

CARACTERIZACIÓN DE MACIZOS ROCOSOS

Resumido y modificado de:

1./ M. FERRER y L. GONZÁLEZ DE VALLEJO (1999). *Manual de campo para la descripción y caracterización de macizos rocosos en afloramientos*. IGME, Madrid, 107 p.

2./ L. GONZÁLEZ DE VALLEJO, M. FERRER, L. ORTUÑO y C. OTEO (2002). *Ingeniería geológica*. Prentice Hall. Madrid, 715 p.

Definiciones:

- **Roca:** agregado natural de partículas de uno o más minerales, con fuerte unión cohesiva permanente, que constituyen masas geológicamente independientes y cartografiables.
- **Suelo:** agregado natural de partículas minerales granulares y cohesivas, separables por medios mecánicos de baja energía o por agitación en agua.
- **Macizo rocoso:** conjunto de matriz rocosa y discontinuidades. Presenta carácter heterogéneo, comportamiento discontinuo y normalmente anisótropo, consecuencia de la naturaleza, frecuencia y orientación de los planos de discontinuidad, que condicionan su comportamiento geomecánico e hidráulico.
 - **Matriz rocosa = Roca matriz = Roca intacta:** material rocoso sin discontinuidades, o bloques de roca entre discontinuidades. (Se caracteriza por su densidad, deformabilidad y resistencia; por su localización geográfica; y por su litología, ya sea ésta única o variada).
 - **Discontinuidad:** cualquier plano de origen mecánico o sedimentario en un macizo rocoso, con una resistencia a la tracción nula o muy baja. (Genera comportamiento no continuo de la matriz rocosa, y normalmente anisótropo).

Factores del comportamiento mecánico de los macizos rocosos (objetivos del estudio):

- Matriz rocosa: litología (características petrográficas y propiedades)
- Discontinuidades: fracturación (tipo y frecuencia)
- Estructuras geológicas no discontinuas (sedimentarias, tectónicas: pliegues...)
- Tensiones naturales (estado tensional o de esfuerzos, sismicidad, movimientos...)
- Factores geoambientales:
 - Grado de meteorización, susceptibilidad a la meteorización
 - Condiciones hidrogeológicas (nivel freático y sus variaciones, contenido en humedad, circulación de agua...)

Aplicaciones geotécnicas de la descripción y caracterización de macizos rocosos:

- cimentación de edificios
- estabilidad de taludes: escavados o naturales
- construcción de muros y anclajes, escolleras
- terraplenes, pedraplenes y presas de tierra
- excavaciones a cielo abierto o superficiales
- excavaciones subterráneas y túneles
- obtención de materiales de construcción (balasto, macadam, áridos, piedra natural)
- mejora geotécnica de terrenos
- control de filtraciones y drenajes

1. DESCRIPCIÓN DE MACIZOS ROCOSOS EN AFLORAMIENTOS: METODOLOGÍA

Las descripciones en general son subjetivas, procurar evitarlo con descripciones objetivas:

- utilizar nomenclatura y clasificación normalizada,
- realizar observaciones y toma de datos sistemáticas.

Condiciones, procedimiento o requisitos de una buena descripción:

- examinar todos los factores según una secuencia lógica,
- no omitir ningún tipo de información básica,
- la descripción debe comunicar una imagen mental precisa,
- un usuario debe obtener la información relevante que precise.

El objetivo es que distintos observadores lleguen a la misma descripción.

Etapas en la descripción:

- 1) Descripción general del afloramiento y división en zonas (visión general):
 - identificación, características y condiciones del afloramiento en conjunto,
 - descripción de cada componente: rocas, suelos, agua, singularidades...
 - división del afloramiento en zonas (partes más homogéneas)
- 2) Descripción de cada una de las zonas:
 - descripciones objetivas y normalizadas de sus elementos estructurales (matriz rocosa y discontinuidades) y de sus propiedades
- 3) Descripción y caracterización del macizo rocoso en su conjunto:
 - síntesis de conocimientos (a partir de las observaciones y descripciones): perfiles geológico-geotécnicos y clasificaciones geomecánicas,
 - integración del emplazamiento en la geología regional.

1. Características generales del macizo: Descripción del afloramiento y división en zonas

- Presentar en forma de ficha: tipo de trabajo, fase de estudio, elemento, observador, fecha...
- *Identificación* del macizo rocoso:
 - denominación: litología
 - localización geográfica: localidad, topónimo
 - localización geológica: edad, formación
 - rasgos estructurales generales: estratificación, fallas, fracturas...
- *División en zonas homogéneas*, según distintos criterios:
 - litológicos, estructurales, hidrológicos, meteorización, fallas, brechas...
- *Registro gráfico* de afloramiento (fotografías, dibujos, esquemas), incluyendo:
 - descripción geológica general (geomorfología, litología...) y grandes estructuras
 - diferenciación y características básicas de cada zona
- *Descripción general de cada zona*, incluyendo:
 - litología, edad, meteorización, fracturas, presencia de agua...
 - una visión general del macizo y justificar su división en zonas (sin detalles respecto a la matriz rocosa o discontinuidades).
- *Identificación de zonas singulares* o estructuras lineales (fallas, diques...)
 - afectan mucho al comportamiento geomecánico,
 - precisan tratamiento individual, incluyendo: su problemática específica y su influencia en el comportamiento del macizo.

2. Descripción detallada de cada zona: Matriz rocosa y discontinuidades

- La toma de datos requiere una sistemática precisa y su presentación en forma de ficha: proyecto, autor, fecha, localización, estación, planos, fotos...
- En zonas extensas tomar datos en varios puntos o estaciones de medida, para que los datos sean representativos del macizo.
- A partir de los datos, obtener parámetros relativos a la matriz rocosa y a las discontinuidades (número de familias de discontinuidades, su orientación y sus características).

