

**PROPIEDADES ELASTICAS DE LAS
ROCAS**
(TRADUCCION)

Ing. Carlos A. CANOBA
Lic. Héctor R. FRAGA

Año 2004

Departamento de Ciencias Geológicas – Escuela de Agrimensura
Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura
Universidad Nacional de Rosario

Traducción del Capítulo 3 de la obra “Engineering
Properties of Rocks”, de I. W. Farmer.
E & F.N. SPON Ltd.
Londres – 1968

Agradecimiento:

Al Ing. Marcelo Polare por las sugerencias aportadas para la elaboración y diagramación de la presente traducción.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCION	4
ELASTICIDAD DE LAS ROCAS.....	5
CONSTANTES ELASTICAS PARA LAS ROCAS	7
TEORIA ELASTICA APLICADA A PROYECTOS DE DISEÑOS DE OBRAS DE INGENIERIA EN ROCAS.....	10
BIBLIOGRAFIA	12

INTRODUCCION

En oportunidad del dictado de la cátedra “Geología para Ingenieros” y actualmente en la asignatura “Geología y Geotecnia” de la carrera de Ingeniería Civil, los docentes han experimentado la dificultad intrínseca de transmitir a los alumnos el cómo lograr caracterizar los elementos de la Naturaleza en relación a los modelos que le interesan a la Ingeniería, los cuales necesitan la utilización eficaz de las rocas en sus proyectos de obras civiles.

Así surgió la idea de ofrecer a los alumnos, un panorama de cómo las constantes elásticas (modelos ingenieriles) se relacionan con los minerales y las rocas y sus correspondientes deformaciones. Es decir, cómo llegar a entender el comportamiento de las rocas y consecuentemente clasificarlas por sus aptitudes ingenieriles, en función de las características e índices numéricos que el ingeniero necesita para sus cálculos, en el entendimiento de las limitaciones que surgen de la aplicación de estos modelos físico-matemáticos a los macizos rocosos tal cual se presentan en la Naturaleza. Se evidencia así la necesidad de formar a los profesionales de la ingeniería, para la adopción de los criterios que cada situación particular plantea.

Esta traducción de uno de los capítulos del libro “Engineering Properties of Rocks”, de I. W. Farmer, pareció muy útil para llenar el vacío que corresponde al manejo de los conceptos que se quieren profundizar, atento a que hay pocos textos en la lengua castellana que aborden este problema de manera clara, sintética y eficaz como lo planteó dicho autor.

ELASTICIDAD DE LAS ROCAS

La elasticidad es una propiedad de un material ideal y podemos vincularla con los materiales que se utilizan en ingeniería, incluyendo a las rocas en mayor o menor grado y en función de cuanto estos materiales se acercan al ideal. Prácticamente esto depende de tres factores principales: homogeneidad, isotropía y continuidad, cada uno de los cuales pueden ser definidos dentro de ciertos límites.

La isotropía es una medida de las propiedades direccionales de un material. Por ejemplo, con un criterio estadístico, un cuerpo granular será isótropo si todos sus granos tienen una orientación al azar y cuando un plano de dimensiones equivalentes lo intercepta, en cualquier dirección, corta al mismo en un número igual o equivalente de granos.

Dado que muchas rocas tienen una orientación determinada en sus clastos o cristales, estas son estrictamente hablando anisótropas y deberá esperarse que reaccionen en forma diferente a aquellos esfuerzos que provienen de distintas direcciones, dependiendo esto del grado de anisotropía.

La homogeneidad es una medida de la continuidad física de un cuerpo. De esta manera en un material homogéneo, los constituyentes están distribuidos de tal forma que un pequeño fragmento separado de cualquier parte del cuerpo deberá tener constituyentes y propiedades representativas del todo. La homogeneidad depende en gran medida de la escala y podría ser posible describir una roca masiva de grano muy fino como homogénea, mientras que una roca de grano muy grueso dentro de dimensiones limitadas debe ser considerada no homogénea.

