

Máster Universitario en Túneles y Obras Subterráneas



ÁREA: A MÓDULO: MECÁNICA DE ROCAS

PERMEABILIDAD DE MACIZOS ROCOSOS

Artículo adicional a la ponencia:

Sudipta Sarkar, M. Nafi Toksöz y Daniel R. Burns. Fluid flow Simulation in fractured reservoirs.

Bibliografía de consulta:

Custodio y Llamas, 1976. Hidrología Subterránea. Omega

Evans, D., Nicholson, T., Rasmussen, T. 2001. Flow and transport through unsaturated fractured rock. American Geophysical Union

Freeze y Cherry, 1979. Groundwater. Prentice Hall

I.S.R.M., 1981. Basic Geotechnical Description of Rock Masses

Ponente: L. Jordá

Día: A rellenar por Secretaría

Hora: A rellenar por Secretaría

PERMEABILIDAD DE MACIZOS ROCOSOS



Leopoldo Jordá Gujarro
Departamento de Ingeniería del Terreno - UPV
leoorgu@trr.upv.es

I. Introducción

Tal y como sucede con el resto de las principales propiedades geotécnicas de los macizos rocosos, cuando hablamos de permeabilidad de rocas hacemos referencia a dos conceptos distintos:

- Permeabilidad de la matriz rocosa: que está directamente relacionada con la porosidad de la matriz, de forma análoga a la permeabilidad de los suelos. A esta permeabilidad se le suele llamar primaria.

- Permeabilidad del macizo rocoso: relacionada tanto con la porosidad de la matriz rocosa como con las características de fracturación del macizo rocoso. A esta permeabilidad se le suele llamar secundaria.

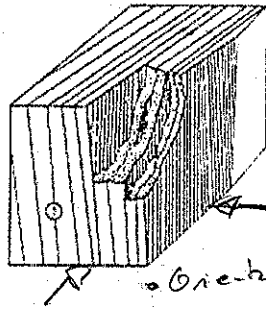


Ambas permeabilidades sólo coincidirán en el caso particular de un macizo rocoso no fracturado. En todos los demás casos la permeabilidad del macizo rocoso será sensiblemente superior a la permeabilidad de la matriz.

Perm. macizo >> perm. matriz.

I. Introducción

La permeabilidad de los macizos rocosos, precisamente por estar fuertemente controlada por la fracturación, es claramente anisótropa. Si existe una única familia de juntas, continuas y persistentes, la permeabilidad del macizo rocoso será máxima en la dirección paralela a la de fracturación, y prácticamente nula (o igual a la permeabilidad de la matriz) en el resto de direcciones.



$$\Rightarrow k_v \gg k_h \approx k_{\text{primaria}}$$

\leftarrow en muchas juntas en poco espesor
 \leftarrow Orientación relativa de la esfera y el núcleo
en pocas juntas dentro un gran logitil

I. Introducción

Debido a esta clara anisotropía la permeabilidad del macizo rocoso no puede ser considerada como un escalar, sino como una matriz:

$$K_{\text{macizo rocoso}} = \begin{bmatrix} k_{xx} & k_{xy} & k_{xz} \\ k_{yx} & k_{yy} & k_{yz} \\ k_{zx} & k_{zy} & k_{zz} \end{bmatrix}$$

I. Introducción

Por este motivo, el flujo a través de un macizo rocoso fracturado es extremadamente difícil de caracterizar y modelizar. Por un lado, ya es complicado de por sí modelizar con exactitud la red de fracturación del macizo. Por otro lado, las juntas tienen continuidades, aperturas y rugosidades variables, en ocasiones tienen rellenos de distintas características. Las juntas pueden ser interceptadas por otras, condicionando el flujo a través de ellas, etc....

Algunos autores citan que la mayoría de situaciones, el 80% de las fracturas del macizo rocoso no intervienen de forma significativa en el flujo.

