tanto, la necesidad de multiplicar el número de ensayos y las modalidades de realización de los mismos para la definición completa del comportamiento mecánico de la roca en función de todas las variables involucradas.

En la imposibilidad de ilustrar y comentar detenidamente cada uno de los ensayos mencionados, se analizará un poco más detalladamente el ensayo de compresión simple por tratarse de un ensayo fundamental, de realización verdaderamente rutinaria debido a su relativa sencillez de ejecución y al número considerable de informaciones que proporciona sobre el comportamiento mecánico de la roca ensayada.

Para comentar los aspectos más sobresalientes del ensayo y sin hacer referencia a todos los detalles prácticos de preparación de la muestra y modalidades de ejecución de la prueba, en la figura 2 se presenta una relación gráfica típica entre esfuerzo y deformaciones obtenida de un ensayo de compresión monoaxial sobre roca.

Los resultados inmediatos que se obtienen son:

- Valor de la resistencia a la compresión simple " C_0 ", que representa el valor de la presión (carga sobre área transversal de la muestra) aplicada al momento del colapso (rotura) de la probeta.
- Valor del módulo de elasticidad longitudinal " E " o de young, que representa la relación entre un incremento de presión normal $\Delta \sigma$ y el correspondiente incremento de la formación longitudinal $\Delta \epsilon$. En el caso más general esta relación no es constante a lo largo de toda la prueba sino que varía al variar del nivel de carga, dando lugar a un comportamiento no lineal de la roca. En tal caso se acostumbra definir dos módulos un primero Tangente " E_t ", que representa la mencionada relación en la parte central y lineal de la curva; un segundo secante " E_s ", que representa la relación entre el 50% de la presión de resistencia a la compresión simple " C_0 " y la deformación longitudinal correspondiente.
- Valor del módulo de elasticidad transversal " ν " o de Poisson, que representa la relación entre la deformación transversal y la deformación longitudinal para un dado nivel de carga. También en este caso tiene validez la observación anteriormente reportada con referencia al comportamiento no lineal y así mismo se definen un módulo tangente " ν_t " y no secante " ν_s ".
- Otras informaciones muy importantes se obtienen además del análisis



ENSAYO DE COMPRESION MONOAXIAL

FIG.-2-

mismo del tipo y forma de la relación esfuerzo-deformaciones: en la figura se representan las curvas del esfuerzo monoaxial (σ_1) en relación con la deformación axial (ϵ_1), la lateral (ϵ_3) y la volumétrica ($\Delta = \epsilon_1 + 2\epsilon_3$) para una típica roca a comportamiento frágil (otro comportamiento característico es el dúctil también reportado en la figura).

Pueden distinguirse cuatro regiones de comportamiento diferente:

- Una región I, con comportamiento no lineal en que ocurre un cierre de las microfisuras y de los poros inicialmente presentes en la roca;
- Una región II, con comportamiento lineal en que puede considerarse tenga validez el modelo elástico lineal;
- Una región III, en donde la σ_1 es suficiente para crear nuevas microfisuras (fractura estable) dando lugar a la abertura de vacíos intergranulares y microfisuras en los cristales constituyentes de la roca;
- Una región IV, cuyo comienzo está definido por el punto A sobre la curva esfuerzo axial - deformación volumétrica (punto con tangente vertical) después del cual ocurre una disminución de Δ (o sea un aumento de volumen respecto a la correspondiente deformación elástica) debido a fracturaciones internas a la roca, fenómeno éste que puede asumirse como señal del comienzo de una fractura inestable.

La curva presentada es como dicho, la de una roca tipo y aunque desde un punto de vista cualitativo los fenómenos individualizados en ella están siempre presentes, habrá rocas para las cuales, desde un punto de vista cuantitativo, alguna de las cuatro fases descritas tendrá importancia predominante, y otra, presentará en cambio una extensión despreciable; las rocas a comportamiento dúctil, por ejemplo se caracterizan por presentar grandes deformaciones a rotura (una fase IV muy amplia).

Otro grupo de propiedades mecánicas de las rocas (a veces denominadas como propiedades tecnológicas) deriva de los estudios de los fenómenos mecánicos ligados a las perforaciones en rocas, arranque y excavaciones mecánicas y con explosivos. Se trata principalmente de estudios que tienen como objetivo de evidenciar las propiedades destinadas a afectar la disgregación mecánica de las rocas bajo los más diferentes tipos de sollicitaciones externas. En la figura 3 se esquematizan los ensayos más típicos usados para la determinación de estas propiedades.

También en este caso no es posible comentar extendidamente los ensayos

DUREZA

- Ensayo de impacto
 Siebeck



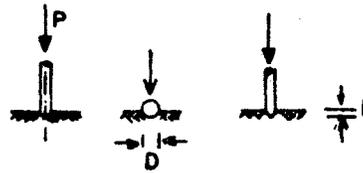
Cristales

Mohs



- Ensayos de punzonado

Metales
 Brinell $\frac{P}{KD}$
 Vickers $\frac{P}{h}$
 Rockwell
 (Wickers)
 Knoop
 Epstein
 Schreiner



N.B.C. Cone Indenter

Punzonado confinado



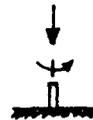
- Ensayos de rebote

Shore
 Schmidt



- Ensayos de perforabilidad

Protodyakonov
 Sievers
 Cerchar
 Tolosa



ABRASIVIDAD

- Ensayos de desgaste
 "Tolosa"
 Cerchar



- Ensayos de molienda

Deval
 Los Angeles



TENACIDAD

- Ensayos de fracturación

Protodyakonov
 L.C.P.C.



PRINCIPALES ENSAYOS TECNOLOGICOS DE LABORATORIO EN ROCAS

en mención. Cabe señalar que diversos estudios han mostrado que la dureza de las rocas medidas por el ensayo de indentación de Rockwell, el esclerómetro Shore o el aparato de impacto de Schmidt (energía del martillo en $L = 0,74 \text{ m.kg}$) está relacionada con la resistencia a compresión simple y el módulo de elasticidad (módulo tangente para el 50% de la resistencia a compresión) para un gran número de rocas. La resistencia a compresión simple y el módulo de elasticidad se relacionan mejor con el producto de la dureza (valor Shore o Schmidt) por la densidad seca de la roca; la figura 4 muestra una correlación de este tipo. Se puede utilizar esta combinación de dureza y densidad seca para prever la resistencia a compresión simple o el módulo de elasticidad de un material, con un intervalo de confianza del 75%. Esto se ilustra en la misma figura que es un ábaco para determinar la resistencia a compresión simple a partir de la dureza Schmidt y la densidad seca.