- *Matriz rocosa:*

- Identificación:
 - litología: naturaleza, potencia, localización geológica (formación, edad)
 - formaciones superficiales: naturaleza, textura, morfología, espesor
 - estructura: pliegues, fallas, otros...
 - fracturación: parámetro J_v , juntas por m^3 (6 clases)
- Meteorización: grados de meteorización (6 clases)
- Resistencia: índices de campo (7 clases + valores R del esclerómetro)
- Hidrogeología: grados de humedad (5 clases, valor del caudal)

- *Discontinuidades:*

- Identificación: tipo de plano (estratificación: S_0 , esquistosidad: S_1 , juntas: J_1, J_2 , fallas: F_1, F_2)
- Características (para cada tipo o familia de discontinuidades):
 - orientación: dirección y buzamiento (valores)
 - espaciado, en mm (7 clases)
 - continuidad según dirección y buzamiento, en m (5 clases)
 - rugosidad, establecer tipos y clases en cada tipo (3 x 3 clases)
 - apertura, en mm (9 clases)
 - relleno: - composición (8 tipos)
 - espesor, en mm
 - grado de meteorización (6 clases)
 - filtraciones, discontinuidades con o sin relleno (4 clases)
 - resistencia a la compresión de las paredes (discontinuidades con o sin relleno):
 - índices de campo (6 clases)
 - valor del penetrómetro de bolsillo
- Resistencia al corte (parámetro cuantitativo)

3. Caracterización global: Parámetros del macizo rocoso y clasificación geomecánica

- En la descripción del macizo rocoso se toman datos cualitativos y si es posible cuantitativos.
- Por ello, los métodos de caracterización tienden normalmente a obtener valores numéricos.
- En este sentido, existen tablas donde se establecen clases (escalas con valores de referencia, criterios) que permiten cuantificar dichas características y obtener parámetros.
- Dichos parámetros son necesarios en la clasificación geomecánica de los macizos rocosos.

- *Parámetros del macizo rocoso* (elementos que proporcionan los parámetros utilizados para definir y caracterizar el macizo en su conjunto o sus diferentes zonas):

- Número de familias de discontinuidades
- Tamaño de bloque
- Intensidad de fracturación
- Meteorización
- Resistencia

2. CARACTERIZACIÓN DE LA ROCA MATRIZ

(Trabajo de campo y de laboratorio)

- La descripción de rocas con fines ingenieriles, requiere seleccionar propiedades básicas y obtener parámetros (“propiedades índice”) para su clasificación geomecánica.
- Las “propiedades índice” pueden ser obtenidas mediante ensayos de campo o de laboratorio, sobre muestras o probetas de roca matriz (roca intacta).

Normas: EUROCÓDIGO 7-2; ISRM Doc N° 6 1977; BS 5930:1981; UNE-EN 932-3:1979; UNE-EN 14689-1:2005; UNE-EN 12407:2001; UNE-EN 932-3:1997; UNE 83108:1990

1) Litología: identificación y descripción

▪ Identificación: clasificación

- Clasificación petrológica o petrográfica

Existen distintos criterio de clasificación:

- genéticos: ígneas, sedimentarias, metamórficas...
- petrográficos:
 - composicionales: silíceas, carbonatadas, arcillosas...
 - texturales:
 - tipos: clásticas (compactadas, cementadas), cristalinas...
 - elementos: tamaño de grano (grosso, fino...)
- porosidad: porosas, fisuradas...

→ Clasificación y denominación de la roca [2./, pág. 243]

▪ Geometría, estructura y relaciones de campo

- Geometría (forma del cuerpo rocoso); tamaño...
 - Estructura (masiva, foliada...); estructuras sedimentarias, tectónicas...
 - Relaciones espaciales y temporales con otras rocas.
- Determinación: análisis de campo, en afloramientos naturales, calicatas...

▪ Descripción petrográfica

- Composición: identificación de minerales esenciales y accesorios (silicatos, carbonatos...)
 - Textura: tipo de textura (clástica, cristalina...), elementos texturales (tamaño, forma...)
 - Porosidad: tipo de espacios vacíos, elementos (tamaño, forma...)
- Determinación: análisis en laboratorio, “de visu”, láminas delgadas...

▪ Parámetros litológicos esenciales:

- **Color** (atender al color de la roca matriz, sin capas de alteración):
 - relación con la mineralogía: minerales con color propio o accidental (debido a impurezas).
 - relación con el grado de meteorización: produce variaciones de color, cambios selectivos...

→ Determinación: por comparación con cartas de colores (escala Munsell de color).
- **Tamaño de grano:**
 - elemento principal en la caracterización de la textura de la roca, incluye dos conceptos: tamaño medio de grano y variación de tamaño (calibrado, heterometría)

• Clasificación del tamaño medio de grano:

Término (clase)	Tamaño (escala)	Equivalencia
Grano muy grueso (canto)	> 60 mm	Grava gruesa
Grano grueso	60 a 2mm	Grava
Grano medio	2 a 0,06 mm	Arena
Grano fino	0,06 a 0,002 mm	Limo
Grano muy fino (partícula)	< 0,002 mm	Arcilla

→ Determinación: con una regla o por comparación con cartas de tamaños.