Una complicación añadida aparece teniendo en cuenta el efecto escala, que también influye considerablemente en otras propiedades del macizo rocoso. A medida que aumenta las dimensiones de elemento de macizo rocoso considerado la permeabilidad del conjunto tiende a hacerse mayor, ya que aumenta la probabilidad de involucrar juntas más continuas o más abiertas:

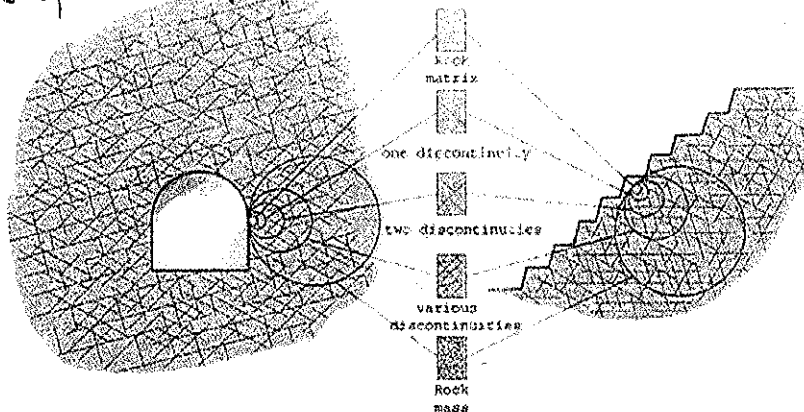
El flujo se realiza con aproximaciones

- si sólo hay una junta de J resolución P_{-1}
- las juntas con escape de continuidad no interviene en el flujo.

- En general sólo una P_{-1} de J es la que nos va a influir en el flujo
- como no intervienen 2 o más P_{-1} se debe realizar como homogéneo.

I. Introducción

Factor escala \rightarrow $\sigma > \sigma_{TN}$ se aumenta las J afectadas y por tanto la permeabilidad (relativa) aumenta. A efectos de flujo ocurre lo mismo.



II. Permeabilidad primaria

La permeabilidad primaria depende básicamente de la porosidad de la matriz rocosa, esto es, de la relación entre el volumen de huecos y el volumen total.

La porosidad de la matriz rocosa sana depende de la textura y de la génesis de la roca. La alteración y meteorización de la roca a lo largo de su vida geológica interviene aumentando la porosidad "inicial".

Valores típicos:

□ Rocas sedimentarias:

→ Puede oscilar entre: $0 < n < 90\%$

→ Para una arenisca media, $n \approx 15\%$

→ n disminuye con la profundidad

→ n aumenta con la edad (desgaste) *alteración de los minerales*

□ Rocas ígneas y metamórficas:

→ Normalmente, $n < 1$ a 2%

→ n aumenta con la edad (desgaste) hasta $n = 20\%$ o más

Varía con la edad geológica y con la profundidad
 $> \text{Edad} \rightarrow \text{porosidad}$
 $> \text{profundidad} < \text{porosidad}$

Desperdible dentro del problema
Silvo 5 - 7 meteorización

II. Permeabilidad primaria

Algunos ejemplos de porosidades típicas de la matriz para distintos tipos de rocas:

ROCAS BÁSICAS		< 0,5
GRANITO <i>≈ Ignea</i>	SANO	0 - 1
	ALTERADO	1 - 5
	MUY ALTERADO	5 - 15
	DESCOMPUESTO	> 15
CALIZA	MÁRMOL	< 1
	COMPACTA	1 - 8
	MEDIA-FLOJA	8 - 12
	TOBA/ARECIFAL/CRETA	20 - 40
ARENISCA	COMPACTA	< 3
	MEDIA	3 - 15
	FLOJA	> 15
ESQUISTOS PIZARRAS LUITAS	MUY COMPACTOS	< 3
	COMPACTOS	3 - 7,5
	MEDIOS	7,5 - 20
	FLOJOS	> 20

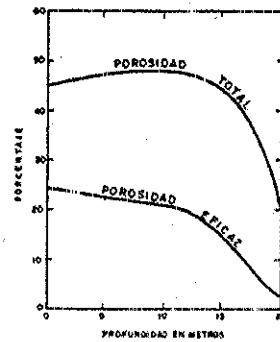
II. Permeabilidad primaria

La meteorización puede multiplicar por 10 o 20 veces la porosidad primaria de la matriz sana. Por este motivo es frecuente, especialmente en las rocas ígneas y metamórficas, una disminución de la porosidad con la profundidad y, por tanto, de la permeabilidad primaria.

