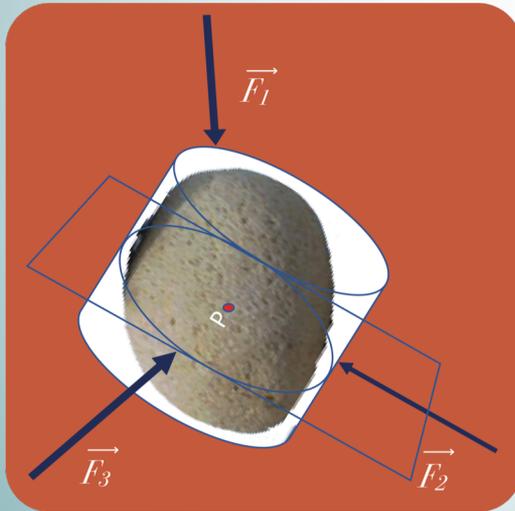


Caracterización geomecánica de suelos y rocas

Tema 5.1 Criterios de rotura en macizos rocosos



Alberto González Díez

Patricio Martínez Cedrún

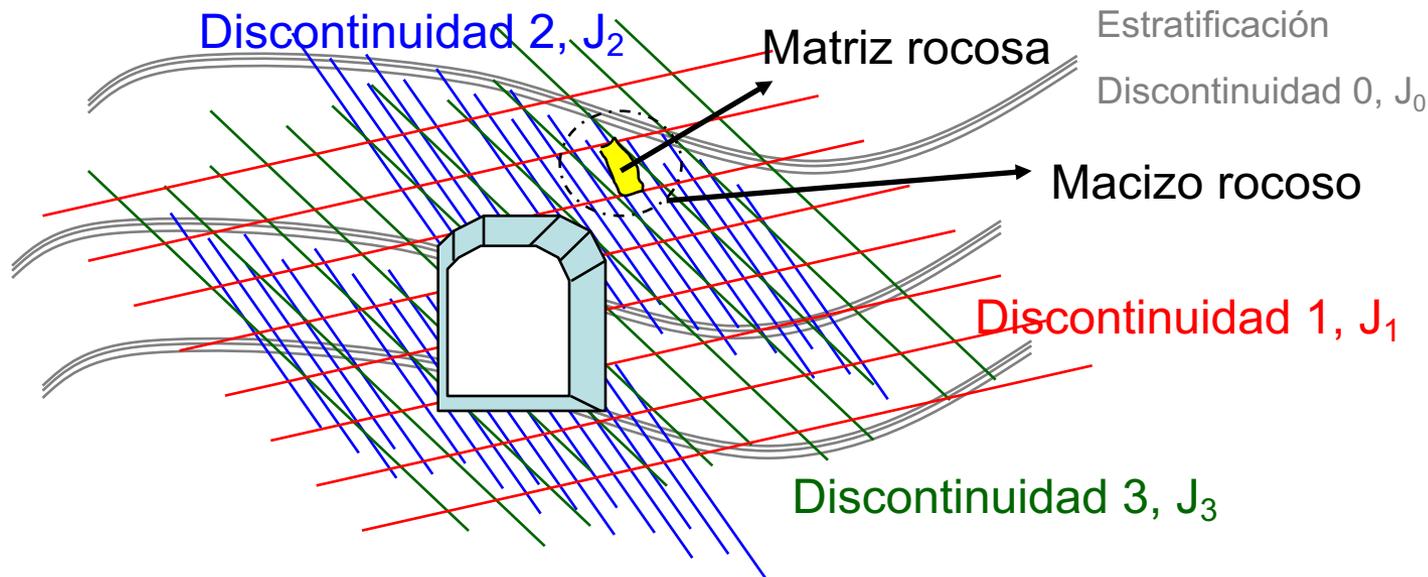
DPTO. DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y FÍSICA DE LA
MATERIA CONDENSADA (CITIMAC)

Este tema se publica bajo Licencia:

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

Resistencia y deformabilidad de macizos rocosos

La **resistencia del macizo rocoso** es función de la resistencia de la matriz rocosa y de las discontinuidades. Ambos factores **presentan** valores con **una alta variabilidad**, dependiendo además del ambiente a los que están sometidos el macizo (tensiones naturales, condiciones hidrogeológicas, zonas tectonizadas).



La resistencia puede evaluarse en términos de máximo esfuerzo que puede soportar para unas determinadas condiciones y en términos de sus propiedades resistentes, c y ϕ ; parámetros que habitualmente se necesitan en las obras civiles.

Componentes que afectan a la resistencia del macizos rocosos

Según el grado de fracturación del macizo, su comportamiento y propiedades resistentes quedarán definidas por:

- La resistencia de la matriz rocosa (isótropa o anisótropa)
- La resistencia al corte de cada familia de discontinuidades
- La resistencia global de un sistema de bloques rocosos con comportamiento isótropo.

Su evaluación puede basarse en:

- Métodos empíricos basados en experiencias y ensayos de laboratorio,**
- Métodos indirectos basados en índices de calidad (clasificaciones geomecánicas)**
- Modelos matemáticos y análisis a posteriori**
- Modelos físicos**

Resistencia y deformabilidad de macizos rocosos IV

Los **métodos indirectos** basados en **índices de calidad** (**clasificaciones geomecánicas**) permiten estimar la resistencia la resistencia de forma aproximada, al establecer correlaciones entre la clase de roca y los parámetros resistentes **c** y ϕ del macizo rocoso.

Orígenes del criterio Hoek y Brown

Fue desarrollado por Evert Hoek and E. T. Brown in 1980.

Es un método empírico e indirecto, basado en índices de calidad (clasificaciones geomecánicas) y apoyado en los trabajos previos de *RMR* (*Rock Mass Rating, propuesto por Bieniawski*).

Los autores introdujeron su criterio de rotura en un intento de proporcionar datos previos (**datos de partida**) en el análisis del diseño de excavaciones subterráneas en rocas competentes (materiales duros y resistentes).

