






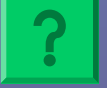


PROBLEMAS ACTUALES DE LA MECÁNICA DE ROCA EN MINERÍA

Profesor Roberto Blanco Torrens

Los principales problemas que confronta la aplicación de las ciencias geomecánicas en la actividad minera son:

- Falta o insuficientes estudios geomecánicos 
- Deficiente elección en el modelo de comportamiento del macizo 
- Estudio del campo deformacional del macizo 
- Afectaciones estructurales 
- Estabilidad de obras subterráneas 
- Afectaciones dinámicas en minas subterráneas 
- Afectación de los terrenos y obras de superficie por los trabajos subterráneos 
- Diseño, construcción y control de taludes en canteras y minas a cielo abierto 

Falta o insuficientes estudios geomecánicos

- Sobre este aspecto se ha escrito mucho. Numerosas organizaciones, instituciones, colegios y universidades han hecho mucho énfasis y pronunciamientos, pero lamentablemente continúa sin una solución real



Deficiente elección en el modelo de comportamiento del macizo

En dependencia del carácter de la relación entre tensiones y deformaciones los modelos geomecánicos pueden dividirse en lineales y no lineales.

En dependencia de la conjugación de los particularidades mecánico-estructurales y al grado de su manifestación, los modelos geomecánicos pueden ser ; heterogéneos anisótropos o isótropos y homogéneos-isótropos.

Según las causales de manifestación de la heterogeneidad pueden ser: Naturales (estratificación, esquistocidad, agrietamiento ,etc.) y artificiales relacionada con la variación de propiedades del macizo a causa de los procesos tecnológicos.

Ahora bien a la hora de enfrentar la tarea y elegir el método para su solución es necesario ante todo definir si el macizo en estudio se considera continuo o discontinuo (discreto).



Para ello es necesario usar el concepto de volumen elemental, el cual se define como el volumen que posee en sí todas las propiedades del macizo en cuestión, pero que es a la vez lo suficientemente pequeño en comparación con el objeto que se estudia, que su estado tenso-deformacional se puede considerar como el estado tenso-deformacional en un punto. En otras palabras el volumen elemental del macizo es aquel que siendo lo suficientemente pequeño, es capaz de poseer todas sus propiedades.

Si evaluamos las dimensiones del volumen elemental de la condición dada por la conservación de las propiedades del macizo es necesario examinar tanto la estructura de la roca componente (la interna) como las particularidades propias del macizo.

En las rocas se pueden esperar pocos volúmenes que posean en sí todas las propiedades de la roca. Estos volúmenes con una determinada dimensión son los límites y si se disminuyen comienzan a manifestarse otras propiedades.

Las dimensiones de estos volúmenes depende del tipo de roca y en primer lugar de las dimensiones de los granos del esqueleto mineral . Por ejemplo. Para la arenisca con un contenido de cuarzo hasta un 80% (la dimensión del grano es hasta de 0,5 mm) y cemento hasta un 20 % , el volumen elemental esta en el orden de los 0,025 cm³; su área de 0,084 cm² y su dimensión lineal de 0,29 cm aproximadamente. En este mismo orden, están las dimensiones del volumen para otros tipos de rocas.

Si tenemos en cuenta que los objetos que se investigan en los macizos rocosos se miden generalmente en metros y en muchos casos en decenas y más de metros, se llega a la conclusión de que se pueden considerar los volúmenes anteriores como pequeños.

Realmente, la dimensión lineal del objeto de estudio es en más de dos órdenes (100 veces) la del volumen elemental. Por lo que se puede plantear que los defectos de la estructura interior de la roca no son significantes para valorar la definición de un macizo como continuo o discreto.

Los defectos estructurales de los macizos rocosos si ejercen gran influencia en las dimensiones de los volúmenes elementales. En casos particulares las dimensiones de tales volúmenes pueden alcanzar varios metros.

- Por ejemplo durante el estudio de los procesos mecánicos que ocurren en los alrededores de las excavaciones subterráneas en donde la zona de influencia de excavación se mide en metros y en casos extremos en decenas de metros , tales volúmenes no se pueden considerar como elementales.
- Por el contrario si estudiamos el desplazamiento del macizo rocoso en un frente de arranque, cuando las dimensiones de la zona investigada alcanza cientos de metros y dicho volumen se puede considerar como lo suficientemente pequeño y clasificar como elemental.
- Por consiguiente la cuestión a cuando es posible emplear el método de la Mecánica de los medios continuos para el estudio del macizo rocoso se debe resolver para cada caso en particular teniendo en cuenta las características mecánica – estructurales del macizo.

Estudio del campo deformacional del macizo

Aquí se hace referencia solamente a dos aspectos: la deformación más allá del estado límite y la deformación con el tiempo.



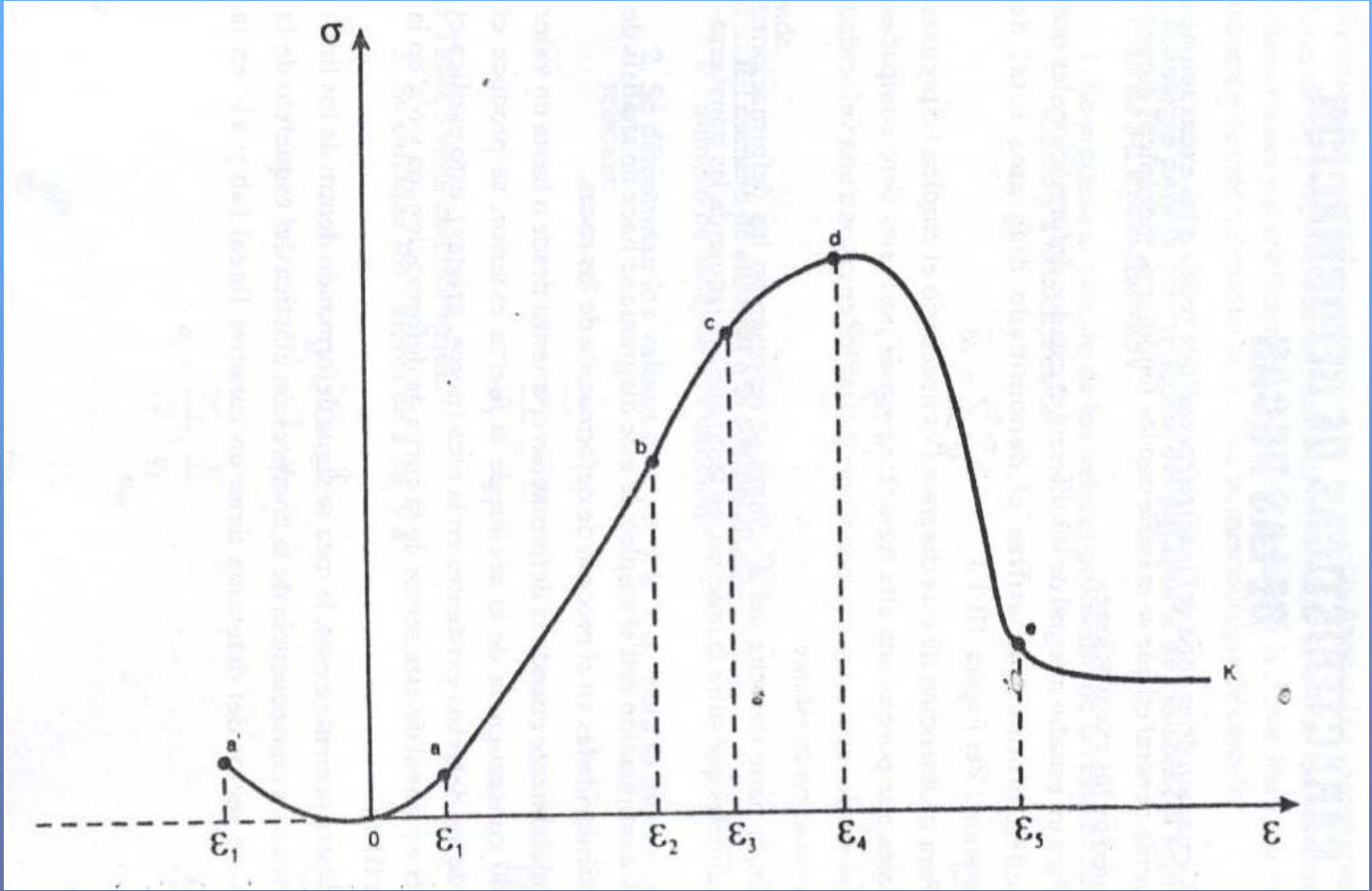
Para el estudio de estas características del proceso de deformación, se hace referencia inicialmente al Diagrama de deformación total.

Con el empleo del diagrama tensión – deformación longitudinal y tensión – deformación transversal se puede estudiar en detalle las particularidades del proceso de deformación de las rocas.

A medida que crece la deformación de la muestra por la acción de cargas externas desde cero hasta una magnitud dada ϵ , (para el diagrama tensión – deformación longitudinal y tensión deformación transversal respectivamente) se produce el cierre de los defectos que poseen las rocas (poros, grietas, etc.), esto conduce a que los sectores $\sigma - \epsilon$ y $\sigma - \epsilon_t$ del diagrama no sean lineales (ver fig.)

