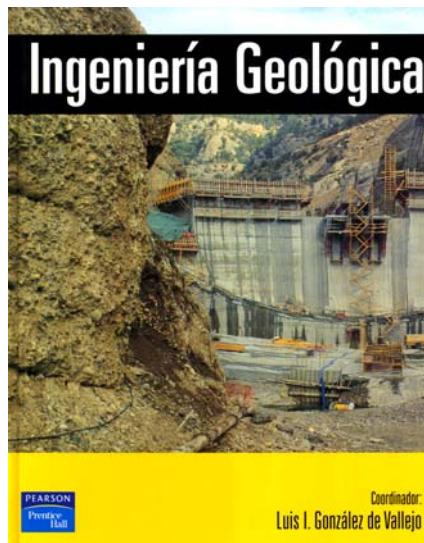


DESCRIPCIÓN DE MACIZOS ROCOSOS



Introducción

El conocimiento geológico es fundamental para el proyecto de las obras de infraestructura, edificación y explotaciones mineras, y para la ordenación territorial o urbana. La interpretación de las condiciones geológicas, y su integración en el diseño y construcción, mediante soluciones acordes a la naturaleza del terreno y al medio ambiente, es el principal objetivo de la ingeniería geológica, junto a la prevención y mitigación de los daños causados por los desastres naturales de origen geológico.

En líneas generales, el libro responde a estos planteamientos, estructurándose en tres partes. La Parte I trata de los fundamentos: mecánica del suelo, mecánica de rocas e hidrogeología, así como de los métodos: investigaciones *in situ*, reconocimientos geotécnicos y cartografía geotécnica. En la Parte II se incluyen las aplicaciones más importantes: cimentaciones, taludes, túneles, presas y estructuras de tierras. La Parte III se dedica a los riesgos geológicos, en particular a los deslizamientos y otros movimientos del terreno, y al riesgo sísmico.

Este libro constituye una referencia básica para el ingeniero geólogo, el ingeniero geotécnico, el geólogo, el ingeniero civil y, en general, para los profesionales relacionados con las cimentaciones, excavación de taludes, túneles, minería, presas, obras de tierra, etc. Como libro de texto desarrolla un programa de estudios avanzados en ingeniería geológica, geología aplicada y geotecnia.

Sus autores, Luis I. González de Vallejo, Mercedes Ferrer, Luis Ortuno y Carlos Oteo, son profesores de Ingeniería Geológica y de Ingeniería del Terreno en las universidades Complutense y Politécnica de Madrid.

CONTENIDO (Capítulo 4)

1. Metodología y sistemática

2. Descripción y zonificación del afloramiento

3. Caracterización de la matriz rocosa

- Identificación
- Meteorización
- Resistencia

4. Descripción de las discontinuidades

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

5. Parámetros del macizo rocoso

- Número y orientación de familias de discontinuidades
- Tamaño de bloque y grado de facturación
- Grado de meteorización

6. Clasificación geomecánica y caracterización global del macizo rocoso

1. Metodología y sistemática

La descripción y caracterización de los macizos rocosos en afloramientos es una labor necesaria en todos los estudios de ingeniería geológica cuyo objetivo sea el conocimiento de las propiedades y características geotécnicas de los materiales rocosos. Estos trabajos se realizan durante las primeras etapas de las investigaciones *in situ*.

El desarrollo de los trabajos de campo en afloramientos permite obtener información necesaria para evaluar el comportamiento geotécnico de los macizos rocosos, planificar las fases de investigación más avanzadas e interpretar los resultados que se obtengan de las mismas. Debido a la gran variedad de condiciones y propiedades, la caracterización de los macizos puede ser una tarea compleja, sobre todo si se presentan conjuntamente materiales rocosos y suelos, zonas fracturadas, tectonizadas y/o meteorizadas. En la descripción se deben incluir todos los aspectos y parámetros que puedan ser observados, deducidos y medidos en los afloramientos.

Las descripciones de los macizos rocosos con fines geotécnicos precisan de observaciones y medidas adicionales a las geológicas; de ahí la necesidad de establecer una sistemática que homogeneice criterios y facilite la comunicación entre todos los profesionales que tengan que realizar los trabajos de descripción de macizos rocosos a partir de afloramientos. Estas descripciones pueden implicar un cierto grado de subjetividad que debe evitarse, en la medida de lo posible, realizando observaciones sistemáticas y utilizando una terminología estandarizada, teniendo en cuenta los siguientes aspectos:

- Todos los factores deben examinarse sistemáticamente y en secuencia lógica.
- No debe omitirse ninguna información básica sobre el afloramiento.
- Las descripciones deben comunicar una imagen mental precisa y permitir deducir la información más relevante.
- El número de datos debe ser estadísticamente representativo.

La caracterización de campo del macizo rocoso es un ejercicio progresivo que comienza con una descripción general de las condiciones del terreno, y con la identificación y clasificación de los materiales que forman los macizos. Las observaciones posteriores más complejas sobre propiedades y factores concretos pueden aumentar el grado de interpretación y por tanto de subjetividad.

En general, el procedimiento a seguir parte de una descripción general de los aspectos y características observables a simple vista, en base a los cuales se establecen distintas zonas más o menos homogéneas en base a la litología, estructura tectónica, etc.; posteriormente, se describen y caracterizan con detalle los componentes de las diferentes zonas del macizo y sus propiedades; finalmente, a partir de todos los datos obtenidos, se clasifica geomecánicamente el macizo rocoso. La caracterización de cada zona debe realizarse de forma objetiva e individualizada, e incluye el estudio de la matriz rocosa, de las discontinuidades y del conjunto del macizo, describiendo tanto sus propiedades intrínsecas como los factores externos que condicionan su comportamiento.

La sistemática para la descripción de los afloramientos de macizos rocosos se puede resumir en las siguientes etapas:

- Descripción de las características generales del afloramiento.
- División en zonas y descripción general de cada zona.
- Descripción detallada de cada zona.
 - Matriz rocosa.
 - Discontinuidades.
- Descripción de los parámetros del macizo rocoso.
- Caracterización global y clasificación geomecánica del macizo rocoso.

La descripción general del afloramiento debe incluir la identificación, condiciones y características generales del afloramiento y la de cada uno de sus componentes: rocas, suelos, zonas con agua, discontinuidades singulares, etc.

La división en zonas más o menos homogéneas se realiza a partir de criterios fundamentalmente litológicos y estructurales. El número de zonas que se establezca y la extensión de las mismas dependerá del grado de heterogeneidad de los materiales y estructuras que formen el macizo rocoso, de la extensión del afloramiento y del grado de detalle y finalidad de la investigación. Se deben describir las características generales de cada zona (Figura 1).

La descripción de cada zona se lleva a cabo por separado y detalladamente, y deberá ser lo más objetiva y clara posible, utilizando terminología estandarizada, de manera que distintos observadores lleguen a la misma descripción, evitando que puedan aparecer diferencias en la interpretación de las observaciones o medidas realizadas en una misma zona. A lo largo de esta fase se describen las características y propiedades físicas y mecánicas de la matriz rocosa y de las discontinuidades; los aspectos y factores a describir son los del Cuadro 1.

Las descripciones se efectúan de forma cualitativa y, siempre que sea posible, cuantitativa. A tal efecto existen tablas, escalas, índices y valores de referencia que se utilizan para cuantificar las diferentes propiedades y características del macizo o de sus elementos. La cuantificación de los parámetros es útil para establecer valores objetivos con los que trabajar, pero además es necesaria para su introducción en las clasificaciones geomecánicas de los macizos rocosos.

Dado el gran número de parámetros a valorar, para la toma sistemática de los datos resulta muy útil utilizar estadí�os como el que se presenta en la Figura 2, que permiten anotar claramente las observaciones y medidas realizadas. En el caso de afloramientos extensos deberán tomarse varios puntos o estaciones de medida en cada zona, en cada una de las cuales se realiza la toma de datos sistemática. Cuanto mayor sea el número de medidas y estaciones realizadas, mayor será la representatividad de los resultados obtenidos en cuanto a caracterización global del macizo rocoso.

La descripción de los parámetros del macizo rocoso se realiza a partir de los datos recogidos en cada estación; se establecerán los parámetros referentes al número de familias de discontinuidades, orientación y características representativas de cada una de ellas, determinando su importancia relativa, tamaño y forma de los bloques que conforman el macizo, grado de fracturación, etc., así como otros factores que influyen en el comportamiento, como el grado de meteorización y las propiedades hidrogeológicas. En los apartados siguientes se tratan estos diferentes aspectos. La caracterización final del macizo rocoso dependerá de la valoración adecuada de cada uno de ellos.

Trabajo:		
Fase de estudio:	Elemento investigado:	
Localización y accesos:	Autor:	Fecha:
Observaciones:		
	FOTO	ESQUEMA
DESCRIPCIÓN GEOLÓGICA GENERAL:		
DESCRIPCIÓN BÁSICA DE CADA ZONA:		
Zona I:		
Zona II:		
Zona III:		

Figura 1. Estadillo para la descripción y división en zonas del macizo rocoso.

La caracterización global del macizo rocoso constituye la fase final del proceso descriptivo, y debe proporcionar las condiciones geológicas y geomecánicas del macizo en su conjunto. A partir de estos resultados se aplican las clasificaciones geomecánicas, que proporcionan información sobre la calidad y resistencia del macizo, así como datos cuantitativos para su aplicación a diferentes fines constructivos (túneles, taludes, etc.). Esta última fase requiere una mayor experiencia, y debe integrar el conocimiento de la geología regional y del emplazamiento. Los resultados de la caracterización geomecánica de afloramientos rocosos pueden presentarse en forma de cartografías de detalle y en perfiles geológico-geotécnicos.

2. Descripción y zonificación del afloramiento

El primer paso en el estudio de un afloramiento de un macizo rocoso debe ser la identificación del mismo y su descripción general. Posteriormente se lleva a cabo la división en zonas o sectorización y la descripción de las mismas. Es muy útil realizar fotografías y dibujos esquemáticos del afloramiento, donde se pueden indicar las características básicas de cada zona.

Por lo general, en un macizo rocoso pueden establecerse a simple vista, siempre que el afloramiento no sea muy amplio, distintas áreas con diferente aspecto o tipos de materiales rocosos, por ejemplo, zonas con distinta litología, elementos estructurales, grado de facturación, grado de meteorización, etc., lo que permite una división inicial por zonas. Esto facilita las posteriores descripciones y la aplicación sistemática de los procedimientos en la toma de los datos y medidas. En ocasiones, si existen pocos afloramientos o éstos presentan poca extensión, o si el macizo rocoso a caracterizar es muy amplio, esta tarea puede resultar difícil.

