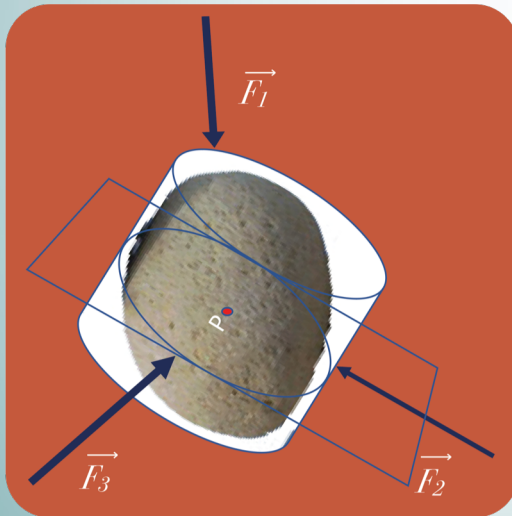


Caracterización geomecánica de suelos y rocas

Tema 6.4 Medida de discontinuidades



Alberto González Díez

Patricio Martínez Cedrún

DPTO. DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y FÍSICA DE LA
MATERIA CONDENSADA (CITIMAC)

Este tema se publica bajo Licencia:

[Creative Commons BY-NC-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Juntas o Discontinuidades

Discontinuidades: Es cualquier plano de origen mecánico o sedimentario que separa los bloques de matriz rocosa en un macizo rocoso.

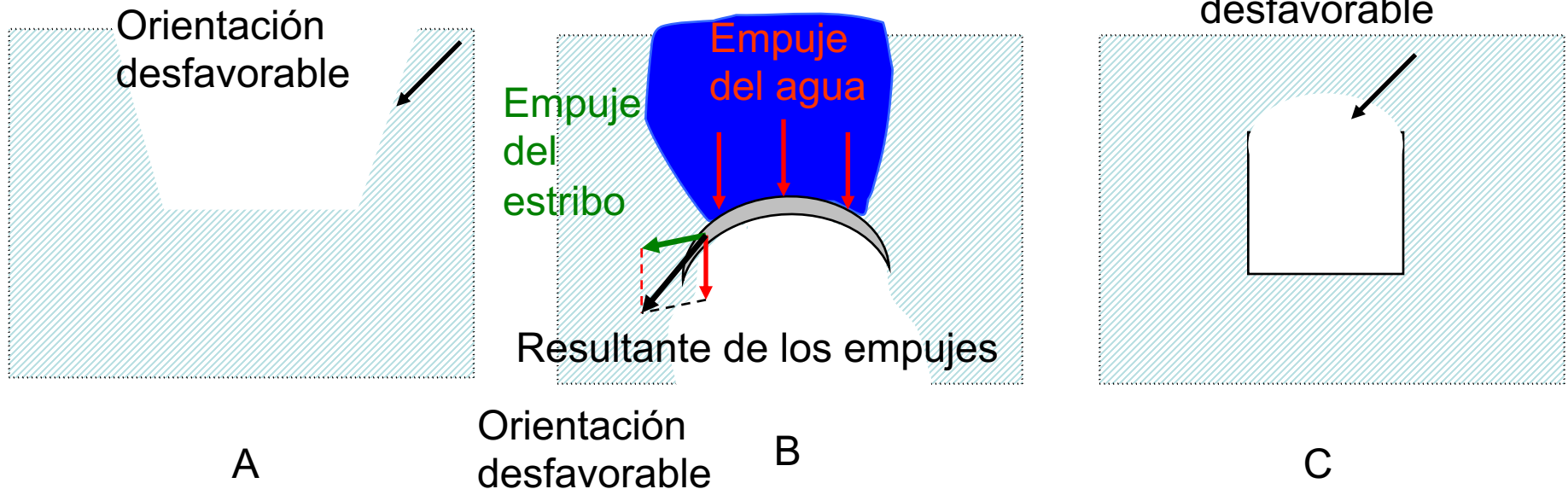
Las discontinuidades o juntas (J_n) condicionan las propiedades y el comportamiento resistente, deformacional e hidráulico del macizo rocoso.

La resistencia al corte de las discontinuidades es el aspecto más importante en la determinación de la resistencia de los macizos rocosos duros fracturados. Para su estimación es necesario definir las características y propiedades de los planos de discontinuidad.

Discontinuidades

Las discontinuidades suponen planos preferentes de alteración, meteorización y fractura, permitiendo el flujo de agua a su través.

La orientación de las discontinuidades influye en la estabilidad de actividades. En la figura inferior se presentan tres ejemplos de orientación desfavorable en obras. A, una excavación; B, una presa; C, Un túnel.