La deformación posterior de la roca se produce en un estado elástico (ab y $a'b'$) debido a la compresión elástica del esqueleto mineral.

El posterior desarrollo de la deformación conduce al inicio del proceso de agrietamiento de la muestra, como resultado de lo cual se produce un aumento gradual del coeficiente de deformación transversal lo cual caracteriza la afectación de la dependencia directa entre tensión y deformación transversal ($b'c'$). Durante esto la dependencia entre tensión y deformación longitudinal (bc) conserva su estado lineal.



Debido a la aparición de deformaciones no lineales el coeficiente de relación entre tensión (σ) y deformación (ε) pierde su sentido como módulo de elasticidad y se debe entonces considerar a esa relación como el módulo de deformación, el cual tiene un valor numérico inferior al de elasticidad.

Cuando se alcanza la deformación ε_3 que como muestra la experiencia, está vinculada a la resistencia a largo plazo de la roca, se inicia el proceso de desarrollo del agrietamiento, que conduce a la destrucción de la dependencia lineal entre σ y ε^l (sector cd).

Este proceso de agrietamiento ocurre también en el sector c'd', pero ya allí se había afectado la dependencia lineal.

Una vez que se alcanza la deformación límite, que se corresponde con la máxima resistencia de la roca estudiada, o sea, con el límite de resistencia (puntos d y d'), una deformación posterior de la roca es acompañada de un intenso proceso de ensanchamiento volumétrico y una disminución gradual de la resistencia que ofrece la roca, ante la carga actuante. Esto posibilita que se produzca un intenso proceso de agrietamiento

En el punto e del diagrama se produce la separación de la muestra en partes y por eso no es factible una posterior deformación de esta muestra en un estado lineal.

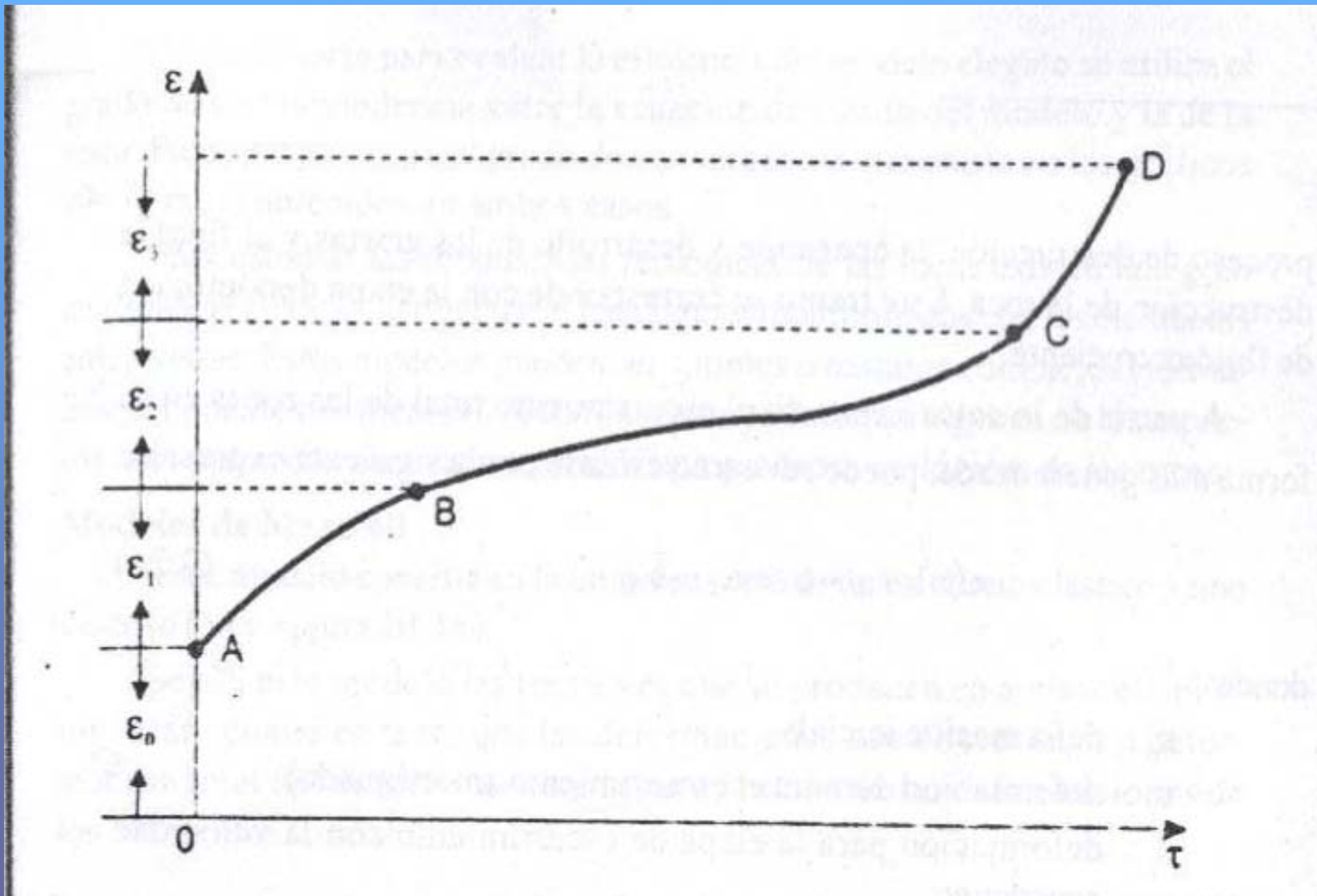
En condiciones de un estado triaxial, debido a la acción de las fuerzas laterales, la separación en partes de la muestra se produce sin un aumento de volumen.

Es característico para el diagrama de deformación total, que en su parte od (od') a medida que aumenta la deformación de las rocas crece también la resistencia ante la acción de la carga, en tanto que en el sector dk (dk') sucede lo contrario a medida que crece la deformación disminuye la resistencia de la roca.

El diagrama de deformación total puede ser dividido en tres sectores característicos que se corresponden con tres estadios diferentes del proceso de deformación (ver fig.).

- Sector od (od'): que corresponde hasta el límite de resistencia de la roca.
- Sector de ($d'e'$): que corresponde a la deformación después del límite de resistencia.
- Sector ek ($e'k'$): denominado sector de deformación ruinososa.

La posibilidad de encontrarse la roca en cualquier de estos estados de deformación motiva la necesidad de estudiar sus propiedades en dependencia del estado en que ellas se encuentran.



Análisis del comportamiento de las rocas más allá del límite de resistencia.

La particularidad fundamental del comportamiento mecánico de las rocas más allá del límite de resistencia consiste en la gradual disminución de su resistencia a medida que crece la deformación. El sector de decrecimiento de la resistencia en el diagrama de deformación total $\sigma - \varepsilon$ comienza en el punto d, que corresponde al máximo valor de σ o sea, al valor máximo de resistencia de la roca σ_R la cual, en condiciones de compresión lineal ($\sigma_2 = \sigma_3 = 0$), se hace igual al límite de resistencia a compresión lineal (σ_c) en tanto que para condiciones de un estado triaxial, esta tensión se puede expresar por ejemplo, por la relación:

$$\sigma_R = \sigma_c + (2\lambda + 1)\sigma_3$$

y:

$$\lambda = \frac{\text{Sen}\varphi}{1 - \text{Sen}\varphi}$$

Siendo:

φ : Angulo de inclinación de la envolvente lineal con respecto a σ

Como se conoce el diagrama de deformación total consta de tres partes; 2 de ellas situadas más allá del límite de resistencia.

En el sector d_e se produce la deformación de la roca con la disminución de su resistencia y para un estado lineal tiene lugar el aumento de su volumen. Esto va a ir acompañado de un proceso intenso de agrietamiento.

En el punto e del diagrama, las rocas pasan a un estado ruinoso de destrucción y de ahí en adelante el diagrama se puede mostrar como una línea horizontal (paralela al eje \mathcal{E}), (ver fig.)

Analizando la parte del diagrama correspondiente a la deformación más allá del límite, se señala una ε_1' deformación ε_1' que se encuentra en el tránsito hacia el estado ruinoso (sector d_e)

Si se denomina ε_R a la deformación de destrucción (ruinosa), se tiene que tiende a ε_R

La magnitud de la resistencia de la roca que se corresponde con la magnitud de la deformación ε_R se denomina Resistencia Mínima de la roca más allá del estado límite, o sea:

$$\sigma_1' \rightarrow \sigma_{1\min.}$$

Los gráficos que relacionan los valores de $\sigma_{1\text{min.}}$, de diferentes tipos de rocas, con la magnitud de la tensión mínima (σ_3) pueden ser aproximadamente representados por una expresión lineal.

$$\sigma_{1\text{min.}} = A + B\sigma_3$$

Donde:

A : Una magnitud que tiene el sentido de una resistencia residual de la roca para el caso de un estado lineal ($\sigma_2 = \sigma_3 = 0$) esta magnitud se designa por σ_c^0

B : Coeficiente que caracteriza la influencia de la fricción interna en la cohesión de la roca.