La poro-primaria se confina dentro y se reduce y/o a través

Esta reducción se produce igualmente en la permeabilidad secundaria, pero en este caso debido al cierre de juntas debido a las mayores presiones de confinamiento.

Variación de la porosidad con la profundidad en unos micaesquistos cuarcíticos (Stewart, 1964)



II. Porosidad de la matriz rocosa

En muchas rocas la porosidad es un buen indicador del grado de alteración de la roca. Por ejemplo, en el caso de los granitos, la relación entre porosidad de la matriz y alterabilidad es bien conocida:

POROSIDAD (%)	ALTERABILIDAD DE LOS GRANITOS
< 1	MUY DÉBIL
1 - 2,5	DÉBIL PERO APRECIABLE
2,5 - 5	FUERTE
> 5	MUY GRANDE

II. Permeabilidad primaria

Permeabilidad de la matriz rocosa (no meteorizada) de algunas rocas (en m/s):

	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}	10^{-10}	10^{-11}	10^{-12}	10^{-13}
Arenisca			←	→						
Caliza y dolomía			←	→						
Lutitas						←	→			
Granito						←	→			
Pizarra								←	→	
Esquisto				←	→					
Rocas metamórficas						←	→			
Rocas volcánicas				←	→					
Sal									←	→

Hudson y Harrison, 2000

Dos casos para Flujo a través de J:

- Limpia: se ha l. junta como un conducto
- Con relleno

III. Flujo a través de una junta sin relleno

Teóricamente, el flujo a través de una fractura aislada se puede modelizar suponiendo que la junta es un conducto de espesor igual a la apertura de la junta. En el caso de un macizo con una única familia de juntas persistentes y continuas, de características más o menos constantes, si es posible establecer un cálculo del flujo relativamente aproximado.

En una junta aislada (sin relleno) el flujo se puede considerar unidimensional. En este caso, la permeabilidad de la junta será:

$$k_j = \frac{a^3}{12 \mu}$$

donde:

a: apertura de la junta

μ : viscosidad dinámica =

Por lo tanto, la "permeabilidad de una junta" depende del cubo de la apertura de ésta.

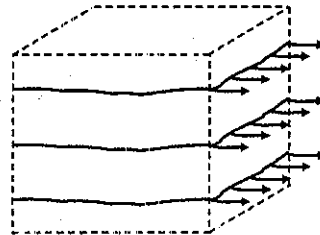
III. Flujo a través de una junta sin relleno

Suponiendo régimen laminar, el caudal que circula por una junta será:

$$q = -k_j \cdot i = -\frac{a^3}{12 \cdot \mu} i \quad \text{Donde } i \text{ es el gradiente hidráulico}$$

Si s es la separación entre las juntas de una familia, existirán $1/s$ juntas por cada metro de sección transversal al plano de la familia. El flujo a través de una sección transversal unitaria de macizo rocoso será:

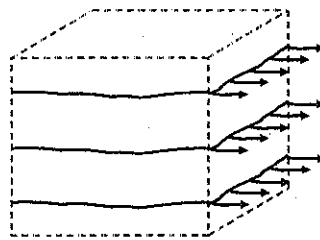
$$Q = -\frac{a^3}{12 \cdot \mu \cdot s} i$$



$$i = \frac{\Delta \text{Potencial}}{L \text{ flujo}} \left\{ \frac{z_{NF} - z_{FN}}{L \text{ flujo}} \right.$$

III. Flujo a través de una junta sin relleno

$$Q = -\frac{a^3}{12 \cdot \mu \cdot s} i$$



Y por lo tanto, la permeabilidad del macizo rocoso en la dirección x o y será:

$$k_x = k_y = \frac{a^3}{12 \cdot \mu \cdot s}$$

Mientras que $k_z = k_{\text{primaria}}$

IV. Flujo a través de una junta con relleno

El flujo a través de una junta con relleno permeable se puede considerar igualmente unidimensional. En este caso, rige la ley de Darcy de flujo en medios porosos.