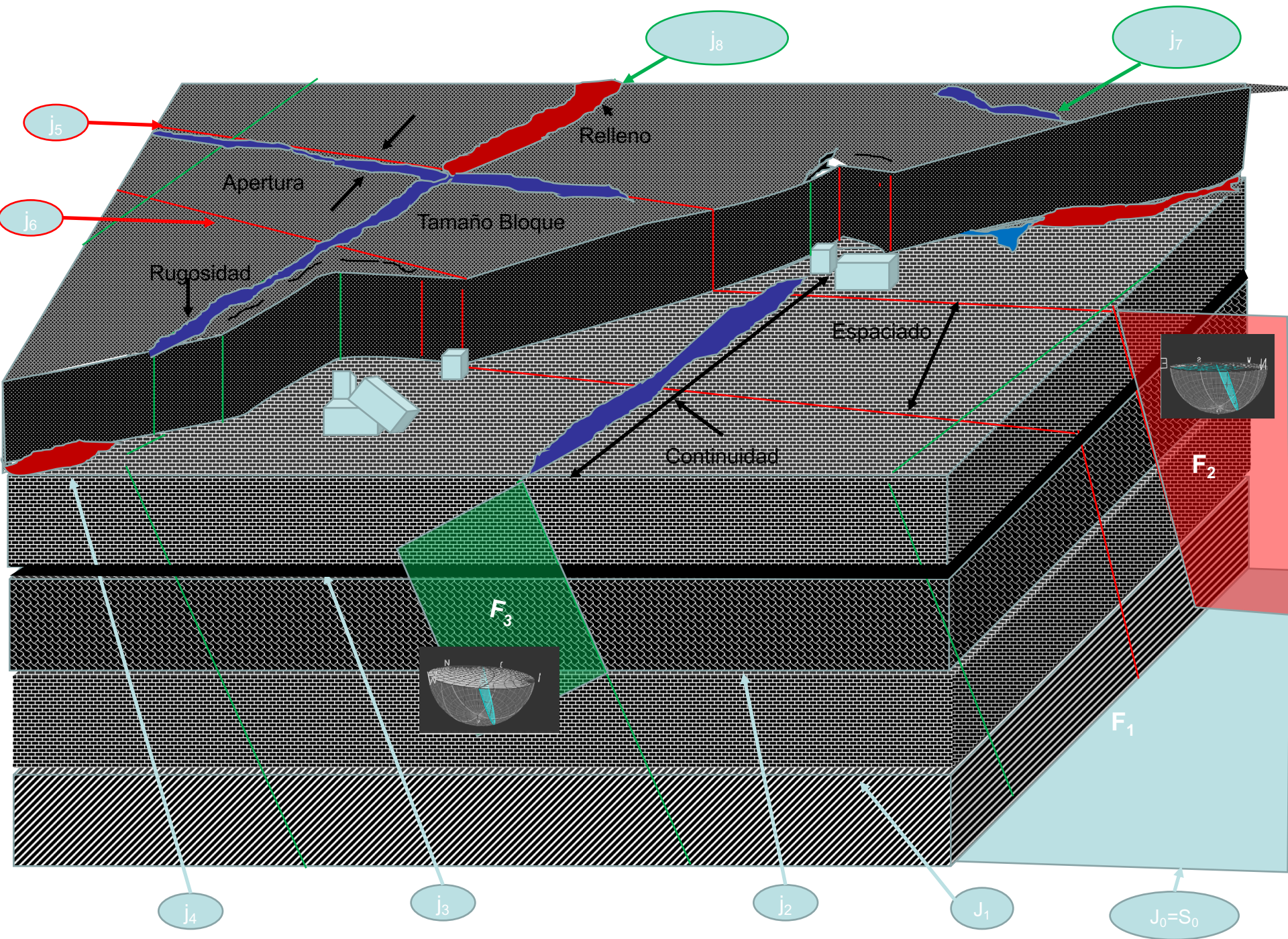


Tipos

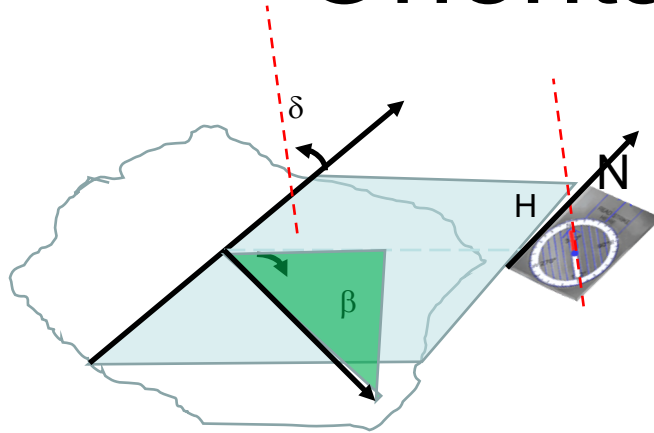
Discontinuidades	Sistemáticas Aparecen en familias	Singulares Aparece un único plano
Planares	Planos de estratificación	Fallas
	Planos de laminación	Diques
	Diaclasas o juntas	Discordancias
	Planos de esquistosidad	
Lineales	Intersección de discontinuidades planares	Ejes de pliegues
	Lineaciones	

Características de las discontinuidades

- Orientación
- Espaciado
- Continuidad
- Rugosidad
- Abertura
- Relleno
- Filtraciones
- Resistencia de las paredes



Orientación



Las discontinuidades sistemáticas se presentan en familias con orientación y características más o menos homogéneas. La medida de orientación de un plano su dirección y buzamiento, o bien su cabeceo o inmersión. La dirección final es una medida estadística.

La dirección relativa y espaciado de las diferentes familias de discontinuidades definen la forma de los bloques de roca que conforman el macizo.

Los tipos de discontinuidades son:

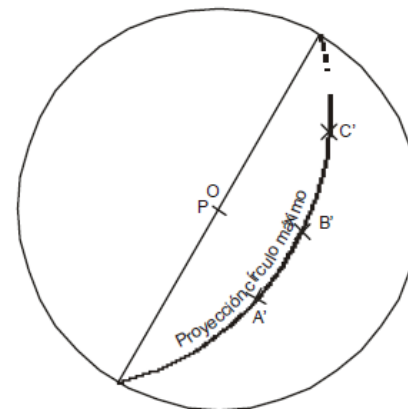
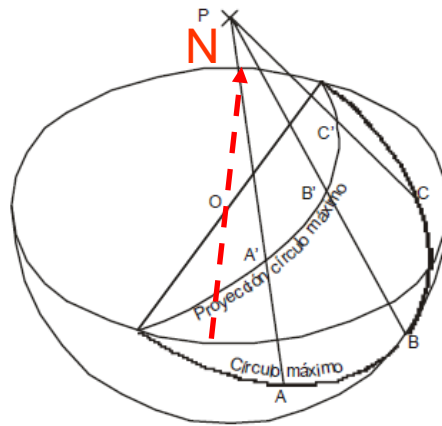
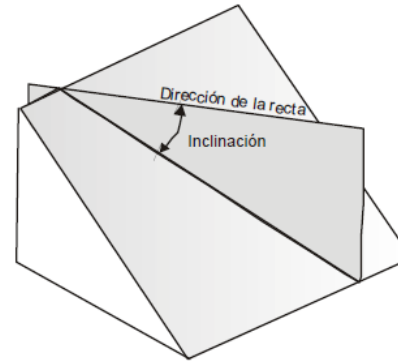
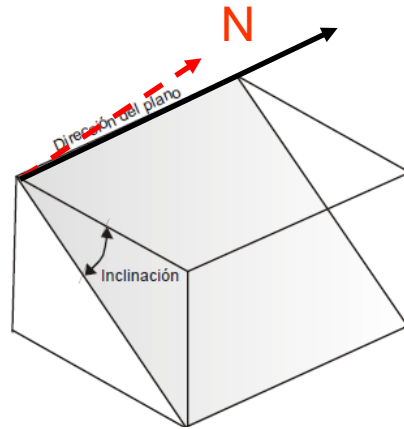
Estratificación	S_0 ,	Esquistosidad	$S_{1,2,3,...,n}$
Fractura-junta	J_0 ,	Familias	$F_{1,2,3,...,n}$

Representación gráfica

La representación gráfica de la orientación de las diferentes familias de discontinuidades puede realizarse mediante:

- Proyección estereográfica, representando los polos o planos con valores medios de las diferentes familias.
- Diagramas de rosetas, que permiten representar un gran número de medidas de orientación de forma cuantitativa.
- Bloques diagrama, permitiendo una visión general de las familias y sus orientaciones respectivas.
- Símbolos en mapas geológicos, que indican los valores medios de dirección y la dirección y valor del buzamiento para los diferentes tipos de discontinuidades (juntas, fallas, foliación, etc.).