El criterio se dedujo a partir de los resultados de las investigaciones de Hoek en roturas frágiles de rocas intactas y de un modelo de estudio del comportamiento de macizos rocosos de Brown.

Consideraciones previas (Hoek y Brown)

El criterio comienza tomando en consideración las propiedades de la roca intacta y entonces se introducían factores reductores de estas propiedades sobre la base de las características de un macizo rocoso diaclasado.

No debe olvidarse que los autores, intentaron relacionar siempre este criterio de naturaleza empírica con las observaciones geológicas, y con los resultados obtenidos por Bieniawski en su RMR.

Debido a la ausencia de otras alternativas, el criterio fue pronto adoptado por la comunidad de la mecánica de rocas y su uso rápidamente extendido más allá de los límites originales utilizados en la deducción de las relaciones de reducción de la resistencia

Principales características

Es más adecuado en el análisis de una matriz rocosa o en el de macizos rocosos isótropos.

Es un modelo no lineal.

Tiene en cuenta diversos parámetros que determinan la rotura de un medio rocoso a gran escala:

La no linealidad con el nivel de tensiones,

La influencia del tipo de roca y el estado del macizo

La relación entre resistencia a la compresión y a la tracción

La disminución del ángulo de rozamiento con el aumento de la tensión de confinamiento.

Fue desarrollado inicialmente para su aplicación a macizos rocosos fracturados sin alterar con matriz rocosa resistente, asumiendo que los bloques de roca están en contacto unos con otros y que la resistencia del macizo está controlada por la resistencia de las discontinuidades

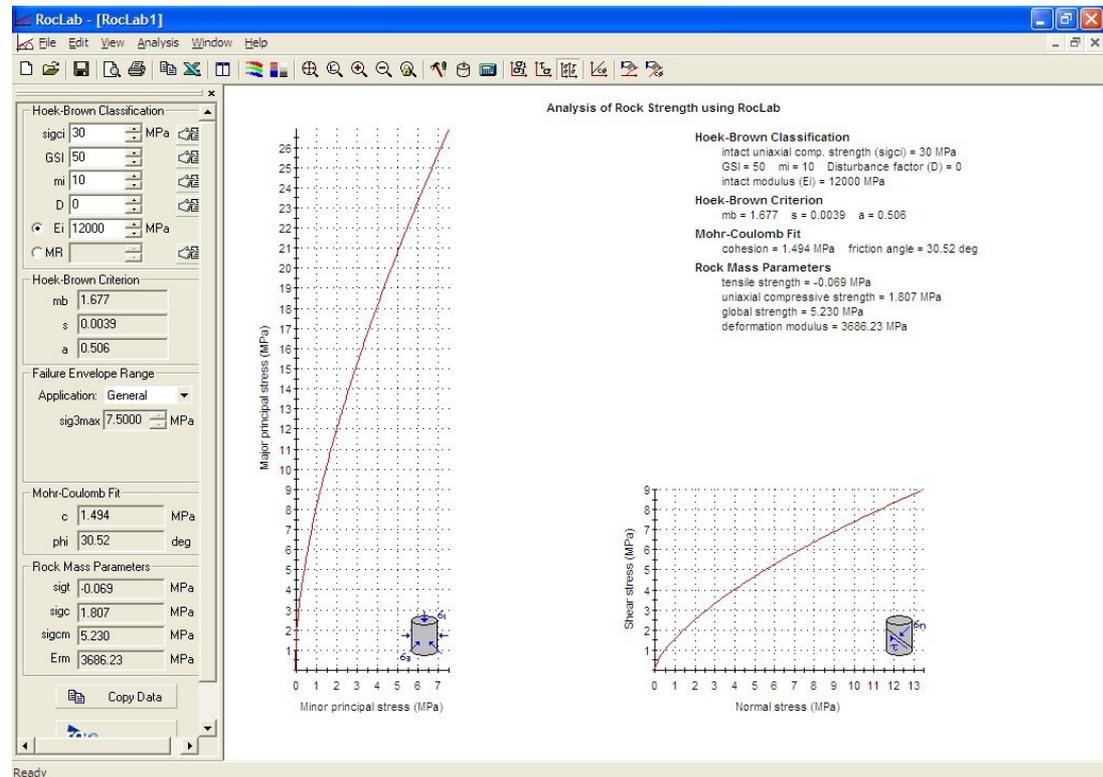
Dificultades del criterio

El criterio de rotura de macizos rocosos de Hoek-Brown es ampliamente aceptado y ha sido aplicado en un gran numero de proyectos a nivel mundial.

Mientras que en general el criterio se considera satisfactorio, existen algunas incertidumbres e inexactitudes que han creado inconvenientes en su implementación a modelos numéricos y a programas de computación de equilibrio límite.

En particular, la dificultad de encontrar un ángulo de fricción y resistencia cohesiva equivalentes para un macizo rocoso dado, ha sido un inconveniente desde su publicación

Un programa de computación asociado, denominado “RocLab”, ha sido desarrollado con la finalidad de ser un medio conveniente de resolución y representación grafica de las ecuaciones presentadas en este artículo.



CRITERIO DE HOEK-BROWN

Principales ecuaciones

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad [1]$$

donde m_b es un valor reducido de la constante del material m_i y está dado por:

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right) \quad [2a]$$

Donde m_b , s y a dependen de las propiedades y características del macizo rocoso

s y a son constantes del macizo rocoso dadas por las siguientes relaciones:

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right) \quad [3a]$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{-GSI/15} - e^{-20/3} \right) \quad [4a]$$

Para **macizos rocosos fracturados de mala calidad**, con materiales blandos y alterados, los parámetros usados para un material "disturbed" **no dan buen resultado, por lo que se ha desarrollado otros parámetros**

D es un factor que depende sobre todo del grado de alteración al que ha sido sometido el macizo rocoso por los efectos de las voladuras o por la relajación de esfuerzos. Varía desde 0 para macizos rocosos in situ inalterados hasta 1 para macizos rocosos muy alterados.