La continuidad puede ser considerada como una referencia a la porosidad y/o a la cantidad de diaclasas y fallas en un cuerpo rocoso particular. El grado de continuidad afectará su cohesión y por lo tanto la diferente distribución de tensiones a través de todo el cuerpo.

Los extremos, al considerar la continuidad de una roca, estarán entre una masa rocosa fracturada, la cual es completamente discontinua y un cuerpo rocoso masivo de grano muy fino con un diaclasamiento muy espaciado, con lo cual es prácticamente continuo.

A partir de estas definiciones es posible arribar a una primera estimación de la probable elasticidad de una roca, recordando siempre que con la posible excepción de la obsidiana o de un metal nativo, todas las rocas son en alguna medida anisótropas, no homogéneas y discontinuas y por lo tanto no son perfectamente elásticas. De todas maneras, algunas rocas se pueden aproximar en grado variable a algunas propiedades elásticas, particularmente cuando están sometidas a bajas cargas de deformación.

Obviamente la mayoría de las rocas elásticas deben ser de grano fino, masivas y compactas, una propiedad de las rocas extrusivas (excepto cuando tienen vesículas, que son espacios vacíos visibles) y las rocas filoneas y algunas rocas metamórficas finamente granudas. Estas rocas (Fig.1a) se aproximan de muchas formas a las propiedades de un material elástico, frágil, que tiene una relación cuasi - lineal entre tensión / deformación hacia el punto de ruptura, por lo cual se las puede denominar rocas cuasi - elástica.

Rocas de menor elasticidad, son las rocas ígneas de grano grueso y sedimentos compactados de grano fino, con baja porosidad y una razonable cohesión, por lo que se las denomina rocas semi-elásticas. Estas tienen una relación tensión / deformación (Fig. 1b) en la cual la pendiente de la curva (equivalente al modulo de elasticidad bajo condiciones de cargas definidas) decrece con el incremento de la tensión. Este tipo de curva, obtenida a partir de ensayos con pequeñas muestras de laboratorio y por lo tanto

que acentúan la falta de homogeneidad y la anisotropía del material, pueden de hecho brindar un cuadro exagerado de la falta de elasticidad de este tipo de rocas, la cual a gran escala, como ser un depósito masivo o estrato puede estar sujeto al análisis elástico, con ciertas precauciones. Esto es ilustrativo de uno de los peligros de los ensayos de laboratorio incluso cuando se los asocia con la interpretación estadística, como un método de obtener datos para realizar un análisis a gran escala (grandes dimensiones).

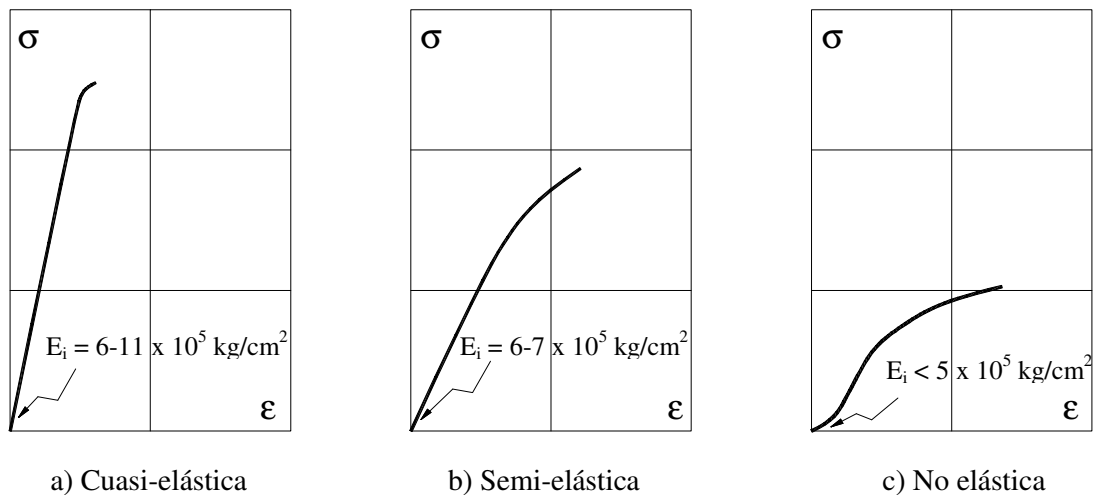


Fig. 1 – Típica relación tensión / deformación en rocas.