2) Meteorización

- Alteraciones que cambian las características de las rocas: modifican sus propiedades (porosidad ↑, permeabilidad ↑, deformabilidad ↑, resistencia ↓).
 - Causas (factores):
 - factores internos: mineralogía, componentes, textura y estructura, (cada tipo de roca sufre unos procesos: presenta mayor o menor intensidad).
 - factores externos: clima (temperatura, humedad, lluvia, viento), determina el tipo y la intensidad,
 - además influye el tiempo de exposición (relación con la profundidad).
 - Causas (procesos):
 - procesos o acciones físicas (influidos por la temperatura y la humedad) ⇒ efectos: fragmentación y desintegración = disgregación (aumenta la superficie expuesta).
 - procesos o acciones químicas (en presencia de agua e influidas por la temperatura) ⇒ efectos: descomposición, disolución.
 - procesos biológicos ⇒ efectos: destrucción, fisuración y descomposición.
- Determinación del estado de meteorización mediante índices normalizados, [2./ pág. 344]:

- **Grado de meteorización (ISRM, BS 5930:1981):**

Término	Descripción
FRESCA	No se observan signos de meteorización en la matriz rocosa.
DECOLORADA	Se observan cambios en el color original de la roca debidos a meteorización. Indicar el grado de cambio y si dicho cambio se limita a uno o varios minerales.
DESINTEGRADA*	Roca meteorizada a suelo, conservándose la fábrica original. Los granos minerales están sin alterar, pero la roca es friable.
DESCOMPUESTA*	Roca meteorizada a suelo, conservándose la fábrica original. Algunos o todos los granos minerales están descompuestos.

*Admiten grados: ligeramente (<10%), moderadamente (<35%), altamente (<75%), extremadamente (>75%)

3) Propiedades físicas

- **Parámetros físicos esenciales:**
 - **Densidad / Porosidad** (distintos métodos de ensayo)
 - Determinación: ensayos de laboratorio.....
 - Normas: EUROCÓDIGO 7-2; ISRM Doc Nº 2 1977; UNE-EN 12404:2001
 - **Absorción de agua** (contenido en agua, índice de vacíos...)
 - Determinación: ensayos de laboratorio.....
 - Normas: EUROCÓDIGO 7-2; ISRM Doc Nº 2 1977; UNE-EN 13755:2002
 - **Hinchamiento** (presión sin cambio de volumen, deformación en muestra confinada, deformación en muestra sin confinar)
 - Determinación: ensayos de lab. Normas: EUROCÓDIGO 7-2; ISRM Doc. Nº 2 1977
- **Parámetros relacionados con la dureza, abrasión y durabilidad:**
 - **Ensayo de Desmoronamiento (Slake-durability)**
 - Determinación: ensayo de laboratorio Normas: ISRM Doc. Nº 2 1977
 - **Resistencia al rebote (esclerómetro Shore)**
 - Determinación: ensayo de laboratorio Normas: ISRM Doc. Nº 5 1977
 - **Resistencia a la abrasión (máquina de abrasión)**
 - Determinación: ensayo de laboratorio Normas: UNE-EN 14157:2004
 - **Resistencia al desgaste: Ensayo Micro-Deval. Ensayo nórdico**
 - Determinación: ensayo de lab. Normas: UNE-EN 1097-1:1997; UNE-EN 1097-9:1999
 - **Resistencia a la fragmentación: Ensayo de Los Ángeles. Ensayo de impacto.**
 - Determinación: ensayo de lab. ... Normas: ISRM Doc. Nº 5 1977; UNE-EN 1097-2:1999
 - **Resistencia a la fragmentación: Índice de machacabilidad**
 - Determinación: ensayo de laboratorio Normas: UNE 83112:1989

- **Parámetros relacionados con la velocidad del sonido** [2./ pág. 175]
 - **Velocidad de propagación de ondas elásticas** (pulsos de alta frecuencia, pulsos de baja frecuencia, método de resonancia, módulos elásticos dinámicos)
 - Determinación: ensayo de laboratorio

Normas: ISRM Doc. N° 4 1977; UNE-EN 14579:2005

4) **Propiedades mecánicas: Resistencia y deformabilidad**

- Parámetros que permiten caracterizar y clasificar la roca matriz: la resistencia (compresión simple), y el comportamiento frente a la deformación (módulo de Young, coeficiente de Poisson).
- La resistencia determina la competencia de la roca matriz para mantener unidos sus componentes, y depende fundamentalmente de su composición mineral y del grado de alteración.

▪ **Resistencia a la compresión uniaxial**

→ Determinación de la resistencia a la compresión simple:

- | | | |
|-------------------|----------------------|--|
| - en campo: | - pruebas: | a) índices indirectos o índices de campo |
| | - ensayos sencillos: | b) martillo Schmidt, c) carga puntual |
| - en laboratorio: | - ensayos mecánicos: | d) compresión uniaxial |

a) **Índices de campo: estimación de la resistencia uniaxial (ISRM):**

- Primera aproximación del valor de la resistencia: valoración cualitativa que tabulada permite establecer una estimación cuantitativa del rango de resistencia en suelos cohesivos y rocas.
 - Procedimiento: limpiar capa de alteración superficial, hacer pruebas con navaja o martillo de geólogo y clasificar la resistencia de la roca de acuerdo con la tabla:

• **Resistencia a partir de índices de campo (ISRM):**

Clase	Descripción	Identificación de campo	≈ Resistencia a la compresión (MPa)
S ₁	Suelo muy blando	El puño penetra fácilmente varios cm.	< 0,0025
S ₂	Suelo blando	El dedo penetra fácilmente varios cm.	0,0025 – 0,05
S ₃	Suelo firme	Se necesita una pequeña presión para hincar el dedo.	0,05 – 0,10
S ₄	Suelo rígido	Se necesita una fuerte presión para hincar el dedo.	0,10 – 0,25
S ₅	Suelo muy rígido	Con cierta presión puede marcarse con la uña.	0,25 – 0,50
S ₆	Suelo duro	Se marca con dificultad al presionar con la uña.	> 0,50
R ₀	Roca extremadamente blanda	Se puede marcar con la uña.	0,25 – 1,0
R ₁	Roca muy blanda	Al golpear con la punta del martillo la roca se desmenuza. Con navaja se talla fácilmente.	1,0 – 5,0
R ₂	Roca blanda	Al golpear con la punta del martillo se producen ligeras marcas. Con la navaja se talla con dificultad.	5,0 – 25
R ₃	Roca moderadamente dura	Con un golpe fuerte del martillo puede fracturarse. Con la navaja no puede tallarse.	25 – 50
R ₄	Roca dura	Se requiere más de un golpe del martillo para fracturarla.	50 – 100
R ₅	Roca muy dura	Se requiere muchos golpes del martillo para fracturarla.	100 – 250
R ₆	Roca extremadamente dura	Al golpear con el martillo sólo saltan esquirlas.	> 250

b) **Ensayo con el esclerómetro Martillo Schmidt:** [2./ pág. 346]