Los Valores de GSI se obtiene de la clasificación geomecánica de Hoek and Brown

ESTIMACIÓN DEL FACTOR DE ALTERNACIÓN D

La influencia de este factor de alteración puede ser grande. Esto se ilustra con un ejemplo típico en el que $\sigma_{ci} = 50$ MPa, $m_i = 10$ y $GSI = 45$.

Imágenes tomadas de E. Hoek, E.T. Brown. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering 11 (2019) 445-463. Texto de <https://www.rocscience.com/documents/pdfs/uploads/7713.pdf>

Apariencia del macizo rocoso	Descripción del macizo rocoso	Valor D sugerido
	Excelente calidad de voladura controlada o excavación con tuneladora, TBM, con resultados de alteración mínima del macizo rocoso confinado circundante al túnel	$D = 0$
	Excavación mecánica o manual en macizos rocosos de mala calidad (sin voladuras) con una alteración mínima en el macizo rocoso circundante. Cuando aparezcan problemas de deformación en el piso durante el avance, la alteración puede ser severa a menos que se coloque una contrabóveda temporal, tal como se muestra en la fotografía.	$D = 0$ $D = 0.5$ No invert
	Voladura de muy mala calidad en un túnel en roca competente con daños locales severos, extendiéndose 2 o 3 m en el macizo rocoso circundante.	$D = 0.8$
	Pequeñas voladuras en taludes de ingeniería civil dan lugar a pequeños daños al macizo rocoso, particularmente si se usan voladuras de contorno como se muestra en el lado izquierdo de la fotografía. Sin embargo la liberación de tensiones resulta en alguna alteración.	$D = 0.7$ Good blasting $D = 1.0$ Poor blasting
	Los taludes en las grandes minas a cielo abierto sufren alteraciones significativas debido a las grandes voladuras de producción y también debido a la relajación de tensiones al retirar el estéril de recubrimiento. En algunas rocas blandas la excavación puede llevarse a cabo mediante el ripado y empuje con tractores de orugas y el grado de afectación a los taludes será menor.	$D = 1.0$ Production blasting $D = 0.7$ Mechanical excavation

Parámetro m_i

Tomado de González de Vallejo et al., 2002

Valores de la constante m_i para la matriz rocosa

Tipo de roca y valor de la constante m_i				
Sedimentarias clásticas	Conglomerado	(22)	Lutita	4
	Arenisca	19	Grauvaca	(18)
	Limolita	9		
Sedimentarias no clásticas	Caliza margosa	7	Caliza micrítica	8
	Brecha caliza	(20)	Yeso	16
	Caliza esparítica	(10)	Anhidrita	13
Metamórficas	Mármol	9	Gneiss (*)	33
	Cuarcita	24	Esquisto (*)	4-8
	Migmatita	(30)	Filita (*)	(10)
	Anfibolita	25-31	Pizarra (*)	9
	Milonita	(6)		
Ígneas	Granito	33	Diorita	(28)
	Riolita	(16)	Andesita	19
	Granodiorita	(30)	Gabro	27
	Dacita	(17)	Basalto	(17)
Ígneas extrusivas piroclásticas	Aglomerado	(20)	Toba	(15)
	Brecha	(18)		

Hoek y Brown, 1997. Los valores entre paréntesis son estimados.

(*) Valores obtenidos de ensayos en matriz rocosa con dirección de aplicación de la carga normal a los planos de foliación. El valor de m_i será significativamente diferente si la rotura ocurre a favor de los planos de debilidad.

Parámetros m_b y s

Tomado de González de Vallejo et al., 2002

CUADRO 3.19

Relaciones aproximadas entre la calidad de los macizos rocosos y los valores de las constantes m y s

Criterio de rotura empírico $\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{m\sigma_1\sigma_3 + s\sigma_1^2}$ σ_1 y σ_3 : esfuerzos principales mayor y menor σ_1 : esfuerzo compresivo uniaxial de la matriz rocosa m y s : constantes empíricas del macizo rocoso	Constantes del material: m y s .	Rocas carbonatadas: dolomitas, calizas y mármol.	Rocas arcillosas: argilitas, limolitas, lutitas y pizarras.	Rocas areniscosas: areniscas y cuarcitas	Rocas ígneas cristalinas de grano fino: andesitas, doleritas, diabásas y riolitas.	Rocas cristalinas ígneas de grano grueso y metamórficas: anfíbolitas, gabros, gneises, granitos, noritas y cuarzodioritas.
Muestras de roca intacta						
Muestras de tamaño de probeta de laboratorio sin discontinuidades. RMR = 100 Q = 500	m s m s	7,0 1,0 7,0 1,0	10,0 1,0 10,0 1,0	15,0 1,0 15,0 1,0	17,0 1,0 17,0 1,0	25,0 1,0 25,0 1,0
Macizo rocoso de muy buena calidad						
Bloque de roca sana. Juntas sin meteorizar y con espaciado de 1 a 3 m. RMR = 85 Q = 100	m s m s	2,40 0,082 4,10 0,189	3,43 0,082 5,85 0,189	5,14 0,082 8,78 0,189	5,82 0,082 9,95 0,189	8,56 0,082 14,63 0,189
Macizo rocoso de calidad buena						
Bloques de roca sana o ligeramente meteorizada, con juntas espaciadas de 1 a 3 m. RMR = 65 Q = 10	m s m s	0,575 0,00293 2,006 0,0205	0,821 0,00293 2,865 0,0205	1,231 0,00293 4,298 0,0205	1,395 0,00293 4,871 0,0205	2,052 0,00293 7,163 0,0205
Macizo rocoso de calidad media						
Varias familias de discontinuidades moderadamente meteorizadas con espaciados de 0,3 a 1 m. RMR = 44 Q = 1	m s m s	0,128 0,00009 0,947 0,00198	0,183 0,00009 1,353 0,00198	0,275 0,00009 2,030 0,00198	0,311 0,00009 2,301 0,00198	0,458 0,00009 3,383 0,00198
Macizo rocoso de calidad mala						
Numerosas juntas meteorizadas con algo de relleno. Brechas compactas sin rellenos. Espaciado de 0,03 a 0,5 m. RMR = 23 Q = 0,1	m s m s	0,029 0,000003 0,447 0,00019	0,041 0,000003 0,639 0,00019	0,061 0,000003 0,959 0,00019	0,069 0,000003 1,087 0,00019	0,102 0,000003 1,598 0,00019
Macizo rocoso de calidad muy mala						
Numerosas juntas intensamente meteorizadas con rellenos. Espaciado < 0,05 m. Brechas con rellenos arcillosos. RMR = 3 Q = 0,01	m s m s	0,007 0,0000001 0,219 0,00002	0,010 0,0000001 0,313 0,00002	0,015 0,0000001 0,469 0,00002	0,017 0,0000001 0,532 0,00002	0,025 0,0000001 0,782 0,00002

