

CAPITULO VIII

8.- CLASIFICACIONES GEOMECHANICAS

Las labores mineras subterráneas y superficiales, cuyos componentes son estructuras complejas; para ejecutar dichas labores mineras, es necesario poseer el máximo conocimiento del macizo rocoso.

Para tener el conocimiento del macizo rocoso hoy en día existen muchas **Clasificaciones Geomecánicas**, como: Protodyakonov, Bieniawski, Laubscher and Taylor, Barton, Romaña, que nos determinarán la **calidad del macizo rocoso**, cuya finalidad es dividir al macizo rocoso en dominios estructurales, cada uno de ellos tendrán características similares, como: Litología, espaciado de juntas, entre otros. Los límites de un dominio estructural pueden coincidir con rasgos geológicos, tales como fallas o diques.

8.1.- CLASIFICACION GEOMECHANICA DE PROTODYAKONOV

Mediante esta clasificación geomecánica se define la calidad del macizo rocoso, por medio de un parámetro “f”, que es el coeficiente de resistencia.

Cuadro Nº 6

CATEGORIA	DESCRIPCION	"f"
Excepcional	Cuarcita, Basalto y rocas de resistencia excepcional	20
Alta resistencia	Granito, areniscas silíceas y calizas muy competentes	15-20
Resistencia media	Calizas, granito algo alterado y areniscas	8-6
	Areniscas medias y Pizarras	5
	Lutitas, areniscas flojas y conglomerados friables	4
	Lutitas, esquistos y margas compactas	3
Resistencia baja	Calizas, lutitas blandas, margas, areniscas friables, Gravas, bolos cementados	2
	Lutitas fisuradas y rotas, gravas compactas y arcillas preconsolidadas	1.5
Resistencia muy baja	Arcillas y gravas arcillosas	1.0
	Suelos vegetales, turbas y arenas húmedas	0.6
	arenas y gravas finas	0.5
	Limos y loess	0.3

El coeficiente “f” esta definido por la siguiente formula matemática:

$$f = \frac{S}{10}c$$

Siendo:

d_c = La resistencia a Compresión Simple de la roca expresada en MPa.

Teniendo en cuenta este coeficiente y las dimensiones de la excavación subterránea, se definen las cargas de cálculo para dimensionar el tipo de sostenimiento.

8.2.- CLASIFICACIÓN GEOMECANICA DE BIENIAWSKI

Esta clasificación geomecánica se basa en el índice **RMR "Rock Mass Rating"**, que da una estimación de la calidad del macizo rocoso, teniendo en cuenta los siguientes factores:

Resistencia Compresiva de la roca.
 Índice de la Calidad de la Roca - RQD.
 Espaciamiento de Juntas.
 Condición de Juntas.
 Presencia de Agua.
 Corrección por orientación.

Estos factores se cuantifican mediante una serie de parámetros definiéndose unos valores para dichos parámetros, cuya suma, en cada caso nos da el índice de Calidad del **RMR** que varía entre **0 – 100**.

Los objetivos de esta clasificación son:

- Determinar y/o Estimar la calidad del macizo rocoso.
- Dividir el macizo rocoso en grupos de conducta análoga.
- Proporcionar una buena base de entendimiento de las características del macizo rocoso.
- Facilitar la planificación y el diseño de estructuras en roca, proporcionando datos cuantitativos necesarios para la solución real de los problemas de ingeniería.

Se clasifican las rocas en **5 categorías**. En cada categoría se estiman los valores de la cohesión y el ángulo de fricción interna del macizo rocoso (Cuadro N° 9). A continuación se definen y valoran cada uno de los factores que intervienen en la clasificación.

8.2.1.- RESISTENCIA COMPRESIVA DE LA ROCA.

La resistencia compresiva " d_c " de una roca se puede determinar por tres procedimientos:

8.2.1.1.- PRIMER PROCEDIMIENTO:

Estimación de la Resistencia Compresiva mediante el martillo Schmidt de Dureza.

8.2.1.2.- SEGUNDO PROCEDIMIENTO

Determinación de la Resistencia Compresiva mediante el Ensayo de Carga Puntual "Franklin".

8.2.1.3.- TERCER PROCEDIMIENTO

Determinación de la Resistencia Compresiva mediante el Ensayo de Compresión Simple y/o Uniaxial

8.2.2.- INDICE DE LA CALIDAD DE LA ROCA - RQD

Para determinar el RQD (Rock Quality Designation) en el campo y /o zona de estudio de una operación minera, existen hoy en día tres procedimientos de calculo.