PROPIEDADES MECANICAS DE LOS MACIZOS ROCOSOS

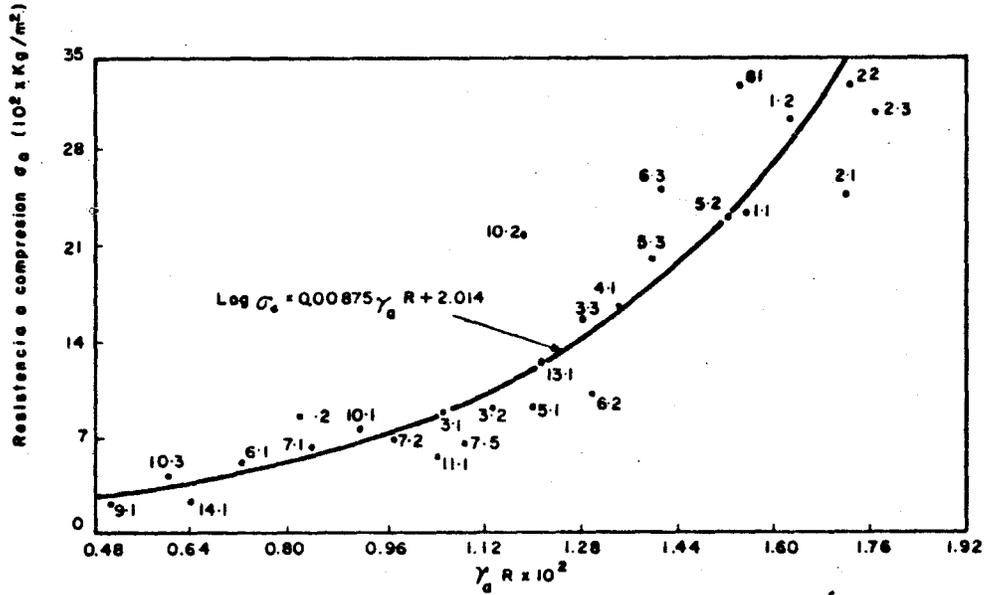
Del mismo título asignado a este escrito puede intuirse la existencia de una problemática especial relativa a la diferenciación que se ha querido enfatizar entre los términos de "rocas" y "macizos rocosos".

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 macizo rocoso.

Con estos términos se denomina a 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 zonas 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 sin un adecuado análisis de las características de la masa natural.

Las propiedades mecánicas de una muestra inalterada ensayada en laboratorio pueden ser muy diferentes de las propiedades del macizo rocoso del que se ha extraído la muestra.

El comportamiento de un macizo rocoso sometido a una variación de esfuerzos viene determinado por las propiedades mecánicas del material o de los materiales rocosos que los constituyen, pero al mismo tiempo



Relación entre los valores medios de γ_R y la resistencia a compresión simple

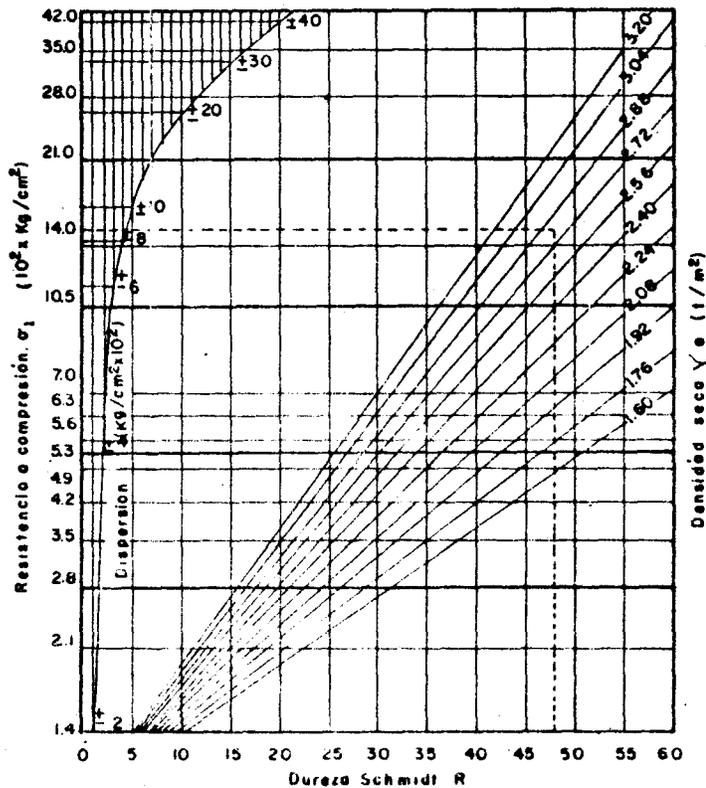


Diagrama de clasificación de las rocas basado en la dureza Schmidt R

DUREZA DE LAS ROCAS

INSTITUTO NACIONAL DE CANALIZACIONES
Caracas - Venezuela
PRIMER CURSO INTERAMERICANO DE
INGENIERIA DEL DRAGADO

- 14 -

po y a menudo en forma determinante, por el número y naturaleza de las estructuras o discontinuidades geológicas existentes en el mismo. La importancia relativa de cada uno de estos factores depende principalmente de la relación entre las dimensiones de la obra de ingeniería a realizar y la separación entre las discontinuidades, en una palabra del "factor escala".

Las singularidades estructurales más comunes son las diaclasas, los planos de estratificación y esquistosidad y las fallas. Debido a que constituyen discontinuidades planas o quasi-planas tienen un importante efecto anisótropo sobre las propiedades del macizo rocoso.

Es importante representar cuidadosamente todas estas estructuras geológicas indicando su emplazamiento, orientación (dirección y buzamiento) y separación. Deben también describirse las características físicas. Se ha advertido que, incluso en los testigos rocosos obtenidos por perforación con diamante, puede observarse la abertura e irregularidad de las superficies de discontinuidad así como el tipo de material de relleno entre o a lo largo de superficies adyacentes, siendo conveniente registrar estos datos. Los términos abierto o cerrado pueden aplicarse para describir el grado de abertura; plano, curvo o irregular para señalar la homogeneidad del perfil; y pulida, lisa o rugosa para indicar la textura superficial. También deberían obtenerse valores numéricos siempre que fuera posible medirlos.

Los reconocimientos de campo pueden dar resultados muy útiles respecto a las características citadas. Sin embargo, debe tenerse cuidado en no sacar conclusiones erróneas de las medidas, por las razones siguientes: en primer lugar, los afloramientos pueden no ser lo suficientemente numerosos para proporcionar una muestra representativa estadísticamente; en segundo lugar, las discontinuidades principales, como fallas o zonas de fallas múltiples, pueden no ser visibles por efecto de la erosión o una meteorización profunda que las haya enmascarado; en tercer lugar, los afloramientos pueden no tener una exposición tridimensional suficiente para permitir determinar el número real y la separación de todas las discontinuidades y, por último, las discontinuidades profundas pueden diferir considerablemente de las que aparecen superficialmente. Por estas razones, suele ser conveniente realizar los levantamientos no sólo en la superficie sino en pozos de reconocimiento, galerías y sondeos.