Se plantea que para un estado triaxial:

$$\sigma_L = (2\lambda + 1)\sigma_3 + \sigma_c$$

y para uno lineal:

$$\sigma_L = \sigma_c$$

La magnitud del coeficiente **B** se puede determinar con el uso del coeficiente de fricción interna. Si se tiene en cuenta “que el límite inferior” de la resistencia de la roca en un estado triaxial viene dado por la expresión:

$$\sigma_{1\text{min.}} = (2\lambda + 1)\sigma_3$$

Comparando las dos expresiones de $\sigma_{1\min.}$ se obtiene que el valor del coeficiente B , se puede dar por la relación

$$B = 2\lambda + 1$$

Comparando la magnitud obtenida de la magnitud de B experimentalmente con la obtenida por la expresión anterior $(2\lambda + 1)$ se ve que la dispersión de los resultados no excede de un 10% (o sea, no excede de los errores en la determinación de las propiedades de las rocas). Por ende la resistencia mínima se puede expresar para el caso del estado lineal:

$$\sigma_{1\min.} = \sigma_c^0 + (2\lambda + 1)\sigma_3$$

La disminución de la resistencia de la roca se acompaña con variaciones en su volumen (para un estado lineal), lo cual lleva a un aumento de su coeficiente de deformación transversal.

A partir de los resultados obtenidos por un gran volumen de trabajos experimentales se plantea que la relación entre las deformaciones longitudinales y transversales, más allá del estado límite, se puede escribir en forma aproximada por la siguiente relación lineal:

$$\varepsilon_3' = -\beta\varepsilon_1'$$

Siendo:

ε_3 Deformación transversal más allá del estado límite.

ε_1 Deformación lineal más allá del estado límite

β Coeficiente de deformación transversal

También se puede plantear la relación entre el módulo de deformación más allá del estado límite E^* (denominado también Módulo de caída) con respecto al módulo de deformación (E) antes del límite.

$$\xi_0 = \frac{E^*}{E}$$

El módulo de deformación más allá del límite E^* depende de una serie de factores: tipo de roca, velocidad del proceso de deformación, tipo de estado tensional, entre otros.

Algunos valores de β y ξ_0 para diferentes tipos de rocas se dan en la tabla #.

Por ejemplo bajas velocidades en el proceso de deformación de las rocas (en un estado más allá del límite) se corresponden con altos valores del Módulo de deformación

Para ilustrar mejor la regularidad en la variación del Módulo de deformación en el proceso de deformación, se debe analizar un diagrama total de deformación para cualquier roca, obtenido del resultado de ensayos con sucesivas descargas y cargas de la muestra

Tabla #. Valores de β y ξ_0

β ξ_0

Tipo de roca		
Areniscas	3	0.6
Mármol	4	0.5
Argilita	8	2.5
Alebrolita	14	7.0
Calcita	3	2.5

σ E^*

Características de deformación de las rocas con el tiempo

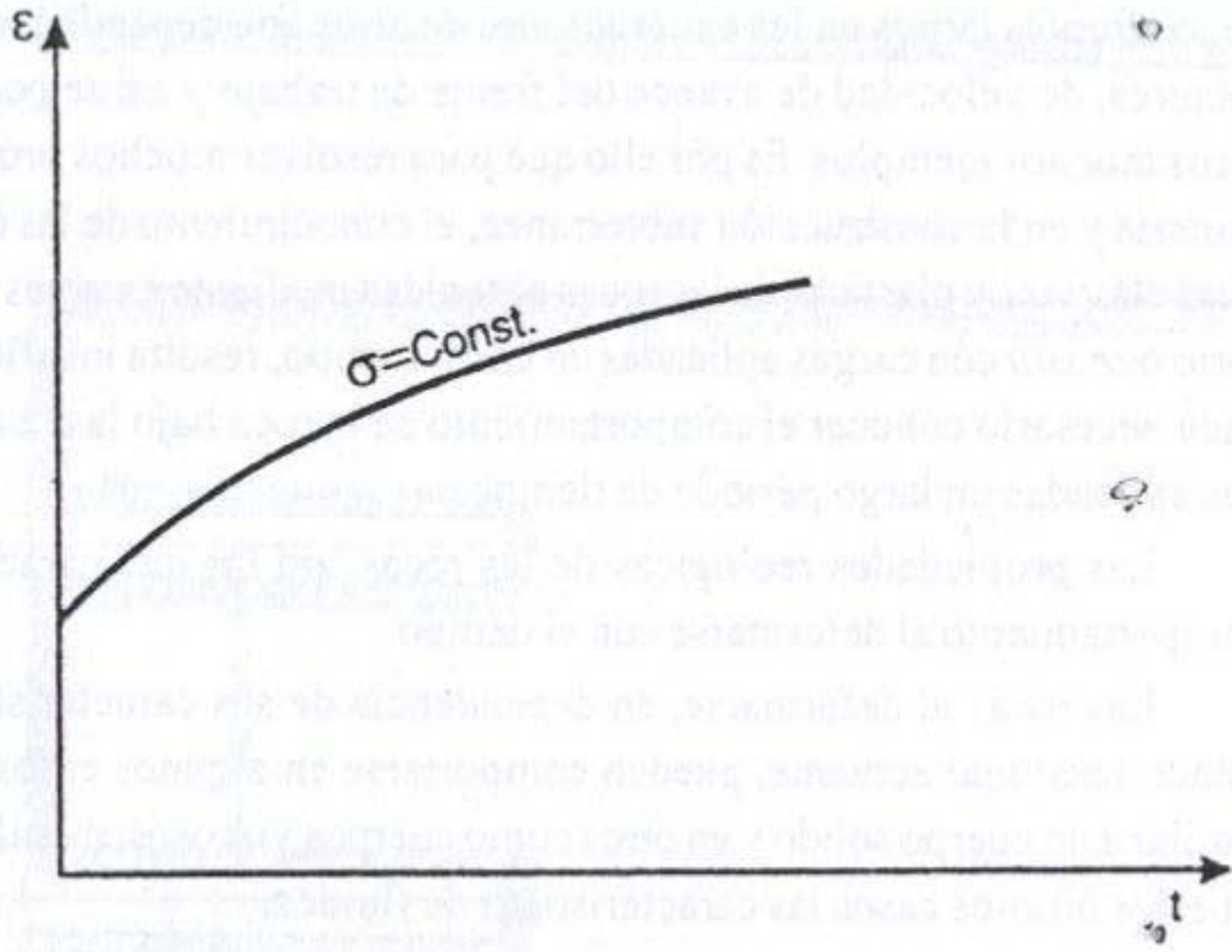
Es conocido, de la práctica minera, que la deformación en las rocas varía con el tiempo y por ejemplo se sabe que los desplazamientos de las rocas desnudas que rodean a las excavaciones tienden a desarrollarse con el transcurso del tiempo, que los desplazamientos en las rocas del techo de los frentes largos en las excavaciones de arranque dependen, entre otros factores, de la velocidad de avance del frente de trabajo y así se podrían mencionar muchos ejemplos.

Es por ello que para estudiar y resolver muchos de los problemas en minería no resulta suficiente el conocimiento de las características elásticas y plásticas de las rocas, obtenidas mediante ensayos de laboratorio o in situ con cargas aplicadas durante un corto tiempo, sino que es necesario estudiar el comportamiento de las rocas bajo la acción de cargas aplicadas durante un largo periodo de tiempo.

Las propiedades reológicas de las rocas, son las que caracterizan su comportamiento al deformarse con el tiempo. Las rocas al deformarse con el tiempo, en dependencia de sus características y del estado tensional actuante, pueden comportarse en algunos casos en forma similar a un sólido y en otras como cuerpos viscosos, manifestándose en este último caso las características de fluidez.

La fluidez en las rocas puede ser plástica y viscosa. La primera se manifiesta solo en aquellos casos en que la magnitud de la tensión actuante sobrepasa el límite de fluidez de la roca, en tanto que la segunda puede ocurrir para cualquier momento y desarrollarse para cualquier magnitud de la tensión. Para la caracterización de las propiedades reológicas de las rocas son muy usados los conceptos: escurrimientos de las deformaciones y relajamiento de las tensiones.