Ámbito de estudio	Característica o propiedad	Método	Clasificación
Matriz rocosa	Identificación	Observaciones de visu y con lupa	Clasificación geológica y geotécnica
	Meteorización	Observaciones de visu	Índices estándar
	Resistencia	Índices y ensayos de campo	Clasificaciones empíricas de resistencia
Discontinuidades	Orientación	Medida directa con brújula de geólogo	
	Espaciado	Medidas de campo	Índices y clasificaciones estándar
	Continuidad		
	Rugosidad	Observaciones y medidas de campo	Comparación con perfiles estándar
	Resistencia de las paredes	Martillo Schmidt Índices de campo	Clasificaciones empíricas de resistencia
	Abertura	Observaciones y medidas de campo	Índices estándar
	Relleno		
	Filtraciones		
Macizo rocoso	Número de familias de discontinuidades	Medidas de campo	Índices y clasificaciones estándar
	Tamaño de bloque		
	Intensidad de fracturación		
	Grado de meteorización	Observaciones de campo	Clasificaciones estándar

Cuadro 1 - Características y propiedades a describir en campo para la caracterización del macizo rocoso

Se recomienda seguir la siguiente secuencia (Ferrer y González de Vallejo, 1999):

a) Identificación del afloramiento

Localización, situación geográfica, accesos, extensión, características geométricas, ele. Debe indicarse si es un afloramiento natural o corresponde a una excavación y las condiciones en que se encuentra.

b) Fotografías y esquemas

c) Descripción geológica general

- Formación y edad geológica
- Litologías
- Estructuras observables a gran escala
- Rasgos estructurales generales: macizo estratificado, fallado, fracturado, masivo, etc.
- Zonas alteradas y meteorizadas y espesor de las mismas
- Presencia de agua, surgencias, etc.

Es recomendable incluir cuantos datos se aprecien, incluso los que puedan considerarse de interés secundaria. Si existe alguna duda sobre las condiciones del afloramiento también deben indicarse en la descripción.

d) División en zonas y descripción general de cada zona

La zonificación se realizará en base a criterios litológicos y estructurales considerando los sectores más o menos homogéneos del afloramiento, no siendo conveniente establecer demasiadas zonas, aunque el número y la extensión de las mismas dependerá del grado de heterogeneidad de los materiales y estructuras que formen el macizo, de la extensión del afloramiento y del grado de detalle y finalidad de la investigación. Se debe realizar una breve descripción general de cada zona, sin entrar en detalles referentes a la matriz rocosa o a las discontinuidades, incluyendo datos sobre la litología, estado de meteorización, fracturación y presencia de agua. Estas descripciones cualitativas deben apartar una idea del material a estudiar, pero sin valorar cuantitativamente las propiedades del macizo y de sus componentes.

Para la división en zonas del afloramiento y la descripción general de cada una se recomienda utilizar estadios *como* el de la Figura 1.

e) Identificación de zonas singulares

Zonas singulares son aquellas zonas, elementos o estructuras no sistemáticas, que no se repiten en el macizo, y que tienen influencia en sus propiedades y comportamiento mecánico, por ejemplo fallas, diques, zonas de brecha, cavidades, zonas de flujo de agua, etc. Estas zonas deben tratarse y describirse de forma individualizada, indicando la problemática específica que presentan, así como su influencia en el comportamiento general del macizo.

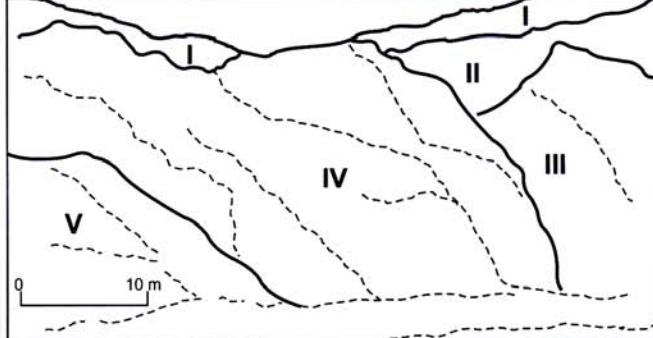
PROYECTO: REALIZADO POR: FECHA:			ESTACIÓN: LOCALIZACIÓN:			HOJA/PLANO: FOTO:					
LITOLOGÍA	NATURALEZA:			POTENCIA:	FORMACIÓN Y EDAD:						
FORMACIONES SUPERFICIALES ESTRUCTURA	NATURALEZA Y TEXTURA:			MORFOLOGÍA:	ESPESOR:						
FRACTURACIÓN	PLIEGUES FALLAS			OTROS							
BLOQUES Jv Juntas/m ³	Muy grandes < 1	Grandes 1-3	Medios 3-10	Pequeños 10-30	Muy pequeños >30	Muy brechificado > 60					
RESISTENCIA DE MATRIZ ROCOSA	Extremad. blanda (Uña) 0	Muy blanda (Navaja) 1	Blanda (Punta martillo) 2	Media (1 Golpe martillo) 3	Dura (+ 1 Golpe martillo) 4	Muy dura (Varios golpes) 5	Extremad. dura (Sólo raya con martillo) 6				
GRADOS DE METEORIZACIÓN	I Sana	II Algo meteorizada	III Medianamente meteorizada	IV Muy meteorizada	V Completamente meteorizada		VI Suelo residual				
HIDROGEOLOGÍA	Sin presencia de agua	Seco (con señales de agua)	Húmedo	Goteos	Flujo	CAUDAL ESTIMADO					
RESISTENCIA "R" ESCLERÓMETRO	30	42	30	50	45	38	40	OBSERVACIONES:			
FOTO			CROQUIS								
											
ESTACIÓN Nº 14		ESPACIADO en mm		CONTINUIDAD	ABERTURA en mm						
				Rumbo	Buzamiento						
J ₁	60	90	< 20 Extrem. juntas								
J ₁	90	30	20-60 Muy juntas								
J ₁	60-200	Juntas	60-200 Moderad. juntas								
J ₁	200-600	Moderad. juntas	200-600 Separadas								
J ₁	600-2000	Muy separadas	2.000-6.000 Extrem. separadas								
J ₁	20-6.000		> 6.000 R B R B R B R B R B								
J ₁	< 1 m	Muy baja	1-3 m Baja								
J ₁	3-10 m	Moderada	3-10 m Alta								
J ₁	> 10 m	Muy alta	> 20 m Muy cerrada								
J ₁	< 0,1 m	Cerrada	> 0,1 m 0,1-0,25								
J ₁	0,25-0,5	Parcialm. abierta	0,5-2,5 Abierta								
J ₁	2,5-10	Moderad. abierta	> 10 Ancha								
J ₁	10-100	Muy ancha	10-100 Extrem. ancha								
J ₁	> 1000	Caverosa	> 1000 I Rugosa								
				Escalonada							
				II Lisa							
				III Stickensided							
				IV Rugosa							
				V Lisa							
				VI Stickensided							
				VII Rugosa							
				VIII Lisa							
				IX Stickensided							
				Composition							
				Espesor mm							
				I Sana							
				II Algo meteorizadas							
				III Media meteorizadas							
				IV Muy meteorizadas							
				V Compl. meteorizadas							
				VI Suelo residual							
				Seco							
				Humedo							
				Gateos							
				Flujo							
				1 Muy blando							
				2 Blando							
				3 Consistente							
				4 Muy consistente							
				5 Duro							
				6 Muy duro							
						RESISTENCIA AL PENETRÓMETRO DE BOLSILLO kg/cm ²					

Fig. 2 – Estadillo para toma de datos geomecánicos en campo (cortesía de Prospección y Geotecnia)

3. Caracterización de la matriz rocosa

Los aspectos que deben describirse en campo son:

- Identificación
- Meteorización o alteración
- Resistencia a compresión simple

Identificación

La identificación de visu de una roca se establece a partir de su composición y de su textura o relaciones geométricas de sus minerales. A estos criterios descriptivos se unen las características genéticas, cuando éstas pueden ser deducidas de la paragénesis mineral, composición química, forma y estructura del yacimiento, y de las relaciones temporales y espaciales con otras rocas.

Las observaciones más prácticas son:

- Composición mineralógica
- Forma y tamaño de los granos
- Color y transparencia
- Dureza

Para la correcta observación de estas propiedades es necesario limpiar la roca, eliminando la capa superficial de alteración. Según el tipo de roca, otros aspectos que pueden ser determinados son la presencia o ausencia de exfoliación y la existencia de maclado y tipo de macla.

La composición mineralógica permite clasificar litológicamente la roca. Los minerales más comunes que forman las rocas se pueden identificar a nivel de muestra con una lupa, si las dimensiones del mineral lo permiten. La identificación detallada de los minerales requiere un estudio petrográfico mediante lámina delgada, que se realizará siempre que existan dudas en la identificación de los mismos.

Una vez descritos los minerales, se nombra y clasifica la roca. El sistema más recomendable se basa en clasificaciones geológicas enrocadas hacia usos geotécnicos. En el Cuadro 2 se incluye la clasificación propuesta por la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas (ISRM).

La identificación de la roca se completa definiendo el tamaño de grano y el color. En el Cuadro 2 de clasificación de rocas para usos geotécnicos aparece el tamaño de grano como criterio de clasificación, adoptando las rocas sedimentarias una terminología específica en función de este parámetro.

El tamaño de grano hace referencia a las dimensiones medias de los minerales o fragmentos de roca que componen la matriz rocosa. La estimación del tamaño de grano se realiza normalmente de visu, con una regla o con la ayuda de comparadores de tamaño. En rocas de grano fino es útil la ayuda de una lupa de mano. El tamaño de las partículas minerales que componen la roca puede ser homogéneo (rocas equigranulares) o presentar variaciones importantes (heterogranulares).

Los términos utilizados y los intervalos de tamaño reconocidos internacionalmente son los indicados en el Cuadro 3.