8.2.2.1.- PRIMER PROCEDIMIENTO:

Se calcula midiendo y sumando el largo de todos los trozos de testigo mayores que 10 cm en el intervalo de testigo de 1.5 m.

$$RQD = \frac{\sum_{\text{trozos} \geq 10\text{cms}}}{150\text{cms}}$$

8.2.2.2.- SEGUNDO PROCEDIMIENTO

Comprende el cálculo del RQD en función del número de fisuras, por metro lineal, determinadas al realizar el levantamiento litológico-estructural (Detail line) en el área y/o zona predeterminada de la operación minera.

8.2.2.2.1.- Fórmula matemática:

$$RQD = 100 \cdot (0.1? + 1)$$

Siendo:

$$I = \frac{N^{\circ} \text{ de Fisuras}}{SPAN}$$

8.2.2.3.- TERCER PROCEDIMIENTO

Comprende el cálculo del RQD en función del número de fisuras, por metro cúbico, determinadas al realizar el levantamiento litológico-estructural (Detail line) en el área y/o zona predeterminada de la operación minera.

8.2.2.3.1.- Fórmula matemática:

$$RQD = 115 - 3.3 (J_v)$$

Siendo:

J_v = Número de fisuras por metro cúbico.

8.2.3.- ESPACIAMIENTO DE JUNTAS

Se ha comprobado que el espaciamiento de juntas tiene gran influencia sobre la estructura del macizo rocoso. La resistencia del macizo rocoso va disminuyendo según va aumentando el número de juntas, siendo el espaciado de las juntas el factor más influyente en esta disminución de resistencia.

Así resulta que un material rocoso de alta resistencia de 100 a 200 MPa, que esté muy fracturado con un espaciamiento de juntas de 5 cm, corresponde a un macizo rocoso débil.

A continuación se presenta la clasificación de Deere de los macizos rocosos. En lo referente al espaciamiento de juntas, que es la que recomienda utilizar en la clasificación geomecánica de Bieniawski.

Cuadro Nº 7

DESCRIPCION ESPACIAMIENTO	ESPACIO DE JUNTAS	TIPO MACIZO ROCOSO
Muy ancho	> 3 m	Sólido
Ancho	1 - 3 m	Masivo
Moderadamente cerrado	0.3 - 1 m	En bloques
Cerrado	50 - 300 mm	Fracturado
Muy cerrado	< 50 mm	Machacado

8.2.4.- CONDICION DE JUNTAS

En este apartado se tienen en cuenta los siguientes parámetros:

- Apertura.
- Tamaño.

- Rugosidad.
- Dureza de los labios de la discontinuidad.
- Relleno.

8.2.4.1.- APERTURA

La apertura de las juntas es un criterio para descripción cuantitativa de un macizo rocoso. La clasificación de Bieniawski es la siguiente:

<u>Descripción</u>	<u>Separación</u>
Abierta	> 5 mm
Moderadamente abierta	1 - 5 mm
Cerrada	0.1 – 1 mm
Muy cerrada	< 0.1

8.2.4.2.- TAMAÑO

El tamaño de las juntas influye en la importancia que el material rocoso y la separación de las juntas tienen en el comportamiento del macizo rocoso.

8.2.4.3.- RUGOSIDAD

En esta clasificación se establecen 5 categorías de rugosidad: muy rugosa, rugosa, ligeramente rugosa, suave y espejo de falla.

8.2.4.4.- DUREZA DE LOS LABIOS DE LA DISCONTINUIDAD

Se consideran 3 categorías de dureza: dura, media y blanda.

8.2.4.5.- RELLENO

Se define por su espesor, tipo de material, consistencia y continuidad.

8.2.5.- PRESENCIA DE AGUA

El efecto del agua tiene especial importancia en los macizos rocosos diaclasados. Se tendrá en cuenta el flujo agua en el macizo rocoso. El criterio que se utilizará será el siguiente: completamente seco, húmedo, agua a presión moderada y agua a presión fuerte.

8.2.6.- CORRECCION POR ORIENTACION

A la hora de considerar los efectos de la orientación de las discontinuidades para la clasificación del macizo rocoso, con vistas a la construcción de una

excavación subterránea y una labor minera superficial, es suficiente considerar si las orientaciones del rumbo y del buzamiento son más o menos favorables con relación a la labor minera que se va ejecutar.

Bieniawski ha propuesto la siguiente clasificación:

Cuadro N° 8

RUMBO PERPENDICULAR AL EJE				RUMBO PARALELO AL EJE DEL TUNEL		BUZAMIENTO 0-20° (Independiente del Rumbo)
Dirección según Buzamiento		Dirección contra Buzamiento				
Buzamiento 45-90°	Buzamiento 20-45°	Buzamiento 45-90°	Buzamiento 20-45°	Buzamiento 45-90°	Buzamiento 20-45°	
Muy Favorable	Favorable	Regular	Desfavorable	Muy Desfavorable	Regular	Desfavorable

Esta clasificación no es aplicable a rocas expansivas fluyentes.

