

FLUJO EN MEDIOS POROSOS Y FRACTURADOS

Por: Ing. Miguel Angel Chávez M.

Profesor del IIEA

Existen dos conceptos completamente opuestos para abordar la Hidráulica del Subsuelo, sin embargo de lo cual constituyen dos aspectos muy importantes para la ingeniería.

Se trata de estudiar el agua bajo dos puntos de vista distintos; así, el agua como un bien de la naturaleza, esto es, el agua ocupando los acuíferos que pueden ser explotados para bien del hombre y por otra parte, el agua con su incidencia negativa en las propiedades de los materiales usados como fundación o en todo caso como parte de las obras de ingeniería.

En lo concerniente al presente Seminario, la primera parte tratará sobre la hidráulica de los acuíferos o depósitos de agua que se encuentran en la naturaleza, en tanto que una segunda y tercera parte se entra al análisis del flujo de agua tanto en suelos como en rocas, haciendo énfasis en estas últimas y estableciendo la diferencia sustancial existente entre flujo en medios porosos y flujo en medios fracturados, para el caso de aplicaciones en las obras de ingeniería.

INTRODUCCION A LA HIDRAULICA DE ROCAS

ANALISIS GEO-ESTRUCTURAL APLICADO A HIDRAULICA DE ROCAS

Cuando se mapea empleando conocimientos de geología estructural, es posible apreciar que las fracturas en los macizos rocosos, no tienen una orientación arbitraria. Se tiene una distribución espacial que está ligada justamente a los fenómenos geológicos que han generado acciones mecánicas, durante un determinado proceso geológico. Así las fracturas pueden estar agrupadas en FAMILIAS, con un rango direccional dado; estas fracturas más o menos distintas confieren al macizo una estructura pseudo regular.

Desde pocos años atrás se está aplicando el llamado método hidroestructural, el cual permite definir la orientación y la frecuencia de fracturas. Además permite definir el macizo rocoso en bloques elementales, con una morfología dada y más aún permite obtener las propiedades hidráulicas de las fracturas. De esta forma se pueden evaluar también las propiedades hidráulicas tridimensionales, lo cual es posible gracias a las mediciones de permeabilidad.

El levantamiento hidroestructural consiste en un levantamiento sistemático de las fracturas en las zonas de interés. Este levantamiento se realiza no sólo en los afloramientos, sino también en trincheras calicatas y perforaciones en tal forma de obtener una información tridimensional. El trabajo en sí, se lleva a cabo en tres dimensiones en lo posible ortogonales (perpendiculares entre sí).

Se debe construir una ficha para anotar la información, considerando los siguientes diecisiete parámetros:

- 1 El número de la ficha
- 2 Lugar y zona de levantamiento
- 3 Espesor de la cubierta en el punto levantado
- 4 Posición geográfica del punto levantado
- 5 Orientación en el plano de un eje de observación
- 6 Tipos de roca de acuerdo al elemento estructural en estudio
- 7 Tipo de elemento estructural
- 8 Orientación (Rumbo/Buzamiento) del elemento estructural
- 9 Continuidad
- 10 Espesor del elemento estructural
- 11 Naturaleza del reemplazamiento
- 12 Grado de abertura libre
- 13 Sumideros (vertientes de agua)
- 14 Descomposición (peso de sedimento que tenía en el pasado el elemento estructural)
- 15 Abertura de las fracturas
- 16 Rugosidad y ángulo de fricción apreciado (de las fracturas)
- 17 Extensión o continuidad de las fracturas.

Se debe dejar un espacio importante en el cuadro para las observaciones

Los datos de un análisis estructural pueden ser procesados mediante un procedimiento estadístico tradicional como el de la red de Schmidt, en este tratamiento, se supone que las fracturas, tienen todas un mismo peso que equivale a decir, que tienen una misma

magnitud y que sólo interviene el número de fracturas. Es evidente que se tiene un gran problema, pues todas las fracturas no juegan un mismo papel en el flujo.

El tratamiento de la información se hace mediante las llamadas Ponderaciones Hidráulicas que constituyen un procedimiento estadístico computarizado que sirve para establecer categorías o rangos de categorías de fracturas en un macizo rocoso, en base a un conjunto de características pre-establecidas. De esta forma, se pueden caracterizar mejor las fracturas, tomando como base su propiedad de permitir el flujo de agua.