Descripción	Tamaño del grano	Equivalencia con los tipos de suelo
Grano grueso	> 2 mm	Gravas
Grano medio	0,06 – 2 mm	Arenas
Grano fino	< 0,06 mm	Limos y arcillas

Cuadro 3 - Clasificación del tamaño de grano de las rocas

Clasificación de las rocas para usos geotécnicos

CUADRO 4.2

Tamaño de grano, mm	Rocas estratificadas (mayormente sedimentarias)				Rocas con foliación				Rocas con estructura masiva y textura cristalina (mayormente igneas)				Tamaño de grano, mm
Mayor de 20	Descripción por tamaño de grano				>50% de los granos son de rocas volcánicas de grano fino				Descripción por tamaño de grano				Mayor de 20
20	R U	CONGLOMERADO Cantos rodados, bolos y gravas cementadas por una matriz fina.	>50% de los granos son carbonatos		ROCAS SALINAS	GNEISS Foliación bien desarrollada y muy espaciada.	MÁRMOL	PEGMATITA DIORITA	Proxenita				20
6	D I T A S	BRECHA Fragmentos irregulares de roca en una matriz fina.	C A L Z A	Calicrudita Granos redondeados	GRUESO	MIGMATITA Foliación irregular. Esquistos y neises mezclados.	CUARCITA Granulita CORNEANA Antibolita Serpentina	GRUESO	GABRO			6	
2	A R E N I A T A S	ARENISCA Granos angulosos o redondeados, cementados, por minerales de arcilla, carbonáticos o de hierro. Cuarcita: granos de cuarzo y cemento siliceo. Arcosa: mayoría de gravas feldespáticas. Grauvaca: diversos fragmentos de roca.	D O L M A	Ceniza volcánica cementada Calcareita	Yeso	ESQUISTO Foliación ondulada bien desarrollada; generalmente abundante mica	MICRO-GRANITO DIORITA	MEDIO	Dolerita			2	
0.6	E M I T A S	Medio y cemento siliceo. Arcosa: mayoría de gravas feldespáticas. Grauvaca: diversos fragmentos de roca.	O L M A			MEDIO						0.6	
0.2	A F I S	Fino		TOBA								0.2	
0.06	L U T A S	MASIVAS LAMINADAS	C R T A D	TOBA de grano fino Limolita cárquidea TOBA de grano grueso	FINO	FILITA Foliación ligeramente ondulada	RIOLITA ANDESITA	FINO	OBASALTO			0.06	
0.002	T A S		N A D			PIZARRA Planos de foliación bien desarrollados						0.002	
Menor de 0.002	Silex: aparece como bandas o nódulos en la creta. Chert: aparece como nódulos y bandas en limolitas y calcareritas.				CARBÓN LIGNITO	MILONITA Asociado a zonas de falla, principalmente en áreas ignea y metamórficas			Obsidiana	Vidrio volcánico		Menor de 0.002	
Amorfo o Cripto cristalino				Cemento granular excepto rocas amorfas				CRISTALINAS				Claro → Color → Oscuro	
	SILICEAS		SILICEAS		SILICEAS	Principalmente SILICEAS			ACIDA Mucho Algo de cuarzo	INTERMED. BÁSICA Poco o nada de cuarzo	ULTRA BÁSICA Cuarzo		
ROCAS SEDIMENTARIAS Las rocas con cemento granular presentan gran variación de resistencia, algunas arenosas son más resistentes que muchas rocas igneas. La estratificación puede no observarse en muestras de mano siso en afloamiento. Solo las rocas sedimentarias y algunas rocas metamórficas derivadas de ellas contienen fósiles. Las rocas calcáreas contienen calcita (CO_3Ca) que se reconoce por su efervescencia con ácido clorídrico diluido.													
ROCAS METAMÓRFICAS Se distinguen por su foliación. La foliación en los gneises se observa mejor en el alforamiento. Las rocas metamórficas sin foliación son muy difíciles de reconocer. Cualquier roca generada por metamorfismo de contacto se describen como corneanas y generalmente son algo más resistentes que la roca original.													
ROCAS IGNEAS Constituidas por granos minerales fuertemente unidos. Elevada resistencia cuando aparecen sados; no porosas. Aparecen como: 1. Batolitos; 2. Lacolitos; 3. Sills; 4. Diques; 5. Flujos de lava; 6. Filones.													

Cuadro 2 – Clasificación de las rocas para usos geotécnicos

El color de una roca depende de los minerales que la componen. Algunos minerales tienen un color distintivo, pero frecuentemente contienen sustancias o impurezas que lo modifican. El color se puede describir de forma semejante al de los suelos, dando un color principal seguido de uno secundario e indicando, por último, la intensidad que presenta (por ejemplo, granito gris verdoso claro). Existen cartas de colores que se emplean para la comparación, evitando así cualquier grado de subjetividad en la descripción. La observación debe realizarse sobre la roca fresca, una vez retirada la capa superficial de alteración.

Cuando la roca no ha sufrido procesos de alteración y presenta un color original y característico, se define como roca sana. Las variaciones de coloración de la roca en el afloramiento indican que el material rocoso ha sufrido procesos de meteorización. La variación en la coloración puede afectar a todos los minerales constituyentes o solo a algunos, aspecto que ha de indicarse en la descripción.

La dureza es una propiedad directamente relacionada con la resistencia, que depende de la composición mineralógica y del grado de alteración que afecte a la roca. Su descripción es cualitativa. Generalmente se adoptan como criterios la densidad y la resistencia de la roca, estableciéndose el grado 1 para la roca menos densa y resistente ($\gamma = 1,5 \text{ t/m}^3$ y $(\sigma_c = 50 \text{ kg/cm}^2)$) y el grado 14 para la más densa y resistente ($\gamma = 2,7 \text{ t/m}^3$ y $(\sigma_c = 1.800 \text{ kg/cm}^2)$).

Para evaluar la dureza de los minerales se emplea la escala de Mohs, que asigna un valor de 1 para el mineral más blando (talco) y un valor de 10 para el más duro (diamante).

Meteorización

El grado de meteorización de la roca es una observación importante en cuanto que condiciona de forma definitiva sus propiedades mecánicas. Según avanza el proceso de meteorización aumentan la porosidad, permeabilidad y deformabilidad del material rocoso, al tiempo que disminuye su resistencia. Los procesos de meteorización física y química que afectan a las rocas se describen en el Apartado 3.2 del Capítulo 3.

La identificación del estado o grado de meteorización de la matriz rocosa se puede realizar de forma sistemática a partir de las descripciones del Cuadro 4.

Término	Descripción
Fresca	No se observan signos de meteorización en la matriz rocosa
Descolorada	Se observan cambios en el color original de la matriz rocosa. Es conveniente indicar el grado de cambio. Si se observa que el cambio de color se restringe a uno o algunos minerales se debe mencionar.
Desintegrada	La roca se ha alterado a un estado de suelo, manteniéndose la fábrica original. La roca es friable, pero los granos minerales no están decompuestos.
Decompuesta	La roca se ha alterado al estado de un suelo, algunos o todos los minerales están decompuestos

Cuadro 4 – Descripción del grado de meteorización

Las condiciones climáticas son el principal agente en la meteorización, y el aspecto que ofrecen las rocas meteorizadas varía para las distintas regiones climáticas. En la Figura 3 se presentan algunos ejemplos mostrando diferentes grados de meteorización de la matriz rocosa. Los distintos tipos de rocas son afectados desigualmente por los procesos de meteorización (como se describe en el Apartado 3.2 del Capítulo 3), siendo éstos más intensos cuanto mayor es el tiempo de exposición a los agentes atmosféricos.

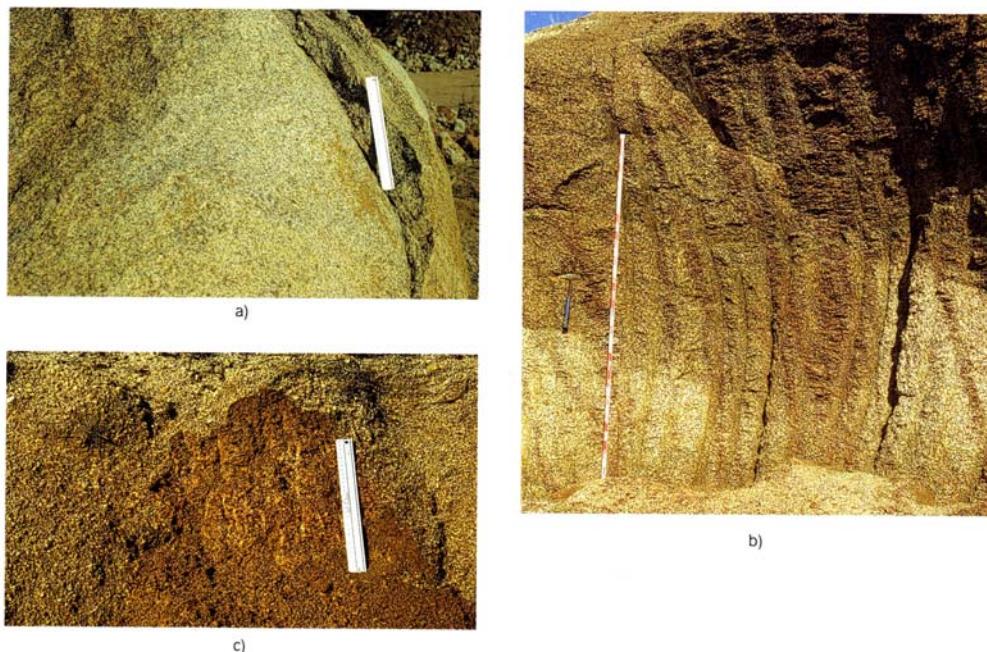


Fig.3 - Diferentes grados de meteorización de matriz rocosa granítica. a) roca ligeramente decolorada, con cambios en el color original de la matriz rocosa; b) roca desintegrada, alterada al estado de suelo, manteniendo la fábrica original; c) roca descompuesta, con minerales descompuestos y pérdida de la textura original. Los elementos de escala de las fotografías corresponden a 30 cm (a y b) y 2 m (c); (cortesía de Prospección y Geotecnia).

Resistencia

La resistencia de la matriz rocosa puede ser estimada en el afloramiento mediante índices de campo o a partir de correlaciones con datos proporcionados por sencillos ensayos de campo, como el ensayo de carga puntual PLT o el martillo Schmidt.

Los índices de campo permiten una estimación del rango de resistencia de la roca. Los criterios para su identificación aparecen descritos en el Cuadro 7 del Capítulo 3, y deben ser aplicados sobre la roca una vez limpiada la capa de alteración superficial.

El ensayo de carga puntual o de rotura entre puntas, PLT, permite obtener un índice, I_s , correlacionable con la resistencia a compresión simple. Mediante el martillo Schmidt o esclerómetro se mide la resistencia al rebote de una superficie rocosa, que se correlaciona con la resistencia a compresión simple. En el Apartado 5 del Capítulo 6 se describen ambos ensayos y sus aplicaciones; en las Figuras 6.68 y 6.69 de dicho capítulo se muestran los dos aparatos de ensayo. En ambos casos es recomendable tomar un número elevado de medidas y realizar su análisis estadístico. Con los valores de resistencia obtenidos con estos métodos se puede clasificar la matriz rocosa en base a los criterios del Cuadro 5.