Índice geológico de resistencia, GSI (Geological Strength Index)

Obtención de los parámetros m , s y a

Con el fin de ampliar en rango de aplicación del criterio generalizado, sobre todo a macizos rocosos de mala calidad, y emplear parámetros más geológicos para evaluación de su resistencia, Hoek (1994) y Hoek et al., (1995) han propuesto un **índice geológico de resistencia, GSI (Geological Strength Index)**, que evalúa la calidad del macizo en función del grado y las características de la fracturación, estructura geológica, tamaño de los bloques y alteración de las discontinuidades.

Los valores de m , s y a se obtienen mediante expresiones:

$$m_b = m_i \exp \frac{GSI - 100}{28} \quad [2b] \quad \text{Para macizos con } GSI > 25 \text{ (Buena-media calidad)}$$

$$s = \exp \frac{GSI - 100}{9} \quad a = 0,5 \quad [3b] \quad \text{Para macizos con } GSI < 25 \text{ (Mala-muy mala calidad)}$$

$$s = 0 \quad a = 0,65 - \frac{GSI}{200} \quad [4b]$$

Clasificación GSI, Hoek y Brown

CARACTERIZACIÓN DEL MACIZO ROCOSO PARA ESTIMAR SU RESISTENCIA		CONDICIÓN DEL FRENTE				
<p>Basándose en el aspecto de la roca elegir la categoría que mejor describa las condiciones del macizo previo a la excavación. Tener en cuenta que las voladuras pueden crear una impresión falsa sobre la calidad del macizo rocoso, en cuyo caso será necesario realizar algún tipo de ajuste por daños debidos a voladuras; la observación de testigos de sondeos y de frentes de roca en zonas afectadas y no afectadas por voladuras puede ser de ayuda. Para la definición del grado de fracturación (<i>blockiness</i>) debe considerarse la relación entre el tamaño del bloque y la dimensión del frente de excavación.</p>		MUY BUENA (MB) Superficies muy rugosas sin alterar	BUENA (B) Superficies rugosas ligeramente alteradas, con pátinas de oxidación	MEDIA (M) Superficies suaves moderadamente alteradas	POBRE (P) Superficies de cizalla muy alteradas con rellenos compactos conteniendo fragmentos rocosos	MUY POBRE (MP) Superficies de cizalla muy alteradas con rellenos arcillosos
ESTRUCTURA						
	BLOQUES REGULARES (BR) Macizo rocoso sin alterar. Bloques en contacto de forma cúbica formados por tres familias de discontinuidades ortogonales, sin relleno.	BR/MB	BR/B	BR/M	BR/P	BR/MP
	BLOQUES IRREGULARES (BI) Macizo rocoso parcialmente alterado. Bloques en contacto de forma angular formados por cuatro o más familias de discontinuidades con rellenos con baja proporción de finos.	BI/MB	BI/B	BI/M	BI/P	BI/MP
	BLOQUES Y CAPAS (BC) Macizo alterado, plegado y fracturado con múltiples discontinuidades que forman bloques angulosos y con baja proporción de finos.	BC/MB	BC/B	BC/M	BC/P	BC/MP
	FRACTURACIÓN INTENSA (FI) Macizo rocoso muy fracturado formado por bloques angulosos y redondeados, con alto contenido de finos.	FI/MB	FI/B	FI/M	FI/P	FI/MP

Tomado de González de Vallejo et al., 2002 (Fig. 3.94)

Clasificación GSI, Hoek y Brown II

Tomado de González de Vallejo et al., 2002

<p>ÍNDICE GEOLÓGICO DE RESISTENCIA GSI (<i>geological strength index</i>)</p> <p>A partir de la clasificación obtenida en la Figura 3.94 seleccionar el cuadro correspondiente en este ábaco y obtener el valor medio del índice GSI.</p>		CONDICIÓN DEL FRENTE				
ESTRUCTURA		MUY BUENA (MB) Superficies muy rugosas sin alterar	BUENA (B) Superficies rugosas ligeramente alteradas, con pátinas de oxidación	MEDIA (M) Superficies suaves moderadamente alteradas	POBRE (P) Superficies de cizalla muy alteradas con rellenos compactos conteniendo fragmentos rocosos	MUY POBRE (MP) Superficies de cizalla muy alteradas con rellenos arcillosos
	<p>BLOQUES REGULARES (BR) Macizo rocoso sin alterar. Bloques en contacto de forma cúbica formados por tres familias de discontinuidades ortogonales, sin relleno.</p>	80	70			
	<p>BLOQUES IRREGULARES (BI) Macizo rocoso parcialmente alterado. Bloques en contacto de forma angular formados por cuatro o más familias de discontinuidades con rellenos con baja proporción de finos.</p>		60	50		
	<p>BLOQUES Y CAPAS (BC) Macizo alterado, plegado y fracturado con múltiples discontinuidades que forman bloques angulosos y con baja proporción de finos.</p>			40	30	
	<p>FRACTURACIÓN INTENSA (FI) Macizo rocoso muy fracturado formado por bloques angulosos y redondeados, con alto contenido de finos.</p>				20	10

GSI buena calidad

Para un **GSI>25 (macizos de media a muy buena calidad)** este índice puede obtenerse a partir del RMR mediante la siguiente correlación, en cuyo caso debe asignarse un **valor de 15 para las condiciones de agua en el macizo rocoso y un valor de 0 al parámetro de ajuste para la orientación de las discontinuidades.**

$$GSI = RMR_{(89)} - 5$$

En la Aplicación del criterio de Hoek y Brown y en la interpretación de los valores de resistencia obtenidos debe tenerse en cuenta que:

El criterio es válido únicamente para macizos rocosos con comportamiento isótropo.