Existen dos ponderaciones a saber:

Primera ponderación, que permite analizar las fracturas de gran espesor y extensas. La fórmula se expresa así:

$$P(N) = 1 + \text{Espesor}(N) \times \text{Continuidad}(N)$$

P(N), peso que afecta a N elementos estructurales.

El parámetro Espesor (N), es definido para cada caso, rangos de espesor.

La Continuidad se define como la relación entre la longitud de la discontinuidad y una longitud de referencia en tal forma que varía entre 0 y 1.0

Por ejemplo, en casos prácticos, se puede considerar el coeficiente Espesor (N), variando de 1 a 5, para espesores de 0, 1, 5, 10, 30 mm.

Los parámetros de Espesor (N) y Continuidad (N), pueden ser definidos en las columnas 10 y 9 del cuadro de parámetros adjunto.

Segunda Ponderación:

Selecciona las fracturas hidráulicas eficaces, se define por:

$P(N) = 1 + (H20) + B (\text{ABERTURA LIBRE})$.
Los coeficientes (H20) y B (Abertura libre), son fijados a priori. Por ejemplo, se establecen flujos de agua de 0,05,3,10 litros/min, con lo que se definen 5 clases, las cuales pueden estar afectadas por los coeficientes ponderadores 0 a 4.

El coeficiente (Abertura Libre), sin reemplazamiento siguiendo el mismo criterio anterior.

Los análisis de ponderación se hacen en los diagramas de SCHMIDT, donde se representa estos detalles mediante concentraciones por unidad de superficie. Los resultados de esta representación, son utilizados para definir las direcciones idóneas de los ensayos de CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA en el macizo rocoso, determinándose finalmente la anisotropía.

En los diagramas adjuntos, se presenta la resolución de un problema de un túnel, mostrándose las curvas de igual concentración, según el procedimiento normal de Schmidt (sin ponderación) considerando 915 elementos. Otra graficación es hecha con una primera ponderación, para 1440 elementos, en tanto que un tercer gráfico muestra la segunda ponderación de 552 elementos, mostrándose cuatro concentraciones. En dichos gráficos se puede constatar que sin ponderación se obtuvieron cinco familias, en tanto que con ponderación se tiene tres familias (f_1, f_2, f_3).

CORRELACION ENTRE PARAMETROS ESTRUCTURALES E HIDRAULICOS

La conductividad hidráulica \bar{k}_h o módulo de permeabilidad, es la media geométrica entre las permeabilidades principales del medio, así:

$$\bar{k}_h = \sqrt[3]{k_1 \cdot k_2 \cdot k_3}$$

Donde k_1, k_2, k_3 , son las permeabilidades en las direcciones ortogonales.

Se ha llegado a determinar que el valor de \bar{k}_h , en un macizo rocoso está en relación directa a la intensidad de fracturación, a la abertura de las fracturas y a la extensión de las mismas.

Por otra parte es importante señalar que la anisotropía hidráulica puede ser determinada, en base al conocimiento de los valores de k_1, k_2 y k_3 para cada familia de fracturas.

En base a experiencias prácticas se ha determinado que se puede obtener información sobre la orientación e intensidad de la fracturación y también una información sobre la abertura de las fracturas, en base a la adopción de una hipótesis que relaciona el parámetro \bar{k}_h , con el valor medio de los esfuerzos efectivos y al no tener estos, el peso de tierra de cobertura.

La extensión de las fracturas puede ser cuantificada por medio del parámetro Continuidad C de las fracturas, dato que puede ser obtenido en un afloramiento. Cuando no es posible obtener ningún

dato sobre la Continuidad, este parámetro puede ser también asumido, apoyándose también en el criterio del estado de esfuerzos. Con este fin se dedujo la ley siguiente:

LEY DE CORRELACION PARA LA DETERMINACION DE LA CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA:

Se expresa por la siguiente relación:

$$\bar{k}h = k n^{-\alpha} C^{-\beta} e^{-\gamma}$$

$\bar{k}h$ = Conductividad hidráulica (valor global)

C = Continuidad

e = Esfuerzo efectivo (es un parámetro que está relacionado a la abertura de fracturas)

k = Coeficiente de proporcionalidad

n = Densidad de fracturación, que es número promedio de fracturas por unidad de longitud, en una dirección arbitraria.

α , β y γ Son exponentes que se agregan a la ley de correlación, dependiendo del caso analizado. En otras palabras, dichos exponentes deben ser obtenidos en las experiencias particulares.