Resistencia a compresión simple (MPa)	Descripción
1-5	Muy blanda
5-25	Blanda
25-50	Moderadamente dura
50-100	Dura
100-250	Muy dura
> 250	Extremadamente dura

Cuadro 5 - Clasificación en base a la resistencia de la roca

4. Descripción de las discontinuidades

Las discontinuidades condicionan de una forma definitiva las propiedades y el comportamiento resistente, deformacional e hidráulico de los macizos rocosos. La resistencia al corte de las discontinuidades es el aspecto más importante en la determinación de la resistencia de los macizos rocosos duros fracturados, y para su estimación es necesario definir las características y propiedades de los planos de discontinuidad.

En el Apartado 3.5 del Capítulo 3 se describen los tipos de discontinuidades y se definen los parámetros físicos y geométricos que condicionan sus propiedades y su comportamiento mecánico. La descripción y medida de estos parámetros para cada familia debe ser realizada en campo:

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

Algunos de estos parámetros, como la rugosidad, resistencia de las paredes, apertura y relleno, determinan el comportamiento mecánico y la resistencia al corte de las discontinuidades.

Orientación

Las discontinuidades sistemáticas se presentan en familias con orientación y características más o menos homogéneas. La orientación relativa y el espaciado de las diferentes familias de un macizo rocoso definen la forma de los bloques que conforman el macizo. La orientación de las discontinuidades con respecto a las estructuras u obras de ingeniería condiciona la presencia de inestabilidades y roturas a su favor. En la Figura 3.68 del Capítulo 3 se presentan ejemplos de la influencia de la orientación de los planos de debilidad en obras como taludes, presas y túneles.

La orientación de una discontinuidad en el espacio queda definida por su dirección de buzamiento (dirección de la línea de máxima pendiente del plano de discontinuidad respecto al norte) y por su buzamiento (inclinación respecto a la horizontal de dicha línea). Su medida se realiza mediante la brújula con clinómetro o con el diaclasímetro.

La dirección de buzamiento se mide siguiendo la dirección de las agujas del reloj desde el norte, y varía entre 0° y 360° . El buzamiento se mide mediante el clinómetro, con valores entre 0° (capa horizontal) y 90° (capa vertical). Los valores de dirección de buzamiento y buzamiento se suelen registrar en este orden en los estadílicos, indicando el tipo de discontinuidad al que corresponden los valores. Por ejemplo, la notación $S_0\ 270^\circ/60^\circ$ indica un plano de estratificación con un buzamiento de 60° según una dirección de 270° .

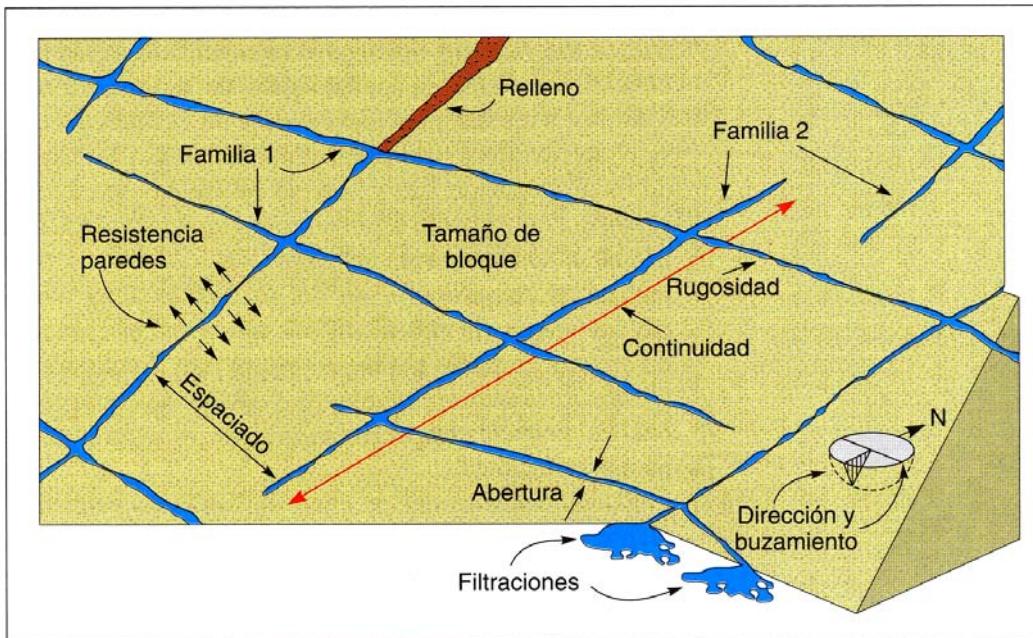


Fig. 4 - Representación esquemática de las propiedades geométricas de las discontinuidades (Hudson, 1989).

También puede definirse la orientación de un plano de discontinuidad por su rumbo o dirección (ángulo que forma una línea horizontal trazada sobre el plano de discontinuidad con el norte magnético, midiendo hacia el este) y su buzamiento, debiendo indicar en este caso el sentido del buzamiento (norte, sur, este, oeste). La dirección del plano y la dirección de buzamiento forman un ángulo de 90° (Figura 5). Ejemplo: la notación $J_2\ 135^{\circ}/50^{\circ}\ SW$ indica un plano de discontinuidad que pertenece a la familia de diaclasas J_2 con una dirección de 135° respecto al norte y hacia el este y con un buzamiento de 50° hacia el suroeste; la orientación de este mismo plano también queda definida por $315^{\circ}/50^{\circ}\ SW$ o por $45^{\circ}\ W/50^{\circ}\ SW$.

Es aconsejable medir un número suficiente de orientaciones de discontinuidades para definir adecuadamente cada familia. El número de medidas dependerá de la dimensión de la zona estudiada, de la aleatoriedad de las orientaciones de los planos y del detalle de análisis. Si las orientaciones son constantes se puede reducir el número de medidas.

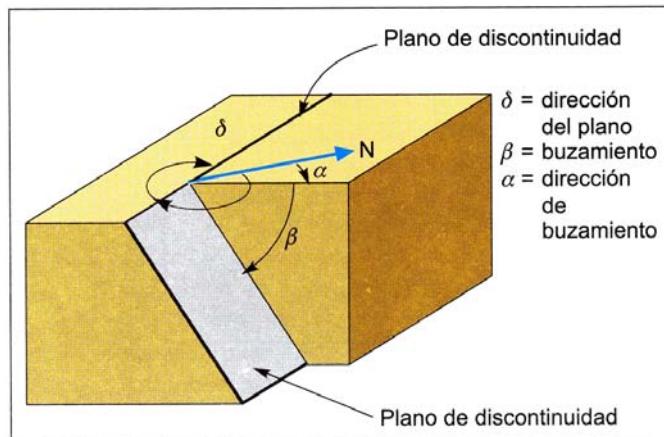


Fig. 5 – Medida de la orientación de discontinuidades

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 (Figura 6).
- Bloques diagrama, permitiendo una visión general de las familias y sus orientaciones respectivas, como se muestra en la Figura 3.77 del Capítulo 3.
- 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.).

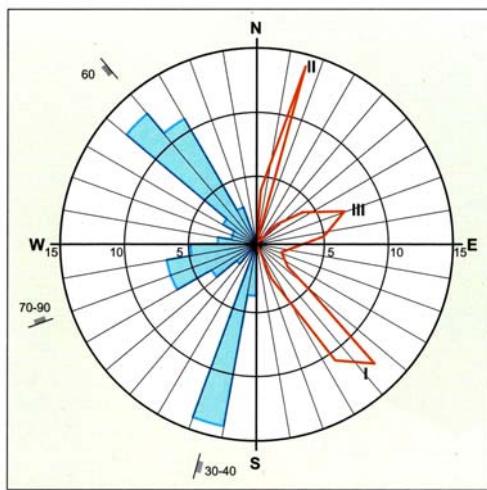


Fig.6 - Representación de datos de orientación en un diagrama de rosetas según dos métodos (ISRM. 1981).

Espaciado

El espaciado entre los planos de discontinuidad condiciona el tamaño de los bloques de matriz rocosa y, por tanto, define el papel que ésta tendrá en el comportamiento mecánico del macizo rocoso, y su importancia con respecto a la influencia de las discontinuidades. En macizos rocosos con espaciados grandes, de varios metros, en los procesos de deformación y rotura prevalecerán las propiedades de la matriz rocosa o de los planos de discontinuidad según la escala de trabajo considerada y la situación de la obra de ingeniería con respecto a las discontinuidades; si los espaciados son menores, de varios decímetros a 1 ó 2 metros, el comportamiento del macizo lo determinarán los planos de debilidad; por último, si el espaciado es muy pequeño el macizo estará muy fracturado y presentará un comportamiento «isótropo», controlado por las propiedades del conjunto de bloques más o menos uniformes.

El espaciado se define como la distancia entre dos planos de discontinuidad de una misma familia, medida en la dirección perpendicular a dichos planos. Normalmente este valor se refiere al espaciado medio o modal de los valores medidos para las discontinuidades de una misma familia.

La medida del espaciado se realiza con una cinta métrica, en una longitud suficientemente representativa de la frecuencia de discontinuidades, al menos de tres metros. Como norma general, la longitud de medida debe ser unas diez veces superior al espaciado. La cinta debe colocarse perpendicularmente a los planos, registrándose la distancia entre discontinuidades adyacentes.

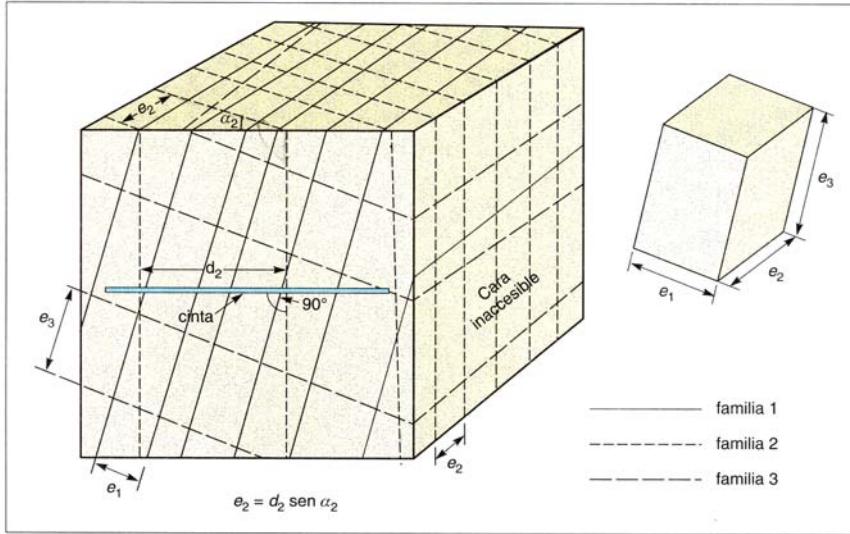


Fig. 7 - Medida del espaciado en una cara expuesta del afloramiento (ISRM. 1981).