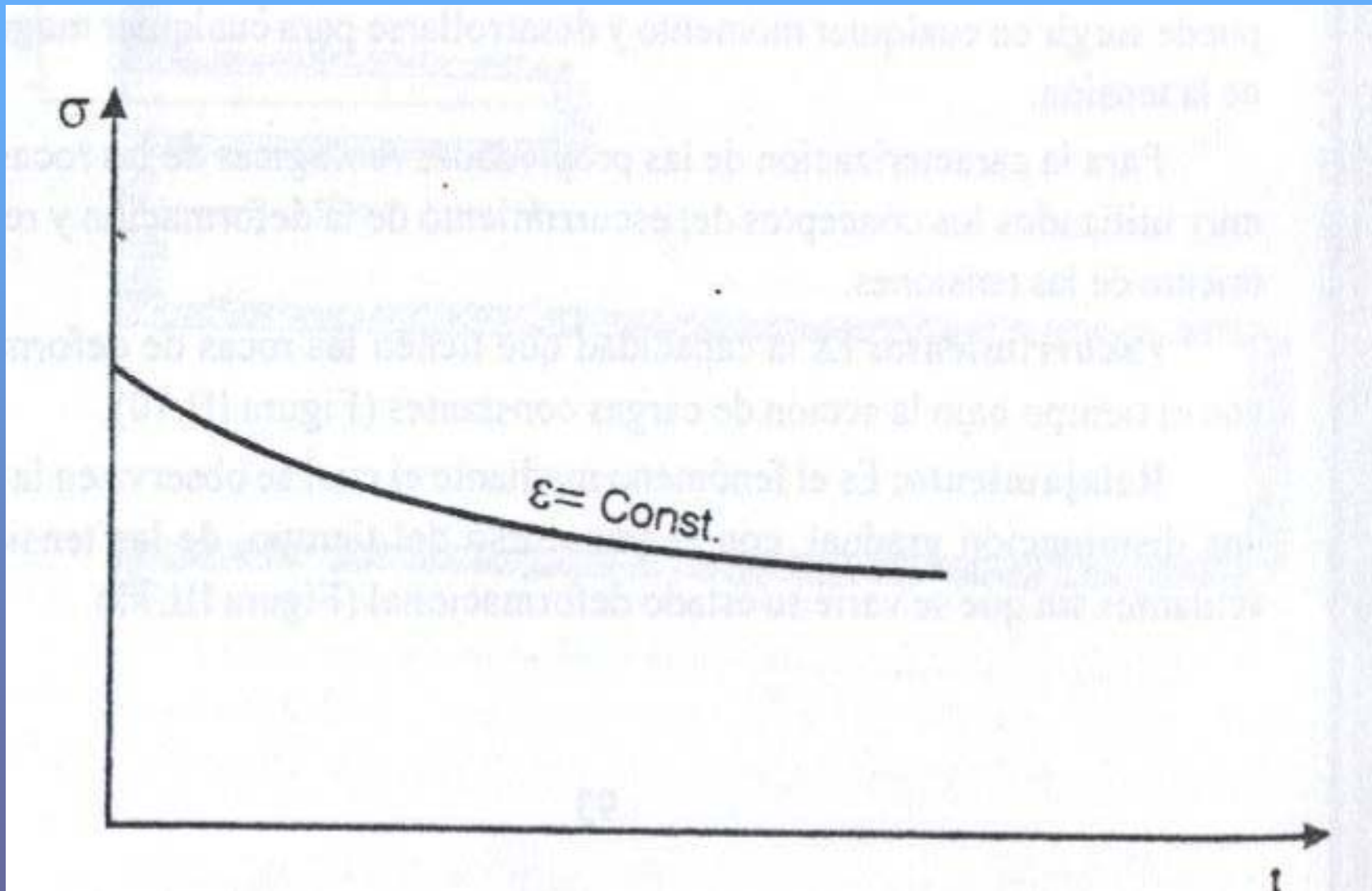
Se denomina escurrimiento de las deformaciones a la capacidad que tienen las rocas de deformarse con el tiempo bajo la acción de cargas constantes.(ver fig.)

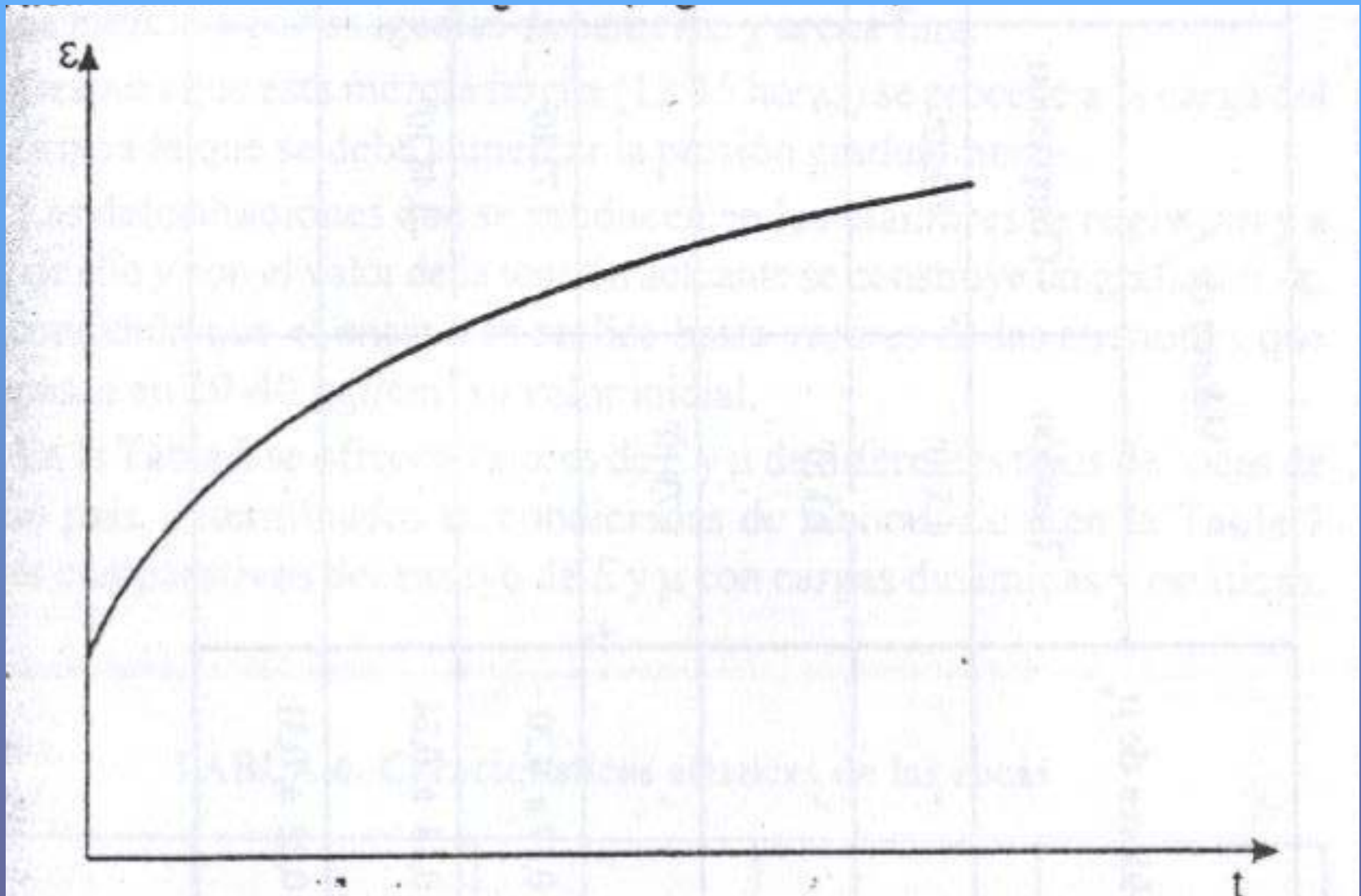


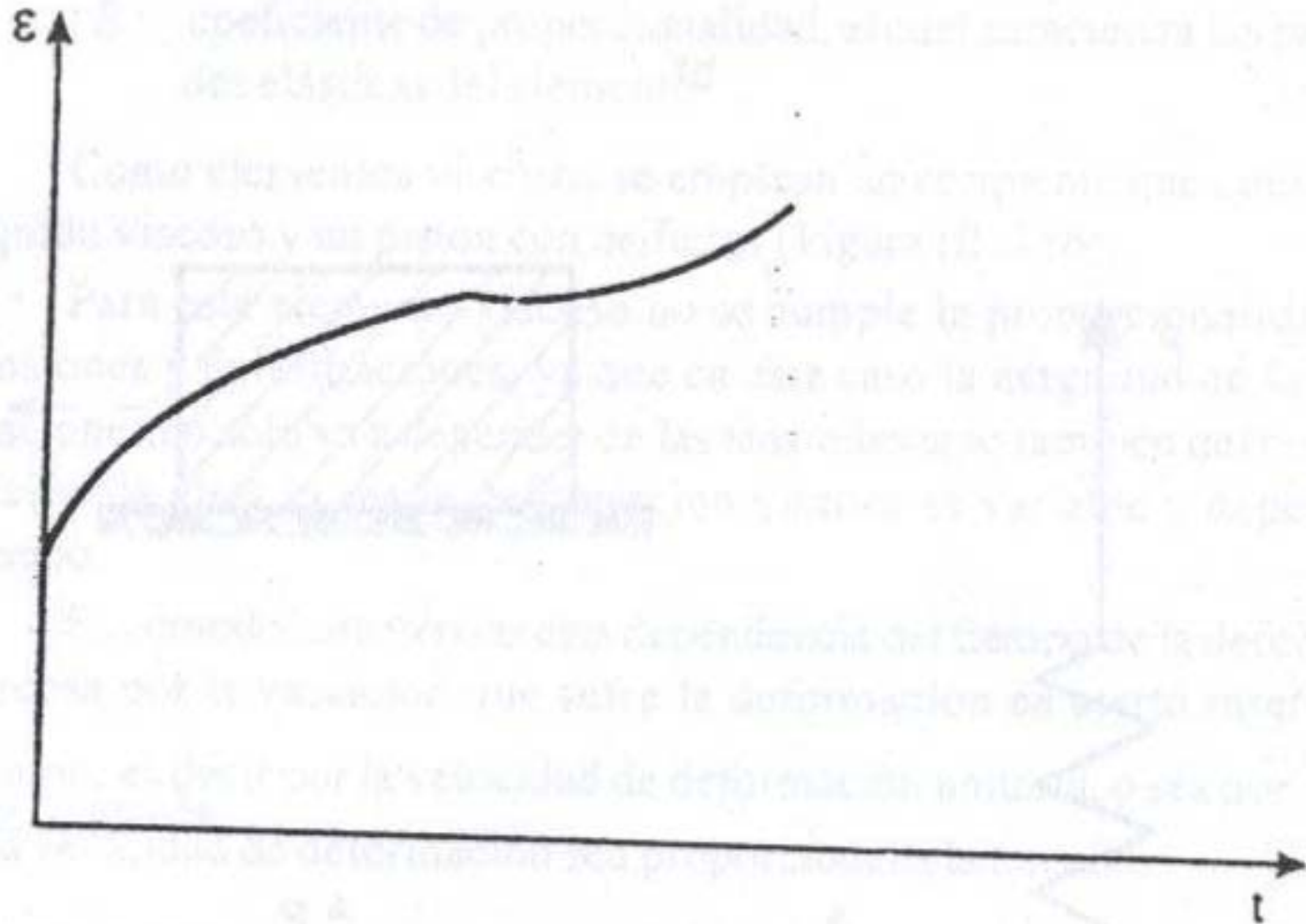
En tanto que relajamiento de tensiones es el proceso mediante el cual se produce en la roca la disminución gradual, con el transcurso del tiempo, de las tensiones actuantes, sin que varíe su estado deformacional (ver fig).