Si no ha sido posible determinar la continuidad C, la ley de correlación puede reducirse a:

$$\bar{k}h = k' n^{\alpha'} e^{-\beta'}$$

En esta relación sólo deben ser determinadas experimentalmente, los valores de α' y β' , con lo que el módulo $\bar{k}h$ puede ser determinado, aunque se trate de un valor cualitativo.

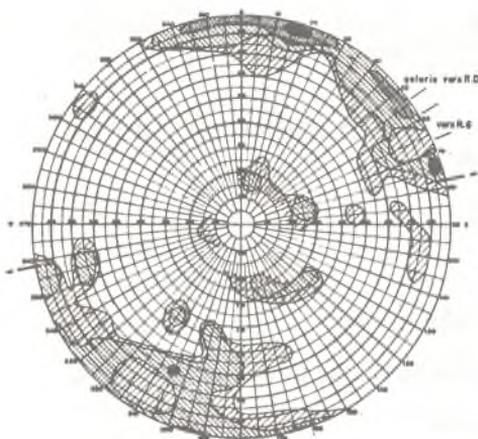
Es importante anotar que el número de fracturas encontradas en una dirección, determina que la permeabilidad, sea en sentido perpendicular a esa dirección.

En general, es posible determinar una ley de correlación, como la indicada en primer término, en base a la realización de ensayos de permeabilidad o mejor dicho de conductividad hidráulica.

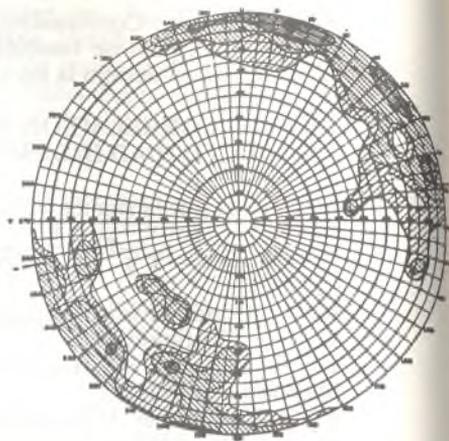
ESCALA DE FRACTURACION

En Hidráulica de rocas, la escala de fracturación reviste un importante carácter, contenido en los dos aspectos siguientes:

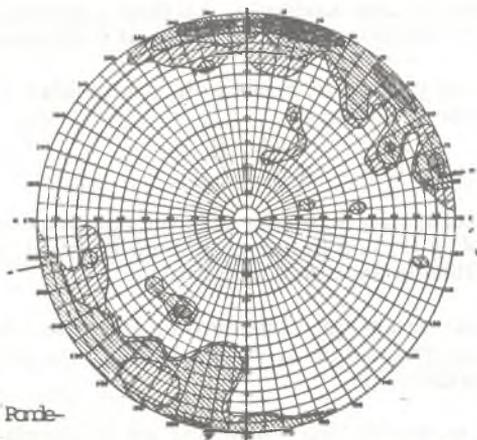
-Definición de criterios que permitan hacer una distinción entre medios continuos y medios discontinuos.



a) Tratamiento sin ponderación: 915 elementos



b) Tratamiento en primera ponderación: ponderados 1440 elementos



c) Segunda ponderación: Ponderados 552 elementos.

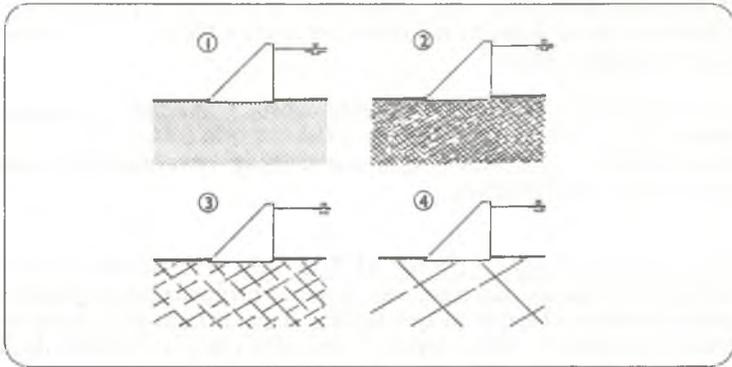
Concentración 0  2  5  10 

Familias principales de fracturación: F1:N110° E, F2:N135° E, F3: N 170° E.