Por lo general, las superficies expuestas de los afloramientos rocosos no permiten realizar las medidas del espaciado en la dirección perpendicular a las superficies, y lo que se miden son espaciados aparentes, debiéndose aplicar las correcciones necesarias para obtener el espaciado real. La Figura 7 representa una cara de un afloramiento en la que únicamente se pueden medir los espaciados aparentes de tres familias de discontinuidades. Colocando la cinta métrica perpendicular a las trazas de los planos de cada familia, se mide la distancia d , que deberá ser corregida para calcular el espaciado real:

$$e = d \operatorname{sen} \alpha$$

siendo e el espaciado real, d la distancia media medida con la cinta y α el ángulo entre la línea de medición y la dirección de la familia.

El espaciado se describe según los términos del Cuadro 6. En la Figura 8 se presentan ejemplos de discontinuidades con diferentes espaciados.



Fig. 8 - Ejemplos de espaciados de discontinuidades en afloramientos. a) Espaciado «muy junto» (5 cm) en la familia principal de discontinuidades con dirección perpendicular a la regla; b) Macizo calizo con dos familias principales de discontinuidades, una vertical con continuidad «media» y una horizontal con continuidad «muy baja», ambas con espaciado «muy junto» y formando bloques «muy pequeños»; c) Macizo cuarcítico de buena calidad con discontinuidades horizontales y verticales «separadas», con espaciados del orden de 0,5-1 metro.

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

Cuadro 6. Descripción del espaciado

Continuidad

La continuidad o persistencia de un plano de discontinuidad es su extensión superficial, medida por la longitud según la dirección del plano y según su buzamiento. Es un parámetro de gran importancia pero de difícil cuantificación a partir de la observación de afloramientos, en los que normalmente se ven las trazas de los planos de discontinuidad según un buzamiento aparente.

La medida de la continuidad se realiza con una cinta métrica. Si el afloramiento permite la observación tridimensional de los planos de discontinuidad, deberán medirse las longitudes a lo largo de la dirección y del buzamiento. Las discontinuidades pueden o no terminar contra otra discontinuidad, debiendo indicar-

se en la descripción. Es importante destacar las familias más continuas, ya que por lo general serán éstas las que condicioneen principalmente los planos de rotura del macizo rocoso. La continuidad se describe según el Cuadro 7.

Por lo general, las discontinuidades singulares, como las fallas y los diques, suelen ser muy continuas, y representan los mayores planos de debilidad en el macizo rocoso, por lo que deben ser caracterizadas y descriptas con especial atención.

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

Cuadro 7 – Descripción de la continuidad (ISRM, 1981)

Rugosidad

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 datos de campo y de expresiones empíricas, como se describe en el Apartado 3.5 del Capítulo 3 y en el Recuadro 4.1, al final de este apartado. La rugosidad aumenta la resistencia al corte, que decrece con el aumento de la abertura y, por lo general, con el espesor de relleno.

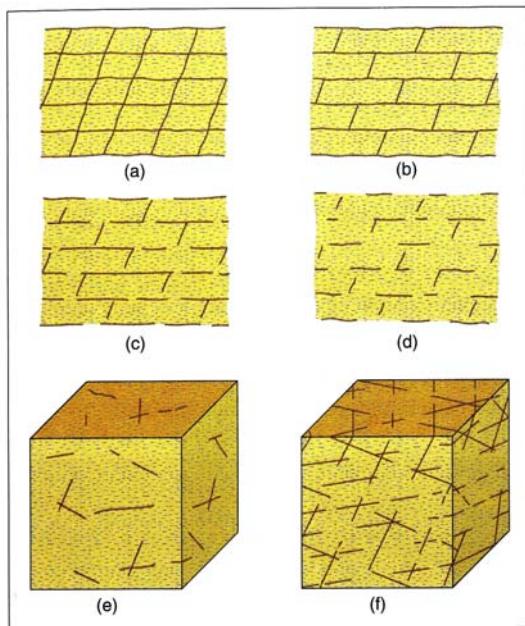


Fig. 9 - Diagramas mostrando distintos modelos de continuidad o persistencia de varias familias de discontinuidades (ISRM. 1981).

El término 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, definidas en ocasiones como de 1^a y 2^a orden respectivamente. La descripción de la rugosidad requiere, pues, dos escalas de observación (Figura 10):

- Escala decimétrica y métrica para la ondulación de las superficies: superficies planas, onduladas o escalonadas.
- Escala milimétrica y centimétrica para la rugosidad o irregularidad: superficies pulidas, lisas o rugosas.

La rugosidad puede ser medida en campo con diversos métodos, dependiendo de la exactitud requerida, de la escala de medida o de la accesibilidad al afloramiento, incluyendo desde estimaciones cualitativas hasta medidas cuantitativas. El método más sencillo y rápido es la comparación visual de la discontinuidad con los **perfíles estándar de rugosidad** de la Figura 4.11. Cualitativamente un plano de discontinuidad puede ser, por ejemplo, ondulado-liso, planorugoso o ondulado-rugoso.

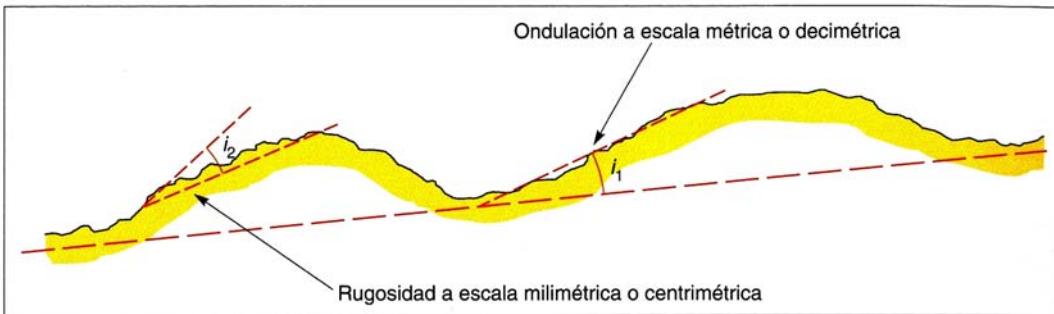


Fig. 10 - Ondulación y rugosidad de una superficie de discontinuidad.

En las Figuras 4.12 y 3.78 del Capítulo 3 se presentan diferentes ejemplos de descripción de la rugosidad y otros parámetros de las superficies de discontinuidad.

Existen otros métodos más precisos que permiten realizar medidas cuantitativas de la ondulación y la rugosidad:

- Realización de **perfíles lineales**. Para ello se apoya una regia sobre las rugosidades más salientes y se registra, a intervalos regulares, la distancia entre la regia y la superficie de la discontinuidad (considerando ésta como la dirección media del plano), obteniéndose así un registro detallado de valores x-y a partir de los cuales se pueden obtener los ángulos de rugosidad u ondulación. La distancia de medida depende de la escala de las rugosidades, desde algunos decímetros para la rugosidad a pequeña escala hasta algunos metros para las de escala decimétrica o métrica.
- **Método de los discos.** Este método se utiliza para medir los ángulos de rugosidad del plano de discontinuidad en varias direcciones, muy útil cuando no se conoce la posible dirección de movimiento. Los resultados aportan las variaciones locales de la superficie de discontinuidad respecto a su buzamiento general. El método consiste en colocar unos discos planos de diferente diámetro (5, 10, 20 ó 40 cm según la escala de trabajo) sobre distintas zonas de la discontinuidad, y medir con una brújula la dirección y buzamiento del disco. Cuando el disco utilizado es grande (por ejemplo de 40 cm), el ángulo de rugosidad medido será menor que con discos menores, como se observa en la Figura 4.13. Los resultados se pueden representar estereográficamente con respecto a diferentes posibles direcciones de deslizamiento o movimiento sobre el plano.

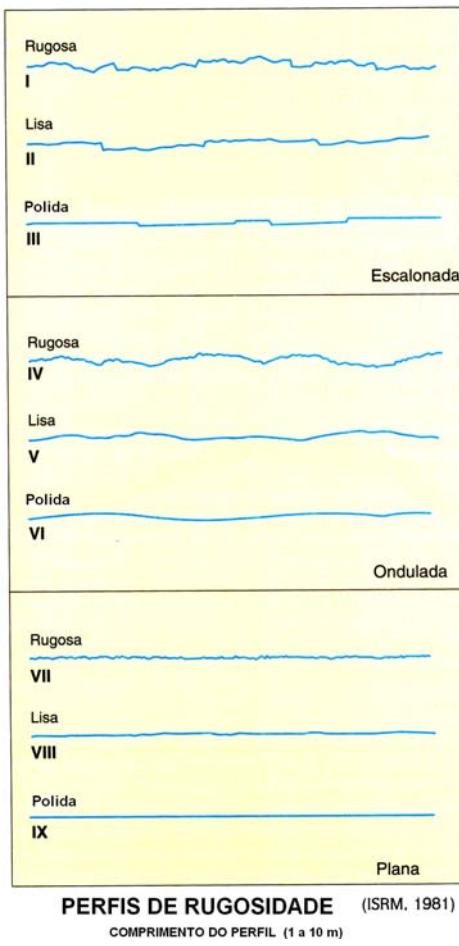


Fig. 11 - Perfiles de rugosidad. La longitud de los perfiles está en el rango entre 1 y 10 metros (ISRM. 1981)

Las medidas deben ser realizadas sobre perfiles representativos de la rugosidad de los planos. Para establecer los valores de los ángulos de rugosidad y de ondulación se recomienda llevar a cabo un gran número de medidas. Si se conoce o presume la dirección de deslizamiento potencial a favor de una discontinuidad, será a lo largo de ésta donde deberá ser estimada la rugosidad. Si esta dirección es desconocida, deberán caracterizarse las rugosidades para varias posibles direcciones de deslizamiento en el plano de discontinuidad.



Fig. 12 - a) Discontinuidad «ondulada-lisa» con «alta continuidad» en un macizo volcánico; b) discontinuidad «plana-rugosa» en cuarcitas. Los elementos de escala de las fotografías corresponden a 2 m y 30 cm respectivamente.