El índice GSI se basa en estimaciones cualitativas, y en modelos simples que rara vez coinciden con las condiciones reales

Los resultados deben ser cotejados con otros métodos y, siempre que sea posible, con datos de campo y análisis a posteriori.

Hoek y Brown y RMR

Los valores de **m** y **s** también se pueden obtener a partir del índice **RMR**

-Para macizos rocosos **sin alterar y no afectados por voladuras** (no disturbed)

$$m = m_i \exp \frac{RMR - 100}{28}$$

$$s = \exp \frac{RMR - 100}{9}$$

Donde m_i es el valor correspondiente a la matriz rocosa, se obtiene de ensayos de compresión triaxial (sus valores máximos para diferentes tipos de roca se pueden ver en el cuadro adjunto **copiar cuadro 3.14 (González de Vallejo et al., 2002)**)

Si el medio rocoso está totalmente sano (RMR=100) $m=m_i$ y $s=1$.

Para macizos rocosos **alterados o afectados por voladuras** (disturbed)

$$m = m_i \exp \frac{RMR - 100}{14}$$

$$s = \exp \frac{RMR - 100}{6}$$

CRITERIO DE HOEK-BROWN GENERALIZADO

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad [1]$$

La resistencia a la compresión uniaxial σ_c se obtiene haciendo $\sigma'_3 = 0$.

$$\sigma_c = \sigma_{ci} s^a \quad [5]$$

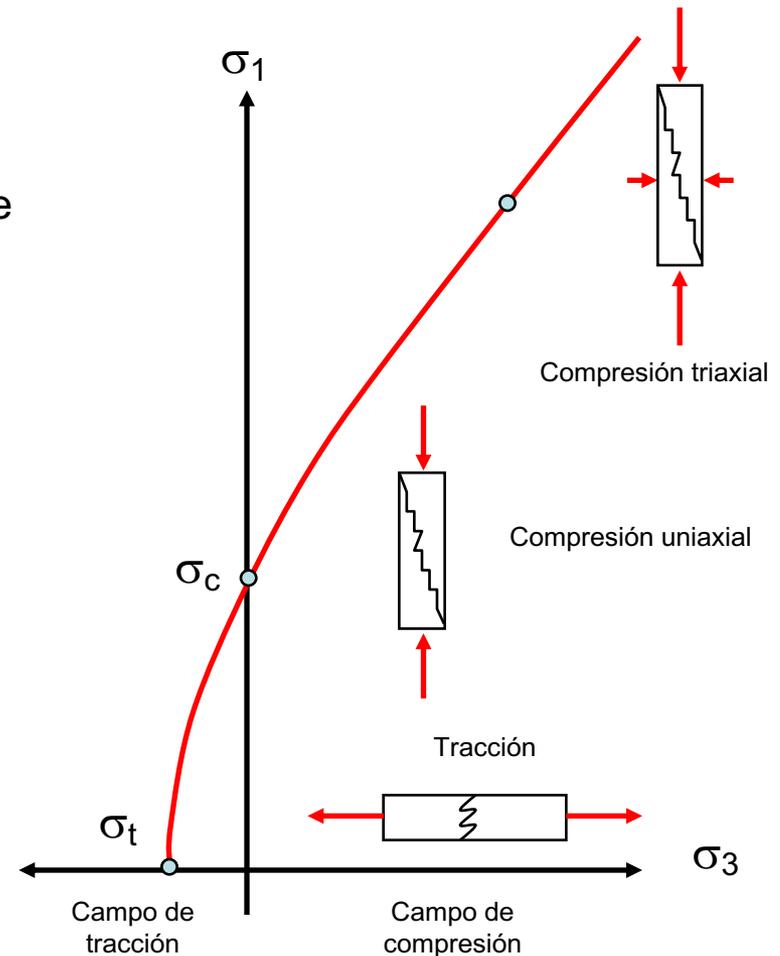
σ_t es la resistencia a tracción

$$\sigma_t = -\frac{s\sigma_{ci}}{m_b} \quad [6]$$

Esta ecuación se obtiene haciendo $\sigma'_1 = \sigma'_3 = \sigma_t$.

En el entorno de una excavación la rotura se inicia cuando los esfuerzos generados exceden el valor σ_c , y se propagan generando un campo de esfuerzos biaxial, dentro del área afectada por la rotura.

Este campo se estabiliza cuando la relación entre los esfuerzos de resistencia local resulta mayor que la combinación de los esfuerzos inducidos (σ'_1 y σ'_3).



Resistencia matriz rocosa (HOEK-BROWN)

Las ecuaciones de Hoek y Brown, permiten un análisis detallado de la resistencia de la matriz rocosa que puede ser útil en determinados casos en los que se precise una evaluación de detalle (como por ejemplo cuando se trata de determinar la estabilidad de excavaciones en roca o diseñar sus sistemas de sostenimiento).

En ocasiones (como por ejemplo cuando se considera la rotura de un pilar) es más útil considerar el comportamiento global del macizo rocoso que el proceso detallado de propagación de rotura.