Representación gráfica



Representación gráfica

Diagrama de
círculos máximos

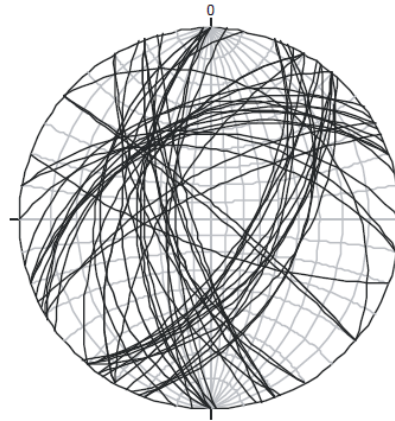
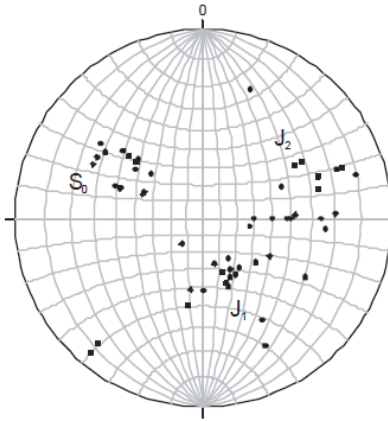
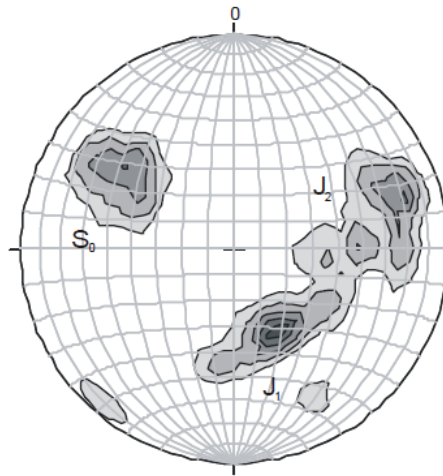


Diagrama de polos

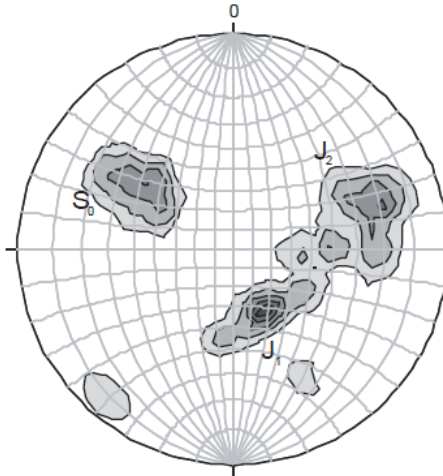


Diagramas de densidad de polos

izquierda Schmidt
(proyección
equiarea)



derecha wulf
(proyección
equiangular)

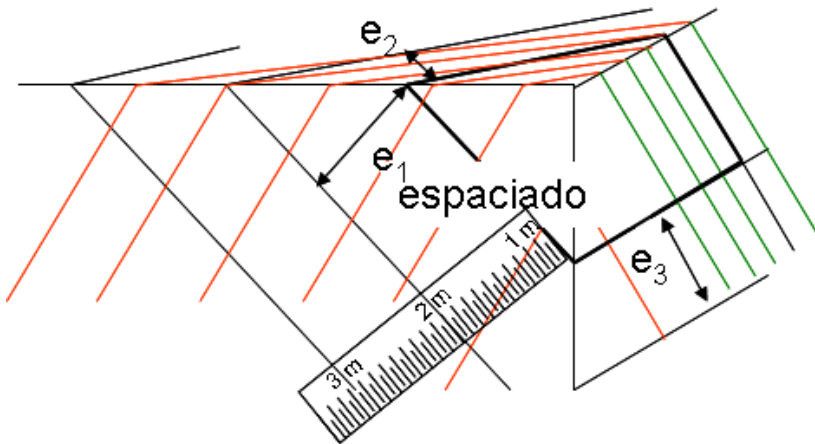


Espaciado

El espaciado es la distancia media perpendicular, entre los planos de discontinuidad pertenecientes a una misma familia.

Por tanto:

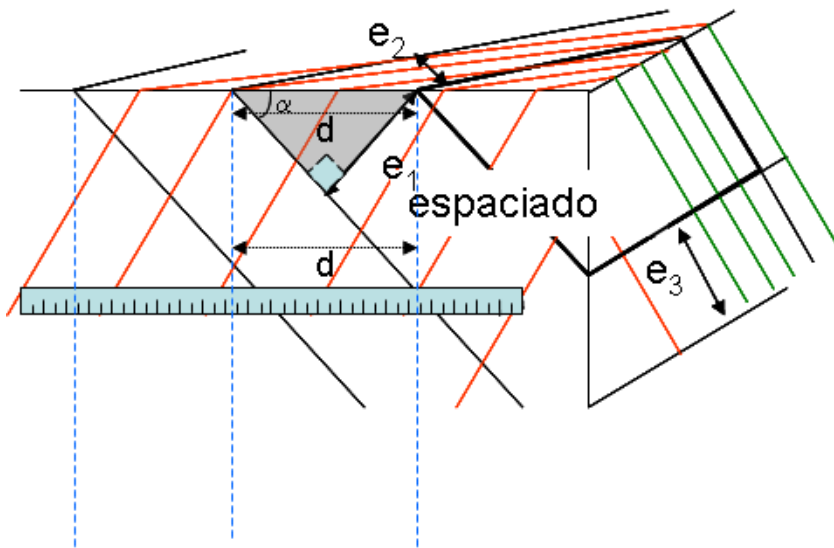
- Define el tamaño de los bloques del macizo rocoso. Y consecuentemente, el papel que la discontinuidad tendrá en el comportamiento mecánico del macizo rocoso.
- Si los espaciados son pequeños la resistencia del macizo rocoso disminuye de forma considerable, pudiendo en casos extremos presentar un comportamiento asimilable al de materiales granulares sin cohesión.
- La conductividad hidráulica de una familia es inversamente proporcional al espaciado, siempre que la abertura de las discontinuidades sea comparable.