-Determinación de la variación de parámetros hidráulicos, en función del volumen de interés y más aún por la extensión de los parámetros hidráulicos, medidos en los ensayos, aplicables a las dimensiones de la obra.

Esto se conoce con el nombre de EFECTO DE ESCALA.

Criterio de Continuidad y discontinuidad del Medio.- Primeramente, al analizar un problema, se debe definir si el medio es continuo o discontinuo. Para visualizar este problema, es posible plantear un ejemplo práctico de una presa esquematizada en la figura siguiente, para el caso de cuatro medios diferentes:



En el diagrama 1 se constata un típico medio homogéneo. En el diagrama 2, se tiene una fundación altamente fracturada de más de 10.000 fracturas en la sección; en este caso se dice que el medio es continuo.

En el caso 3, donde existen entre 100 a 1.000 fracturas, se considera que la hipótesis de discontinuidad es necesaria. En el caso 4, donde existen menos de diez fracturas, el medio es obviamente discontinuo, y deben ser analizadas las fracturas individualmente.

Efecto de Escala.- Muchos parámetros geomecánicos varían, cuando el volumen de macizo rocoso considerado cambia. Se ha constatado que las propiedades hidráulicas de un macizo rocoso decrecen cuando las dimensiones del macizo aumentan. La dirección de la fractura también cambia.

Es en consecuencia, muy importante comparar la extensión de las fracturas (métricas o decamétricas, etc.) y el radio de acción de los ensayos hidráulicos. Una extrapolación de resultados de medidas puntuales puede conducir a graves errores.

Frente a estos inconvenientes, la solución es conocer, lo mejor posible al macizo rocoso, definiendo mallas de fracturación y simulando el flujo.

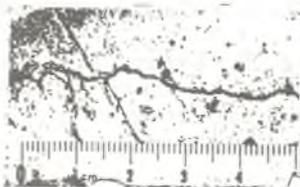
LEYES DEL FLUJO EN LAS ROCAS

Es necesario reconocer que existen varios factores y parámetros que influyen en el flujo en las rocas, los cuales pueden clasificarse en dos categorías, a saber:

- Los factores o parámetros cuantificables y medibles, durante la prospección de campo o los ensayos (laboratorio e In situ).
- Los factores y parámetros que son siempre cuantificables, aunque no medibles en la práctica.

MACIZOS SIN FRACTURAS ABIERTAS.- Practicamente no existen macizos rocosos sin fracturas, a pocas profundidades, pueden no existir fracturas abiertas ya que éstas se han cerrado por causa de un estado de esfuerzo, muy elevado. En estos casos el análisis de flujo se asimila exclusivamente a un medio poroso, en el cual, la ley general de Darcy ($v=ki$) puede ser aplicada. Los mayores avances a este respecto han sido desarrollados en las técnicas de la explotación petrolera.

ANALISIS DEL FLUJO EN UNA FRACTURA ELEMENTAL.- En la naturaleza las fracturas abiertas son los caminos que prefiere el agua, dichas fracturas no son ni planas ni continuas, tal como se puede apreciar en la figura siguiente:



Además de lo antes indicado, las fracturas tienen "labios" los cuales han sido modelados en el transcurso del tiempo geológico, pues se han producido: disoluciones, erosiones, reemplazamientos, recristalizaciones, fenómenos debido sobre todo, a la circulación del agua.

En muchos casos prácticos se hace muy difícil definir a abertura media de las fracturas, también evaluar la rugosidad o hablar de la velocidad de flujo. Por estos motivos un análisis de este tipo involucra complejidad.

Para poder iniciar el análisis del flujo en una fractura, se parte de condiciones simplificadas. Así, se asume la existencia de fracturas abiertas sin reemplazamiento, considerando la existencia de "puentes de roca".

En las rocas, las fracturas se caracterizan fundamentalmente por presentar un valor alto de rugosidad relativa, definiéndose así, a la relación KA/Dh ; en donde:

KA = rugosidad absoluta, se define como la altura de asperezas

Dh = diámetro hidráulico, que es el doble de la abertura "e" de la fractura.