Un peligro similar existe en obtener datos para un tercer tipo de relación tensión/deformación por medio de métodos en laboratorio. Esta categoría incluye las rocas cohesivas, con mucha porosidad, comprendiendo a la mayoría de las rocas sedimentarias débiles (Fig. 1c). Estas son por lo tanto por evidencia propia no elásticas y cualquier análisis apoyado en criterios de elasticidad podría ser peligroso. La curva generalmente exhibe una zona inicial de incremento de la pendiente con el incremento de la carga, un rasgo que significa una compactación íntima y el cierre de grietas antes que cualquier deformación asimilable a la proporción lineal. Estas rocas tienden a exhibir características variables en la relación tensión / deformación.

Los rasgos principales de la relación tensión / deformación para una roca competente puede ser generalizada en la forma (Fig. 2) de una curva con una zona aproximadamente lineal de máxima pendiente, que da paso a una curva de pendiente decreciente con el incremento de la tensión, a medida que el punto de ruptura se alcanza.

La curva que representa a una roca en el ensayo uniaxial de compresión (positiva) en el caso de tensión es similar en su forma pero la ruptura ocurre a tensiones más bajas.

Aunque la curva puede ser tomada para representar el tipo de deformación elástica de una roca, es sin embargo dificultoso para obtener un valor satisfactorio para el módulo de elasticidad. Este puede ser obtenido por tres caminos a saber: (i) como el módulo secante (E_s) en un punto particular, dando un valor promedio de E por debajo de un límite específico de carga, (ii) el módulo tangente (E_t) en un punto particular de la curva, dando un valor aparente de E a una tensión específica o (iii) el módulo tangente inicial (E_i) la pendiente de la línea tangente pasando por el origen, dando el

valor de E bajo las condiciones de carga 0 (cero), en efecto el máximo valor de E que algunas veces se toma como aquel obtenido bajo condiciones de carga dinámica en una roca sin carga (o tensión).

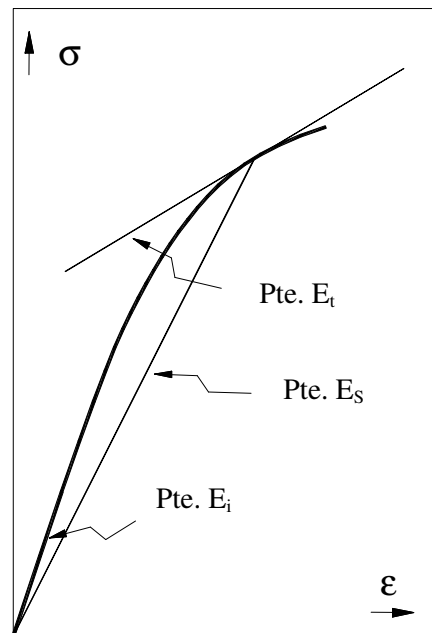


Fig. 2 – Curva general de tensión / deformación en rocas.

El valor de E obtenido en cualquier punto de la curva puede, para la roca promedio, estar estrictamente relacionado (Judd y Huber, 1961) a pesar de que sus valores pueden divergir tanto así como en un 100 %. Por esta razón el valor de E asociado para una roca es E_i , atento a que es el más preciso obtenido bajo las condiciones de ensayo en laboratorio.