Según la escala del trabajo considerada, prevalecerán durante la rotura de un macizo rocoso las propiedades de la matriz rocosa o de los planos de discontinuidad. Así, si los espaciados son mayores a 1 o 2 metros, el comportamiento lo determina la matriz rocosa; con espaciados menores, de varios decímetros a 1 o 2 metros, el comportamiento del macizo lo determinarán los planos de debilidad; si el espaciado es muy pequeño el macizo estará muy fracturado y presentará un comportamiento isótropo, controlado por las propiedades del conjunto de los bloques.

La cinta debe colocarse perpendicular a lo planos registrándose la distancia entre discontinuidades adyacentes.

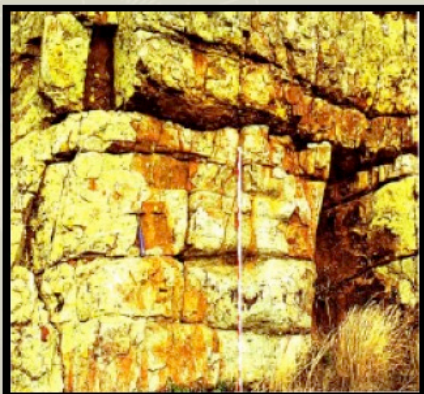
Medida del espaciado



$$e_n = d_n \sin \alpha$$

La medida del espaciado se realiza con una cinta métrica, en una longitud suficientemente representativa de la frecuencia de las discontinuidades, al menos se realiza sobre tres metros, y como norma general, la longitud de medida debe ser de unas 10 veces superior al espaciado.

Por lo general, las superficies expuestas de los afloramientos rocosos no permiten realizar las medidas del espaciado en la dirección perpendicular a los planos de anisotropía, midiéndose espaciados aparentes.



Clasificación del espaciado de discontinuidades según el ISRM, 1981

Descripción	Espaciado
Extremadamente junto	< 20 mm
Muy Junto	20-60 mm
Junto	60-200 mm
Moderadamente junto	200-600 mm
Separado	600-2.000 mm
Muy separado	2.000-6.000 mm
Extremadamente separado	> 6.000 mm

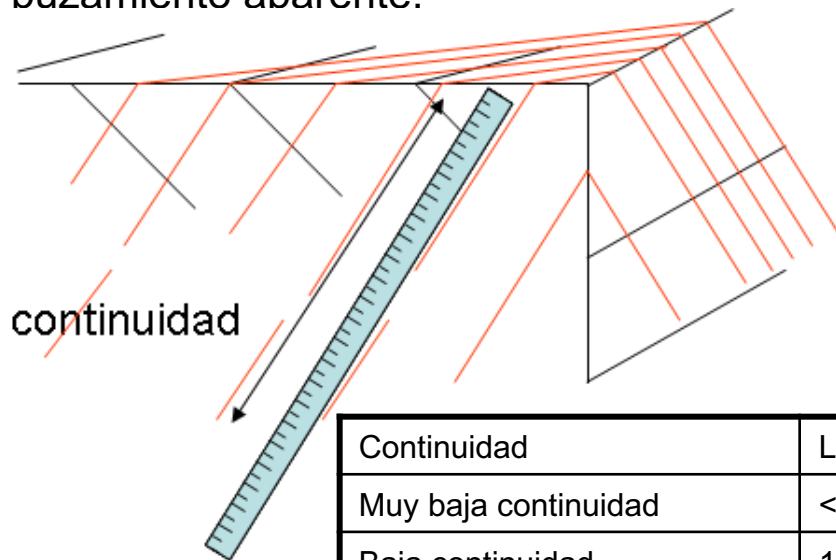
Modificado de Ferrer y González de Vallejo 2007.

Continuidad o persistencia

La continuidad es la extensión superficial de la junta sobre la cara del talud. Dicha extensión o longitud se mide empleando cinta métrica, que se apoya sobre la misma junta. La intersección de la junta con las caras del talud aporta buzamientos aparentes y las continuidades muestran las longitudes de dichos buzamientos aparentes.

Define si la matriz rocosa está involucrada en los procesos de rotura del macizo rocoso.

Parámetro de gran importancia y de difícil cuantificación a partir de la observación de afloramientos en los que normalmente se ven los planos de discontinuidad según su buzamiento aparente.



Continuidad	Longitud
Muy baja continuidad	< 1 m
Baja continuidad	1-3 m
Continuidad media	3-10 m
Alta continuidad	10-20 m
Muy alta continuidad	>20 m

Si el afloramiento permite la observación tridimensional de la discontinuidad se deben analizar las discontinuidades en la dirección y en la dirección de buzamiento.

Las discontinuidades pueden terminarse o no contra otra discontinuidad, este aspecto se tiene que definir en el informe.

Es importante destacar las familias más continuas ya que éstas condicionarán más lo planos de rotura

Rugosidad

Se emplea en sentido amplio para hacer referencia tanto a la ondulación de las superficies de discontinuidad como a las irregularidades o rugosidades a pequeña escala de los planos. Estas irregularidades se definen como de 1º y 2º orden.

Se observa a dos escalas, y según estas se clasifican en :

- las ondulaciones de superficies, a escala decimétrica y métrica, generan superficies planas, onduladas o escalonadas
- Las irregularidades, a escala milimétrica y centimétrica, generan superficies pulidas, lisas o rugosas.