En las rocas de acuerdo a su constitución, características y condiciones de yacencia pueden manifestarse, para una carga constante, deformaciones con diferentes características y grados de intensidad. De tal forma se aprecia que el escurrimiento de deformaciones puede presentarse en dos formas, a partir de lo que, las rocas se pueden dividir en dos clases: la primera clase a la que pertenecen la mayoría de las rocas (areniscas, calizas, peridotitas, granitos, etc.) se caracteriza porque las deformaciones al cabo de un tiempo cesa de aumentar, o sea, tiene un carácter amortiguado (ver fig.)

En tanto que la Segunda clase, a la cual pertenecen las arcilas y los esquistos arcillosos entre otros, se caracterizan por presentar un carácter no amortiguado en su deformación (ver fig.)







Las investigaciones realizadas han permitido establecer las características principales que deben satisfacer las ecuaciones de las curvas del escurrimiento:

Para las rocas primera clase:

1. Una carga instantánea es correspondida con una deformación instantánea, existiendo entre ellas una dependencia lineal.
2. La deformación aumenta con el transcurso del tiempo.
3. Para una carga constante, la magnitud de la deformación tiende a un determinado límite, el cual va a depender de la magnitud de la carga actuante.
4. El límite al cual tiende la magnitud de la deformación, tiene una relación no lineal con la carga actuante.

Para las rocas de la Segunda clase:

1. No se establece una deformación límite.
2. En un periodo inicial, no muy extenso, la curva del escurrimiento posee un carácter exponencial, para después pasar a tener una forma lineal.
3. La velocidad de deformación es directamente proporcional a la carga aplicada.

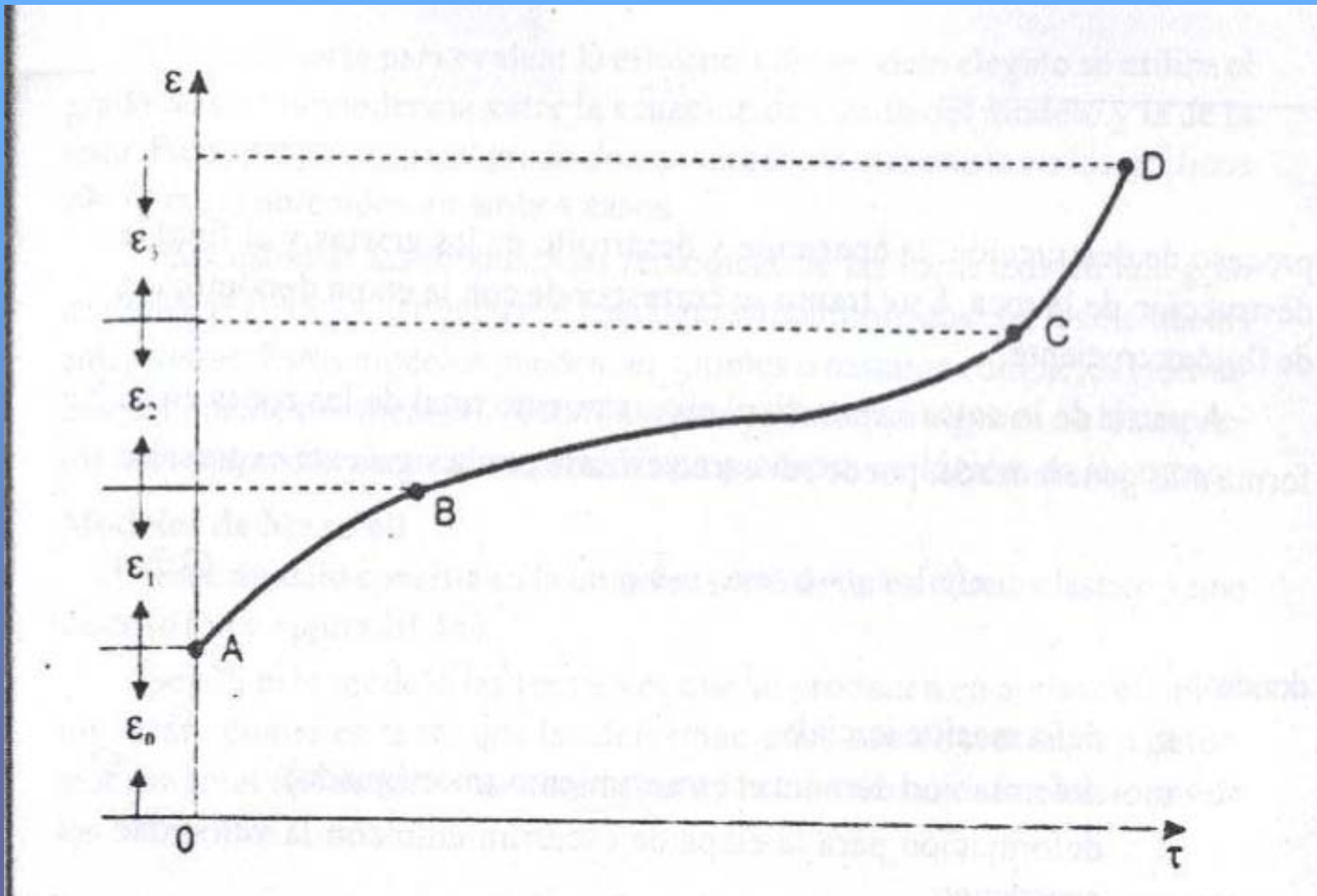
En su forma más completa el carácter de deformación de las rocas, con el tiempo, puede ser caracterizado por la curva de escurrimiento, representada en su forma más general (ver fig.)

Del análisis de la curva OABCD se obtiene lo siguiente:

El tramo OA se corresponde con la deformación inicial (ε_0) que se produce instantáneamente. En dependencia de la magnitud de la carga actuante esta deformación puede ser totalmente elástica (cuando se produce debido a la compresión elástica del esqueleto mineral y a la eliminación en él del aire y agua) y en parte puede haber deformación no elástica (cuando hay deformaciones irreversibles) debido a la ocurrencia de microfracturas. En las rocas.

El tramo AB corresponde a un estado de escurrimiento amortiguado en donde la velocidad de deformación tiende a cero ($\dot{\varepsilon}^* \rightarrow 0$) En esta etapa pueden ocurrir tanto deformaciones elásticas, como no elásticas.

El tramo BC de la curva se corresponde con un estado de escurrimiento de las deformaciones no establecido, con una velocidad constante de la deformación ($\dot{\varepsilon}^* = \text{constante}$) Esta etapa de deformación se caracteriza por la deformación de los enlaces estructurales en la roca y por ello al producirse la descarga la deformación solo en parte es reversible



Por último en el tramo CD se manifiesta un aumento en la velocidad de deformación, lo que va acompañado de la intensificación del proceso de destrucción (aparición y desarrollo de las grietas y al final la destrucción de la roca). Este último tramo a veces se denomina de fluidez creciente.

La magnitud total del escurrimiento de la deformación (ε_t) se calcula por la expresión:

$$\varepsilon_t = \varepsilon_0 + \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3$$

Siendo:

ε_0 : Deformación instantánea.

ε_1 : Deformación durante el escurrimiento amortiguado.

ε_2 : Deformación para la etapa de escurrimiento con la velocidad constante.

ε_3 : Deformación durante la etapa de fluidez.

En ocasiones la expresión anterior se puede escribir:

$$\varepsilon_t = \varepsilon_e + \varepsilon_{noelást.}$$

Y se conoce que:

$$\varepsilon_c = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}$$

Siendo:

ε_0 : Módulo inicial de elasticidad (para $t=0$).