El E_t para una carga en particular se da entonces, variable desde un 100 a un 50 % de ese valor, dependiendo del tipo de roca y de las condiciones en que se carga y el módulo secante hasta el punto de rotura podrá variar del 90 al 50 % del E_i , dependiendo del tipo de roca.

Así para una roca de grano fino cuasi-elástica $E_s = E_t = 0,9 E_i$ y para una roca de grano grueso ana-elástica $E_t = 0,9 E_i$ para cargas elásticas ligeras, $E_t = 0,8 E_i$ para cercanas a la rotura y $E_s = 0,5 E_i$ en el punto de rotura.

CONSTANTES ELÁSTICAS PARA LAS ROCAS

Para definir cualquier material elásticamente se requieren dos de las cinco constantes elásticas disponibles: E (módulo de elasticidad), ν (coeficiente de Poisson), K (módulo de compresibilidad), G (módulo de rigidez) y λ (constante de Lamé). En la teoría elástica las más convenientes son G y λ , pero en los problemas de ingeniería donde la medida de la relación directa de una roca a una fuerza, se requiere una medida directa, E y ν son las más comúnmente citadas. A pesar de ello en la mayoría de las rocas cuasi y semi-elásticas, todas las constantes elásticas pueden ser relacionadas con buen grado de precisión.

Una lista de los valores de E y ν se pueden observar en la Tabla 1.

Roca	E (kg/cm ²)	v
Granito	2 – 6 x 10 ⁵	0,25
Microgranito	3 – 8 x 10 ⁵	0,25
Sienita	6 – 8 x 10 ⁵	0,25
Diorita	7 – 10 x 10 ⁵	0,25
Dolerita	8 – 11 x 10 ⁵	0,25
Gabro	7 – 11 x 10 ⁵	0,25
Basalto	6 – 10 x 10 ⁵	0,25
Arenisca	0,5 – 8 x 10 ⁵	
Lutita	1 – 3,5 x 10 ⁵	
Arcilla consolidada (Argilita)	2 – 5 x 10 ⁵	
Caliza	1 – 8 x 10 ⁵	
Dolomita	4 – 8,4 x 10 ⁵	
Carbón	1 – 2 x 10 ⁵	

Tabla 1 - Constantes elásticas de rocas con carga cero.

Basado en un amplio rango de diferentes fuentes (Hosking, 1955; Blair, 1955, 1956; Nicholls, 1961; Coates y Parsons, 1966; Windes, 1949, 1950) y las propias observaciones del autor estos dan el rango de constantes para un tipo de roca particular, dependiendo el valor real fundamentalmente de la cohesión de la roca. Así, un calcáreo débil podrá tener un valor de $E = 10^5 \text{ Kg} / \text{cm}^2$ y un calcáreo de grano muy fino $10^6 \text{ Kg} / \text{cm}^2$.

Es por lo tanto posible estimar con experiencia, el módulo de elasticidad de cualquier roca por medio de ensayos físicos y empíricos simples, que nos llevaran a valores de $\pm 20 \%$ con relación a su valor real. Esto es suficientemente preciso para la mayoría de los cálculos de diseño que incluyan rocas.

Los tres tipos de rocas previamente definidos en términos de su relativa anelasticidad (cuasi, semi y no elásticas) pueden ser también delineadas en términos de su modulo elástico aparente. Así una roca cuasi-elástica tendrá un valor de $E = 6 - 11 \times 10^5 \text{ Kg.} / \text{cm}^2$, una semi-elástica entre $4 - 7 \times 10^5 \text{ Kg.} / \text{cm}^2$ y una no-elástica menor que $5 \times 10^5 \text{ Kg./cm}^2$. Estos valores mencionados en cada caso corresponden al módulo tangente inicial (E_i).

Las relaciones entre E y v y las otras constantes elásticas y físicas de las rocas fueron analizadas estadísticamente por Judd y Huber sobre la base de las observaciones de Blair y Windes, ellos concluyen que existe una relación lineal directa para todas las rocas ensayadas entre el modulo de elasticidad y el módulo de rigidez y entre E y la resistencia a la compresión de la roca.