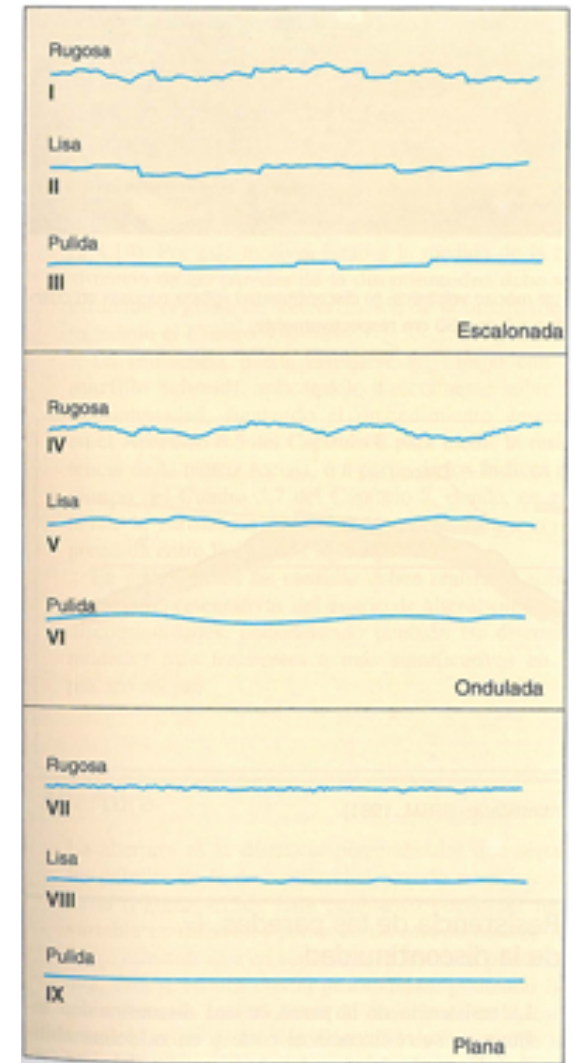
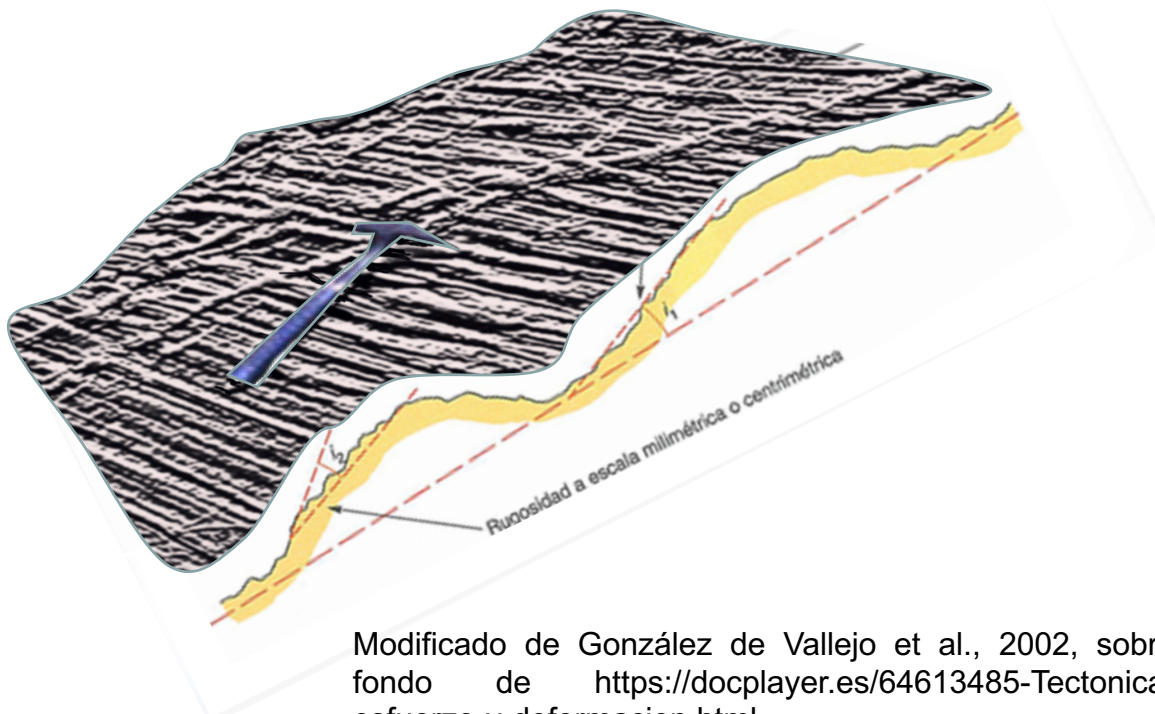
La descripción y medida de la rugosidad tiene como principal finalidad la evaluación de la resistencia al corte de los planos, τ que para discontinuidades sin cohesión puede ser estimada a partir de los datos de campo y de expresiones empíricas.

La rugosidad aumenta la resistencia al corte, decreciendo esta con el aumento de la apertura y en general con el espesor del relleno.

Rugosidad a escala

Se mide con diversos métodos o también puede estimarse, en función de las condiciones del afloramiento.

El método más sencillo es la comparación con perfiles de rugosidad con rango entre 1 y 10 metros.



Modificado de González de Vallejo et al., 2002, sobre fondo de <https://docplayer.es/64613485-Tectonica-esfuerzo-y-deformacion.html>

Medidas de rugosidad

Las medidas cuantitativas de la rugosidad.

Se trata de medidas que se realizan sobre la superficie del plano, a partir de un número elevado de medidas, con el fin de determinar estadísticamente el valor de la rugosidad. Hay que determinar la posible dirección de desplazamiento de los planos, si no realizar medidas para cada posible dirección. Los métodos empleados son:

Perfiles lineales de rugosidad

-Perfiles lineales. Se apoya una regla sobre las rugosidades más salientes y se registra, a intervalos regulares, la distancia entre la regla y la superficie de la discontinuidad (dirección media del plano), obteniéndose así un registro detallado de los valores de x-y a partir de los cuales se puede obtener los ángulos de rugosidad y ondulación. La distancia de medida depende de la escala de las rugosidades. Operativamente junto a la regla se suele instalar un peine que permite la medida de las microrugosidades.