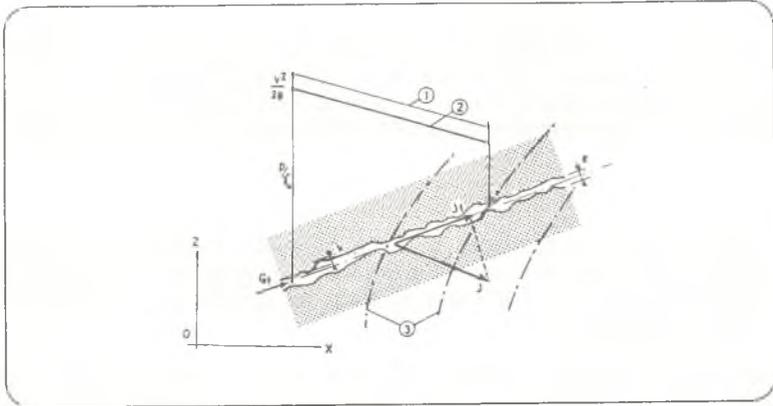
Las variaciones que presenta la abertura de las fracturas, sectorialmente, son las que provocan la existencia de un coeficiente de pérdida de carga, este coeficiente es más importante que el coeficiente de pérdida de carga que se define en la ley de POISEUILLE.

Las leyes de flujo en una fractura elemental se define así:

En régimen laminar $v = K_L J_L$

En régimen turbulento $v = K_T J_T$

En las dos relaciones "v" es la velocidad media del flujo; K_L es la conductividad hidráulica de la fractura en régimen laminar y K_T en régimen turbulento. J_L es la proyección ortogonal del gradiente hidráulico ($J = -\text{grad } \phi$), sobre el plano de fractura.



α es el grado de no linealidad del flujo. $\alpha = 0.5$ para el caso de un régimen turbulento, completamente rugoso. En flujo laminar $\alpha = 1$. Es valor de α cambia muy poco en incrementos grandes de velocidad de flujo.

En el flujo de fracturas el paso del flujo laminar a flujo turbulento se produce con número de REYNOLDS ($Re = v^* Dh/\nu$) muy bajos, pudiendo encontrarse valores de 10 a 100. El valor de Reynolds decrece cuando el valor a la rugosidad relativa aumenta.

Las conductividades hidráulicas K_f y K'_f se definen así:

$$K_f = \frac{k^* g c^2}{12\alpha C} \quad K'_f = 4k^* \sqrt{g c} \log \frac{d}{KA/Dh}$$

En estas expresiones:

g = aceleración de la gravedad

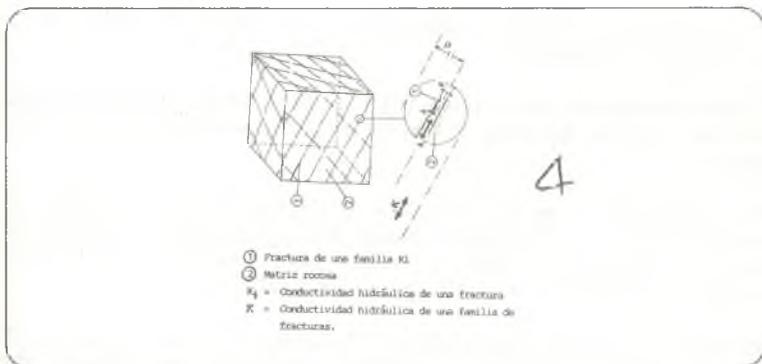
k^* = grado de separación de la fractura = $\frac{\text{superficie abierta}}{\text{superficie total de la fractura}}$

c = abertura media de las fracturas.

Los coeficientes c y d se definen así:

Cuando $KA/Dh > 0,033$, que es el caso generalizado en rocas:
 $C = 1 + 8,8 (KA/Dh)^{1.5}$ y $d = 1.9$

Cuando las fracturas tienen relleno, la conductividad hidráulica es igual a la permeabilidad del relleno.



CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA DE UN SISTEMA DE FRAC- TURAS

Se considera que el macizo rocoso está constituido por varias familias de fracturas planas y paralelas.

Para conocer las propiedades hidráulicas de un medio como el descrito, es suficiente conocer la conductividad hidráulica K (en régimen laminar o turbulento) de cada familia de fracturas, se puede plantear ecuaciones similares al caso de una fractura unitaria:

Para flujo laminar $V = K J_f$
 Para régimen turbulento $V = K^c J_f^{ac}$

La determinación de la ESCALA del fenómeno tiene un papel muy importante por cuanto, dentro de un macizo rocoso existen continuas y fracturas discontinuas. Por este motivo se consideran los siguientes dos casos de análisis, separadamente:

Sistemas de Fracturas Continuos.- La conductividad hidráulica direccional de un sistema de fracturas continuos se deduce directamente de la conductividad hidráulica de las fracturas elementales y se aplica tanto en régimen laminar como turbulento, así:

$$K = \frac{e}{b} K_f + km$$

Esta ecuación se obtiene relacionando el caudal de flujo de la sección total del macizo.