Cualquier relación entre E / G , E / K o λ / G podría sugerir que si las rocas fuesen elásticas, entonces podría haber un valor constante de v para todas las rocas, al margen de la magnitud de E. El gráfico que relaciona E y v reproducido en la Fig. 3 muestra que mientras este ideal puede aproximarse en las rocas que posean un elevado módulo de elasticidad, los valores de v para rocas de bajo módulos las cuales representan las rocas no elásticas, muestran valores de v inferiores y variables. Esta evidencia sugiere que predecir las relaciones de las rocas en este tipo de material no debe basarse plenamente

en la teoría elástica. Esto también sugiere que las mediciones de carácter físico en los laboratorios son menos que totalmente precisas.

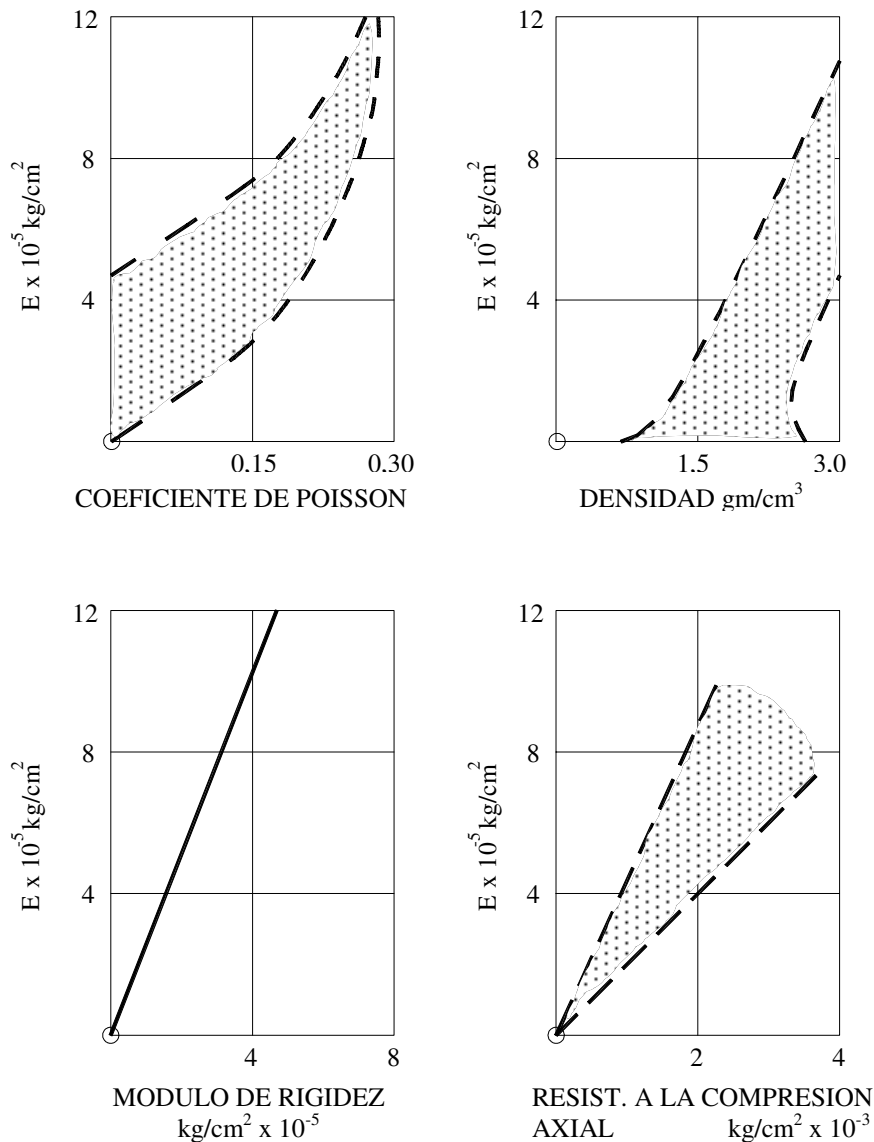


Fig. 3 – Relaciones entre el módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson, densidad, módulo de rigidez y resistencia en rocas. (según Judd y Huber)