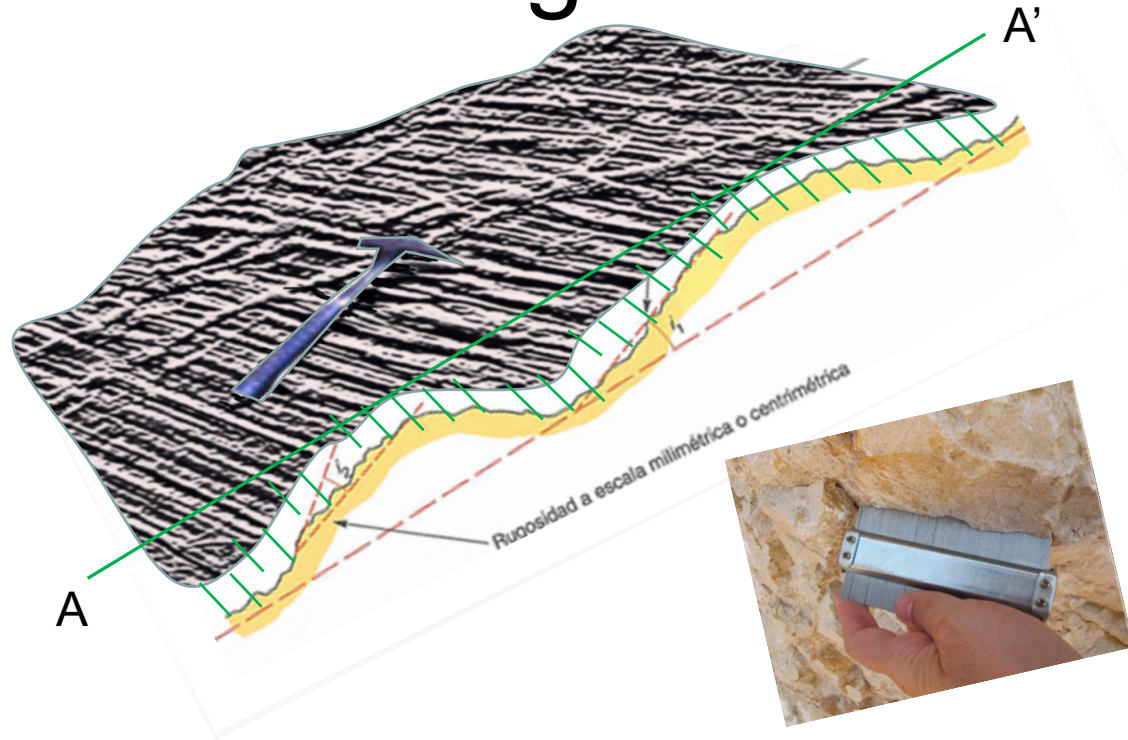


Imagen de medida de la rugosidad de una diaclasa con un perfilómetro. Tomado de Enrique Montalar <https://enriquemontalar.com/el-perfilometro-y-la-rugosidad-de-la-junta/>

Modificado de González de Vallejo et al., 2002, sobre fondo de <https://docplayer.es/64613485-Tectonica-esfuerzo-y-deformacion.html>

Media de la rugosidad sobre discos

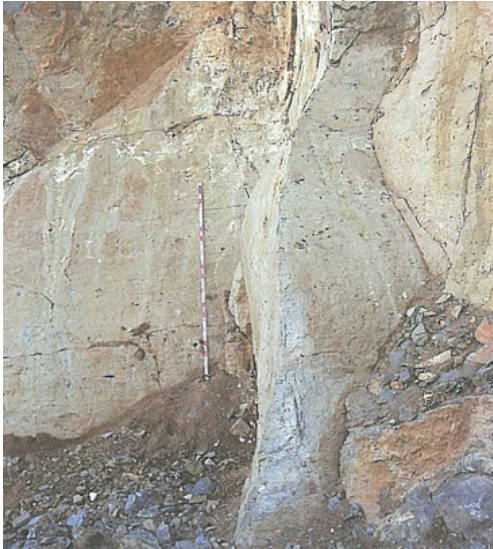
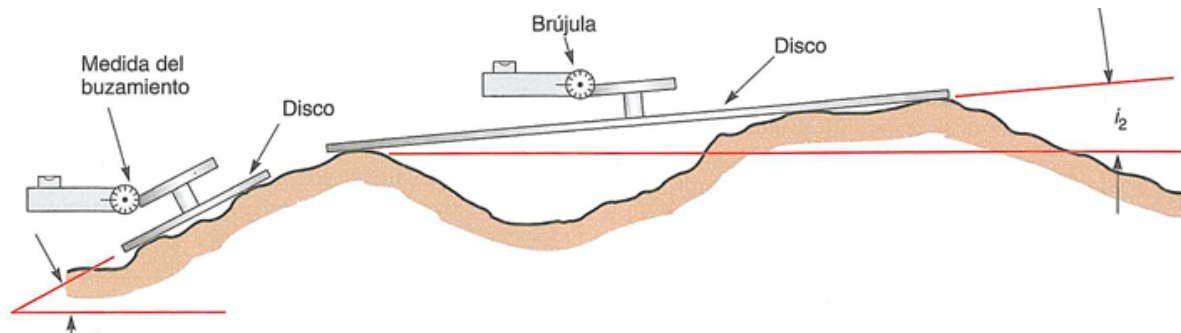
-Métodos de discos. Este método se utiliza para medir ángulos de rugosidad del plano de discontinuidad en varias direcciones, muy útil cuando no se conoce la posible dirección del movimiento. Los resultados aportan las variaciones de la superficie de discontinuidad respecto a su buzamiento real. El método consiste en colocar unos discos planos de diferente diámetro (5, 10, 20, o 40 cm, según la escala del trabajo) sobre distintas zonas de la discontinuidad y medir con una brújula la dirección y buzamiento del disco. Los resultados se pueden representar estereográficamente con respecto a diferentes posibles direcciones de deslizamiento o movimiento del plano.



Discos para la medida de la rugosidad. Tomado de Suárez Burgoa, 2015

Rugosidad

Superior. Métodos de discos para la medida de la rugosidad; Inferior izquierda, discontinuidad rugosa lisa con alta continuidad; inferior centro, discontinuidad plana rugosa; inferior derecha, media mediante disco (tomados de González de Vallejo et al., 2002 y Suárez Burgoa, 2015).



Resistencia de las paredes de la discontinuidad

Influye en la resistencia al corte y deformabilidad.

Depende del tipo de matriz rocosa, del grado de alteración y de la existencia o no de relleno.