Sea una junta continua de apertura "a" y con un relleno de permeabilidad k_{relleno} . El flujo a través de una junta será:

$$q_j = -k_{\text{relleno}} a i \rightarrow \text{Ley de Darcy de Permeabilidad}$$

Los anchos de la junta

Si el espaciamiento de la familia de juntas es "s", el número de juntas que atraviesa una sección transversal definida por un plano perpendicular al de la junta será 1/s. Por lo tanto, el flujo total a través de una sección unitaria del macizo rocoso perpendicular a la familia de juntas será:

$$Q = \frac{-k_{\text{relleno}} a i}{s}$$

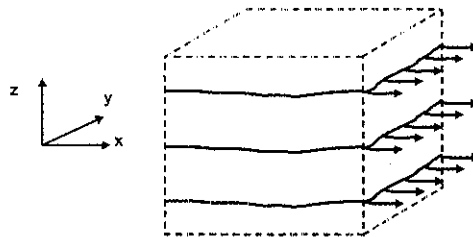
Entonces, la permeabilidad del macizo rocoso en cualquier dirección paralela al plano de la junta será

IV. Flujo a través de una junta con relleno

Análogamente al caso sin relleno, tendremos:

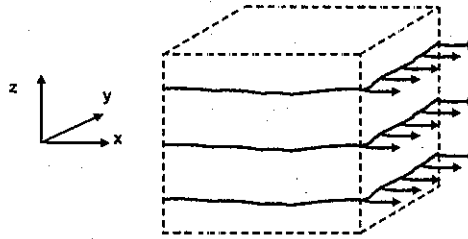
$$k_x = k_y = \frac{k_{\text{relleno}} \cdot a}{s}$$

$$k_z = k_{\text{primaria}}$$



V. Generalización. Análisis 2D

Sea un macizo rocoso con una única familia de juntas, limpias o sin relleno, con una apertura y espaciamiento característicos. El tensor de permeabilidad del macizo rocoso será, en el plano X, Z:



$$K = \begin{bmatrix} k & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Donde k es la permeabilidad del macizo rocoso en la dirección del eje x , es decir:

$$k = \frac{a^3}{12 \cdot \mu \cdot s} \quad \text{Para una familia de juntas sin relleno}$$

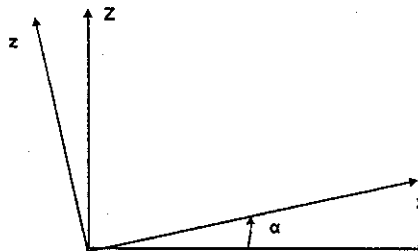
$$k = \frac{k_{\text{relleno}} \cdot a}{s} \quad \text{Para una familia de juntas con relleno}$$

V. Generalización. Análisis 2D

Para cualquier sistema de coordenadas:

$K' = T^T \cdot K \cdot T$ donde T es la matriz de cambio de ejes, para una rotación del plano X, Z igual a α respecto del centro de coordenadas:

$$T = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix}$$



V. Generalización. Análisis 2D

Entonces, la matriz de permeabilidad del macizo rocoso será, para cualquier sistema de ejes seleccionado:

$$K' = T^T \cdot K \cdot T = \begin{bmatrix} k \cos^2 \alpha & -k \cos \alpha \cdot \text{sen} \alpha \\ -k \cos \alpha \cdot \text{sen} \alpha & k \cdot \text{sen}^2 \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{xx} & k_{xz} \\ k_{zx} & k_{zz} \end{bmatrix}$$

Por lo tanto, el flujo a través de una sección unitaria, perpendicular al plano XZ, del macizo rocoso (siempre con la hipótesis de una única familia de juntas) será:

$$q = \begin{bmatrix} q_x \\ q_z \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} k_{xx} & k_{xz} \\ k_{zx} & k_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_x \\ i_z \end{bmatrix}$$

Esta expresión, aun siendo válida sólo para el caso de una única familia de juntas, permite realizar una estimación del flujo en el macizo rocoso válida en bastantes situaciones reales, ya que suele ser frecuentemente que el flujo principal se produzca a favor de una única familia de juntas, especialmente en rocas sedimentarias

En el caso de zonas frías de juntas se considera como un macizo homogéneo.