A.- Clasificación de los parámetros y sus valores

Cuadro N° 9

Parámetros	ESCALA DE VALORES							
	Carga Puntual	80 kg/cm ²	40-80 kg/cm ²	20-40 kg/cm ²	10-20 kg/cm ²	10 kg/cm ²		
Resistencia de la roca intacta	A Compresión Simple	2000 Kg/cm ²	1000 - 2000 Kg/cm ²	500 - 1000 Kg/cm ²	250 - 500 kg/cm ²	100-250 kg/cm ²	30-100 kg/cm ²	10-30 Kg/cm ²
VALOR		15	12	7	4	2	1	0
R. Q.D.		90-100%	75-90%	50-75%	25-50%	25%		
VALOR		20	17	13	8	3		
Espaciado de Juntas		3 m	1 - 3 m	0.3 - 1 m	50-300 mm	50 mm		
VALOR		30	25	20	10	5		
Condición de Juntas		Muy rugosas sin continuidad cerradas, Paredes de roca dura	Ligeramente rugosa < 1 mm. de separación Paredes de roca dura	Ligeramente rugosa < 1 mm. de separación Paredes de roca suave	Espejo de falla o relleno de espesor < 5mm ó abiertos 1-5mm	relleno blando de espesor < 5mm. ó abiertas <5 mm. fisuras continuas		
VALOR		25	20	12	6	0		
Aguas Subterráneas	Cant. Infiltración 10 m. de túnel	Ninguna		25 litros/min	25-125 litros/min	>125 litros/min.		
	Presión de agua Esfuer. principal	Cero		0.0-0.2	0.2-0.5	0.5		
	Situación General	Totalmente Seco		Solo húmedo agua insterst.	Ligera presión de agua	Serios problemas de agua		
VALOR		10		7	4	0		

B.- Ajuste de valores por orientación de las juntas

Cuadro N° 10

Orientación de rumbo y buzamiento de las fisuras		Muy Favorable	Favorable	Regular	Desfavorable	Muy Desfavorable
Valores	Túneles	0	-2	-5	-10	-12
	Cimentaciones	0	-2	-7	-15	-25
	Taludes	0	-5	-25	-50	-60

C.- Determinación de la clase del macizo rocoso

Cuadro N° 11

Valor total del RMR	81-100	61-80	41-60	21-40	<20
Clase Número	I	II	III	IV	V
Descripción	Muy Bueno	Bueno	Medio	Malo	Muy Malo

D.- Significado de las clases de macizos rocosos

Cuadro N° 12

Clase Número	I	II	III	IV	V
Tiempo de Mantenimiento	10 años para 5m.	6 meses para 4 m.	1 semana para 3 m.	5 horas para 1.5 m.	10 minutos para 0.5 m.
Cohesión	> 3 Kg/cm ²	2-3 Kg/cm ²	1.5-2 Kg/cm ²	1-1.5 Kg/cm ²	< 1 Kg/cm ²
Angulo de fricción	> 45°	40°-45°	30°-40°	30°-35°	< 30°

8.3.- CORRECCION DE LAUBSCHER AND TAYLOR

Laubscher and Taylor, han propuesto algunas modificaciones a la clasificación geomecánica de Bieniawski y recomendaciones para el sostenimiento.

Los ajustes que proponen Laubscher and Taylor, consisten en la modificación del valor original, siendo los siguientes:

8.3.1.- Meteorización

Algunos tipos de roca se meteorizan rápidamente cuando entran en contacto con el aire, afectando a tres parámetros.

Cuadro N° 13

Parámetro	Meteorización	Observaciones
dc	Disminuye hasta 96%	Afecta las microfisuras de la roca
RQD	Disminuye hasta 95%	La roca aumenta sus fracturas
Condición de Juntas	se reduce hasta un 82%	Si la meteorización es motivo de deterioro en las superficies de la fisura ó su relleno

8.3.2.- Esfuerzos In-situ e inducidos

Los esfuerzos, tanto in-situ como los inducidos pueden incidir sobre las fisuras, mantenimiento sus superficies en compresión o permitiendo que las fisuras se aflojen, y aumentan el riesgo de un movimiento cortante.

Cuadro N° 14

Parámetro	Esfuerzos In-situ e ind.	Observaciones
Condición de Juntas	Aumenta hasta 120%	Las juntas quedan en compresión
	Disminuye hasta un 90%	Si el riesgo de un movimiento cortante aumenta
	Disminuye hasta un 76%	Si las fisuras están abiertas y con relleno delgado

8.3.3.- Cambios de los esfuerzos

Cuando hay cambios importantes por operaciones mineras, la situación de las fisuras es afectada.