La resistencia de un macizo rocoso puede estimarse a partir de la relación de Mohr-Coulomb: con una c' y ϕ' determinada para el intervalo de esfuerzos $\sigma_t < \sigma'_3 < \sigma_{ci}/4$, presentado en la ecuación [8]

$$\sigma'_{cm} = \frac{2c' \cos \phi'}{1 - \sin \phi'} \quad [7]$$

$$\sigma'_{cm} = \sigma_{ci} \cdot \frac{[m_b + 4s - a(m_b - 8s)] \left(\frac{m_b}{4} + s \right)^{a-1}}{2(1+a)(2+a)} \quad [8]$$

Esfuerzos normales (HOEK-BROWN)

Los esfuerzos normales y al corte están relacionadas con los esfuerzos principales por las siguiente ecuaciones:

$$\sigma'_n = \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} - \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2} \frac{d\sigma'_1/d\sigma'_3 - 1}{d\sigma'_1/d\sigma'_3 + 1} \quad [9]$$

Siendo

$$d\sigma'_1/d\sigma'_3 = 1 + am_b \left(m_b \sigma'_3 / \sigma_{ci} S \right)^{a-1} \quad [11]$$

$$\sigma_t = (\sigma'_1 - \sigma'_3) \frac{\sqrt{d\sigma'_1/d\sigma'_3}}{d\sigma'_1/d\sigma'_3 + 1} \quad [10]$$

Los módulos de deformación se expresan según

$$E_m [GPa] = \left(1 - \frac{D}{2} \right) \cdot \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} \cdot 10^{\frac{GSI-10}{40}} \quad [12]$$

SI $\sigma_{ci} \leq 100$ MPa

D, tiene cuenta los efectos de los daños de las voladuras y la relajación de esfuerzos.

$$E_m [GPa] = \left(1 - \frac{D}{2} \right) \cdot 10^{\frac{GSI-10}{40}} \quad [13]$$

SI $\sigma_{ci} > 100$ MPa

Parámetros resistentes (Hoek y Brown)

Obtención de los parámetros c y ϕ

La determinación de los parámetros c y ϕ mediante este método no es inmediata.

La principal dificultad estriba en que al ser un criterio no lineal, los valores de ambos parámetros no son constantes sino que son función del valor del esfuerzo σ_n .

Los autores proponen un método de evaluación de estos parámetros mediante la aplicación de las ecuaciones del criterio y la simulación de pares de valores σ_1 - σ_3 , a partir de los que se pueden construir las curvas σ_1 - σ_3 y la σ_n - τ . La ecuación lineal del criterio de Mohr-Coulomb es entonces ajustada a la curva de Hoek y Brown, para un determinado valor de σ_n , lo que permite calcular los valores de c y ϕ (ver Hoek y Brown, 1977).

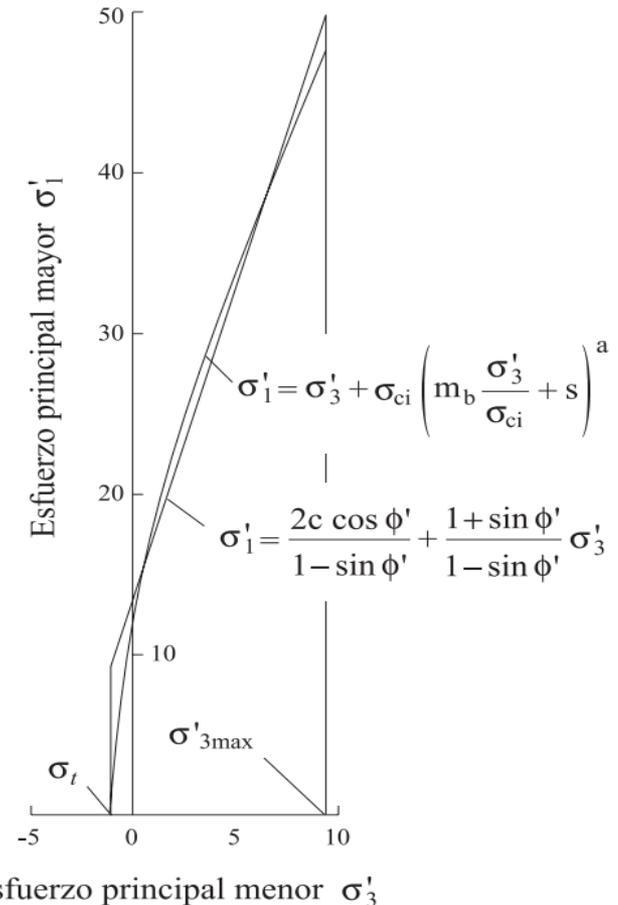
CRITERIO DE MOHR-COULOM vs HOEK-BROWN

Este método se diseñó por la necesidad de hacer comparaciones entre este método y el de Mohr-Coulomb (criterio que se emplea en muchos programas existentes), se debe determinar los ángulos de fricción y las resistencias cohesivas para cada macizo rocoso e intervalo de esfuerzos.

La relación lineal definida por de Mohr-Coulomb para la resistencia al corte, τ y un esfuerzo normal dado σ'_n , se encuentra sustituyendo estos valores de c' y ϕ' en la ecuación:

$$\tau = c' + \sigma' \tan \phi' \quad [14]$$

La línea obtenida al aplicar dicha relación sirve de base para el ajuste, que se realiza al equilibrar las áreas por encima y por debajo de Mohr-Coulomb a la curva generada mediante la ecuación [1] para un intervalo de esfuerzo principal menor definido por $\sigma_t < \sigma_3 < \sigma'_{3max}$, tal como se ilustra en la Figura adjunta.



Relaciones entre esfuerzos principales mayores y menores para el criterio de Hoek y Brown y Mohr-Coulomb tomado de <https://www.rocscience.com/documents/pdfs/uploads/7713.pdf>

CRITERIO DE MOHR-COULOM vs HOEK-BROWN

El proceso de ajuste da lugar a las siguientes ecuaciones para el ángulo de fricción ϕ' y la resistencia cohesiva c' :

$$\phi' = \sin^{-1} \left[\frac{6am_b(s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{2(1+a)(2+a) + 6am_b(s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}} \right] \quad [15]$$

$$c' = \frac{\sigma_{ci} \cdot [(1+2a)s + (1-a)m_b\sigma'_{3n}] \cdot (s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a) + \sqrt{1 + \frac{6am_b(s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a)}}} \quad [16]$$

Siendo:

$$\sigma'_{3n} = \sigma'_{3n} / \sigma_{ci}$$

Como señalan Hoek, Carranza y Corkum, “el valor de $\sigma'_{3\max}$, el límite superior del esfuerzo de confinamiento sobre el que se ha considerado la relación de los criterios de MohrCoulomb y de Hoek-Brown, ha sido determinado para cada caso individual” (<https://www.rocscience.com/documents/pdfs/uploads/7713.pdf>)

Criterio de rotura Mohr-Coulomb

Es un **criterio simple de utilizar** pues es lineal, y difícil de aplicar a macizos rocosos, pues no son sistemas isótropos, o difícilmente isótropos.