La estable relación lineal entre G y E (Fig. 3) en esa forma aproximada de $E = 2,5 G$, sugiere que un valor constante de ν igual a 0,25 (3-5 y 3 -12) debe ser considerado seriamente, atento ello que muy bien puede ser que algunas de las discrepancias de la gráfica E / V son debidas a mediciones erráticas de ν , que en la práctica raramente son satisfactorias.

Ciertamente que en cualquier trabajo que involucra el análisis elástico de las rocas, existe suficiente evidencia para sugerir que para el valor de 0,25 para el coeficiente de Poisson, (ν) puede ser asumido aunque exista abrumadora evidencia en contra. Si esta no puede ser hecha todavía hay suficiente soporte para decir que la roca puede ser considerada ana-elástica, en cuyo caso la necesidad para tener un valor del coeficiente de Poisson cesará. El significado de la relación lineal entre la resistencia a la

compresión de una roca (S_c) y el modulo de elasticidad, tomando la forma aproximada $E = 350 S_c$ y $G = 140 S_c$ recae en la confirmación que la resistencia de la roca esta relacionada con la falta de flexibilidad (representada por E) y la falta de rigidez (representada por G) de la estructura interna de la roca.

Otras importantes tendencias sugeridas por Judd y Huber relacionan G y E en una forma casi lineal con la densidad aparente de la roca y en una forma curvilínea con la velocidad de las ondas de tensión longitudinal de las rocas. Los efectos dinámicos pueden ser considerados posteriormente, pero la relación aproximada entre E y la densidad tiene una importancia inmediata. Esta, por si sola, nos puede llevar a la conclusión que dado que la mayoría de los minerales que forman las rocas tienen similares pesos específicos, las propiedades elásticas de las rocas son afectadas en grado sumo por la estructura interna de la roca, representada especialmente por el tamaño del grano y el grado de compactación y la subsecuente presencia de poros en el interior de la roca. Se debe notar, a pesar de ello, que no existen indicadores de una relación correspondiente entre la densidad de la roca y la porosidad aparente. Esto es sorprendente y debe hacer caer algunas dudas sobre la validez de algunos ensayos sobre porosidad aparente como se aplican a las rocas que son diferentes de los suelos. Los ensayos normales de la porosidad aparente, basados en suelos de alta porosidad, saturados a la presión atmosférica, a lo largo de breves periodos de tiempo, son obviamente inapropiados para las rocas.

La densidad aparente (ρ) de un material puede por lo tanto ser usada como una base para obtener un valor aproximado de E y desde aquí para otras constantes de las rocas por las reglas de estimaciones empíricas ("a ojo"):

$$E = 0,9 (\rho - 2,1) \times 10^6 \text{ Kg /cm}^2$$

La precisión de estos valores puede caer en el rango de $\pm 20 \%$. Esto es aproximado, y para un cálculo preciso los valores obtenidos experimentalmente de E, provenientes de una amplia cantidad de muestras y tamaños debería ser esencial. A pesar de ello en muchos casos de diseños de obras en rocas han incluido grandes imprecisiones al asumir inicialmente que una roca en particular es inelástica. Por lo tanto, antes de realizar cualquier análisis es esencial que los supuestos iniciales sean cuidadosamente verificados.