Cuadro N° 15

Parámetro	Cambios de Esfuerzos	Observaciones
Condición de Juntas	Aumenta hasta un 120%	Las fisuras siempre están en compresión
	Disminuye hasta en 60%	Causan movimientos cortantes importantes

8.3.4.- Influencia de las orientaciones del rumbo y buzamiento

El tamaño, la forma y la dirección del avance de una excavación subterránea tendrán una influencia sobre su estabilidad cuando se consideran en función del sistema de fisuras del macizo rocoso.

Laubscher and Taylor opinan, para garantizar la estabilidad de una excavación subterránea en una roca fisurada depende de la cantidad de fisuras y de los frentes de excavación que se desvían de la vertical y recomiendan los siguientes ajustes:

Cuadro N° 16

Parámetro	Cantidad de fisuras	Porcentaje(*)				
		70%	75%	80%	85%	90%
Espaciado de juntas	3	3		2		
	4	4	3		2	
	5	5	4	3	2	1
	6	6		4	3	2,1

(*) Ajuste en porcentaje dependiendo de la cantidad de frentes inclinados en la excavación

Se propone además los siguientes ajustes para los valores del espaciado de juntas, para las zonas de cortantes que se ubican en operaciones mineras:

0-15° = 76%

15°-45° = 84%

45°-75° = 92%

8.3.5.- Efectos de la voladura

Las voladuras crean nuevas fracturas y provocan movimientos en las fisuras existentes. Se proponen las siguientes reducciones para los valores del RQD y la Condición de Juntas.

Perforaciones de reconocimiento	100%
Voladuras de sección lisa	97%
Voladuras convencionales buenas	94%
Voladuras convencionales deficientes	80%

8.3.6.- Ajustes combinados

En algunos casos la clasificación geomecánica se encuentra sujeta a más de un ajuste. El ajuste total no debe pasar de un 50%.

8.3.7.- Recomendaciones para el sostenimiento

Considerando los valores de clasificación ajustados y tomando en cuenta prácticas normales de sostenimiento en minas, Laubscher and Taylor han propuesto el siguiente cuadro:

Cuadro N° 17

VALORES AJUSTADOS	VALORES GEOMECANICOS ORIGINALES - BIENIAWSKI									
	90-100	80-90	70-80	60-70	50-60	40-50	30-40	20-30	10-20	0-10
70 - 100										
50 - 60		a	a	a	a					
40 - 50			b	b	b	b				
30 - 40				c,d	c,d	c,d,e	d,e			
20 - 30					e	f,g	f,g,j	f,h,j		
10 - 20						i	i	h,i,j	h,j	
0 - 10							k	k	l	l

Leyenda:

- a.- Generalmente no hay sostenimiento, pero algunas intersecciones de fisuras pueden necesitar pernos.
- b.- Cuadrícula de pernos cementados con espaciamiento de 1 m.
- c.- Cuadrícula de pernos cementados con espaciamiento de 0.75 m.
- d.- Cuadrícula de pernos cementados con espaciamiento de 1 m y 100 mm de concreto lanzado.
- e.- Cuadrícula de pernos cementados con espaciamiento de 1 m y concreto colado de 300 mm. y que solo se usará si los cambios de los esfuerzos no son excesivos.
- f.- Cuadrícula de pernos cementados con espaciamiento de 0.75 m. y 100 mm de concreto lanzado.
- g.- Cuadrícula de pernos cementados con espaciamiento de 0.75 m y 10 mm de concreto lanzado y malla.
- h.- Concreto colado de 450 mm de espesor con una cuadrícula de pernos cementados con espaciamiento de 1 m. si los cambios de los esfuerzos no son excesivos.
- i.- Pernos cementados con espaciamiento de 0.75 m si hay un refuerzo potencial a la mano, y 100 mm de concreto lanzado, luego cimbras de acero a manera de técnica de reparación si los cambios en los esfuerzos son excesivos.
- j.- Estabilizar con refuerzo de cable protector y concreto colado de 450 mm de espesor si los cambios en los esfuerzos no son excesivos.
- k.- Estabilizar con refuerzo de cable protector seguido de concreto lanzado hasta e incluyendo el frente si es necesario y luego cimbras de acero poco separados, como técnica de reparación donde los cambios en los esfuerzos son excesivos.
- l.- No trabajar en este terreno, o usar las técnicas j ó k.