- Ensayo sencillo de campo o laboratorio, que permite estimar la resistencia a la compresión simple de la matriz rocosa y que también se aplica a las discontinuidades:
 - en roca matriz: evitar bloques pequeños o con discontinuidades cercanas,
 - en superficies de discontinuidad: aplicar directamente en dicha superficie.
- El esclerómetro es un cilindro de unos 6 cm de diámetro, con la masa y el muelle en su interior, el vástago retráctil en uno de sus extremos y una escala en su superficie lateral.
- El ensayo consiste en lanzar una masa mediante un muelle sobre un vástago en contacto con la roca, al golpear el vástago la roca rebota la masa y queda registrado el “número de rebote”.

- El "número de rebote" obtenido, junto con la densidad de la roca, se correlaciona con la resistencia a la compresión simple (gráfico de Miller).

→ Determinación: ensayo de campo y de laboratorio

Normas: ISRM Doc. Nº 5 1977, UNE-EN 12504-2:2002

c) Ensayo de carga puntual o ensayo PLT (*Point Load Test*): [2./ pág. 348]

- Ensayo sencillo de campo o laboratorio, a utilizar sobre fragmentos de roca o testigos, (resultados más fiable para testigos); ensayo no indicado en rocas blandas o anisótropas.

- El ensayo consiste en aplicar una carga puntual a un trozo de roca hasta la rotura, y obtener un índice (I_s) mediante la expresión: $I_s = P / D^2$

donde: P = carga de rotura, D = diámetro de la muestra (distancia entre puntas).

- El índice obtenido (I_s) está relacionado con la resistencia a la compresión simple (σ_c); dicha relación para testigos de 50 mm es: $\sigma_c = 23 I_s$, para otros diámetros existen gráficos de corrección.

→ Determinación: ensayo de campo y de laboratorio

Normas: EUROCÓDIGO 7-2; UNE 22950-5:1996

d) Resistencia a la compresión uniaxial y deformabilidad [2./ pág. 165]

– **Ensayo de compresión uniaxial**

→ Determinación: ensayo de laboratorio Normas: EUROCÓDIGO 7-2; ISRM Doc. 1978; UNE 22950-1:1990; ASTM C170:1087; UNE 1926-1:1999; UNE 83111:1987

– **Ensayo de deformabilidad: Módulos elásticos (Young, Poisson)**

→ Determinación: ensayo de laboratorio

Normas: EUROCÓDIGO 7-2; ISRM Doc. 1978; UNE 22950-3:1990; UNE-EN 14580:2006

– **Ensayo de deformabilidad: Módulo de elasticidad dinámico**

→ Determinación: ensayo de laboratorio Normas: UNE-EN 14146:2004

• **Clasificación de la resistencia de la roca matriz (ISRM, 1981; Bieniawski, 1973):**

Clase	Descripción (ISRM)	Resistencia a la compresión simple (MPa)	Resistencia (Bieniawski)	Valores del ensayo PLT (MPa)		
R ₀	Extremadamente blanda	< 1	Muy baja	No aplicable	≈ Suelos	
R ₁	Muy blanda	1 – 5			Baja	Rocas blandas
R ₂	Blanda	5 – 25				
R ₃	Moderadamente dura	25 – 50	Media	1- 2	Rocas duras	
R ₄	Dura	50 – 100	Alta	2 – 4		
R ₅	Muy dura	100 – 250	(>200) Muy alta	4 – 8		
R ₆	Extremadamente dura	> 250		> 10		

1 MPa = 10,2 Kp/cm²

▪ **Resistencia a la tracción** [2./ pág. 174]

– **Ensayo de tracción directa**

→ Determinación: ensayo de laboratorio ISRM Doc. Nº 8 1977

– **Ensayo de tracción indirecta: Ensayo brasileño**

→ Determinación: ensayo de laboratorio

Normas: EUROCÓDIGO 7-2; ISRM Doc. Nº 8 1977; UNE 22950-2:1990

▪ **Resistencia la compresión triaxial** [2./ pág. 170]

→ Determinación: ensayo de laboratorio

Normas: EUROCÓDIGO 7-2; ISRM Doc. Nº 5 1977; UNE 22950-4:1990

▪ **Resistencia al corte directo** (in situ, en laboratorio, in situ por torsión) [2./ pág. 348]

→ Determinación: ensayo de laboratorio y de campo

Normas: EUROCÓDIGO 7-2; ISRM Doc. Nº 5 1977

3. DESCRIPCIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES

(Trabajo de campo)

1) Identificación: Tipos de discontinuidades

- El comportamiento (mecánico, hidráulico) del macizo condicionado por las discontinuidades.
- Distinguir: discontinuidades sistemáticas (tratamiento estadístico) y singulares (individual).