Los datos obtenidos por observación directa de las discontinuidades geológicas pueden representarse de dos formas básicamente diferentes: como un plano de situación real, con las distintas singularidades estructurales identificadas en lo referente a su tipo, características físicas, orientación y emplazamiento, y como diagramas estadísticos señalando las frecuencias relativas de las discontinuidades de dife-

rentes orientaciones encontradas en el lugar.
Ambos sistemas tienen sus ventajas y también sus limitaciones.

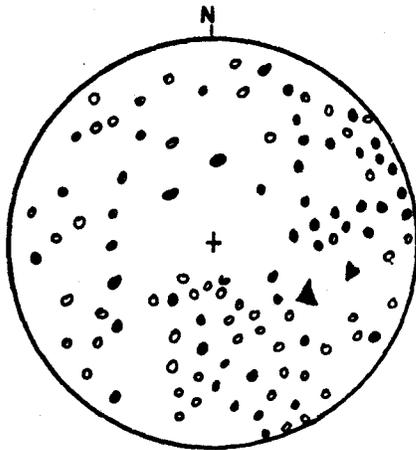
El primer tipo de representación es preferible para un empleo general. Permite dibujar secciones transversales de cualquier zona especialmente crítica de una obra, como un estribo, un desmonte escarpado o las paredes de una gran excavación subterránea, permitiendo ver inmediatamente cualquier discontinuidad orientada peligrosamente. La ausencia de una estructura geológica de orientación crítica en tales secciones no significa necesariamente que no pueda existir; únicamente quiere decir que no fue advertida en el programa de reconocimiento. Deben examinarse los datos de las zonas circundantes para ver si, estadísticamente, puede tener alguna probabilidad de presentarse una discontinuidad crítica.

La situación real de las singularidades puede representarse en un plano: para los pozos y galerías de reconocimiento se recomiendan las secciones desarrolladas. La orientación se suele representar mediante un símbolo apropiado de dirección y buzamiento. El diagrama cuadrado de Muller constituye también una forma gráfica excelente para representar los datos.

Los diagramas estadísticos pueden ser de diversos tipos. Los dos más comunes son la roseta de diaclasas y la proyección estereográfica (Figura 5).

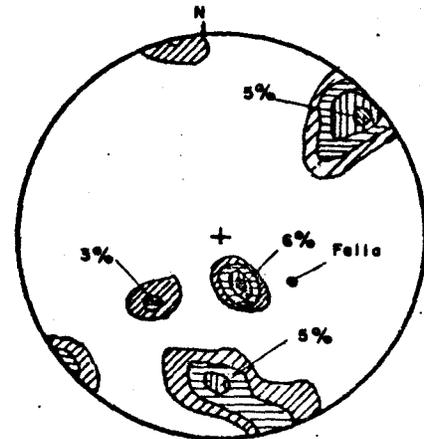
La ventaja del diagrama estadístico es que permite reunir un gran número de observaciones dispersas en torno a un origen único, componiendo una figura de la que se pueden sacar conclusiones. El diagrama estadístico es útil para obtener una indicación sobre las condiciones "medias". En algunos casos puede servir para definir las direcciones de excavación, etc., haciendo mínimos los problemas de estabilidad. Debe señalar una vez más, sin embargo, que el factor más importante en un determinado emplazamiento suele no ser el estado "medio", sino la presencia de una estructura geológica de orientación crítica como una zona milonitizada, una falla o una diaclasa principal.

Pasando ahora directamente al problema de las propiedades mecánicas de los macizos rocosos, se trata nuevamente de los dos grupos de las principales características mecánicas que se han definido para las rocas como material: características de resistencia y características de deformabilidad. Cabe quizá señalar que en este caso, el del macizo rocoso, hay por lo menos una característica más de notable importancia que es la de la permeabilidad. En efecto la permeabilidad de la roca como material, ligada esencialmente a la porosidad de ésta, reviste en la práctica una importancia muy a menudo secundaria, especialmente en el contexto de las estructuras a escala real que siem-



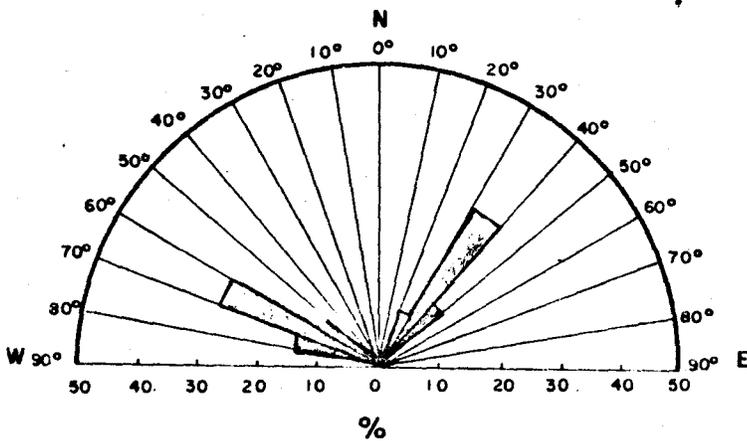
- DIACLASAS
- FOLIACIONES
- ▲ FALLAS

DIAGRAMA DE CONCENTRACION DE POLOS

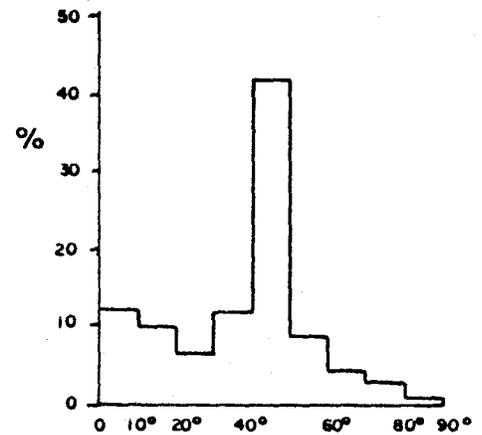


- ▨ 2% - 7 polos
- ▩ 3% - 10 polos
- ▧ 4% - 14 polos
- ▦ 5% - 17 polos
- ▤ 6% - 22 polos

DIAGRAMA DE CONTORNOS DE POLOS



ROSETA DE RUMBOS



HISTOGRAMA DE BUZAMIENTOS

REPRESENTACION DE DATOS

GEOESTRUCTURALES

pre interesan los macizos rocosos que están fracturados y cuyo comportamiento hidráulico resulta en consecuencia directamente ligado a la circulabilidad de los líquidos en estas fracturas y, solamente en parte mínima y casi siempre despreciable, a la porosidad de los materiales.