En tanto que las deformaciones no elástica, en el proceso de escurrimiento, aumenta según una ley exponencial (como muestran los resultados experimentales) y tienden a un determinado límite, el cual en forma no lineal, depende de las tensiones actuantes.

Para la condición de un proceso de deformación ilimitado en el tiempo, se puede decir que:

$$\varepsilon_{noelást.} = \varepsilon_{\infty} = \frac{\sigma}{E_{\infty}}$$

Siendo:

ε_{∞} y E_{∞} : Deformación y módulo de deformación para un largo periodo de acción de la carga

Esta deformación (ε_{∞}) se puede representar en forma de una curva exponencial.

$$\varepsilon_{\infty} = A \left(\frac{\sigma}{E_0} \right)^m$$

Siendo:

A y m : parámetros de la roca.

De tal forma la ecuación del escurrimiento de las deformaciones se puede escribir:

$$\varepsilon_t = \frac{\sigma}{E_0} + A\left(\frac{\sigma}{E_0}\right)^m$$

Por su parte la curva de relajamiento de las tensiones (dada en la fig.#); puede escribirse en forma exponencial por la expresión:

$$\sigma = \frac{\sigma_0}{e^{t/t_0}}$$

Donde:

σ_0 y t_0 : tensión y tiempo inicial.

El tiempo de relajamiento (periodo en que se produce la disminución de las tensiones) para la mayoría de las rocas es muy grande, es por ello que para caracterizar las propiedades reológicas de las rocas, se utiliza en muchas ocasiones un indicador de la caída de tensiones en el macizo para un determinado período de tiempo, o sea:

$$R = \frac{\sigma_0 - \sigma_1}{\sigma_0} \leq 1$$

Siendo:

σ_0 Y σ_1 las tensiones en el momento inicial y en el momento intermedio que se tomo para el estudio.

Como ejemplos de este proceso de relajamiento de tensiones en los frentes de arranque puede señalarse la disminución de las tensiones en un pilar deformado, que sostiene rigidamente a un techo el cual es capaz, con el transcurso del tiempo, asimilar la carga de las rocas , que yacen más arriba; o la disminución de las tensiones en el pilar flexible deformado a cuenta de la distribución de las tensiones que en el ocurren..

Las investigaciones del estado tenso-deformacional del macizo rocoso, muestran que para largas acciones de las cargas se disminuyen las características elásticas de las rocas y se manifiestan con mayor intensidad las no elásticas.

Un ejemplo claro de la manifestación del proceso del escurrimiento de las deformaciones en los frentes de arranque tiene lugar en los pilares que gradualmente se van deformando al sostener a techos flexibles, proceso el cual puede durar años y concluye con la destrucción del pilar.

El escurrimiento de las deformaciones y el relajamiento de las tensiones están ligadas al proceso de transición de las deformaciones elásticas en plásticas, pero si la manifestación de las deformaciones plásticas se producen en los casos, que las tensiones sobrepasen el límite de elasticidad, durante la

manifestación del escurrimiento se produce un lento crecimiento de las características plásticas de deformación, en situaciones de cargas por debajo del límite de elasticidad, pero para tiempos prolongados de acción de esa carga.

Durante el relajamiento de las tensiones las deformaciones elásticas en las rocas, con el transcurso del tiempo, se transforman en plásticas, pero la deformación total no varia.

Un rol muy significativo en la manifestación de las deformaciones residuales, lo tiene la existencia de defectos estructurales en la roca.

Un rasgo muy característico de los procesos de deformación con el tiempo (reológicos), en particular el escurrimiento de las deformaciones, lo tiene la dependencia entre la deformación observada en un momento dado y las características de todo el proceso de carga material, o en otras palabras de toda su historia anterior de carga. Esta característica de los materiales se denomina su herencia.

Como se conoce con el aumento del tiempo de aplicación de la carga la resistencia de la roca disminuye, acercándose asintóticamente a un determinado límite.

Este límite habitualmente se denomina resistencia a largo plazo (σ_{∞})

La variación de la resistencia a largo plazo de la roca con el tiempo, puede describirse mediante una curva logarítmica, dada por la expresión:

$$\sigma_{\infty} = \sigma_0 + \ln \frac{K_T}{t}$$

Siendo:

σ_0 : Resistencia de la roca ante una carga instantánea.

K_T : Coeficiente de Tesura (estoicidad de las rocas).

t : Tiempo de aplicación de la carga.

Según demuestran los resultados experimentales obtenidos, para la mayoría de las rocas $\sigma_{\infty} \approx 0.6$ a 0.8. Esta magnitud depende de muchos factores: composición y textura de la roca, humedad, porosidad, tipo y características de actuación de la carga, tiempo y otras. Valores de la resistencia a largo plazo para diferentes rocas se dan en la Tabla #.

Para caracterizar los procesos reológicos que pueden ocurrir en el macizo rocoso existen numerosas teorías, entre ellas la teoría hereditaria del escurrimiento de las deformaciones, que es considerada por muchos autores como la que en forma más precisa representa el fenómeno real que ocurre en el macizo rocoso.

Afectaciones Estructurales Del Macizo Rocoso

La existencia de diferencias estructurales en el macizo rocoso trae como consecuencia que se afecte su integridad y se produzca su debilitamiento, reflejando esto en la pérdida de su resistencia y capacidad portante, disminución de sus cualidades y un aumento de su heterogeneidad y anisotropía.

Como es conocido el agrietamiento de los macizos rocosos es la principal causa de la afectación de su continuidad. En la geología estructural el termino grieta tiene un significado bastante amplio que va desde las grandes roturas producido por fenómenos tectónicos hasta afectaciones microscópicas; en dicha disciplina se estudia todo lo relacionado con la formación de las grietas; las leyes del desarrollo del proceso de agrietamiento en la corteza terrestre y la clasificación de las grietas.



Por su parte la mecánica de rocas y otras disciplinas afines a ella, “grieta” se comprende como una superficie de separación por medio de la cual se produce una ruptura en el campo tenso-deformacional.

En la actualidad son empleadas diferentes clasificaciones del agrietamiento. En dependencia al objetivo que se persiga tales como: la genética, la ingeniería geológica, la geométrica y la hidrogeológica entre otras.

Una clasificación muy aceptada para el estudio geomecánico del macizo rocoso, es a que se basa en las dimensiones promedio del bloque estructural.

La tabla muestra una clasificación del agrietamiento en función de las dimensiones promedio del bloque estructural.

Índice de clasificación	Grado de agrietamiento	Dimensiones del bloque cm
I	Muy agrietado	< 10
II	Agrietado	De 15 a 30
III	Medianamente agrietado	De 30 a 50
IV	Poco agrietado	De 50 a 75
V	Muy poco agrietado	< 75

Se distingue el macro y el micro agrietamiento.

El macro agrietamiento es visible a simple vista y de él depende la estabilidad de las zonas desnudas del macizo, de pilares, taludes y otras obras.

El grado de influencia de esta forma de agrietamiento sobre la estabilidad del macizo está dada por una serie de factores: Orientación de los planos principales de agrietamiento, intensidad del agrietamiento (distancias entre grietas y planos de grietas), características de las grietas (si están abiertas o cerradas, si están rellenas o no, características del relleno etc.) y de los elementos de yacencia.

El macro-agrietamiento en gran medida determina las características de resistencia de los macizos, las dimensiones permisibles de área desnuda, los parámetros de los sistemas de explotación, la dirección de los trabajos entre otros.

Por su parte el micro-agrietamiento influye significativamente en las propiedades mecánicas de las muestras de roca afectando su continuidad en formas de pequeñas partículas, que solo puede ser vista con empleo de microscopios.

Las grietas (o sistemas de grietas) se distribuyen en el macizo rocoso a una distancia dada una de otra, se cortan, convergen, etc, como resultado de cual el macizo con una dimensión H característica (o el sector estudiado) se encuentra dividido en muchos bloques estructurales con una dimensión promedio h .

La relación H/h se define como la intensidad de agrietamiento. Además para la evaluación cualitativa del agrietamiento se utiliza el coeficiente lineal, de área o volumétrico de la intensidad del agrietamiento. Ellas representan la relación entre la unidad de longitud de área o volumen con respecto distancia (h promedio) promedio entre grietas vacías con respecto al área o volumen del bloque estructural

Una particularidad de los procesos mecánicos que ocurren en macizos agrietados es el aumento de su deformabilidad. Esto se produce debido al desplazamiento de los bloques estructurales , unos con respecto a los otros. Aquí en el contacto entre bloques (que puede ser continuo, sectorial o puntual) surge aquí la fuerza de fricción.

Las características deformacionales determinadas en condiciones de laboratorio, como cualquier otra , significativamente se diferencian de las determinadas en el macizo rocoso Según datos de la práctica la relación entre el valor módulo de deformación determinado en condiciones de laboratorio , respecto al determinado directamente “in situ” como regla oscila entre 2,5 a 3,0 pudiendo llegar en algunos casos a 4,0-4,2.

Esta diferencia tan significativa se relaciona en lo fundamental por la presencia en el macizo rocoso de Microgrietas, las cuales habitualmente no existen en las muestras de ensayo.