- **Tipos de discontinuidades:**

- **Sistemáticas planares:** diaclasas, planos de estratificación, esquistosidad, laminación, estilolitos
- **Sistemáticas lineales:** intersección de discontinuidades planares, lineaciones
- **Singulares planares:** fallas, diques, (kink bands), discordancias
- **Singulares lineales:** ejes de pliegue

- **Diaclasas o juntas** (superficies de fractura, desplazamiento inexistente o muy pequeño): $J_1, J_2 \dots$
 - origen tectónico: asociadas a pliegues, fallas
 - enfriamiento de rocas ígneas (transversales y longitudinales a la línea de flujo)
 - relajación por descompresión (subparalelas a la superficie topográfica)
- **Fallas** (superficies de fractura, desplazamiento relativo entre los bloques): $F_1, F_2 \dots$
 - falla normal (desplazamiento vertical, distensión, buzamiento elevado)
 - falla inversa (desplazamiento vertical, compresión, buzamiento bajo)
 - falla de desgarre (desplazamiento horizontal, buzamiento vertical)
- **Planos de estratificación** (en rocas sedimentarias, limitan los estratos): $S_0 \dots$
- **Planos de esquistosidad** (en rocas metamórficas deformadas): $S_1, S_2 \dots$
- **Superficies de laminación** (en rocas sedimentarias, limitan las láminas)
- **Superficies de contacto** (entre litologías, en rocas sedimentarias o ígneas: diques)
 - Determinación en el campo

2) Descripción de las discontinuidades (características y parámetros a definir):

- **Orientación** (dirección y buzamiento; obtención de familias de discontinuidades)
 - Influye en la estabilidad del terreno respecto a obras de ingeniería (excavaciones...).
 - Las distintas familias de discontinuidades definen la forma de los bloques de matriz rocosa.
 - Determinación con la brújula, obtener valores representativos (tratamiento estadístico)
 - representar los datos en: mapas, bloques diagrama o diagramas de roseta
- **Espaciado** (distancia media perpendicular entre planos consecutivos de la misma familia)
 - Influye en el comportamiento del macizo: resistencia, permeabilidad
 - El espaciado de las distintas familias define el tamaño de los bloques de matriz rocosa.
 - Determinación: para cada familia de discontinuidades se obtiene su valor medio o modal,
 - se determina con una cinta métrica calibrada en mm, de al menos 3 metros,
 - la longitud de muestreo 10 veces superior al espaciado estimado,
 - su dirección perpendicular al plano de discontinuidad (si no es posible corregir el dato)
 - representar los datos en forma de histogramas, en escala logarítmica.

- **Descripción del espaciado (ISRM):**

Clase	Descripción	Espaciado (mm)
I	Extremadamente junto	< 20
II	Muy junto	20 – 60
III	Junto	60 – 200
IV	Moderadamente junto	200 – 600
V	Separado	600 – 2000
VI	Muy separado	2000 – 6000
VII	Extremadamente separado	> 6000

- **Continuidad o persistencia** (longitud o extensión superficial del plano de la discontinuidad)
 - Es difícil cuantificar: puede ser mayor que el afloramiento.
 - Determina si la matriz rocosa se ve involucrada en la rotura del macizo.
 - Atender a las discontinuidades singulares que puedan ser superficies de debilidad en la obra.

→ **Determinación:** medir la longitud de los dos lados del plano: dirección y buzamiento

- representar en esquemas o bloques diagrama
- observar el tipo de terminación: en la roca (Er), en otra discontinuidad (Ee), no aflora (Ex)
- parámetro para el tipo de terminación: índice $T = [(Er / (Er + Ee + Ex)) \times 100 \text{ (\%)}$

• **Descripción de la continuidad (ISRM, 1981):**

Clase	Descripción	Longitud (m)
I	Muy baja continuidad	< 1
II	Baja continuidad	1 – 3
III	Continuidad media	3 – 10
IV	Alta continuidad	10 – 20
V	Muy alta continuidad	> 20

- **Rugosidad** (ondulación de la superficie, irregularidades a pequeña escala)
 - Gran influencia en el comportamiento geomecánico, sobre todo en la resistencia al corte (la influencia decrece con: abertura, relleno y desplazamiento de las discontinuidades).
 - Requiere dos escalas de observación: ondulación (dm, m) y rugosidad (mm)
 - ondulación: superficies planas, onduladas, escalonadas
 - rugosidad: superficies pulidas, lisas, rugosas
 - La ondulación y rugosidad pueden controlar las posibles direcciones de desplazamiento.
 - La resistencia al corte de discontinuidades rugosas depende de la dirección de desplazamiento.
- **Determinación:** estimación visual (“perfiles estándar”), perfiles lineales, método de los discos.
- si se conoce o supone la dirección de deslizamiento medir en esa dirección, si no en varias.

- **Resistencia de las paredes** (resistencia a la compresión simple)
 - Infiuye en la resistencia la corte y en la deformabilidad del plano de discontinuidad.
 - Influida por: la roca matriz, el relleno y la meteorización (menor en las discontinuidades).
- **Determinación:** a partir del martillo Schmidt o mediante los índices de campo: $R_0 - R_6$
- tomar paredes representativas del estado de alteración de las discontinuidades.

- **Abertura** (distancia perpendicular que separa las paredes de una discontinuidad, sin relleno)
 - Puede variar mucho de unas zonas a otras del macizo y disminuye con la profundidad
 - Infiuye mucho en la resistencia la corte.
 - Influida por: desplazamientos en las discontinuidades o disolución de la matriz rocosa.
- Medir directamente la separación entre las paredes (galgas calibradas, si es preciso)
- las medidas se hacen para cada familia, se toman los valores medios o modales
 - indicar si existen variaciones en una longitud de 3 metros.