Notas Adicionales

- 1.- Al evaluar los requerimientos de los esfuerzos hay que tomar en

- cuenta la clasificación geomecánica original así como los valores ajustados.
- 2.- Los pernos son de poca utilidad en un terreno intensamente fisurado y no deberán usarse como único refuerzo cuando los valores de espaciado de juntas sea menor de 6.
 - 3.- Las recomendaciones del cuadro son aplicables a las operaciones mineras con niveles de esfuerzos menores de 30 MPa.
 - 4.- Galerías grandes solo se excavarán en roca con un valor de clasificación totalmente ajustado con valores de 50 ó más.

8.4.- CLASIFICACION GEOMECANICA DE BARTON

Esta clasificación geomecánica se basa en el índice de calidad “Q” denominado también **índice de Calidad tunelera**, que da una estimación de la calidad del macizo rocoso, teniendo en cuenta los siguientes factores:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF}$$

Donde :

RQD : Rock Quality Designation

J_n : Joint Set Number, Índice de diaclasado que tiene en cuenta el número de Familias.

J_r : Joint roughness number, índice de rugosidad de las juntas.

J_a : Joint alteration number, índice de alteración de las juntas.

J_w : Joint water reduction factor, factor de reducción por presencia de agua en las juntas.

SRF : Stress reduction factor, factor de reducción por esfuerzos.

A continuación se definen y valoran cada uno de los factores que intervienen en la clasificación:

Cuadro N° 18

Índice de Calidad de roca	RQD	Observaciones
A.- Muy mala	0 – 25	1.- cuando RQD 10, incluyendo cero; se puede utilizar el valor 10 para el RQD. 2.- Intervalos de 5 para RQD, ó sea 100, 95, 90 son precisos.
B.- Mala	25 – 50	
C.- Regular	50 – 75	
D.- Buena	75 – 90	
E.- Excelente	90 – 100	

Cuadro N° 19

Número de Familias	Jn	Observaciones
A.- Masivo, sin o con pocas juntas	0.5 - 1	1.- Para cruces en túneles utilizar (3 x Jn) 2.- Para Portales utilizar (2 x Jn)
B.- Una familia de juntas	2	
C.- Una familia y algunas juntas ocasionales	3	
D.- Dos familias de juntas	4	
E.- Dos familias y algunas juntas	6	
F.- Tres familias de juntas	9	
G.-Tres familias y algunas juntas	12	
H.-Cuatro familias o más, roca muy fracturada, Terrones de azúcar	15	
I.- Roca triturada terrosa	20	

Cuadro N° 20

Número de rugosidad de las Juntas	Jr	Observaciones
- Contacto entre las dos caras de la junta - Contacto entre las dos caras de la junta mediante un desplazamiento lateral 10 cm		1.- Se añade 1.0 si el espaciamiento medio juntas es mayor de 3 m. 2.- Jr = 0.5 se puede usar Para juntas de fricción Planas y que tengan alineaciones orientadas para resistencia mínima.
A.- Juntas discontinuas	4	
B.- Junta rugosa o irregular ondulada	3	
C.- suave ondulada	2	
D.- Espejo de falla, ondulada	1.5	
E.- Rugosa o irregulares plana	1.5	
F.- Suave plana	1.0	
G.- Espejo de falla o superficie de fricción plana.	0.5	
- Sin contacto entre las dos caras de la Junta desplazados lateralmente		
H.- Zona que contiene minerales arcillosos de espesor suficientemente gruesa para impedir el contacto entre las dos caras.	1	
I.- Zona arenosa de grava o roca triturada suficientemente gruesa para impedir el contacto entre las dos caras de la junta.	1	

Cuadro N° 21

Número de alteración de las juntas	Ja	Ør (aprox.)	Observación
- Contacto entre las dos caras de la junta.			1.- Los valores de de Ør el ángulo De fricción residual, se indican como guía aproximada de de las propiedades mineralógicas de los productos de la alteración si es que están presentes.
A.- Junta sellada, dura, sin reblandamiento relleno impermeable, ej. Cuarzo.	0.75		
B.- Caras de la junta únicamente manchadas.	1	25° - 35°	
C.- Las caras de la junta están alteradas ligeramente y contienen minerales no reblandecibles, partículas de arena, roca desintegrada libre de arcilla.	2	25° - 30°	
D.- Recubrimiento de limo o arena arcillosa, pequeña fracción arcillosa no reblandecible.	3	20° - 25°	
E.- Recubrimiento de minerales arcillosos blandos o de baja fricción, ej. Caolinita, mica, clorita, talco, y pequeñas cantidades de arcillas expansivas, los recubrimientos son discontinuos con espesores de 1 ó 2 mm	4	8° - 16°	
- Contacto entre las dos caras de la junta con menos de 10 cm de desplazamiento lateral.			
F.- Partículas de arena, roca desintegrada, libre de arcilla.	4	25° - 30°	
G.- Fuertemente sobreconsolidados, rellenos de minerales arcillosos no reblandecidos Los recubrimientos son continuos menores de 5 mm. de espesor.	6	16° - 24°	
H.- Sobreconsolidación media a baja, reblandecimiento, relleno de mineral arcilloso. Los recubrimientos son continuos menores de 5 mm. de espesor.	8	8° - 16°	
I.- Relleno de arcillas expansivas ej. Montmorillonita, de espesor continuo de 5mm. El Valor Ja depende del porcentaje de partículas del tamaño de la arcilla expansiva.	8 - 12	6° - 12°	
- No existe contacto entre las dos caras de la junta cuando esta es cizallada.			
J.- Zonas o bandas de roca desintegrada o machacada y arcilla.	6 - 8 ó 8 - 12	6° - 24°	
K.- Zonas blandas de arcilla limosa o arenosa con pequeña fracción de arcilla sin reblandamiento.	5	6° - 24°	
L.- Zonas o capas gruesas de arcilla.	10 - 13 13 - 20	6° - 24°	