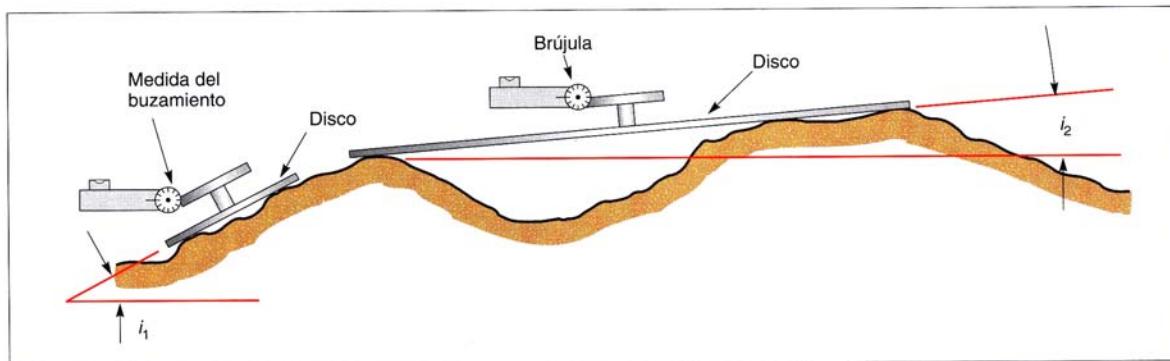


Fig. 13 - Método de los discos para medida de la rugosidad en discontinuidades (ISRM. 1981).



Fig. 12 - Alteración por oxidación en las superficies de discontinuidad de un macizo rocoso de cuarcitas, mientras que la matriz rocosa permanece fresca.

Resistencia de las paredes de la discontinuidad

La resistencia de la pared de una discontinuidad influye en su resistencia al corte y en su deformabilidad. Depende del tipo de matriz rocosa, del grado de alteración y de la existencia o no de relleno. En discontinuidades sanas y limpias, la resistencia sería la misma de la matriz rocosa, pero generalmente es menor debido a la meteorización de las paredes: los procesos de alteración afectan en mayor grado a los planos de discontinuidad que a la matriz rocosa (Figura 14). Por este motivo, junto a la medida de la resistencia de las paredes de la discontinuidad debe ser estimado el grado de meteorización de la matriz rocosa, según el Cuadro 4.

La resistencia puede estimarse en campo con el **martillo Schmidt**, aplicándolo directamente sobre la discontinuidad, siguiendo el procedimiento descrito en el Apartado 6.5 del Capítulo 6 para medir la resistencia de la matriz rocosa, o a partir de los **índices de campo** del Cuadro 3.7 del Capítulo 3, donde, en general, la resistencia de la pared rocosa estará comprendida entre los grados R_0 a R_6 .

En ambos casos las medidas deben realizarse sobre paredes representativas del estado de alteración de las discontinuidades, considerando también las discontinuidades más frecuentes o más significativas en el macizo rocoso.

Abertura

La abertura es la distancia perpendicular que separa las paredes de la discontinuidad cuando no existe relleno (Figura 15a). Este parámetro puede ser muy variable en diferentes zonas de un mismo macizo rocoso: mientras que en superficie la abertura puede ser alta, ésta se reduce con la profundidad, pudiendo llegar a cerrarse. La influencia de la abertura en la resistencia al corte de la discontinuidad es importante incluso en discontinuidades muy cerradas, al modificar las tensiones efectivas que actúan sobre las paredes. Los procesos de desplazamiento en la discontinuidad o de disolución pueden dar lugar a aberturas importantes.

Su medida se realiza directamente con una regla graduada en milímetros. Cuando la separación es muy pequeña se puede emplear un calibre que se introduce en la abertura. Debe indicarse si la abertura de una discontinuidad presenta variaciones, realizándose medidas a lo largo al menos de 3 m. La descripción se realiza según la terminología del Cuadro 8. Las medidas han de realizarse para cada familia de discontinuidades, adoptando los valores medias más representativos de cada una de ellas.

Descripción de la abertura

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

Cuadro 8 – descripción de la abertura (ISRM, 1981)

Relleno

Las discontinuidades pueden aparecer llenas de un material de naturaleza distinta a la roca de las paredes. Existe gran variedad de materiales de relleno con propiedades físicas y mecánicas muy variables. La presencia de relleno gobierna el comportamiento de la discontinuidad, por lo que deben ser reconocidos y descritos todos los aspectos referentes a sus propiedades y estado. Debe tenerse en cuenta que si se trata de materiales blandos o alterados, éstos pueden sufrir variaciones importantes en sus propiedades resistentes a corto plazo si cambia su contenido en humedad o si tiene lugar algún movimiento a lo largo de las juntas.

Las características principales del relleno que deben describirse en el afloramiento son: su naturaleza, espesor o anchura, resistencia al corte y permeabilidad (los dos últimos parámetros de forma indirecta o cualitativa):

- La anchura se mide directamente con una regla graduada en mm.
- La descripción del relleno incluye la identificación del material, descripción mineralógica y tamaño de grana. Si el relleno proviene de la descomposición y alteración del material de las paredes de la discontinuidad, deberá ser evaluado su grado de meteorización, que normalmente será descompuesto o desintegrado (Cuadro 4.4).
- La resistencia se puede estimar mediante los Índices de campo del Cuadro 3.7 del Capítulo 3 (si el relleno es blando corresponderá a los grados S_1 a S_6), o mediante la utilización del esclerómetro o martillo de Schmidt, cuyo procedimiento de medida se detalla en el Apartado 6.5 del Capítulo 6.
- Debe indicarse el grado de humedad, y estimarse cualitativamente la permeabilidad del material de relleno.
- En caso de poder reconocerlo, se indicará si ha existido desplazamiento por corte a favor del relleno, en cuyo caso sus propiedades y estructura mineralógica habrán sufrido cambios con respecto al estado inicial.

En la Figura 15 se presentan ejemplos de discontinuidades con rellenos.

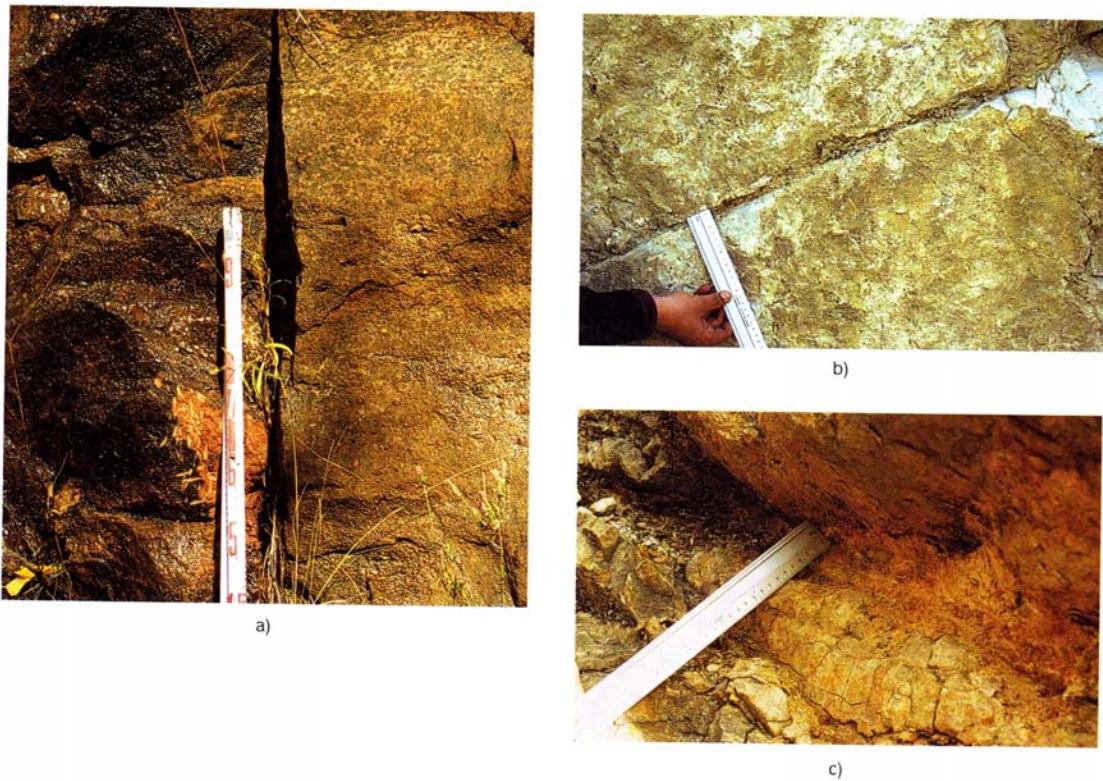


Fig. 15 - a) Discontinuidad de abertura «muy ancha» sin relleno, en areniscas; b) Discontinuidad «plana rugosa», con abertura «ancha» y relleno arcilloso seco; c) Discontinuidad «ondulada-rugosa» en calizas con abertura «muy ancha» y relleno arcilloso. Los elementos de escala de las fotografías corresponden a 0.5 m (a) y 30 cm (b y c); (cortesía de Prospección y Geotecnia).



Fig. 16 - Circulación de agua a favor de discontinuidades en un macizo rocoso muy meteorizado de areniscas (cortesía de Prospección y Geotecnia).

Recuadro 1: Evaluación de la resistencia al corte de discontinuidades a partir de datos de campo

La resistencia al corte de discontinuidades sin cohesión puede estimarse a partir de datos de campo mediante el criterio de Barton y Choubey (1977), como se describe en el Apartado 5 del Capítulo 3:

$$\tau_p = \sigma'_n \operatorname{tg} (\text{JRC} \log_{10}(\text{JCS}/\sigma') + \phi_r)$$

donde:

($\text{JRC} \log_{10}(\text{JCS}/\sigma')$ + ϕ_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 plan de discontinuidad.

JRC = coeficiente de rugosidad de la discontinuidad

JCS = resistencia a compresión simple de la pared de la discontinuidad.

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 Schmidt sobre la pared de la discontinuidad, R el valor del rebote del martillo 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 según se explica en el Apartado 3.5 del Capítulo 3; el valor de σ'_n se calcula en función de la carga litostática sobre la discontinuidad, conociendo la densidad del material rocoso y, en su caso, la presión de agua. El valor de σ'_n puede estimarse a partir de tablas bibliográficas (Cuadro 3.13 del Capítulo 3). El valor del coeficiente de rugosidad JRC se estima por comparación a partir de los perfiles tipo que aparecen en la Figura 3.85 del Capítulo 3.