VI. Casos singulares. Macizos rocosos muy fracturados y macizos rocosos masivos

En muchos problemas de mecánica de rocas (por ejemplo, en el caso de la estabilidad de taludes), los macizos rocosos altamente fracturados (con valores del RQD inferiores al 25 %) se pueden asimilar a un medio continuo y considerarlos, a efectos de cálculo, como un suelo. En el caso del flujo a través del macizo rocoso ocurre lo mismo, y si el macizo está intensamente fracturado se puede trabajar con un valor "medio" e isótropo de la permeabilidad para obtener una estimación razonable.

Es posible, por tanto, obtener valores genéricos de la permeabilidad, obtenidos a partir de por ejemplo ensayos Lugeon, y trabajar con la metodologías tradicionales de flujo a través de un medio poroso (redes de flujo, método de los fragmentos, etc....).

Por el lado contrario, en macizos rocosos no fracturados, o con una baja densidad de juntas de escasa continuidad o no conectadas, se proceder de la misma forma, asimilando el flujo al de un medio continuo.

VII. Rocas sedimentarias

En las rocas sedimentarias la permeabilidad más importante puede ser la primaria o la secundaria. En este tipo de rocas porosidades entre el 10 y el 30% son normales.

En las rocas sedimentarias de grano grueso, en especial los conglomerados y areniscas, si aparecen de forma masiva, sin juntas, la permeabilidad del macizo rocoso será prácticamente la primaria. Lo mismo ocurrirá con el resto de rocas si no están fracturadas. En caso contrario, la permeabilidad suele estar condicionada en mayor o menor medida por la fracturación y por la porosidad de la roca.

Existen dos procesos característicos de las rocas sedimentarias que tienen una influencia muy relevante en la permeabilidad del macizo rocoso:

VII. Rocas sedimentarias

Existen dos procesos característicos de las rocas sedimentarias que tienen una influencia muy relevante en la permeabilidad del macizo rocoso:

Dolomitización: consistente en la sustitución de cristales de calcita en las calizas por cristales de magnesio, dando lugar a dolomía. Los cristales de magnesio ocupan un volumen un 13% inferior a los de calcita, lo que da lugar a un aumento muy considerable de la porosidad y, por tanto, de la permeabilidad primaria.

Karstificación: como es bien sabido, los procesos de disolución pueden formar oquedades de múltiples formas y tamaños. En ocasiones estas oquedades se conectan formando grandes conductos en el macizo rocoso en los cuales puede desarrollarse flujo a gran escala, incluso en régimen permanente. En otras ocasiones da lugar a microkarst, que a efectos prácticos suponen un aumento de la permeabilidad primaria.

VIII. Rocas ígneas y metamórficas

Las rocas ígneas y metamórficas se caracterizan por lo general por una baja porosidad de la matriz rocosa, normalmente inferior al 3% en roca sana. La permeabilidad de la matriz es por tanto extremadamente reducida, alcanzando valores en torno a $10^{-11} - 10^{-13}$ m/s (Stuart *et al*, 1954).

En macizos rocosos de este tipo es habitual que el grado de fracturación decrezca considerablemente con la profundidad. No obstante, a diferencia de lo que sucede con los macizos sedimentarios, debido a la alta resistencia de la matriz es posible que a grandes profundidades fracturas de muy elevada continuidad puedan permanecer abiertas. Este hecho ha dado lugar a la aparición de importantes flujos localizados en macizos metamórficos a grandes profundidades, en las que no era de esperar la existencia de un flujo importante.

Un caso característico (citado por Freeze *et al*, 1979) es el del túnel de San Jacinto, en California. Excavado en granitos con zonas de esquistos, cuarcitas y mármoles, se midieron caudales en torno a 1000-1100 l/s a 450 m de profundidad. Las presiones hidráulicas se estimaron en torno a los 4,2 MPa.