Ahora bien, aunque la manera más directa y eficaz de determinar las características mecánicas de resistencia y deformabilidad de un macizo rocoso, es mediante la realización de ensayos mecánicos in situ, hay que subrayar las notables dificultades técnicas y económicas que siempre están ligadas a estos tipos de ensayos cuyas dimensiones deberían ser las más grandes posibles para así dar lugar a resultados verdaderamente representativos del comportamiento de conjunto de un macizo rocoso.

Es por esta razón que estos ensayos in situ aún no pueden considerarse que tengan un carácter rutinario, y es en consecuencia de esto que se ha intentado definir unos parámetros índices del comportamiento mecánico de un macizo que no necesiten, para su determinación, la realización de costosos y complejos ensayos in situ.

Se está hablando de aquellos parámetros comúnmente definidos como "índices de calidad del macizo rocoso", algunos de los cuales, hoy en día han logrado una aceptación general y consecuente difusión por estar caracterizados por las siguientes propiedades: sencillez y rapidez de ejecución, repetibilidad, posibilidad de buena correlación con las más importantes características mecánicas y facilidad en permitir la definición del macizo rocoso en el marco de las más comunes clasificaciones en uso (ver párrafo siguiente).

A manera de ejemplos se definen y comentan dos entre los principales índices de calidad en uso: el "R.Q.D." (Rock Quality Designation), y el índice de las velocidades "Iv".

El índice de calidad (RQD) se basa en la recuperación modificada de testigo, que a su vez depende indirectamente del número de fracturas y del grado de debilitamiento o alteración del macizo rocoso, según se puede observar por los testigos extraídos de un sondeo. En lugar de contar las fracturas, se obtiene una medida indirecta sumando la longitud total de testigo pero considerando únicamente aquellos trozos de testigo de longitud igual o superior a 10 cm., en estado sano y compacto (figura 6). Se ha visto que el RQD es un índice más sensible y consistente de la calidad general de una roca que el porcentaje de recuperación total.

Si el testigo se ha roto por el manejo o por el proceso de perforación (por ejemplo, cuando se aprecian superficies de fractura recién

tes y regulares en lugar de diaclasas naturales), se juntan los trozos partidos y se cuentan como una pieza única, siempre que alcancen la longitud requerida de 10 cm.

Es necesario un cierto criterio en el caso de las rocas sedimentarias o rocas metamórficas estratificadas, no siendo tan exacto el método en estos casos como en las rocas ígneas, calizas en estratificación gruesa, areniscas, etc. Sin embargo, el método se ha aplicado con éxito incluso en pizarras, aunque era necesario medir los testigos inmediatamente después de extraerlos del sondeo y antes de que comenzara el desmenuzamiento y disgregación al aire.

Evidentemente este método es muy rígido para la roca cuando la recuperación es escasa, si bien una escasa recuperación suele indicar una pobre calidad de la roca. Pero esto no siempre es cierto, sin embargo, ya que un equipo de perforación o una técnica deficientes pueden también dar lugar a recuperación escasa. Por esta razón, se requiere una batería de sondeo de doble tubo de diámetro mínimo NX (54 mm.), siendo fundamental una adecuada vigilancia de la perforación.

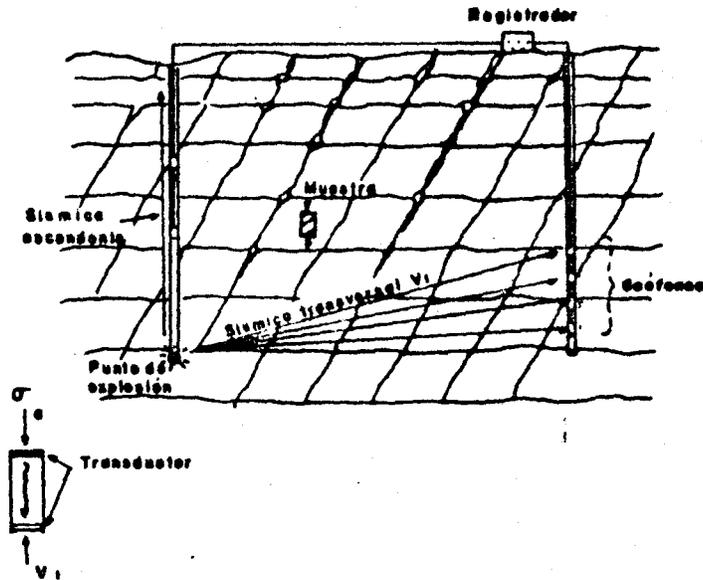
Por simple que parezca el procedimiento, se ha encontrado que existe una correlación bastante buena entre los valores numéricos del RQD y la calidad general de la roca a efectos prácticos de ingeniería.

El efecto de las discontinuidades del macizo rocoso puede estimarse comparando la velocidad in situ de ondas de compresión con la velocidad sónica determinada en laboratorio para un testigo inalterado extraído de la misma roca. La diferencia entre ambas velocidades se debe a las discontinuidades estructurales que existen en el terreno. Se propuso entonces como criterio de calidad el cuadrado del cociente de velocidades o velocidad relativa $(V_F/V_L)^2$ donde V_F y V_L son las velocidades de la onda de compresión para el macizo rocoso in situ y para el testigo inalterado respectivamente. Para una roca masiva de excelente calidad, con sólo unas pocas diaclasas cerradas, la velocidad relativa debe ser próxima a la unidad. Al aumentar el grado de diaclasado y fracturación, la velocidad relativa disminuye a valores inferiores a la unidad. (Figura 7).

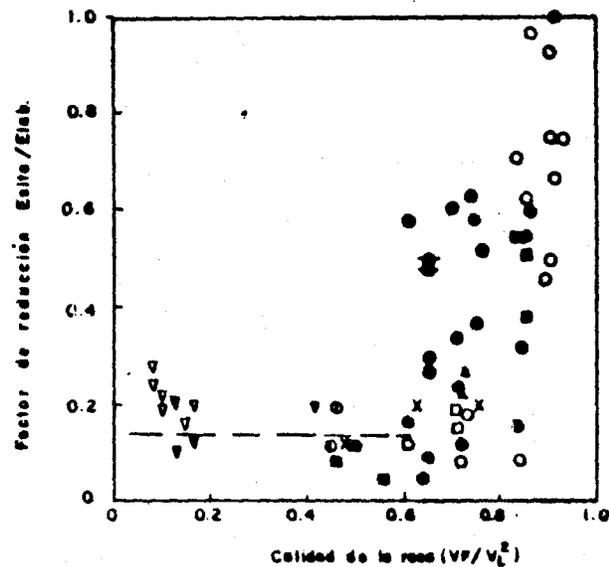
La velocidad sónica se determina en laboratorio con un testigo sometido a una tensión axial igual a la sobrecarga de peso propio calculada para la profundidad a la que se tomó la muestra, y con una humedad equivalente a la supuesta para la roca in situ (es decir seca o saturada). Preferentemente la velocidad sísmica en el terreno debe determinarse por la velocidad ascendente en un sondeo o la transversal entre sondeos o galerías de reconocimiento próximas, ya que con