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 anterior. El ensayo se describe en el Apartado 6.5 del Capítulo 6.

Filtraciones

El agua en el interior de un macizo rocoso procede generalmente del flujo que circula por las discontinuidades (permeabilidad secundaria), aunque en ciertas rocas permeables las filtraciones a través de la matriz rocosa (permeabilidad primaria) pueden ser también importantes. Las observaciones respecto a las filtraciones en discontinuidades, tanto si se presentan rellenas como si aparecen limpias, pueden seguir las descripciones del Cuadro 9.

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 e seco. No es posible el flujo de agua
II	Junta seca sin evidencia 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 (estimar caudal en l/min)
V	Junta con rezume, ocasionalmente goteo pero sin flujo continuo	Relleno localmente lavado, flujo considerable según canales preferentes (estimar caudal e presión)
VI	Junta con flujo continuo de agua (estimar el caudal en l/min y la presión)	Rellenos completamente lavados, presiones de agua elevados

Cuadro 9 – Descripción de las filtraciones en discontinuidades

5. Parámetros del macizo rocoso

Para la caracterización global del macizo rocoso a partir de datos de afloramientos, además de la descripción de sus componentes, la matriz rocosa y las discontinuidades, deben ser considerados otros factores representativos del conjunto, como son:

- Número y orientación de las familias de discontinuidades.
- Tamaño de bloque e intensidad de fracturación.
- Grado de meteorización.

Número y orientación de familias de discontinuidades

El comportamiento mecánico del macizo rocoso, su modelo de deformación y sus mecanismos de rotura están condicionados por el número de familias de discontinuidades. La orientación de las diferentes familias con respecto a una obra o instalación sobre el terreno puede determinar, además, la estabilidad de la misma.

La intensidad o grado de fracturación y el tamaño de los bloques de matriz rocosa vienen dados por el número de familias de discontinuidades y por el espaciado de cada familia. Cada una de las familias queda caracterizada por su orientación en el espacio y por las propiedades y características de los planos.

En los reconocimientos de campo de los macizos rocosos deben ser registradas todas las familias presentes, y evaluar su grado de importancia relativa. Este grado puede expresarse mediante la asignación de números correlativos para las familias de mayor a menor importancia. Así, la familia principal (con mayor continuidad, menor espaciado, mayor abertura, etc.) sería la familia número uno.

La orientación media de una familia se evalúa mediante la proyección estereográfica o la construcción de diagramas de rosetas con los datos de las orientaciones medidas para cada discontinuidad. Actualmente existen programas informáticos para realizar estos trabajos de una forma rápida y exacta.

El macizo puede clasificarse por el número de familias según el Cuadro 4.10, variando entre macizos rocosos masivos o con una única familia de discontinuidades, por ejemplo un macizo rocoso granítico, y macizos con cuatro o más familias de discontinuidades, como puede ser un afloramiento de pizarras plegado e intensamente fracturado. La presencia de tres familias principales de discontinuidades ortogonales entre sí es frecuente en los macizos rocosos sedimentarios, siendo una de las familias la estratificación.

Tipo de macizo rocoso	Número de familias
I	Masivo, discontinuidades ocasionales
II	Una familia de discontinuidades
III	Una familia de discontinuidades más otras ocasionales.
IV	Dos familias de discontinuidades.
V	Dos familias de discontinuidades más otras ocasionales.
VI	Tres familias de discontinuidades.
VII	Tres familias de discontinuidades más otras ocasionales.
VIII	Cuatro o más familias de discontinuidades.
IX	Brechificado.

Cuadro 10 - Clasificación de macizos rocosos por el número de familias de discontinuidades (SRM, 1981)

Las familias de discontinuidades se pueden representar gráficamente mediante bloques diagrama como los de las Figuras 17 y 3.77 del Capítulo 3, permitiendo así la visualización espacial de su orientación relativa y del tamaño y forma de los bloques de matriz rocosa.

Tamaño de bloque y grado de fracturación

El tamaño de los bloques que forman el macizo rocoso condiciona de forma definitiva su comportamiento y sus propiedades resistentes y deformacionales. La dimensión y la forma de los bloques están definidas por el número de familias de discontinuidades, su orientación, su espaciado y su continuidad. La descripción del tamaño de bloque se puede realizar de las siguientes formas:

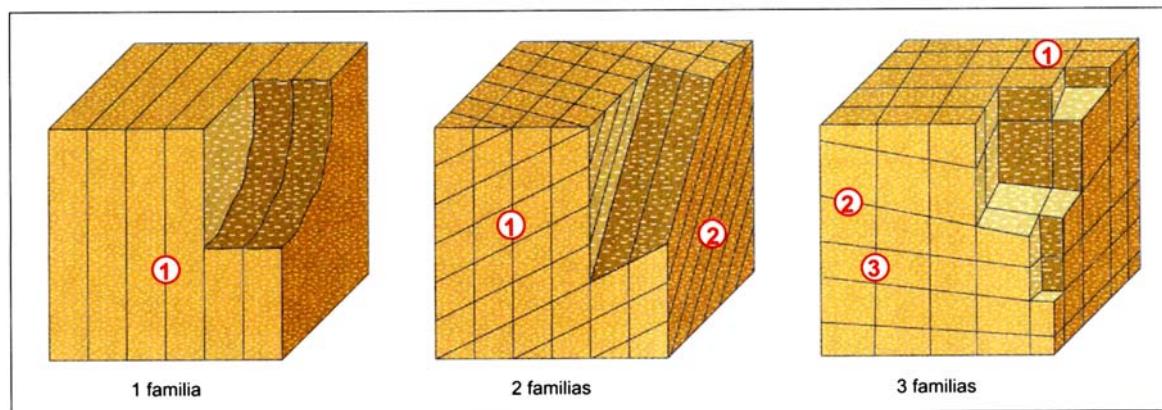


Fig. 17 - Representación del número de familias mediante bloques diagramas.

- Mediante el índice de tamaño de bloque I_b , que representa las dimensiones medias de los bloques tipo medidos en el afloramiento. Por ejemplo, en el caso de una roca sedimentaria con planos de estratificación y con dos familias de discontinuidades perpendiculares entre sí, el índice I_b vendría definido por:

$$I_b = (e_1 + e_2 + e_3)/3$$

siendo e_1 , e_2 y e_3 los valores medios del espaciado de las tres familias de discontinuidades.

- Mediante el parámetro J_v , que representa el número total de discontinuidades que interceptan una unidad de volumen (1 m^3) del macizo rocoso. Ante la dificultad de observar tridimensionalmente un afloramiento, el valor de J_v se suele determinar contando las discontinuidades de cada familia que interceptan una longitud determinada, midiendo perpendicularmente a la dirección de cada una de las familias (o en su defecto realizando la corrección necesaria con respecto a la dirección aparente de medida):

$$J_v = \Sigma \frac{\text{nº de discontinuidades}}{\text{longitud de medida}}$$

Por ejemplo, para un macizo con tres familias de discontinuidades (J_1 , J_2 y J_3):

$$J_v = (\text{nº } J_1/L_1) + (\text{nº } J_2/L_2) + (\text{nº } J_3/L_3)$$

La longitud a medir dependerá del espaciado de cada familia, variando normalmente entre 5 y 10 metros. De forma más rápida, aunque menos exacta, también puede estimarse el valor de J_v contando el número total de discontinuidades que interceptan una longitud L en cualquier dirección de interés (cortando al mayor número posible de planos), correspondiendo este valor a la frecuencia de discontinuidades, λ :

$$\lambda = \frac{\text{nº de discontinuidades}}{L \text{ (m)}}$$

El valor de J_v se relaciona con el tamaño de los bloques según el Cuadro 11; los valores mayores de 60 corresponden a un macizo rocoso brechificado.

El Cuadro 12 incluye una clasificación del macizo rocoso en función de la forma y tamaño del bloque y de la intensidad de fracturación.

En las Figuras 18 y 19 se presentan ejemplos de descripción del tamaño de los bloques y del grado de fracturación en los macizos rocosos en función del número de familias de discontinuidades.

Descripción	J_v (discontinuidades/ m^3)
Bloques muy grandes	< 1
Bloques grandes	1-3
Bloques de tamaño media	3-10
Bloques pequeños	10-30
Bloques muy pequeños	> 30

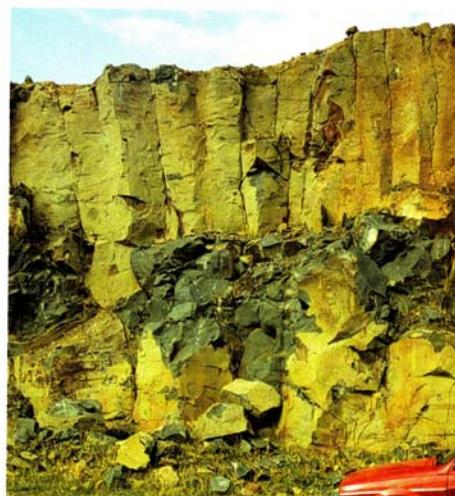
Cuadro 11 - Descripción del tamaño de bloque en función del número de discontinuidades (ISRM, 1981)

Classe	Tipo	Descripción
I	Masivo	Pocas discontinuidades o con espaciado muy grande
II	Cúbico	Bloques aproximadamente equidimensionales
III	Tabular	Bloques con una dimensión considerablemente menor que las otras
IV	Columnar	Bloques con una dimensión considerablemente mayor que las otras
V	Irregular	Grandes variaciones en el tamaño y forma de los bloques
VI	Triturado	Macizo rocoso muy fracturado

Cuadro 12 - Clasificación de macizos rocosos en función del tamaño y forma de los bloques



a)



b)

Fig. 18 - a) Bloques cúbicos pequeños formados por familias de discontinuidades ortogonales entre si en materiales margocalizos: b) bloques columnares grandes (de unos 3 m de altura) en un macizo volcánico con la parte inferior afectada a por un mayor grado de fracturación: (fotos L. G. de Vallejo.)

La fracturación del macizo rocoso está definida por el número, espaciado y condiciones de las discontinuidades, cualquiera que sea su origen y clase. El **grado de fracturación** se expresa habitualmente por el valor del **índice RQD** (*rock quality designation*), parámetro descrito en el Apartado 6.3 del Capítulo 6, que se mide en testigos de sondeos. En base a su valor se clasifica la calidad del macizo rocoso según el Cuadro 3.11 del Capítulo 3.