• **Descripción de la abertura (ISRM, 1981):**

Clase	Descripción	Abertura
I	Muy cerrada	< 0,1 mm
II	Cerrada	0,1 – 0,25 mm
III	Parcialmente cerrada	0,25 – 0,5 mm
IV	Abierta	0,5 – 2,5 mm
V	Moderadamente ancha	2,5 – 10 mm
VI	Ancha	> 1 mm
VII	Muy ancha	1 – 10 cm
VIII	Extremadamente ancha	10 – 100 cm
IX	Cavernosa	> 1 m

- **Relleno** (material distinto de la roca que aparece entre las paredes de una discontinuidad)
 - Gran variedad de materiales de relleno (cuarzo, calcita, óxidos...; arena, arcilla...; brecha...)
 - Deben describirse todos los aspectos referentes a su estado y sus propiedades (en materiales blandos o alterados las propiedades pueden variar con el contenido en humedad).
 - Las propiedades influyen en: la resistencia la corte, la deformabilidad y la permeabilidad
 - **Determinación:** características del relleno a observar en el afloramiento:
 - naturaleza: identificación del material, descripción mineral y tamaño de grano;
 - grado de meteorización si procede de las paredes: desintegrado, descompuesto
 - espesor: llamado en este caso anchura (medir con una regla graduada, en mm)
 - resistencia (indicar mediante índices de campo o esclerómetro): $S_1 - S_6$
 - humedad y permeabilidad (indicar su estado y predecir su comportamiento)
 - desplazamiento previo (ver si hubo cizalla), supone cambio en las propiedades.
- **Filtraciones**
 - El agua procede mayoritariamente del flujo en discontinuidades (permeabilidad secundaria), en rocas sedimentarias puede haber también filtración en la matriz rocosa (permeabilidad primaria).
 - Las filtraciones influyen en la resistencia al corte.

• **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.

3) Resistencia al corte de las discontinuidades (resistencia friccional)

- Es el parámetro más importante en macizos rocosos duros y fracturados
- Influyen: rugosidad, resistencia de las paredes, apertura y relleno de las discontinuidades.
- La resistencia al corte de pico (ζ_p) de discontinuidades rugosas sin cohesión: $\zeta_p = \sigma'_n \operatorname{tg} \Phi_p$,
 donde: σ'_n = esfuerzo normal efectivo sobre el plano de la discontinuidad
 Φ_p = ángulo de rozamiento interno de la discontinuidad (Φ) + ángulo de rugosidad (i)

→ **Determinación:** por cálculos empíricos, o por ensayo de campo (Tilt test)

→ **Tilt test** (ensayo de corte en discontinuidades rocosas bajo cargas normales muy bajas) [2, pag. 350]

- a) Ensayo para bloques: Determinación el ángulo de rozamiento de la discontinuidad (ϕ)
 - tomar dos fragmentos de roca delimitados por una superficie de discontinuidad común,
 - los dos bloques se superponen quedando entre ambos la discontinuidad a estudiar,
 - los bloques se van inclinado hasta que comienza a deslizar uno sobre otro
 - se mide el ángulo del plano de discontinuidad respecto a la horizontal (α),
 - α define el ángulo de rozamiento de la discontinuidad estudiada,
 - α está relacionado con el esfuerzo de corte (ζ) y el esfuerzo normal (σ_n): $\alpha = \operatorname{arctg} \zeta/\sigma_n$
 - el ensayo debe repetirse con muestras de todas las familias de discontinuidades.
- b) Ensayo para testigos cilíndricos: Determinación del ángulo de rozamiento básico (ϕ_b)
 - tomar tres testigos de sondeos, se inclinan hasta que el tercero desliza sobre los otros dos,
 - α define el ángulo de rozamiento básico de discontinuidades lisas (ϕ_b) del material.

4. CARACTERIZACION GLOBAL DEL MACIZO:

4.1. PARÁMETROS DE CAMPO

La caracterización global de macizos rocosos en afloramientos incluye, además de la descripción de sus componentes: **matriz rocosa** y **discontinuidades**, otros parámetros representativos del conjunto:

1) Número de familias de discontinuidades

- Condiciona el aspecto del macizo rocoso y su comportamiento (resistencia y deformación).
- En particular, la orientación de las diferentes familias respecto a la obra condiciona la estabilidad.
- Por tanto, deben registrarse todas las familias y evaluar su importancia (asignar grados 1, 2, 3...)

→ Determinar la orientación media de cada familia: proyección estereográfica equiareal
 - representar el polo de cada plano, contar mediante una falsilla, obtener curvas de nivel con las frecuencias y en el centro del área resultante se sitúa el polo de la familia.

- **Clasificación de macizos rocosos por las discontinuidades (ISRM, 1981):**

Tipo de macizo	Número de familias
I	Masivo, discontinuidades ocasionales
II	1 familia de discontinuidades
III	1 familia de discontinuidades más otras ocasionales
IV	2 familias de discontinuidades
V	2 familias de discontinuidades más otras ocasionales
VI	3 familias de discontinuidades
VII	3 familias de discontinuidades más otras ocasionales
VIII	4 o más familias de discontinuidades
IX	Brechificado

2) Tamaño de bloque

- Condicionan el comportamiento geomecánico del macizo rocoso (resistencia y deformación).
- Tamaño y forma dependen del nº de familias de discontinuidades, su espaciado y su continuidad.