Se ha demostrado que en un agrietamiento cerrado del orden de los 0,002 a 0,004 mm puede conducir a una disminución del módulo de deformación en hasta 2,5 veces.

Normativas para tener en cuenta la influencia del agrietamiento del macizo en sus características deformacionales y en particular sobre la magnitud del módulo de deformación para su uso durante los trabajos de proyección en construcción subterránea. no existe

El estudio del agrietamiento en la mecánica de rocas, se enfoca a partir del rol que él desempeña en el debilitamiento del macizo rocoso y por el efecto que esto produce en la estabilidad de excavaciones subterráneas, taludes y otras construcciones.

En los últimos 40 años se ha realizado una intensa investigación del agrietamiento del macizo rocoso, lo cual se encamina a la resolución de las más variadas tareas, tanto: Geológicas, hidrogeológicas, mineras y relativo a las construcciones subterráneas y de superficie.

Las principales direcciones en que se desarrollan estas investigaciones tienen como objetivos:

- Lograr crear una metodología integral para la valoración del agrietamiento de macizo rocoso.

➤ Establecer la relación existente entre el agrietamiento y las características de resistencia del macizo, así como, la influencia de esto en la estabilidad del sistema excavación- macizo.

➤ Proponer una clasificación integral única del agrietamiento.

➤ Profundizar en el estudio de las causas del agrietamiento

El agrietamiento según las causas por la que se forma puede ser natural y artificial. El agrietamiento natural está ligado a las particularidades del origen del macizo rocoso y a los cambios en él producidos a causa de los procesos endógenos y exógenos, así como por los efectos de la erosión.

El agrietamiento artificial se produce como resultado de la acción sobre el macizo de diferentes afectaciones ligadas a los procesos tecnológicos de construcción de diferentes obras. En particular ejercen un efecto significativo en la formación y magnitud de este agrietamiento, también denominado en ocasiones secundario, los trabajos con explosivos.

Para la evaluación del agrietamiento del macizo rocoso existe un gran número de métodos, experimentales que se pueden clasificar como sigue: Método geológico, métodos físicos, métodos de resistencia, métodos de producción y los métodos de modelación.

Para evaluar cualitativamente el agrietamiento se puede utilizar un coeficiente lineal c de área o volumétrico de intensidad de agrietamiento. Ellos representan la relación entre la unidad de longitud de área o volumen con respecto a la distancia promedio entre grietas (h_{prom}), área del bloque estructural (A_{prom}) y volumen del bloque estructural (V_{prom}).

Una particularidad de los procesos mecánicos que ocurren en macizos agrietados es el aumento de su deformabilidad. Esto se produce debido al desplazamiento de los bloques estructurales unos con respecto a los otros. Aquí en el contacto entre bloques (que puede ser continuo, sectorial o puntual) según las fuerzas de fricción.

Las características deformacionales determinadas en condiciones de laboratorio, con cualquier otra (tensional, de resistencia, etc.) se diferencia significativamente de las determinadas directamente en el macizo rocoso.

Según datos de la practica la relación entre la magnitud del módulo de deformación determinado en condiciones de laboratorio, respecto al obtenido de trabajos “in situ”, como promedio, oscila entre 2,5 a 3,0 pudiendo llegar en algunos casos a valores superiores a 4,0.

Esta diferencia tan significativa se relaciona, en lo fundamental, a la presencia en el macizo rocoso de micro-grietas, las que habitualmente no existen en las muestras de ensayo.

Normativas para tener en cuenta la influencia del agrietamiento en las características deformacionales o tensionales del macizo no existen.

En dependencia de su orientación las grietas pueden estar ordenadas y desordenadas.

Caso a. Grietas ordenadas con un sistema.

Caso b. Grietas ordenadas con un dos sistemas.

Caso c. Desordenada caóticamente.

Cuando existe un agrietamiento ordenado (no importa el número de sistema de grietas) siempre es posible definir uno o mas sistemas preponderantes (peligrosas) de grietas. Para el caso de un agrietamiento caótico no es posible obtener la dirección preponderante de las grietas.

El estudio del agrietamiento es necesario en la mecánica de roca para:

1. Definición del modelo geomecánico más representativo del macizo rocoso.
2. Para el estudio del estado tenso-deformacional de cualquier macizo.
3. Para cálculos prácticos, cuando es necesario conocer las características de resistencia y otras del macizo.

Para poder establecer el plan de investigación y elegir el método de resolución de cualquier tarea planteada es necesario ante todo definir si el macizo rocoso en estudio se considera continuo o discreto.

Métodos de Evaluación de las afectaciones estructurales

1. MÉTODOS EXPERIMENTALES PARA EL ESTUDIO DEL AGRIETAMIENTO

- MÉTODO GELÓGICO
- MÉTODOS DE ESTUDIO DE AGRIETAMIENTO EN CONDICIONES DE PRODUCCIÓN
- MÉTODOS GEOFÍSICOS
- ESTUDIO DEL AGRIETAMIENTO POR MÉTODO DE MODELACIÓN

2. MÉTODOS ANALÍTICOS PARA EL CÁLCULO DEL AGRIETAMIENTO

Otros aspectos a estudiar de gran importancia a la hora de evaluar el grado de afectación estructural de los macizos son: su Estratificación y la Bloquicidad

Estabilidad de obras subterráneas

Por estabilidad de las excavaciones subterráneas se define la capacidad que ellas poseen de conservar la forma y dimensiones requeridas de su sección transversal durante todo el tiempo previsto de explotación.

La estabilidad del sistema macizo-excavación depende de un gran número de factores, entre ellos los más importantes son:

- Propiedades físico-mecánicas de las rocas.
- Grado de agrietamiento del macizo y unido a esto el número de sistemas de grietas existentes, sus orientaciones respecto a la dirección de la excavación, material del que están rellenas las grietas, entre otros aspectos.
- Tensiones actuantes en el macizo (antes y después de hecha la excavación).
- Ubicación espacial de la excavación en el macizo.
- Método de laboreo empleado.
- Cantidad de agua e hidráulica del macizo.



En la actualidad uno de los problemas más debatidos en la esfera de la Mecánica de Rocas y la Construcción Subterránea, es como valorar la estabilidad de las excavaciones subterráneas, desde el punto de vista cuantitativo. Actualmente para tal efecto existen numerosos criterios, los cuales se basan en el empleo de diferentes indicadores que permiten clasificar el macizo en categorías, según su estabilidad.

Formas de Pérdida de Estabilidad

Sobre la base de los estudios efectuados por numerosos investigadores y especialistas en la materia se diferencian tres formas principales en que se manifiesta la pérdida de estabilidad en los macizos rocosos:

- Desprendimientos de pedazos o sectores de rocas fracturadas a causa de su propio peso.
- Desplazamiento, deformación y destrucción de la roca en las zonas de concentración de tensiones.
- Desplazamiento significativo de la roca desnuda, sin que se produzca en ella una destrucción apreciable.

Pérdida de Estabilidad por Desprendimiento

La pérdida de estabilidad del macizo por el desprendimiento a causa del propio peso de una zona fracturada es característica de los macizos rocosos afectados estructuralmente (estratificados, agrietados, con planos de clivaje y otros).

El mecanismo con que se produce esta pérdida de estabilidad es bastante simple de explicar. El peso de la roca que yace sobre la excavación, en un determinado sector, es mayor que la resistencia al cortante de la roca, por lo que esta se separa del macizo y cae en la excavación (ver Figura).

El pronóstico de la posible ocurrencia de este fenómeno es bastante difícil debido al gran por ciento de causales que en él pueden incidir. Para este estudio, habitualmente se parte de un modelo de bloque para representar al macizo (este modelo considera al medio discreto).

Pérdida de Estabilidad por Desplazamiento, Deformación y Destrucción de la roca en el contorno de la excavación

En este caso la pérdida de estabilidad se produce cuando la magnitud de las tensiones actuantes en el contorno de las excavaciones sobrepasan el valor de la resistencia existente en el macizo.

La condición de estabilidad del macizo, en el caso más general, viene dada por la siguiente expresión:

$$\sigma - R_c < 0$$

Criterios para la evaluación de la estabilidad del macizo rocoso

Como se dijo anteriormente existen numerosos criterios para evaluar la estabilidad del macizo rocoso. En el presente trabajo se hace referencia a los métodos más difundidos para la evaluación de la estabilidad, relacionando su empleo al modelo geomecánico más representativo del macizo y a la forma preponderante en que se produce la pérdida de estabilidad, tratando en lo posible de sistematizar este análisis.

- 1. Evaluación de la estabilidad del macizo con el empleo de criterios ingenieriles empíricos (conocidos como clasificaciones geomecánicas)**

2. Muchos autores parten del criterio de comparar las tensiones actuantes con la resistencia que ofrece el macizo rocoso, o sea se plantea que la excavación es estable cuando se cumple la siguiente condición.

$$\mathbf{R - \sigma > 0}$$

Siendo:

R : Resistencia del macizo, MPa

σ : Tensión actuante, MPa.

A partir de este criterio general se plantean una serie de expresiones que con un mayor o menor grado de precisión cualifican la estabilidad del macizo rocoso.