Tal como se aprecia en la figura (*) y "e" es la abertura media de las fracturas, b es la distancia y Km es la permeabilidad de la matriz rocosa.

Frecuentemente en la práctica Km es despreciable en relación al término $\frac{e}{b} K_f$. En cambio cuando no hay fracturas o están cerradas (e = 0, $K_f = 0$) el único término para el cálculo es Km y corresponde al caso de los macizos sanos (sin fracturas).

Sistema de Fracturas Discontinuas.- Es necesario indicar que en el caso de fracturas continuas, cuando se hacen los cálculos de aplicación de las fórmulas anteriores, se determina que, aún las fracturas más finas, tienen conductividades hidráulicas elevadas. Así, por ejemplo, una fractura de 0.1 mm de abertura, puede tener una conductividad hidráulica de un orden de 1×10^{-4} cm/s; si la familia de fracturas es de la misma frecuencia y tiene una abertura media de 1 mm, la conductividad hidráulica es de 0.1 cm/s.

Estos valores teóricos calculados son casi siempre superiores a aquellos que se miden en la práctica.

Lo que ocurre es que las fracturas, aún cuando presenten aberturas notables, tienen una extensión limitada; teniendo en consecuencia una discontinuidad de sus tramos abiertos. En un medio de ese tipo, el flujo es evidentemente anisotrópico.

Las fracturas están interrumpidas, sin comunicación y por tanto cortocircuitan el flujo, cuando esto ocurre en la dirección de tales fracturas.

Como las fracturas tienen un potencial de flujo constante, la circulación de agua se produce a través de la matriz rocosa, utilizando también los caminos que puede dejar la fracturación secundaria de la roca.

Al resolver este problema es de considerar tres dimensiones y usar un computador, obteniéndose las conductividades hidráulicas, para cualquier distribución geométrica.

El valor de la conductividad hidráulica en una primera aproximación, se calcula con la relación siguiente, en la dirección de las fracturas:

$$K = km [1 + 1/2 (1/L - 1 - 1/L)]$$

Es necesario anotar que la conductividad hidráulica K depende también de la frecuencia de fracturas B/L ; además, la función $K/km = f(1/L, b/L)$ sólo se puede determinar numéricamente. Se considera que la relación antes indicada es aceptable para L/b comprendida entre 3 y 6.

En el caso que estamos analizando, la conductividad hidráulica transversal es igual a km , que es la permeabilidad de la matriz.

En la expresión anterior se define como grado de anisotropía a la relación:

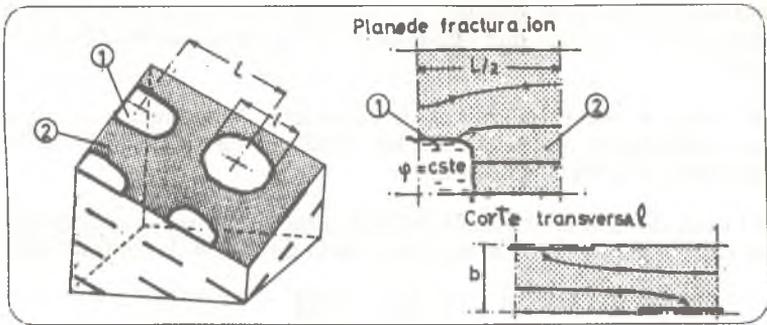
$$1 + 1/2 (1/L - 1 - 1/L)$$

En el caso de macizos rocosos con fracturas discontinuas, se define como grado de discontinuidad al coeficiente $1/L$, el cual es igual a su vez a la raíz cuadrada del grado de separación de la superficie de fracturación (K_s).

Se define como frecuencia de fracturas a la relación b/L .

Cada parámetro de la fórmulas antes indicadas se muestra en los gráficos correspondientes.

Es importante aclarar, que en el caso de juntas de estratificación, se aplican las relaciones anteriores.



Sistemas de Fracturas discontinuas:

1. Fractura abierta
2. Matriz rocosa.