Cuadro N° 22

Factor de reducción por presencia de agua en las juntas.	Jw	Presión agua Kg/cm ²	Observaciones
A.- Excavaciones secas o de fluencia poco importante, menos de 5 l/min. Localmente.	1	< 1	1.- Los factores de C a E, son estimaciones aproximadas aumenta Jw si se instalan drenes. 2.- Los problemas especiales causados por la presencia de hielo no se toman en consideración.
B.- Fluencia o presión media, ocasional lavado de los rellenos de las juntas.	0.66	1 - 2.5	
C.- Fluencia grande o presión alta, considerable lavado de los rellenos de las juntas.	0.33	2.5 - 10	
D.- Fluencia o presión de agua excepcionalmente altas con las voladuras disminuyendo con el tiempo.	0.1 - 0.2	> 10	
E.- Fluencia o presión de agua excepcionalmente altas y continuas, sin disminución.	0.05 - 0.1	> 10	

Cuadro N° 23

Factor de Reducción de esfuerzos	SRF	Observaciones
Zonas débiles que intersectan la excavación y pueden causar caídas de bloques, según avanza la misma.		
A.- Varias zonas débiles conteniendo arcilla o roca desintegrada químicamente, roca muy suelta alrededor (cualquier profundidad).	10	1.- Redúzcanse estos valores SRF de 25%-50% si las zonas de fractura solo se intersectan pero no cruzan la excavación. 2.- Para un campo virgen de esfuerzos fuertemente anisotropico, medidas: cuando $5 < d1/d3 < 10$, redúzcase: a 0.8 la dc y el dt. Cuando $d1$ y $d3 > 10$, redúzcase: a 0.6 la dc y el dt. donde: dc = Resistencia Compresiva. dt = Esfuerzo a la tracción d1 = Esfuerzo Principal Mayor. d3 = Esfuerzo Principal Menor.
B.- Solo una zona débil conteniendo arcilla o roca desintegrada químicamente (profundidad de excavación menor de 50 m.).	5	
C.- Solo una zona débil conteniendo arcilla o roca Desintegrada químicamente (profundidad de excavación mayor de 50 m.).	2.5	
D.- Varias zonas de fractura en roca competente (libre de arcilla), roca suelta alrededor (cualquier profundidad).	7.5	
E.- Solo una zona fracturada en roca competente (libre de arcilla), (profundidad de excavación menor de 50 m.).	5	
F.- Solo una zona fracturada en roca competente (libre de arcilla), (profundidad de excavación mayor de 50 m.).	2.5	
G.- Juntas abiertas sueltas, muy fracturadas, etc. (cualquier profundidad).	5	

Continua.....

Cuadro N° 24

Factor de Reducción de esfuerzos	dc / d1	dt / d1	SRF	Observaciones
- Roca Competente, problemas de esfuerzos.				3.- Hay pocos casos reportados donde el techo debajo de la superficie sea menor que el ancho del claro. Se sugiere Que el SRF sea aumentado de 2.5 a 5 para estos casos, ver H
H.- Esfuerzo bajo, cerca de la superficie.	> 200	> 13	2.5	
I.- Esfuerzo medio.	200-10	13-0.66	1.0	
J.- Esfuerzo grande, estructura muy cerrada (generalmente favorable para la estabilidad. Pude ser desfavorable para la estabilidad de los hastiales.	10-5	0.66-0.33	0.5-2	
K.- Desprendimiento moderado de la roca masiva.	5-2.5	0.33-0.16	05-10	
L.- Desprendimiento intenso de la roca masiva.	< 2.5	< 0.16	10-20	
- Roca fluyente, flujo plástico de roca incompetente bajo la influencia de altas presiones litostaticas.				
M.- Presión de flujo moderado.			5-10	
N.- Presión de Flujo Intenso.			10-20	
- Roca expansiva, actividad química expansiva dependiendo de la presencia de agua.				
O.- Presión de expansión Moderado.			5-10	
P.- Presión de expansión Intensa.			10-15	