3. Otro criterio para valorar la estabilidad es a partir de la formación y dimensiones de una zona de destrucción alrededor de la excavación. Este criterio se considera más generalizado que sus similares y permite tener en cuenta durante la evaluación de la estabilidad: la forma y dimensiones de la sección de la excavación, la relación existente entre las tensiones principales que actúan en el macizo y sus direcciones.

4. Para evaluar la estabilidad del macizo rocoso, en los que a su destrucción antecede la deformación plástica, se utiliza el criterio deformacional de resistencia, dado por la expresión:

$$\varepsilon_t = \varepsilon_e + \varepsilon_p = \pi_p \cdot \varepsilon_e$$

Siendo:

ε_t : Deformación total (Límite).
 ε_e : Deformación elástica
 ε_p : Deformación plástica
 π_p : Parámetro que indica las características plásticas de las rocas, se determina por la expresión:

$$\pi_p = \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_e}$$

Este comportamiento está caracterizado para un modelo elasto-plástico. Se estudia el caso de una excavación de sección circular de radio R_0 en un medio elasto-plástico con plasticidad limitada, considerando un campo tensional inicial hidrostático ($\lambda = 1$). Para este caso hasta una profundidad dada H el macizo se comporta como un medio elástico y los componentes de las tensiones se pueden determinar por las siguientes expresiones:

$$\sigma_R = \gamma H \left(1 - \frac{R_0^2}{R^2} \right)$$

$$\sigma_\theta = \gamma H \left(1 + \frac{R_0^2}{R^2} \right)$$

Siendo:

R: Distancia del punto examinado al centro de la excavación.

Alrededor de la excavación se producirán solamente los desplazamientos radiales (U).

$$U = \frac{\gamma H}{2G} \cdot \frac{R_0^2}{R}$$

Si se analiza un punto del contorno de la excavación se tiene que ($R=R_0$) y los valores de las tensiones y deformaciones serán:

$$\sigma_R = 0, \quad \sigma_\theta = 2\gamma H \quad y \quad U = \frac{\gamma HR}{2G}$$

Para evaluar la estabilidad, en esta situación, en que se producen deformaciones plásticas en el contorno de la excavación se recomienda emplear el criterio de comparación de las tensiones actuantes con la resistencia real del macizo, pero afectada esta por un coeficiente que tenga en cuenta las características plásticas del medio; o sea:

$$K_c \gamma H < R_c^m \cdot K_{ee}$$

Siendo:

R_c^M : Resistencia lineal a compresión del macizo rocoso.

K_{ee} : Coeficiente de elevación de la estabilidad del macizo rocoso que posee propiedades plásticas. Este coeficiente se puede obtener por la expresión:

$$K_{ee} = 1 + \frac{1}{\text{sen } \rho} \left(\pi_p^{\text{sen } \rho} - 1 \right)$$

El sentido físico de este coeficiente (K_{ee}), que siempre es mayor que 1 consiste en que el macizo al poseer característica plásticas es afectado menos por la concentración de tensiones.

5.Valoración de los desplazamientos del macizo rocoso en los contornos de las excavaciones

Otra vía usada, por algunos autores e institutos de investigación, para evaluar la estabilidad del macizo y que es inherente a la segunda y tercera forma de pérdida de estabilidad (según el modelo geomecánico de macizo que se estudie) es la que se basa en comparar los desplazamientos que sufre el macizo en el contorno de las excavaciones con valores tomados como patrones y que determinan determinados estados de estabilidad.

Afectaciones dinámicas en minas subterráneas

- Desprendimientos súbitos de gases y roca.
- Estallidos (explosiones) de roca.
- Afectaciones sísmicas
- Otras afectaciones



Desprendimiento súbito de roca y gases.

Este fenómeno se define como una destrucción súbita de un sector del macizo acompañado por una intensa trituración de la roca y el mineral y su lanzamiento hacia la excavación con el desprendimiento simultáneo de gases.

Las características generales y rasgos de los desprendimientos súbitos de gases son:

- La formación de una masa de roca triturada .
- El lanzamiento de un volumen de roca por la excavación.
- Formación de sectores huecos en el macizo que quedan relleno de material triturado.
- Gran desprendimiento e gases.
- Daño inferior al que origina la explosión de roca.

La fuerza o escala del desprendimiento se evalúa por : las dimensiones de la sección transversal y el volumen de los vacíos formados ; cantidad de roca lanzadas (toneladas) y cantidad de gas desprendido (m^3).

Además en muchos casos se utiliza el denominado coeficiente de desprendimiento de gas (η), el que se obtiene de la relación entre la cantidad de gas desprendido (N) y el volumen de material lanzado (Q) ; o sea .

$$\eta = \frac{N}{Q} \frac{(m^3)}{(T)}$$

A medida que crece la escala del desprendimiento el valor del coeficiente η crece.

Otro índice de interés es la intensidad del desprendimiento (I) ; o sea la relación entre la cantidad de material desprendido (Q) o de gas desprendido (N) con respecto a la dirección del proceso de lanzado (t)

$$I = Q / t ; N / t$$

Condiciones de manifestación de los desprendimientos súbitos de roca y gases.

Las condiciones de manifestación de estos fenómenos pueden ser muy variadas. Como tendencia se puede plantear que la peligrosidad de su manifestación, su frecuencia e intensidad crece con el aumento de:

- La profundidad de los trabajos.
- La presión de los gases.
- Ángulo del buzamiento
- Potencia del cuerpo mineral.
- Cercanía de los trabajos a zonas de afectaciones tectónicas.

Estallido (explosión) de Roca.

Se produce por la destrucción súbita (frágil) de un sector del macizo, proceso durante el cual tiene lugar una intensa fracturación, trituración y lanzamiento de la roca y/o mineral en la excavación. El golpe se acompaña de sonido muy agudo, afectaciones al macizo circundante y formación de polvo.

Condiciones para que se produzcan las explosiones de roca.

Los estallidos de roca se pueden producir para determinadas conjugaciones de las condiciones geológicas y de las minero-técnicas. Esta conjugación puede tener las más diversas características y esta vinculada a la influencia que ejercen muchos factores, los cuales no solo determinan las condiciones necesarias para que él se produzca, sino también su intensidad y características de manifestación.

Entre los factores geológicos que condicionan la manifestación de las explosiones de roca tenemos:

- Existencia de mineral lo suficientemente resistente y elástico
- Que exista por el techo y piso del mineral capas potentes de roca resistente.

- Suficiente profundidad de la excavación (la profundidad crítica varia según la resistencia de la roca y el mineral).
- Fuerte afectación tectónica.
- Realización de labores mineras cercanas a zonas de afectaciones.

Las afectaciones técnico-mineras que más favorecen la manifestación de los estallidos (explosiones) de roca son:

- La realización de los trabajo de explotación dejando pilares.
- El corte del espacio de explotación por un gran numero de excavaciones preparatorias y de corte .
- Realización de trabajos con frente largo y al encuentro.
- Extracción de pilares muy cargados.
- La acción de cargas adicionales en el macizo durante la realización de los trabajos y las voladuras.

El foco de los estallidos mineros son sectores del macizo en donde tiene lugar una alta concentración de energía potencial dada por su compresión elástica (pilar de mineral y roca circundante, hastiales de excavaciones preparatorias) que se encuentran en un estado tensional límite.

Por ende la existencia de un estado límite de las tensiones en sectores del macizo, condicionada por la acción de la presión actuante(gravitacional, tectónico, etc.) y en ocasiones complementada por la acción del empuje de agua pueden considerarse la principal causa de los estallidos o explosiones de roca .

Como es lógico en muchos casos desempeña un rol condicionante las cargas adicionales que reproducen durante la actividad minera y vienen siendo la gota que llena la copa y producen el desencadenamiento del proceso.

Pronóstico de los estallidos de roca.

El pronóstico de la explosión de roca tiene en cuenta 3 aspectos.

- Definir los sectores del macizo rocoso potencialmente peligrosos y valorar la profundidad a partir de la cual el riesgo de explosión aumenta.
- Determinar los sectores del macizo en los que se pueden producir los estallidos .
- Definir cuando se podrían producir las explosiones de roca.

Afectación de los terrenos y obras de superficie por los trabajos subterráneos

- Fenómeno éste muy conocido, frecuente en muchas zonas mineras subterráneas y muy estudiado, en lo fundamental en lo que se refiere a la medición de los desplazamientos de los terrenos de superficie y afectación a las obras; pero no tan estudiado en lo que respecta a la dinámica del macizo (desplazamientos) y al mecanismo de acción que se produce desde el momento en que se hace el vacío (excavación) y su influencia en el desarrollo de este proceso y consecuencias con el tiempo.



Diseño, construcción y control de taludes en canteras y minas a cielo abierto

- Sobre los movimientos de masas (deslizamientos de taludes y laderas) por los eruditos en la materia se ha escrito mucho y existe mucho material de gran rigor y nivel científico. No está en igual nivel de desarrollo lo referente al diseño y construcción de los taludes en las canteras y minas a cielo abierto (suelo o roca), por lo que en ocasiones en aras de un mayor efecto económico se crean focos de riesgo por características potenciales de inestabilidad en los taludes.



FIN

GRACIAS