No obstante, en determinados casos **el criterio puede ser empleado para macizos rocosos resistentes en los que la rotura se produce a través de superficies de discontinuidad**, teniendo en cuenta que deben adoptarse valores representativos para la cohesión y el ángulo de rozamiento interno.

Beniawski (1979), propone unos valores orientativos para ambos parámetros, en función de la calidad del macizo rocoso (dada por el índice RMR)

Tomado de González de Vallejo et al., 2002

CUADRO 3.20

Valores aproximados para c y ϕ del macizo rocoso según su calidad

Clase de roca	I	II	III	IV	V
RMR	> 80	61-80	41-60	21-40	< 20
Cohesión (MPa)	> 0,4	0,3-0,4	0,2-0,3	0,1-0,2	< 0,1
Ángulo rozamiento interno	> 45°	35°-45°	25°-35°	15°-25°	< 15°

Criterio de rotura para macizos anisótropos

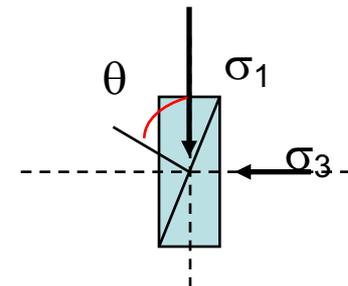
Macizos estratificados (con una familia de juntas)

La resistencia de un macizo rocoso estratificado, suponiendo que posea una familia de discontinuidades que no influye en su comportamiento mecánico, puede ser asimilada a la de la matriz rocosa transversalmente anisótropa. La resistencia del macizo dependerá de la orientación de los esfuerzos aplicados con respecto a la dirección de los planos de estratificación, y variará entre un valor mínimo correspondiente a la resistencia de estos planos y un valor máximo correspondiente a la matriz rocosa.

En casos de macizos rocosos con matriz rocosa blanda y anisótropa, por ejemplo rocas arcillosas y margosas, las resistencias pueden presentar muy poca diferencia.

En el caso de roturas a favor de los planos de estratificación, la resistencia del macizo vendrá dada por el criterio de Mohr-Coulomb:

$$\sigma_1 = \frac{2c + \sigma_3 [\text{sen}2\theta + \text{tag}\phi(1 - \cos 2\theta)]}{\text{sen}2\theta - \text{tag}\phi(1 + \cos 2\theta)} \quad [17]$$

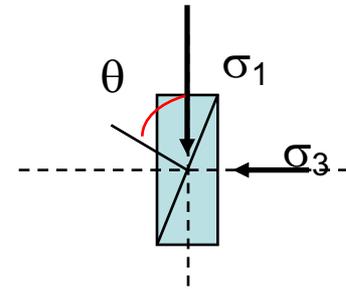


Criterio de rotura para macizos anisótropos II

Para valores de θ cercanos a 90° , o menores que el ángulo de fricción del plano (ϕ), no es posible la rotura a través de planos de estratificación, y el macizo romperá a través de la matriz rocosa.

Si la matriz rocosa es isótropa, la resistencia se puede evaluar aplicando el criterio de Hoek y Brown ($s=1$)

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \sqrt{m_i \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s}$$



Criterio de rotura para macizos anisótrópos III

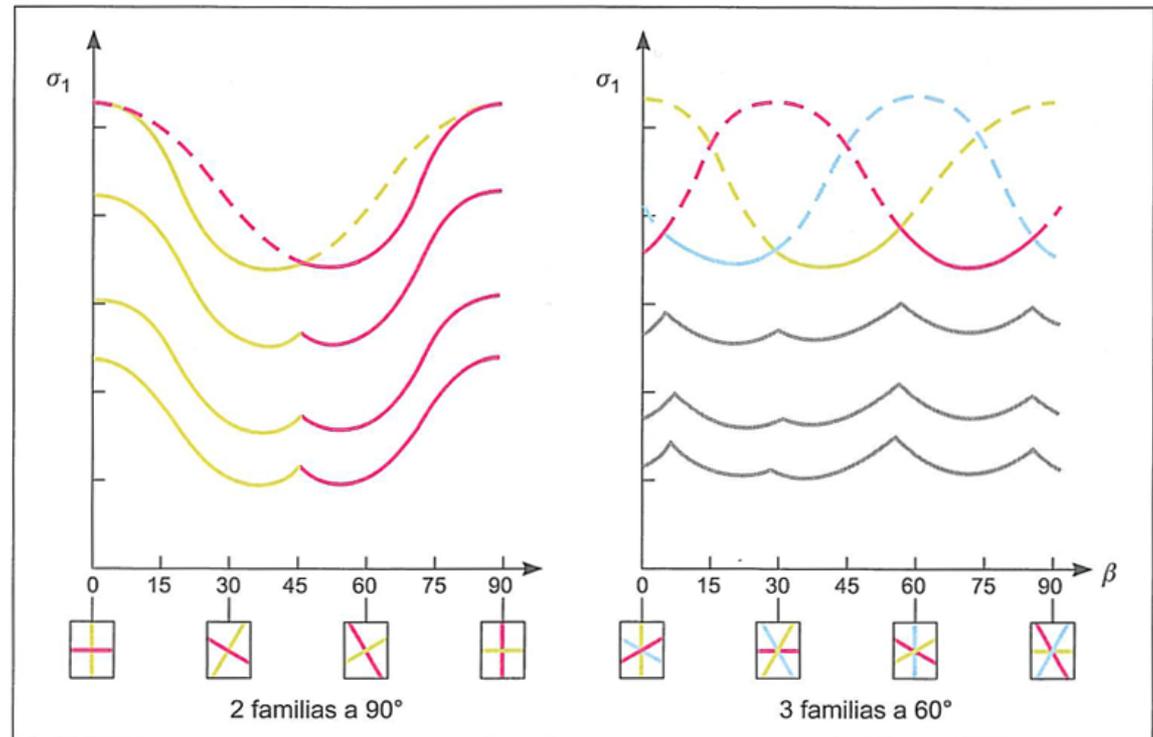
Macizos estratificados (con varias familias de juntas)

La resistencia de macizos rocosos competentes fracturados afectados por 2 o 3 familias de discontinuidades ortogonales entre si, dependerá de la resistencia de las discontinuidades y del ángulo de incidencia de la carga aplicada con respecto a los planos de debilidad.