INSTITUTO NACIONAL DE CANALIZACIONES
 Caracas - Venezuela
 PRIMER CURSO INTERAMERICANO DE
 INGENIERIA DEL DRAGADO

- 20 -



La velocidad relativa (V_F / V_L) como índice de la calidad de una roca



Variación del factor de reducción con la calidad de la roca

INDICES DE CALIDAD DE LOS MACIZOS ROCOSOS

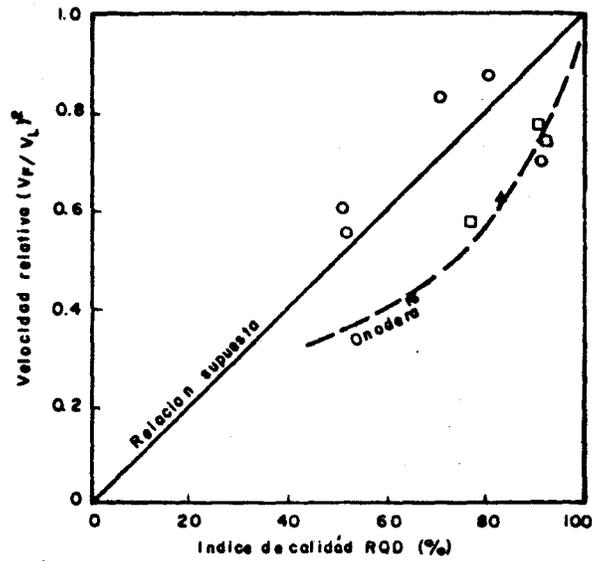
estas medidas se pueden reconocer zonas particulares homogéneas con más precisión que con la sísmica de refracción superficial.

Existe también una correlación entre el cuadrado de la velocidad relativa $(V_F/V_L)^2$ y el RQD. De los limitados datos recogidos se deduce que el cuadrado de la velocidad relativa puede utilizarse de forma equivalente al RQD en estudios de ingeniería. Sin embargo, se requiere un mayor número de datos para ampliar el conocimiento de la relación existente entre ambos índices de calidad. Y finalmente, quizá lo más importante es la existencia de buenas correlaciones entre los índices de calidad definidos y algunas entre las principales características de resistencia del macizo rocoso. (Figura 8).

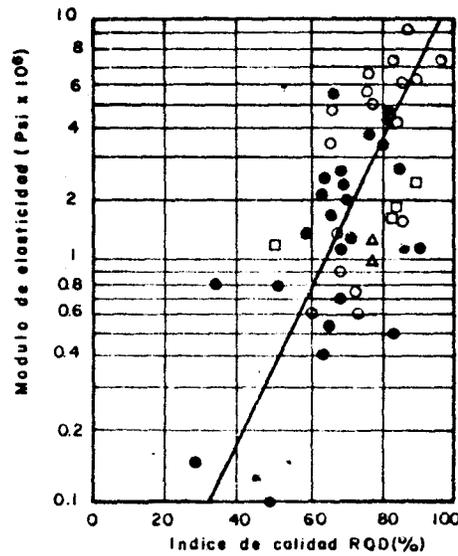
La determinación directa de las características mecánicas de los macizos rocosos mediante la realización de ensayos in situ es, a pesar de lo comentado con respecto a la utilización de los índices de calidad, el procedimiento recomendable y necesario en las etapas de proyecto y para obras de cierta envergadura para las cuales es fundamental el conocimiento preciso del comportamiento mecánico del macizo rocoso. Así como se anticipó, se trata fundamentalmente de tres grupos de ensayos para la determinación de las tres principales propiedades mecánicas: de deformabilidad, de resistencia y de permeabilidad.

Las variaciones de las condiciones naturales impuestas en un macizo rocoso por las más comunes intervenciones de la ingeniería, interesan generalmente un volumen de roca generalmente grande. Estas intervenciones producen en definitiva una variación del estado tensional existente y en consecuencia una deformación de la porción del macizo rocoso interesada por dicha variación. La frecuencia y naturaleza de las discontinuidades geológicas dentro de la zona afectada, constituyen factores importantes que determinan en gran parte las propiedades de deformabilidad del macizo rocoso. El único método que puede emplearse para conseguir una estimación razonable de efecto de estas discontinuidades, así como los valores numéricos de los módulos de deformación, es un ensayo de carga a gran escala. La zona cargada debe ser suficientemente grande para abarcar un volumen de roca que contenga discontinuidades suficientes para ser representativo del macizo rocoso.

Existen dos métodos básicos para determinar la deformabilidad de los macizos rocosos: los denominados métodos estáticos y los dinámicos. En los primeros se aplican cargas estáticas relativamente grandes sobre superficies seleccionadas del macizo rocoso y se miden las deformaciones resultantes. En los ensayos dinámicos se mide la velocidad de propagación de perturbaciones vibratorias inducidas artificialmen



Correlación entre la velocidad relativa y el indice de calidad RQD



Correlación entre RQD y modulo de elasticidad insitu

INDICES DE CALIDAD DE LOS MACIZOS ROCOSOS

INSTITUTO NACIONAL DE CÁNALIZACIONES

Caracas - Venezuela

PRIMER CURSO INTERAMERICANO DE
INGENIERIA DEL DRAGADO

- 23 -

te en el macizo rocoso. Los resultados de todos estos ensayos muestran que el módulo de deformabilidad del macizo rocoso es siempre inferior al módulo determinado a partir de testigos de rocas. El módulo de los testigos inalterados, sin embargo, proporciona un límite superior del módulo del macizo en el caso en que las discontinuidades estén muy separadas y muy cerradas.

Al aumentar el grado de fracturación de la roca, el módulo de deformación del macizo se reduce a una pequeña fracción del módulo determinado a partir de muestras en laboratorio. (Ver la figura 7).