→ Se puede describir el tamaño de bloque de roca intacta de distintas formas, siendo S_i el espaciado de cada familia de discontinuidades (media o moda) y n el número de familias:

a) Mediante las **dimensiones medias del bloque tipo**, estimadas o medidas en el afloramiento:

“índice de tamaño de bloque”: $I_b = (\sum S_i) / n$ (espaciado modal) [m]

(ej: $I_b = (S_1 + S_2 + S_3)/3$, siendo: S_1, S_2, S_3 espaciado medios de tres familias de discontinuidades)

b) Mediante **nº total de discontinuidades que interceptan una unidad de volumen** (1 m^3):

es difícil de obtener directamente, por lo que en la práctica se determina para cada familia de discontinuidades: $J_v = \sum (n^\circ \text{ de discontinuidades} / \text{longitud (m)})$, o en función del espaciado:

“parámetro volumétrico del bloque”: $J_v = \sum (1 / S_i)$ (espaciado medio) [m^{-3}]

- longitud de medida: 5 a 10 m, perpendicularmente a la dirección de cada familia.

c) Más rápidamente, mediante el **nº total de discontinuidades por unidad de longitud** (1 m):

se toma la longitud en cualquier dirección de interés, es decir, que corte el mayor número posible de planos de discontinuidad: $\lambda = n^\circ \text{ discontinuidades} / \text{longitud (m)}$, o bien:

“frecuencia de discontinuidades”: $\lambda = 1 / \text{espaciado medio de discontinuidades}$ [m^{-1}]

- **Descripción del tamaño de bloque en función del nº de discontinuidades (ISRM, 1981):**

Clase	Descripción	J_v (discontinuidades / m^3)
I	Bloques muy grandes	< 1
II	Bloques grandes	1 – 3
III	Bloques medianos	3 – 10
IV	Bloques pequeños	10 – 30
V	Bloques muy pequeños	> 30
VI	Macizo brechificado	> 60

• **Clasificación del macizo rocoso según el tamaño y la forma del bloque (ISRM, 1981):**

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

3) Fracturación del macizo (Densidad de fracturación)

- Relación con el número y características de las fracturas: espaciado, tipo, estado...
- El factor que mejor define el grado de fracturación es la **densidad de fracturas** (n° / volumen)
- En la práctica el índice que define el grado de fracturación del macizo rocoso es el **RQD**

→ **RQD (rock quality designation):** [2./ pág. 326; pág. 133]

- relación entre la suma de las longitudes de los fragmentos de testigo mayores de 10 cm y la longitud total de maniobra: $RQD = (\sum \text{longitudes de trozos} > 10 \text{ cm} / \text{longitud total}) \times 100$ (%)
- se mide en testigos de sondeos, diámetro mínimo 48 mm, perforados con doble tubo,
- considera sólo los fragmentos o trozos de material fresco (grado menor de IV) a lo largo de una maniobra de sondeo o en cada cambio litológico, no excediendo normalmente 1,5 m de longitud,
- las medidas se toman del eje central del testigo, con fragmentos que alcancen todo el diámetro.

• **Clasificación de la calidad del macizo según el índice RQD:**

Clase	Calidad	RQD (%)
I	Muy mala	< 25
II	Mala	25 – 50
III	Aceptable	50 – 75
IV	Buena	75 – 90
V	Muy buena	90 – 100

- Si no puede medirse RQD, puede estimarse de las medidas de discontinuidades en afloramientos:
 - a) A partir del parámetro J_v : $RQD = 115 - 3,3 J_v$ (para $J_v > 4,5$), o bien, $RQD = 100$ (para $J_v \leq 4,5$)
 - b) A partir de la frecuencia de discontinuidades λ : $RQD = 100 e^{-0,1\lambda} (0,1\lambda + 1)$
- Aunque RQD es un índice muy útil, no es suficiente para describir las características de fracturación de los macizos rocosos, al no considerar la orientación, separación, rellenos...

4) Meteorización

- Estimar el grado de meteorización del macizo rocoso en conjunto (además de él de la matriz rocosa)

→ **Procedimiento:** observar directamente de la roca (si es preciso fragmentar la matriz rocosa)

• **Clasificación del grado de meteorización de un macizo rocoso (ISRM,1981; UNE-ENV 1997-3)**

Clase	Término	Descripción
I	Fresco	No aparecen signos visibles de meteorización, tal vez ligera decoloración en las grandes superficies de discontinuidad.
II	Ligeramente meteorizado	Todo el conjunto rocoso está decolorado por meteorización. La decoloración indica alteración del material rocoso y de las superficies de discontinuidad.
III	Moderadamente meteorizado	Menos de la mitad del macizo aparece descompuesto o transformado en suelo. La roca fresca o decolorada aparece de forma continua o como núcleos aislados.
IV	Altamente meteorizado	Más de la mitad del macizo aparece descompuesto o transformado en suelo. La roca fresca o decolorada aparece de forma discontinua o como núcleos aislados.
V	Completamente meteorizado	Todo el macizo aparece descompuesto o transformado en suelo. Se conserva la estructura original del macizo rocoso.
VI	Suelo residual	Todo el material rocoso se ha transformado en suelo. Se ha destruido la estructura del macizo rocoso y la fábrica del material. Existe cambio de volumen pero el suelo no se ha transportado significativamente.

4.2. OTROS PARÁMETROS

- Para completar la caracterización global del macizo es preciso evaluar otros factores que influyen en el comportamiento mecánico:

- Resistencia y deformabilidad
- Comportamiento hidrogeológico
- Estado tensional.

- Los datos de campo no permiten cuantificar estos factores, pero pueden aportar características cualitativas que ayuden a valorar su influencia en el macizo rocoso.

1) Resistencia y deformabilidad

- Su determinación es compleja, debido a la heterogeneidad y anisotropía de los macizos rocosos; en principio, dependen de las propiedades de la matriz rocosa y de las discontinuidades; precisan ensayos de laboratorio para ser representativos, además de los ensayos de campo.
- En macizos con matriz rocosa dura y resistente, las discontinuidades controlan la resistencia; en macizos blandos la matriz juega un papel más importante en la resistencia; en general, la resistencia del macizo siempre presenta valores inferiores a los de la roca matriz.
- Deben establecerse los elementos que van a controlar la resistencia del macizo: una familia de discontinuidades, la matriz, una singularidad...: realizar su caracterización de campo y valorar su influencia (determinar parámetros, integrarlos e interpretarlos según criterios empíricos).
- Las clasificaciones geomecánicas informan de la resistencia global y calidad del macizo, en ellas se utilizan valores de resistencia a la compresión simple aunque no son los mejores.