A pesar de su utilidad, este índice no considera aspectos como la orientación, separación, rellenos y demás condiciones de las discontinuidades, por lo que no es suficiente para describir las características de la fracturación de los macizos rocosos; estas aspectos adicionales deben quedar cubiertos por descripciones de campo y de los testigos de los sondeos.

La descripción de la fracturación a partir de datos de afloramientos puede referirse al número de familias de discontinuidades y al tamaño de los bloques, como se ha descrito en los párrafos anteriores. El **índice RQD** puede estimarse en afloramientos a partir de correlaciones empíricas como la de Palmstrom, 1975 (en ISRM, 1981):

$$RQD = 115 - 3,3 J_v \quad \text{para } J_v > 4,5$$

$$RQD = 100 \quad \text{para } J_v \leq 4,5$$

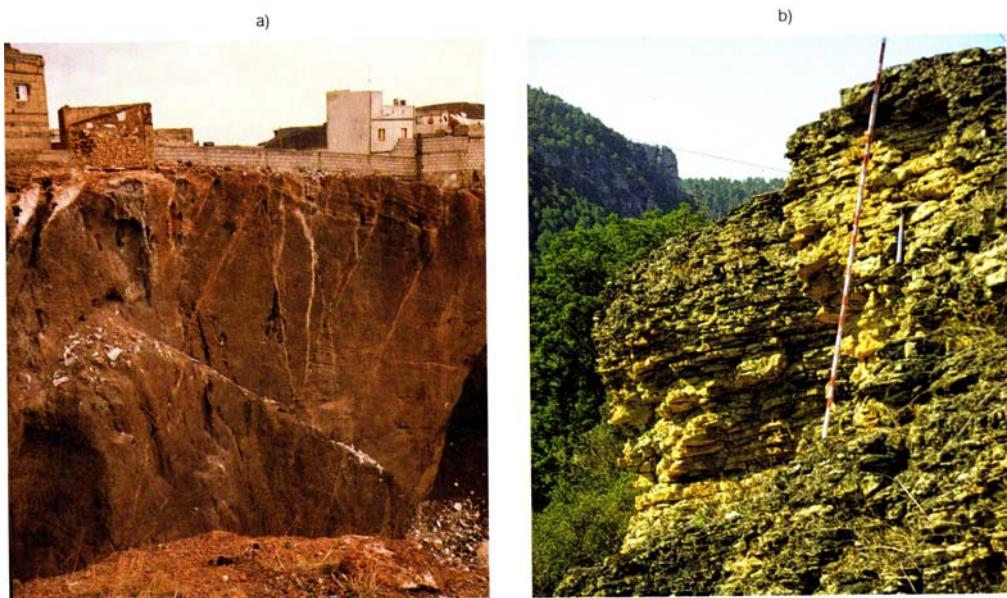


Fig. 19 - a) Macizo rocoso volcánico masivo con bloques muy grandes; b) macizo dolomítico triturado, con bloques muy pequeños;(fotos M. Ferrer).

Por ejemplo, para un macizo rocoso de calidad aceptable con un RQD de 65, el valor correspondiente de J_v es de 15, mientras que para un macizo rocoso de calidad pobre, con RQD de 30, J_v vale 26.

La estimación del índice RQD puede también realizarse a partir de la frecuencia de discontinuidades, λ , mediante la siguiente expresión que proporciona el valor teórico mínimo del RQD (Figura 4.20):

$$RQD \approx 100 \exp^{-0,1\lambda} (0,1\lambda + 1)$$

donde λ es la inversa del espaciado medio de las discontinuidades.

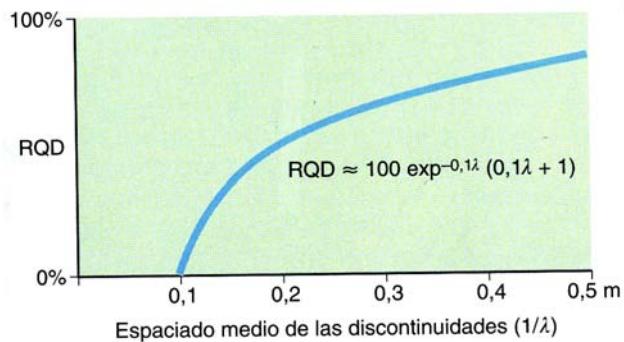


Fig. 20 - Relación entre la frecuencia del espaciado y el índice RQD.

Grado de meteorización

La evaluación del grado de meteorización del macizo rocoso se realiza por observación directa del afloramiento y comparación con los índices estándares recogidos en el Cuadro 13. En ocasiones puede ser necesario fragmentar un trozo de roca para observar la meteorización de la matriz rocosa.

En la Figura 21 se presentan ejemplos de macizos rocosos afectados por diferentes grados de meteorización.

Grado de meteorización	Tipo	Descripción
I	Fresco	No aparecen signos de meteorización.
II	Ligeramente meteorizado	La decoloración indica alteración del material rocoso y de las superficies de discontinuidad. Todo el conjunto rocoso está decolorado por meteorización.
III	Moderadamente meteorizado	Menos de la mitad del macizo rocoso aparece descompuesto y /o transformado en suelo. La roca fresca o decolorada aparece como una estructura continua o como núcleos aislados.
IV	Altamente meteorizado	Más de la mitad del macizo rocoso aparece descompuesto y /o transformado en suelo. La roca fresca o decolorada aparece como una estructura continua o como núcleos aislados.
V	Completamente meteorizado	Todo el macizo rocoso aparece descompuesto y /o transformado en suelo. Se conserva la estructura original del macizo rocoso.
VI	Suelo residual	Todo el macizo rocoso se ha transformado en un suelo. Se ha destruido la estructura del macizo y la fábrica del material.

Cuadro 13 - Evaluación del grado de meteorización del macizo rocoso (ISRM, 1981)



a)



b)



c)



d)

Fig. 21 - Ejemplos de meteorización de macizos rocosos. a) Grado II: gneiss glandular con matriz rocosa y superficies de discontinuidad ligeramente decoloradas; b) y c) Grado III: macizos rocosos calizo y cuarcítico moderadamente meteorizados, con alteración en las superficies de discontinuidad y en los bloques de matriz rocosa; d) Grado IV: macizo cuarcítico muy meteorizado, con los bloques de matriz rocosa separados y muy alterados.

6. Clasificación geomecánica y caracterización global del macizo rocoso

La descripción y medida de las características y propiedades de la matriz rocosa y de las discontinuidades y de los parámetros del macizo rocoso, proporcionan los datos necesarios para la evaluación geomecánica global del macizo. A partir de estas datas, la aplicación de las clasificaciones geomecánicas permite estimar la calidad y los parámetros resistentes aproximados del macizo, en términos de cohesión y fricción, tal como se describe en el Apartado 8 del Capítulo 3. En la Figura 3.132 del Capítulo 3 se presentan ejemplos de clasificación de macizos rocosos.

Para completar la caracterización global del macizo rocoso es también necesario evaluar otros aspectos que, en gran medida, influyen en su comportamiento mecánico, como son:

- Resistencia y deformabilidad
- Comportamiento hidrogeológico
- Estado tensional

Estos factores no pueden ser cuantificados a partir de datas de afloramientos, pero sí pueden ser realizadas observaciones que permitan conocer, al menos de una forma cualitativa, las características correspondientes de los macizos rocosos.

La determinación de la resistencia y deformabilidad de un macizo rocoso fracturado puede ser compleja al depender de las propiedades resistentes de la matriz rocosa y de las discontinuidades, más aún considerando los diversos tipos y características de éstas últimas que pueden coexistir en el macizo. La existencia de zonas tectonizadas, alteradas, de diferente composición, húmedas y la presencia de estructuras asociadas a los materiales rocosos (pliegues, fallas, diques), implican zonas de debilidad y anisotropía con diferentes comportamientos y características resistentes y deformacionales.

En general, en un macizo rocoso con matriz rocosa dura y resistente, serán las diferentes familias de discontinuidades las que controlen su resistencia, bien destacando una familia en función de sus características y su orientación, o bien la combinación de varias de ellas.

Los valores de la resistencia en un macizo de calidad alta son inferiores a los de la matriz rocosa que lo constituye, pero, aún así, éstos pueden ser muy variables en función de la disposición y orientación de las superficies de discontinuidad. En macizos rocosos blandos, la matriz rocosa juega un papel más importante en cuanto que la diferencia entre su resistencia y la de las discontinuidades es menor. En estos casos, la resistencia del macizo viene caracterizada por la de la matriz rocosa o por una combinación de la resistencia de la matriz rocosa y de las discontinuidades.

Una vez establecidos los elementos que van a controlar la resistencia del macizo (una familia o más de discontinuidades, la matriz, el conjunto de todo ello, una zona de debilidad, un plano de discontinuidad singular, etc.) pueden aplicarse los correspondientes criterios empíricos descritos en el Apartado 3.6 del Capítulo 3.

La deformabilidad puede ser igualmente evaluada de forma aproximada mediante las expresiones y criterios empíricos descritos en el mismo apartado.

Los factores hidrogeológicos que deben ser reflejados son: niveles freáticos, direcciones de flujo, filtraciones y surgencias. Así mismo deberán identificarse las zonas o elementos singulares que pueden suponer barreras o vías preferenciales para el paso del agua, como fracturas, diques, cavidades, rellenos arcillosos, etc.

Otro aspecto importante es la descripción del estado tensional a que está sometido el macizo rocoso. Aunque no es posible la evaluación cuantitativa de la magnitud de los esfuerzos con datas de campo, sí

pueden realizarse observaciones geológicas que indiquen las direcciones de esfuerzos esperables en el ámbito del macizo rocoso. Estas observaciones se pueden completar con el conocimiento de la historia geológica y tectónica de la zona (ver Apartado 3.7 del Capítulo 3).

Bibliografía recomendada

Ferrer, M. Y González de Vallejo, L., Eds. (1999). Manual de campo para la descripción y caracterización de macizos rocosos en afloramientos. IGME.

ISRM (1981). Suggested methods for rock characterization, testing and monitoring. ISRM Suggested methods. Ed. E.T. Brown. Pergamon Press.

Referencias bibliográficas

Barton, N Y Choubey, V. (1977). The shear strength of rock joints in theory and practice. Rock Mechanics, vol. 10, n.o 1, pp. 1-54.

Ferrer, M. y González de Vallejo, L, Eds. (1999). Manual de campo para la descripción y caracterización de macizos rocosos en afloramientos. IGME.

Hudson, J. A. (1989). Rock mechanics principles in engineering practice. Butterworths. Ciria. London.

ISRM (1981). Suggested methods for rock characterization, testing and monitoring. ISRM Suggested methods. Ed E.T. Brown. Pergamon Press.