En la figura 9 se presenta la esquematización de algunos entre los más usados métodos de ensayos estáticos in situ para la determinación de las características de deformabilidad de los macizos rocosos. En esta ocasión, en cambio de describir detalladamente algunos de estos ensayos, es quizá más interesante comentar el procedimiento usado en la interpretación de los resultados de estos ensayos. Aunque, ciertamente, la roca no es ni homogénea ni elástica, se acostumbra interpretar los resultados de los ensayos a partir de la teoría de la elasticidad de la cual se derivan las relaciones matemáticas teóricas entre las variables involucradas: geometría, cargas, parámetros elásticos, deformaciones. Prácticamente en una relación de este tipo las incógnitas del problema las constituyen los parámetros de deformación, esencialmente el módulo de elasticidad "E" y el de Poisson " ν "; la geometría es conocida y se miden con instrumentos apropiados las deformaciones producidas por determinados valores de las cargas aplicadas. La justificación de este procedimiento radica en el hecho de que, con cargas moderadas, las relaciones tensiones-deformaciones son aproximadamente lineales, resultando de importancia secundaria las características de fluencia. Sin embargo hoy en día, gracias al difundirse de los modernos métodos de cálculo numéricos, y especialmente del Método de Elementos Finitos, es posible proceder a la interpretación de los resultados de los ensayos mediante relaciones más realísticas entre las variables involucradas, y en particular asumiendo modelos más realísticos para la descripción del comportamiento esfuerzos - deformaciones de las rocas.

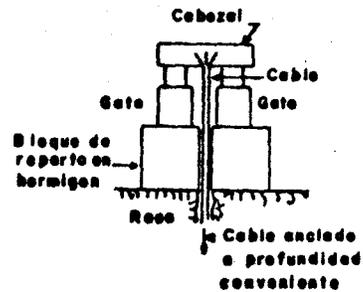
Para lo que en cambio se refiere a los métodos dinámicos, la interpretación se basa sobre la correlación existente entre módulos elásticos y velocidad de propagación de ondas de sonido para un medio de densidad conocida. Cuando se aplica un impulso dinámico a la superficie de un sólido semi-indefinido, la energía se irradia desde la fuente emisora en forma de dos tipos diferentes de impulsos vibratorios elásticos (se propagan también otras perturbaciones, pero éstas no interesan aquí). El más rápido de estos impulsos sólo origina desplazamientos de las partículas del material en la dirección de avance de la perturbación y se denomina onda longitudinal o

INSTITUTO NACIONAL DE CANALIZACIONES
Caracas - Venezuela
PRIMER CURSO INTERAMERICANO DE
INGENIERIA DEL DRAGADO

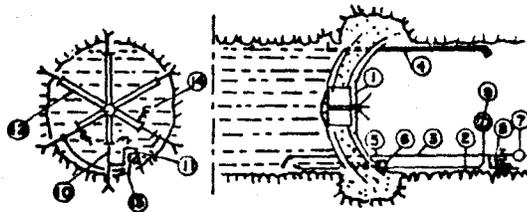
- 24 -



Ensayo de carga en un túnel



Ensayo con cable de anclaje



- | | |
|----------------------|---|
| 1- Agujero de hombre | 8 Salida de agua |
| 2 Tubo del manómetro | 9 Manometro |
| 3 Entrada de agua | 10 Medidor de cuerda vibrante |
| 4 Salida de aire | 11 Camara equilibradora de la presión de aire |
| 5 Tuberia de cable | 12 Varillas de invar |
| 6 Registro estanco | 13 Tubo equilibrador de presiones |
| 7 Medidor de caudal | 14 Cable |

Ensayo de presión hidráulica en galería

ENSAYOS DE DEFORMABILIDAD EN SITIO

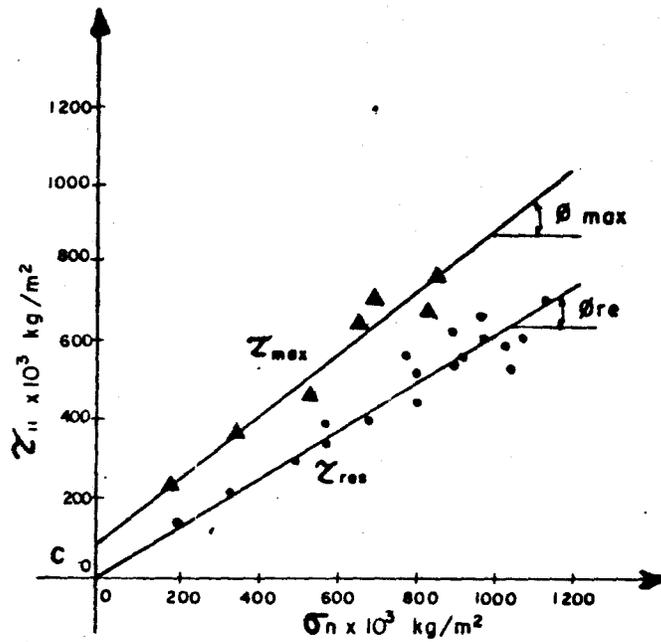
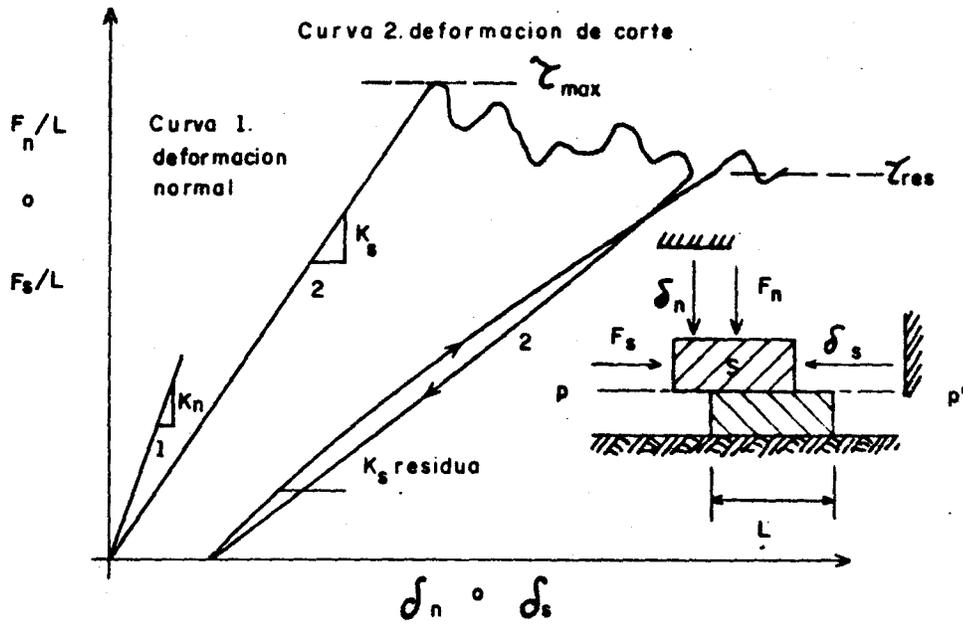
de compresión. La segunda onda es la transversal o de cillazamiento que da lugar a un desplazamiento de las partículas normal a la dirección de avance. Las velocidades de estas ondas en un medio elástico isotropo son simplemente función de "E", " v " y la densidad del medio. En la interpretación del ensayo los dos módulos de elasticidad son las incógnitas mientras que se miden las dos velocidades y la densidad del medio. (Ver la figura 7).