2) Comportamiento hidrogeológico

- El contenido y el flujo de agua en los macizos rocosos tiene gran influencia en su comportamiento.
- Los factores hidrogeológicos a tener en cuenta son: niveles freáticos, direcciones de flujo, filtraciones y surgencias.
- Además, deben identificarse las zonas o elementos singulares (barreras o vías preferentes para el agua): fracturas, diques, cavidades, rellenos arcillosos...
- La obtención de datos cuantitativos sobre parámetros: porosidad, permeabilidad, transmisividad, coeficiente de almacenamiento..., requiere ensayos específicos.
- Los principales parámetros considerados en las clasificaciones geomecánicas son:
 - caudal por 10 m de túnel: inapreciable, <10, 10 – 25, 25 – 125, > 125 (l/min)
 - condiciones: seco, húmedo, algunas, frecuentes, abundantes filtraciones

3) Estado tensional

- Las tensiones en el macizo están producidas por fuerzas exteriores o por el peso del material.
- Los esfuerzos tectónicos son la causa principal de las tensiones almacenadas en las rocas.
- Con los datos de campo no es posible la evaluación cuantitativa de los esfuerzos, pero puede deducirse su dirección probable.
- Su valoración requiere el conocimiento de la historia geológica y tectónica de la zona.
- Los principales parámetros considerados en las clasificaciones geomecánicas son:
 - factor de competencia: resistencia uniaxial de la matriz rocosa dividida por la tensión máxima vertical debida al peso del recubrimiento,
 - accidentes y actividad tectónica: fallas, cabalgamientos, actividad compresiva, distensiva,
 - factor de relajación tensional: edad geológica de la última deformación dividida por la máxima carga litostática (máximo espesor del recubrimiento),
 - actividad geotectónica: desconocida, supuesta, confirmada.

4.3. CLASIFICACIONES GEOMECÁNICAS

- El macizo rocoso es un medio discontinuo, complejo, con un comportamiento geomecánico que puede ser estudiado y clasificado en función de su aptitud para distintas aplicaciones.
- Las clasificaciones geomecánicas aportan índices de calidad relacionados con parámetros geomecánicos del macizo, sostenimiento de túneles y taludes, excavabilidad...
- La descripción y medida de las características y propiedades de la matriz rocosa, de las discontinuidades y de los parámetros globales del macizo rocoso, proporcionan los parámetros requeridos por las distintas clasificaciones.

1) Clasificación RMR (Bieniawski, 1973 y 1979)

- Parámetros geomecánicos considerados:
 - 1) Resistencia uniaxial de la matriz rocosa: ensayo PLT, ensayo de compresión simple.
 - 2) Grado de fracturación del macizo: ensayo RQD.
 - 3) Espaciado de las discontinuidades: separación entre diaclasas (m).
 - 4) Condiciones de las discontinuidades: rugosidad, continuidad, relleno, bordes.
 - 5) Condiciones hidrogeológicas: caudal, presión de agua, humedad.

Parámetros de Clasificación

1	Resistencia de la roca sana	Ensayo de carga puntual	> 100 Kp/cm ²	40 - 80 Kp/cm ²	20 - 40 Kp/cm ²	10 - 20 Kp/cm ²	Compresión simple (Kp/cm ²)		
		C. Simple	> 2.500 Kp/cm ²	1.000-2.500 Kp/cm ²	500-1.000 Kp/cm ²	250-500 Kp/cm ²	50-250	10 - 50	< 10
	Valoración		15	12	7	4	2	1	0
2	RQD		90% - 100%	75% - 90%	50% - 75%	25% - 50%	< 25%		
	Valoración		20	17	13	6	3		
3	Separación entre diaclasas		> 2 m	0.6 - 2 m	0.2 - 0.8 m	0.06 - 0.2 m	< 0.06 m		
	Valoración		20	15	10	8	5		
4	Estado de las diaclasas		Muy rugosas Discontinuas Sin separaciones Bordes sanos y duros	Ligeramente rugosas Abertura < 1 mm Bordes duros	Ligeramente rugosas Abertura < 1 mm Bordes blandos	Espejos de falla o con relleno < 5 mm o abiertas 1-5 mm Diaclasas continuas	Relleno blando > 5 mm o abertura > 5 mm Diaclasas continuas		
	Valoración		30	25	20	10	0		
5	Agua freática	Caudal por 10 m de túnel	Nulo	< 10 litros/min.	10-25 litros/min.	25-125 litros/min	> 125 litros/min.		
		Relación Presión agua-Tensión princ. mayor	0	0.0 - 0.1	0.1 - 0.2	0.2 - 0.5	> 0.5		
		Estado general	Seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Goteando	Fluyendo		
	Valoración		15	10	7	4	0		

- Corrección por la orientación de las diaclasas:
 - 6) Orientación de las discontinuidades respecto a la excavación:

Dirección y Buzamiento		Muy Favorables	Favorables	Medias	Desfavorables	Muy Desfavorables
Valoración para	Túneles	0	-2	-5	-10	-12
	Cimentaciones	0	-2	-7	-15	-25
	Taludes	0	-5	-25	-50	-60

- Clasificación: obtención del índice de calidad RMR (rock mass rating)

Clase	I	II	III	IV	V
Calidad	Muy Buena	Buena	Media	Mala	Muy Mala
Valoración	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	< 20