Para cada posible orientación de esfuerzos será una de las familias la que controle la resistencia del macizo en su conjunto, que se obtiene integrando las curvas de resistencia de cada familia.

En la curva correspondiente a 3 familias de discontinuidades, se aprecia que observa que el macizo no puede romper a través de la matriz rocosa, al prevalecer la orientación de las discontinuidades en cualquier dirección. Esto supone que la resistencia del macizo va haciéndose más uniforme al aumentar las familias.

Curvas representativas de la resistencia de un macizo rocoso afectado por 2 y 3 familias de discontinuidades según Hoek y Brown, 1980. Tomado de González de Vallejo et al., 2002

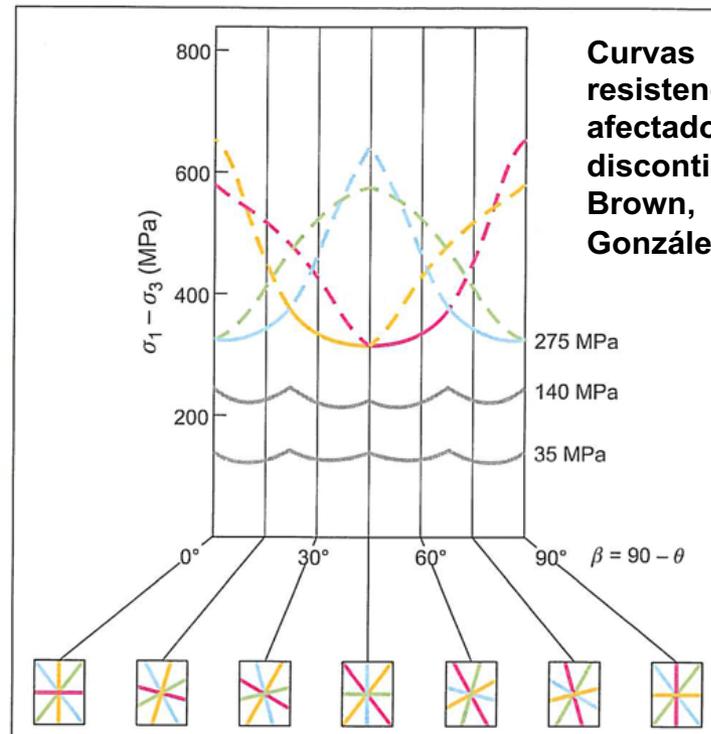


Criterio de rotura para macizos anisótropos IV

Si se supone la presencia de 4 familias de discontinuidades en el macizo rocoso, con iguales parámetros resistentes y orientadas en el espacio a 45° entre ellas, la resistencia del macizo rocoso vendrá representada por la superposición de las curvas de resistencia s_1-b ($b=90-q$) de cada familia.

La rotura siempre tendrá lugar a favor de alguna de las 4 familias, dependiendo de la orientación de los esfuerzos. Para cada orientación el comportamiento del macizo está determinado por la resistencia más baja de las curvas individuales de cada familia.

Para un número suficiente de familias el comportamiento se hace isótropo. (Hoek y Brown consideran que un macizo es isótropo si aparecen 4 familias de discontinuidades).



Resumen de criterios de rotura

CUADRO 3.21

Criterios de rotura en macizos rocosos y datos necesarios para su aplicación

Características del macizo rocoso	Rotura a favor de los planos de discontinuidad	Rotura a través de la matriz rocosa
Macizo rocoso masivo sin discontinuidades.	No es posible.	Hoek y Brown (m_i para roca intacta y $s = 1$).
Macizo rocoso estratificado.	Mohr-Coulomb (c y ϕ de las discontinuidades).	Hoek y Brown (m_i para roca intacta y $s = 1$).
Macizo rocoso con dos familias de discontinuidades.	Mohr-Coulomb (c y ϕ de las discontinuidades).	Hoek y Brown (m_i para roca intacta y $s = 1$).
Macizo rocoso con tres familias de discontinuidades ortogonales.	Hoek y Brown (m , s y α del macizo).	Generalmente no es posible. Si lo fuera se aplican iguales criterios que para el caso de 2 familias.
Macizo rocoso con cuatro o más familias de discontinuidades.	Hoek y Brown (m , s y α del macizo).	No es posible.

Tomado de González de Vallejo et al., 2002

Deformabilidad

Propiedad que tiene la roca para alterar su forma como respuesta a la actuación de un esfuerzo.

Se expresa por sus componentes elásticas E y ν que son el Módulo de Young y el Coeficiente de Poisson

$E = \sigma / \epsilon$ E es la constante de proporcionalidad denominada **Módulo de Young**, o módulo de elasticidad. El **Coeficiente de Poisson** $\nu = \epsilon_t / \epsilon_a$.

El módulo de Young define la relación lineal elástica entre el esfuerzo aplicado y la deformación producida en la dirección de aplicación del esfuerzo. Mientras que el coeficiente de poisson define la relación entre deformación transversal longitudinal. Ambas variables se obtienen del ensayo de compresión simple.

Una roca frágil mayor módulo de young y menor coeficiente de poisson que una roca blanda de comportamiento dúctil.