Teóricamente, en discontinuidades sanas y limpias, la resistencia debería de ser casi la misma que la de la matriz rocosa, pero generalmente es inferior debido a la meteorización de las paredes (las paredes de las discontinuidades suele ser lugares de paso de fluidos y la meteorización se acentúa en dichos entornos). Por esta razón se estima el grado de meteorización de las paredes.

Se puede estimar mediante el esclerómetro o martillo de Schmidt, aplicándolo directamente sobre la discontinuidad. La resistencia de la pared rocosa estará comprendida entre los grados R_0 y R_6 .

Las medidas se realizan sobre paredes representativas del estado de las discontinuidades.

r valor del rebote del martillo de Schmidt sobre la pared de la discontinuidad

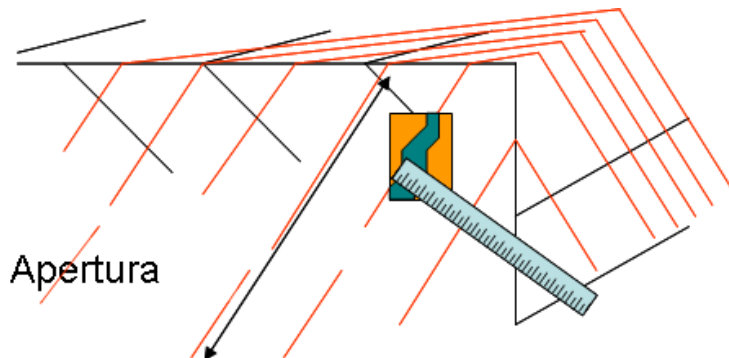


Apertura

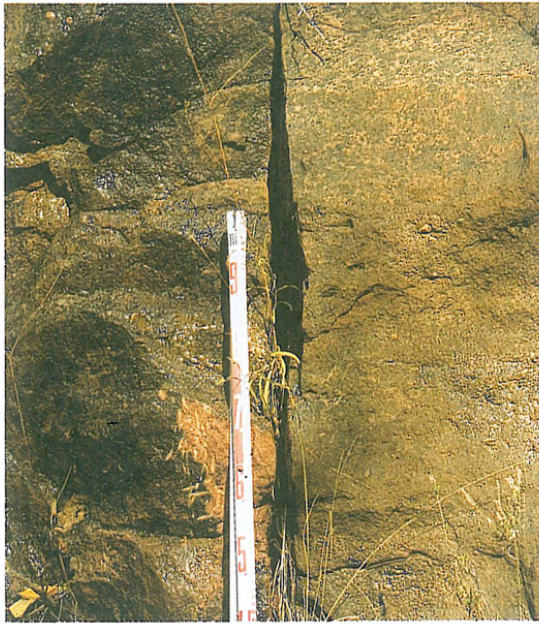
Es la distancia perpendicular que separa las paredes de la discontinuidad cuando no existe relleno. Este parámetro difiere de unas zonas a otras del macizo rocoso, reduciéndose la apertura en profundidad.

Influye en la resistencia al corte de la discontinuidad, incluso en discontinuidades cerradas, al modificarse las tensiones efectivas que actúan sobre las paredes.

Su medida se realiza mediante una regla graduada en milímetros o un calibre, a lo largo de 3 metros de longitud.



Descripción	Apertura
Muy cerrada	< 0,1 mm
Cerrada	0,1 - 0,25 mm
Parcialmente abierta	0,25 - 0,5 mm
Abierta	0,5 - 2,5 mm
Moderadamente ancha	2,5-10 mm
Ancha	>10 mm
Muy ancha	10-100 mm
Extremadamente ancha	100-1.000 mm
Cavernosa	> 1.000 mm



a)

a) discontinuidad de apertura muy ancha,
 b) discontinuidad plana-rugosa y relleno
 arcilloso seco, c) discontinuidad ondulada
 rugosa en calizas con apertura muy ancha
 (tomado de González de Vallejo et al.,
 2002).



b)



c)

Relleno

Las discontinuidades pueden aparecer rellenas de un material que es producto de la alteración de las rocas que forman sus paredes y por lo tanto de naturaleza distinta desde un punto de vista petrológico. Existe una gran variedad de materiales de relleno. Lógicamente este relleno gobierna el comportamiento de la discontinuidad, por lo que deben ser descritos todos los aspectos de propiedades y estados (materiales blandos o alterados, contenido en humedad, movimientos entre juntas).

Se debe describir:

- La naturaleza del relleno incluido tamaños de grano, descripción mineralógica, y si el relleno proviene de la descomposición de matriz rocosa.

Espesor

Anchura

Resistencia al corte, se evalúa mediante los índices de campo (escalas S_1 a S_6) o esclerómetro.

Permeabilidad, grado de humedad



Filtraciones

La medida del flujo de agua a través de discontinuidades de realizarse de manera diferenciada en juntas con o sin relleno. En ellas se debe medir el caudal o las condiciones de humedad que presenta la junta: seco, húmedo, algunas, frecuentes, abundantes filtraciones.

Clase	Discontinuidades sin relleno	Discontinuidades con relleno
I	Junta muy plana y cerrada. 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 agua	Relleno mojado con goteo ocasional
IV	Junta húmeda pero sin agua libre	Relleno que muestra señales de lavado, flujo de agua continuo (se debe estimar caudal, l/s)
V	Junta con rezume, ocasionalmente goteo pero sin flujo continuo	Relleno localmente lavado, flujo considerable según canales preferentes (se debe estimar presiones y caudales)
V	Junta con flujo de agua (estimar el caudal en l/s y la presión)	Rellenos completamente lavados, presiones de agua elevadas.

Resistencia al corte

La resistencia al corte de las discontinuidades es el aspecto más importante en la determinación de la resistencia de los macizos rocosos duros y fracturados. Para su estimación es necesario describir las características físicas y geométricas de los planos ya que no siempre es posible determinarla en ensayos de laboratorio o campo.

La resistencia al corte de discontinuidades sin cohesión puede estimarse a partir de datos de campo mediante el criterios de Barton y Choubey (1977) tratado anteriormente.