Generalmente no suele ser posible determinar directamente el módulo de Poisson a partir de los ensayos, aunque se precisa un valor de este módulo en las ecuaciones que sirven para interpretar los ensayos. Sin embargo se suele suponer, que el valor de " v " es menor que 0.25 reduciendo de esta forma a una sola las incógnitas y cualquier variación, dentro de estos límites que son siempre pequeños, tendrá escaso efecto sobre los cálculos. Desde un punto de vista práctico, la transmisión de la deformación lateral en un macizo rocoso, debido a las deformaciones directas producidas por las cargas, estará limitada probablemente por la presencia de fisuras en las roca, justificando así el bajo valor del módulo de Poisson adoptado.

De las características de resistencia, la única en poseer interés para su determinación mediante ensayos in situ, es la resistencia al corte a lo largo de superficies de menor resistencia (discontinuidades geológicas). En efecto, aunque en principio podría hablarse de ensayos in situ para la determinación de las resistencia a la compresión simple, o tracción simple, etc. en la práctica estas determinaciones no tienen interés, debido a que: en un caso (compresión) la rotura efectivamente debida a sollicitaciones de compresión, para un macizo rocoso, presenta valores confrontables con los de los ensayos de laboratorio correspondientes; en el otro caso (tracción) la resistencia efectiva a las sollicitaciones de tracción en un macizo rocoso es prácticamente nula, por poseer siempre el macizo diaclasas y fracturas en general, las mismas que no pueden oponer resistencia alguna a tracciones en direcciones pseudo - perpendiculares a sus planos geométricos.

Es interesante definir los parámetros de resistencia al corte y las características de deformabilidad asociadas con las discontinuidades. Un bloque de roca ("S" en la figura 10) conteniente la superficie de discontinuidades (p - p') se sujeta a una fuerza normal F, manteniéndola constante durante el transcurso de la prueba, y a una fuerza tangencial F_s , en la dirección (p - p') que se aumenta gradualmente hasta obtener el escurrimiento a lo largo de la discontinuidad.

Se miden los desplazamientos δ_n y δ_s en dirección respectivamente perpendicular y paralela al plano de discontinuidad. Las curvas que se ob



ENSAYOS DE CORTE DIRECTO PARA DISCONTINUIDADES

FIG.-10-

tienen son del tipo indicado en la figura 9 en la que se supone, por sencillez, que la discontinuidad ($p - p'$) tenga un espesor constante y largo L .

De especial interés, para la determinación de las características de resistencia al corte, son sea el valor de pico sea el residual de la curva F_s/L VS. δ_s ; estos valores generalmente se denominan con τ_{max} y τ_{res} .

Una vez que se hayan realizado un número suficiente de pruebas de corte como la descrita, sobre el mismo tipo de discontinuidad y para diferentes valores de la presión normal $\sigma_n = F_n/L$, se pueden reportar sobre un diagrama $\tau_n - \sigma_n$, para cada uno de los valores de σ_n , los valores de τ_{max} y τ_{res} . De esta forma se pueden obtener diagramas del tipo indicado en la misma figura 10 que permiten deducir importantes conclusiones sobre la descripción del comportamiento de las superficies de discontinuidad en el interior de los macizos rocosos y definiendo los valores picos y residuales de los parámetros de resistencia al corte: fricción ϕ y cohesión c .

CLASIFICACION DE ROCAS Y MACIZOS ROCOSOS

La concepción ingenierística con la que se mira a las rocas y a los macizos rocosos, afecta inmediatamente los criterios de clasificación para aquellos, no pudiéndose adoptar la clasificación geológica (genética y química) por las razones que se comentaron al principio.

En las rocas compactas y continuas, muy a menudo es suficiente para los fines aplicativos, simplemente una clasificación del material.

Entre las conocidas de estas se puede considerar como más aceptada y difundida la propuesta por Deere y Miller (1966), motivada en principio por el interés en estandarizar los ensayos mecánicos de laboratorios en rocas y basada en dos propiedades básicas del material: la resistencia a compresión simple y el módulo de elasticidad tangente. La roca se clasifica en una de las cinco categorías de resistencia indicadas en la tabla anexa, identificadas con una letra mayúscula de A a E y cuyos rangos siguen una progresión geométrica. Para lo que se refiere al módulo de elasticidad, se utiliza la relación con la resistencia a la compresión simple definida "módulo relativo".

Basándose en el módulo relativo se identifican tres categorías también identificadas con tres letras mayúsculas de H a M según los rangos indicados en la misma tabla. Finalmente las rocas se clasifican según los dos parámetros al mismo tiempo identificándose con una doble letra:

AM, BL, BH, CM, etc.

También puede emplearse una representación gráfica de esta clasificación de la cual se reporta un ejemplo en la figura 11.

Aunque la clasificación de la roca como material tenga mucho interés práctico, por lo menos en lo que se refiere a un primer acercamiento de los materiales que constituyen una formación, se hace indispensable para los fines ingenierísticos clasificar las rocas también en su conjunto de macizo puesto que, así como se lo ha explicado antes, es el comportamiento mecánico del macizo natural que controla de manera determinante la geomecánica de una estructura real.

En el transcurso de estos pocos años de existencia de la mecánica de rocas, se han propuesto muchísimas clasificaciones en este sentido, aunque en la casi totalidad de los casos, con referencia a aplicaciones específicas (esencialmente túneles). Desde el examen sumario de todas aquellas, se puede notar la progresiva transición desde definiciones completamente descriptivas y cualitativas, a evaluaciones más cuantitativas e ingenierísticas con obvias ventajas prácticas de una mayor objetividad y mejor definición de una calidad estrechamente mecánica.

Entre las más recientes proposiciones merece ser mencionada, a manera de ejemplo la clasificación geomecánica de Bieniaswki. Se define un nuevo índice de calidad: " Rock Mass Roting " (R M R) para la cuantificación numérica de la calidad mecánica del macizo rocoso y se establecen una serie de 5 características físico - mecánicas para el macizo rocoso representativas de su comportamiento geomecánico, con referencia específica a los problemas de excavación y sostenimiento de túneles, pero también (y esta es otra novedosa ventaja de esta clasificación) a otros tipos de aplicaciones geotécnicas (taludes, fundaciones, etc.).