8.4.1.- Recomendaciones para el uso de los cuadros:

- 1.- El parámetro J_n , que representa en número de familia de juntas, puede estar afectado por foliación, esquistosidad, clivaje y laminaciones. Si las juntas paralelas tienen suficiente desarrollo, deben contabilizarse como una familia completa. Si hay pocas juntas visibles, roturas ocasionales en los

testigos debido a estos planos, se contabilizan como juntas ocasionales al considerar el J_n en la tabla.

- 2.- Los parámetros J_r y J_a , cuyo cociente representa la resistencia al esfuerzo cortante, serán los de la familia de juntas o discontinuidad rellena de arcilla, más débil que exista en la roca, además es necesario tener en cuenta la orientación de las familias o discontinuidades, de tal forma que deban ser representativas.
- 3.- El valor SRF , en el caso de que el macizo rocoso contenga arcilla, en este caso la resistencia de la roca es factor determinante de la estabilidad de la excavación subterránea. Cuando el macizo rocoso no contenga arcilla y el número de Juntas sea pequeño la resistencia de la roca puede convertirse en factor, tal que el cociente de dt/dc , defina la estabilidad de la roca.
- 4.- En el caso de rocas muy anisótropicas, la resistencia compresiva de la roca dc y el esfuerzo a la tracción dt , se evaluarán en la dirección más favorable para la estabilidad.

Los parámetros que definen “ Q ”, representan el siguiente aspecto:

RQD/J_n : Tamaño de bloques, representa la estructura global del macizo rocoso.

J_r/J_a : Resistencia al corte entre bloques.

J_w/SRF : Estado tensional en el macizo rocoso.

Para relacionar Q índice de calidad tunelera, con el comportamiento de una excavación subterránea y con las necesidades de sostenimiento de la misma. Barton Lien y Lunde desarrollaron la relación denominada **Dimensión Equivalente “De”** de la excavación, esta relación se obtiene de dividir el ancho, diámetro o altura de la excavación por un factor denominado **Relación de soporte de la excavación ESR** (Excavation Support Ratio).

$$De = \frac{\text{Ancho de la excavación, diámetro o altura (m)}}{\text{Relación de soporte de la excavación ESR}}$$

La relación de soporte de la excavación ESR tiene que ver con el uso que se pretende dar a la excavación y hasta donde se le puede permitir cierto grado de inestabilidad Barton da los siguientes valores supuestos para ESR:

Cuadro N° 25

Tipo de excavación	ESR
A.- Excavaciones mineras provisionales.	3 - 5
B.- Excavaciones mineras permanentes, túneles de conducción de agua para obras hidroeléctricas (con la excepción de las cámaras de alta presión para compuertas), túneles pilotos (exploración), excavaciones parciales para cámaras subterráneas grandes.	1.6
C.- Cámaras de almacenamiento, plantas subterráneas para el tratamiento de aguas, túneles carreteros y ferrocarriles pequeños, cámaras de alta presión, túneles auxiliares.	1.3
D.- Casas de maquinas, túneles carreteros y ferrocarriles mayores, refugios de defensa civil, portales y cruces de túnel.	1.0
E.- Estaciones nucleoelectricas subterráneas, estaciones de ferrocarril, instalaciones para deportes y reuniones, fabricas.	0.8

La relación entre el Índice de calidad tunelera "Q" y la dimensión equivalente "De" de una excavación, Barton Lien y Lunde, elaboraron una tabla a partir de la cual se puede diagnosticar las necesidades de sostenimiento. (ver en los anexos del trabajo).

8.5.- CLASIFICACION GEOMECANICA SMR PARA TALUDES

La clasificación **SMR** (**Slope Mass Rating**) es un método de determinación de los factores de ajuste adecuados para aplicar la clasificación **RMR** de **BIENIAWSKI** a los taludes. Tras su publicación en inglés (**ROMANA** 1985, 1988, 1991, 1995) la clasificación **SMR** ha despertado cierto interés y el propio **BIENIAWSKI** (1989) la recomienda en su último libro para su aplicación en taludes. Las últimas publicaciones "in extenso" corresponden en inglés a un capítulo del compendio "Comprehensive Rock Engineering" editado por **HUDSON** (Vol. 3. **ROMANA** 1993) y al reciente Simposio de ICFL de Granada (**ROMANA**, 1996) y en castellano a los Simposios de Taludes de La Coruña (**ROMANA**, 1993) y Granada (**ROMANA**, 1997) publicaciones de las que tomaremos algunos puntos en el desarrollo del presente Trabajo.