IX. Rocas volcánicas

Las formaciones de origen volcánico se caracterizan fundamentalmente por tres aspectos:

- I. Elevadísima variabilidad tanto en su porosidad primaria y secundaria, en función de las características del material, la velocidad de enfriamiento, la mezcla con otros materiales, edad, etc.
- I. Existencia de barreras impermeables tanto en la dirección paralela a la colada como en dirección perpendicular a la misma.
- I. Existencia de tubos volcánicos que a efectos hidrogeológicos tienen consecuencias similares a las de la karstificación de las rocas carbonatadas

IX. Rocas volcánicas

La porosidad primaria y secundaria es muy variable, dependiendo del tipo de material volcánico, tiempo de solidificación, edad, etc. En general, si la solidificación se ha producido de forma lenta la porosidad de la roca matriz será muy baja, no superando normalmente el 5 %. Por el contrario, los piroclastos y las coladas de enfriamiento muy rápido pueden presentar porosidad de hasta el 50%.

El proceso de "mezcla" de la colada con los materiales sobre los que ésta discurre pueden dar lugar a bandas de una elevada porosidad.

Con el tiempo puede producirse un proceso un proceso colmatación de huecos y fisuras con materiales finos procedentes de la meteorización de los materiales volcánicos.

En cuanto a permeabilidad secundaria, los procesos de enfriamiento rápido suelen dar lugar a grietas de contracción, que se convierten en un sistema bien definido de fracturas (como en el caso de las juntas verticales que delimitan las típicas columnas de basaltos)

IX. Rocas volcánicas

Algunos valores típicos de permeabilidad en rocas volcánicas (Custodio et al, 1996):

- Piroclastos: máximo no superior a 10^{-2} m/día
- Basaltos miocenos de Canarias: 0,01 – 0,1 m/día
- Ignimbritas y fonolitas: 0,001 - 0,01 m/día
- Coladas basálticas recientes: hasta 1000 – 3000 m/día.

IX. Rocas volcánicas

Las barreras impermeables paralelas a las coladas pueden estar constituidas por:

- Mantos de productos piroclásticos poco permeables (tobas litificadas, cenizas,.....)
- Suelos arcillosos procedentes de la meteorización, formados sobre una colada antes del paso de la siguiente
- Dentro de una misma colada las zonas inferior y superior suelen ser más permeables. A veces la barrera impermeable está constituida por la propia zona central de la colada

Por el contrario, las barreras subverticales corresponden en la gran mayoría de casos a diques.

Los tubos volcánicos, con numerosos ejemplos en las Islas Canarias, dan lugar a galerías que pueden tener una elevada longitud y que tienen un efecto muy similar al del karst.

Descripción cualitativa del flujo a través de las juntas

A efectos de caracterización del macizo rocoso, existe una clasificación de la ISRM del flujo a través de las juntas:

• Descripción de las filtraciones (ISRM, 1981)

Clase	Juntas sin relleno	Juntas con relleno
I	Junta muy plana y cerrada. La junta aparece seca y no parece posible que circule agua.	Relleno muy consolidado y seco. No es posible el flujo de agua.
II	Junta seca sin evidencia de flujo de agua.	Relleno húmedo pero sin agua libre.
III	Junta seca pero con evidencia de haber circulado ocasionalmente agua.	Relleno mojado con goteo ocasional.
IV	Junta húmeda pero sin agua libre.	Relleno que muestra señales de lavado. flujo de agua continuo (l/min).
V	Junta con rezume, ocasionalmente goteo pero sin flujo continuo.	Relleno localmente lavado, flujo considerable según canales preferentes (l/min y presión).
VI	Junta con flujo continuo de agua (estimar el caudal en l/min y la presión).	Rellenos completamente lavados. presiones de agua elevadas.

Bibliografía:

Custodio y Llamas, 1976. *Hidrología Subterránea*. Omega

Evans, D., Nicholson, T., Rasmussen, T. 2001. *Flow and transport through unsaturated fractured rock*. American Geophysical Union

Freeze y Cherry, 1979. *Groundwater*. Prentice Hall

I.S.R.M., 1981. *Basic Geotechnical Description of Rock Masses*