Para cada uno de estos cinco parámetros distribuidos en cinco rangos posibles, se asigna una puntuación numérica al macizo rocoso y el R. M.R. es la suma de estas puntuaciones cuyo valor (variable entre 0 y 100) define la clase del macizo entre cinco rangos posibles (tabla anexa). Es interesante notar que mediante este procedimiento se asigna diferente peso a los diferentes parámetros considerados debido a que los valores numéricos varían en cada caso para los mismos cinco rangos previstos.

Adicionalmente se toma en cuenta un sexto parámetro que es tratado como factor correctivo por la orientación de las discontinuidades, haciendo ya directa referencia al específico problema tratado.

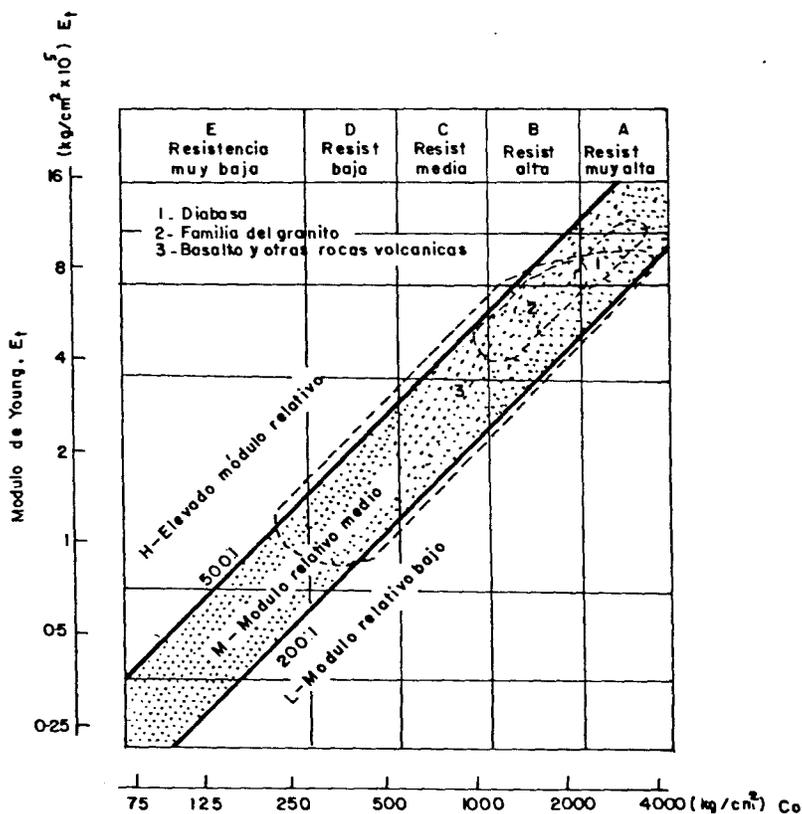
INSTITUTO NACIONAL DE CANALIZACIONES
Caracas - Venezuela
PRIMER CURSO INTERAMERICANO DE
INGENIERIA DEL DRAGADO

I. Basada en la resistencia a compresión simple (C_o).

Clase	Descripción	Resistencia a compresión simple (kg/cm^2)
A	Resistencia muy alta	> 2.250
B	Resistencia alta	1.120-2.250
C	Resistencia media	560-1.120
D	Resistencia baja	280-560
E	Resistencia muy baja	< 280

II. Basada en el módulo relativo (E_t/C_o)

Clase	Descripción	Módulo relativo
H	Elevado módulo relativo	> 500
M	Módulo relativo medio	200-500
L	Módulo relativo bajo	< 200



CLASIFICACION DE LA ROCA INTACTA

INSTITUTO NACIONAL DE CANALIZACIONES
Caracas - Venezuela
PRIMER CURSO INTERAMERICANO DE
INGENIERIA DEL DRAGADO

- 30 -

Clasificación geomecánica de Bieniawski (1979)

A. PARAMETROS DE CLASIFICACION

1	Resistencia de la roca sana	Ensayo de 1 punto	> 100 kp/cm ²	40-80 kp/cm ²	20-40 kp/cm ²	10-20 kp/cm ²	Compresión simple (kp/cm ²)		
		C. simple	> 2.500 kp/cm ²	1.000-2.500 kp/cm ²	500-1.000 kp/cm ²	250-500 kp/cm ²	50-250	10-50	< 10
		Valoración	15	12	7	4	2	1	0
2		RQD	90%-100%	75%-90%	50%-75%	25%-50%	< 25%		
		Valoración	20	17	13	8	3		
3		Separación entre diaclasas	> 2 m	0,6-2 m	0,2-0,6 m	0,06-0,2 m	< 0,06 m		
		Valoración	20	15	10	8	5		
4		Estado de las diaclasas	Muy rugosas Discontinuas Sin separaciones Bordes sanos y duros	Ligeramente rugosas Abertura < 1 mm Bordes duros	Ligeramente rugosas Abertura < 1 mm Bordes blandos	Espejos de falla o con relleno < 5 mm o abiertas 1-5 mm Diacl. continuas	Relleno blando > 5 mm ó abertura > 5 mm Diacl. continuas		
		Valoración	30	25	20	10	0		
5	Agua freática	Caudal por 10 m de túnel	Nulo	< 10 litros/min	10-25 litros/min	25-125 litros/min	> 125 litros/min		
		Relación Presión de agua Tensión principal mayor	0	0,0-0,1	0,1-0,2	0,2-0,5	> 0,5		
	Estado general	Seco	Lig. húmedo	Húmedo	Goteando	Fluyendo			
		Valoración	15	10	7	4	0		

B. CORRECCION POR LA ORIENTACION DE LAS DIACLASAS

Dirección y buzamiento		Muy favorables	Favorables	Medias	Desfavorables	Muy desfavorables
Valoración para	Túneles	0	-2	-5	-10	-12
	Cimentaciones	0	-2	-7	-15	-25
	Taludes	0	-5	-25	-50	-60

C. CLASIFICACION

Clase	I	II	III	IV	V
Calidad	Muy buena	Buena	Aceptable	Mediocre	Muy mala
Valoración	100-81	80-61	60-41	40-21	< 20

TEXTOS GENERALES DE MECANICA DE ROCAS

- Mecánica de Rocas en la ingeniería práctica
Stagg - Zienkiewicz - Editorial Blume (1967).

- Fundamentos de Mecánica de Rocas
Cootes - Litoprint (1973).

- Rock Mechanics and the design of structures in rocks
Obert - Duvall - John Wiley (1967).

- Methods of Geological Engineering in discontinuous rocks
Goodman - Wets Publishing (1976).

- Fundamentals of Rock Mechanics
Jeeger - Cook - Chapman and Hall (1969).

- Meccanica delle Rocce
Giovanni Barla - CLUT (1974).

- La mecanique des roches
Talobre - Dunod (1967).

- Rock Mechanics
Goodman - Wets Publishings (1980).