TEORIA ELASTICA APLICADA A PROYECTOS DE DISEÑOS DE OBRAS DE INGENIERIA EN ROCAS

Un requisito previo en cualquier problema de diseño que involucra materiales naturales es la suposición de que cierta simplificación en las propiedades de los materiales es necesaria para ayudar al análisis matemático. En los problemas que involucran diseños en rocas esto tradicionalmente significa suponer la presencia de propiedades elásticas para una roca, permitiendo que los cálculos se apoyen en la teoría de la elasticidad. Estos cálculos para el diseño algunas veces han sido exitosos, en especial en casos que involucran pendientes rocosas y fundaciones, eso introdujo considerables grados de error, por lo tanto, es esencial que los límites de aplicación de la teoría elástica sean claramente definidos.

Se demostró que por la definición del concepto de elasticidad no hay rocas que sean verdaderamente elásticas, pero que algunas tienen propiedades en su deformación que se aproximan a la forma cuasi-elástica, particularmente algunas rocas cohesivas de

grano fino y rocas masivas a bajos niveles de tensión. Contra esto se debe dejar sentado el conocimiento de que las rocas en la naturaleza son normalmente discontinuas conteniendo varias superficies de esquistosidad, estratificación, diaclasamiento y grietas asociadas, posiblemente fallas y otras estructuras fracturadas, todas las cuales pueden contener y permitir la circulación del agua en distintas cantidades.

Este aspecto debe ser enfatizado en las aplicaciones cercanas a la superficie a menudo consideradas como las condiciones óptimas para el análisis elástico donde las diaclasas abiertas y máximas en la presencia de agua, puede llevar a errores considerables. Por otro lado, a profundidades donde hay una tendencia para que las diaclasas se cierren debido a la presión y donde hay ausencia de agua, ello limitará la diferencia entre muestras y propiedades del macizo rocoso aunque los procesos de fluencia dependientes del tiempo mostraran una tendencia a incrementarse con el aumento de la carga y de la temperatura.

Tomar una real decisión sobre los límites de elasticidad es extremadamente difícil y debe hacerse siempre con precaución, teniendo en mente factores que van mas allá de la estructura interna de la roca. Generalmente, a pesar de todo, las siguientes reglas pueden ser una guía muy útil:

- 1) Ninguna estructura rocosa cercana a la superficie puede ser tratada como un medio continuo y elástico, incluso a pesar de que algunas propiedades de las muestras pueden aproximarse a la elasticidad, a menos que se pueda demostrar que contengan un mínimo de discontinuidades. Los criterios de diseño deben basarse normalmente sobre las propiedades friccionales en los planos de diaclasas y estratificación.
- 2) Ninguna estructura rocosa que se presente muy diaclasada, estratificada, con esquistosidad o fracturada puede ser tratada como un medio continuo y elástico.
- 3) Ninguna roca cuyo módulo de elasticidad medido sea inferior a 5×10^5 Kg. / cm² puede ser considerado como un medio elástico, excepto con suma cautela.
- 4) Ninguna roca sometida a una carga suficiente que induzca una fluencia significativa puede ser tratada como elástica.

BIBLIOGRAFIA

- BLAIR, B.E. (1955), "Physical properties of mine rocks". U.S. Bureau of Mines, Rept Invest.
- BLAIR, B.E. (1956), "Physical properties of mine rocks". U.S. Bureau of Mines, Rept Invest.
- COATES, D.F. y PARSONS, R.C. (1966), "Experimental criteria for classification of rock substances", Int. F, Rock Mech. Min. Sci.
- HOSKING, J.R. (1955), "A comparison of tensile strength, crushing strength and elastic properties of roadmaking rocks", Quarry Man. F.
- JUDD, W.R. y HUBER, C. (1961), "Correlation of rock properties by statistical methods", Int. Symp. on Mining Research (ed. G. Clarke), Pergamon, Oxford.
- NICHOLLS, H.R. (1961), "In-situ determination of the dynamic elastic constants of rocks", Int. Symp. on Mining Research (ed. G. Clarke), Pergamon, Oxford.
- WINDES, S. (1949), "Physical properties of mine rocks", U.S. Bureau of Mines, Rept Invest.
- WINDES, S. (1950), "Physical properties of mine rocks", U.S. Bureau of Mines, Rept Invest.