Resistencia al corte de las discontinuidades:

τ_p = resistencia al corte de pico en discontinuidades rugosas sin cohesión

σ'_n = esfuerzo normal efectivo sobre el plano de la discontinuidad

ϕ_p = ángulo de fricción de pico de la discontinuidad,

$$\tau_p = \sigma'_n \tan \phi_p$$

Desarrollo de la Resistencia al corte

$$\tau_p = \sigma'_n \tan (JRC \log_{10} (\sigma_c / \sigma'_n) + \phi_r)$$

Donde:

$(JRC \log_{10} (\sigma_c / \sigma'_n) + \phi_r)$ representa el ángulo de fricción de pico de la discontinuidad, ϕ_p

τ_p = resistencia al corte de pico en discontinuidades rugosas sin cohesión

σ'_n = esfuerzo normal efectivo sobre el plano de la discontinuidad

JRC = coeficiente de rugosidad de la discontinuidad (*Joint Roughness Coefficient*).

σ_c = resistencia a la compresión simple de las paredes de la discontinuidad

ϕ_b = ángulo de fricción básico

ϕ_r = ángulo de fricción residual

R es el valor del rebote del martillo de Schmidt sobre la matriz rocosa



Fricción residual

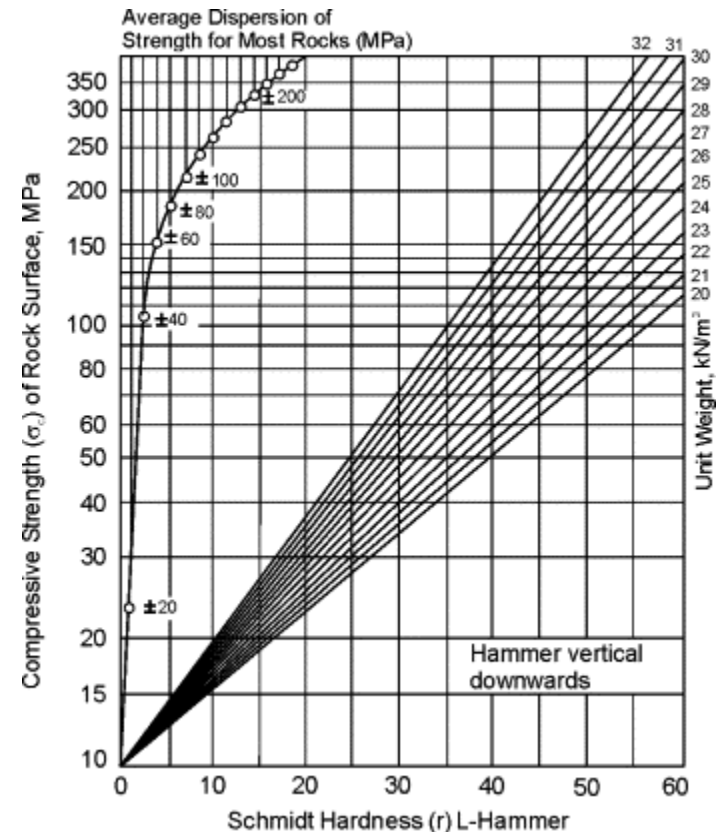
ϕ_r = ángulo de rozamiento residual de la discontinuidad que puede ser estimado a partir de la expresión: $\phi_r = (\phi_b - 20^\circ) + 20^\circ(r/R)$, siendo r el valor del rebote del martillo de Schmidt sobre la pared de la discontinuidad, R es el valor del rebote del martillo de Schmidt sobre la matriz rocosa y ϕ_b el ángulo de fricción básico del material.

Los valores de R , r y JCS se estiman en campo.

σ'_n se calcula en función de la carga litostática sobre la discontinuidad, conociendo el valor la densidad del material rocoso y, en su caso, la presión del agua. El valor de ϕ_b , puede estimarse a partir de tablas bibliográficas.

El valor del coeficiente de rugosidad JRC se estima por comparación a partir de perfiles

Para la estimación de la resistencia friccional de una discontinuidad puede realizarse un sencillo ensayo de campo, denominado Tilt test, que permite la comparación de los valores obtenidos con los calculados por el método empírico

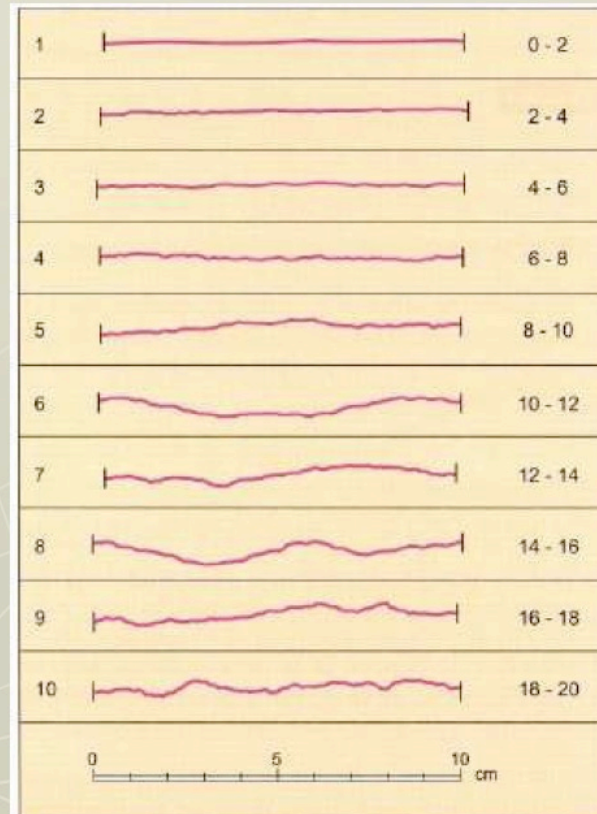


Tomado de Bhawani Singh, R.K. Goel, in Engineering Rock Mass Classification, 2011

Angulo de fricción básico

Roca	Ángulo de fricción básico ϕ_b (grados)
Andesita	45
Arenisca	30 - 50
Basalto	48 - 55
Caliza	35 - 50
Caliza Margosa	30
Cuarcita	40 - 55
Diabasa	40 - 50
Diorita	50 - 55
Dolomía	25 - 35
Esquisto	25 - 30
Gabro	35
Gneis	30 - 40
Granito	45 - 58
Mármol	35 - 45
Lutita	40 - 60
Pizarra	40 - 55
Yeso	30

Perfil tipo para estimar el coeficiente de rugosidad JRC



Tomado de González de Vallejo et al., 2002