Cualquier clasificación debe considerar, en primer lugar que la falla de un talud rocoso puede ocurrir según formas muy diferentes. En la mayoría de los casos la falla de la masa rocosa está gobernada por las discontinuidades y se produce según superficies formadas por una o varias juntas.

El índice **SMR** para la clasificación de taludes se obtiene del índice **RMR** básico sumando un "factor de ajuste", que es función de la orientación de las juntas (y producto de tres subfactores) y un "factor de excavación" que depende del

método utilizado:

$$SMR = RMR + (F1 \times F2 \times F3) + F4$$

8.5.1.- RMR (rango de 0 a 100) se calcula de acuerdo con los coeficientes de BIENIAWSKI (1979), como la suma de las valoraciones correspondientes a cinco parámetros (tabla N° 9):

El factor de ajuste de las juntas es producto de tres subfactores (Cuadro N° 26):

8.5.2.- F1 depende del paralelismo entre el rumbo de las juntas y de la cara del talud. Varía entre 1,00 (cuando ambos rumbos son paralelos) y 0,15 (cuando el ángulo entre ambos rumbos es mayor de 30° y la probabilidad de falla es muy baja). Estos valores, establecidos empíricamente, se ajustan aproximadamente a la expresión:

$$F1 = (1 - \sin aj - as)^2$$

Siendo *aj* y *as* los valores del buzamiento de la junta (*aj*) y del talud (*as*).

8.5.3.- F2 depende del buzamiento de la junta en la falla plana. En cierto sentido es una medida de la probabilidad de la resistencia a esfuerzo cortante de la junta. Varía entre 1,00 (para juntas con buzamiento superior a 45°) y 0,15 (para juntas con buzamiento inferior a 20°). Fue establecido empíricamente pero puede ajustarse aproximadamente según la relación:

$$F2 = (\tan^2 bj)^2$$

Donde *bj* es el buzamiento de la junta. **F2** vale 1,00 para las fallas por vuelco.

8.5.4.- F3 refleja la relación entre los buzamientos de la junta y el talud. Se han mantenido los valores propuestos por BIENIAWSKI en 1976 que son siempre negativos.

Para fallas planas **F3** expresa la probabilidad de que las juntas afloran en el talud. Se supone que las condiciones son "normales" cuando el buzamiento medio de la familia de juntas es igual al del talud, y por lo tanto aflorarán algunas pocas juntas. Cuando el talud buza más que las juntas, casi todas afloran y las condiciones "serán muy desfavorables" lo que supone un valor de **F3** de -60 (para $bs - bj > 10^\circ$), o "desfavorables" lo que supone un valor de **F3** de -50 (para $0 < bs - bj < 10^\circ$). La diferencia con el valor de **F3** "normal" (que es -25) es muy grande.

Para la falla por vuelco no se supone que puedan existir condiciones desfavorables, o muy desfavorables, ya que el vuelco rara vez produce fallas bruscas y en muchos casos los taludes con vuelcos de estratos se mantienen. Se ha utilizado la condición de GOODMAN-BRAY (1977) para evaluar la probabilidad de vuelco. Sin embargo se ha observado que muchos vuelcos se producen para valores ligeramente distintos, lo que puede interpretarse como que la resistencia al esfuerzo cortante se reduce unos 5%, sea por el hecho de que en muchos taludes volcados las juntas están meteorizadas, o porque el ángulo de rozamiento experimente una ligera reducción en el caso de fallas rotacionales (GOODMAN, 1976). La citada condición de GOODMAN-BRAY sólo es válida para el caso de fallas con pie (toe) volcador (que son más frecuentes en la práctica), pero no para el caso de pie deslizante donde la superficie basal del macizo roto aflora en el talud con el aspecto de una junta deslizada.

Cuadro N° 26

Factor de ajuste para las juntas (Romaña, 1985)

CASO		Muy Favorable	Favorable	Normal	Desfavorable	Muy Desfavorable
P	aj-as	> 30°	30° - 20°	20° - 10°	10° - 5°	< 5°
T	aj-as-180°					
P/T	F1	0.15	0.40	0.70	0.85	1.00
P	bj	< 20°	20° - 30°	30° - 35°	35° - 45°	> 45°
	F2	0.15	0.40	0.70	0.85	1.00
T	F2	1	1	1	1	1
P	bj-bs	> 10°	10° - 0°	0°	0° (-10°)	< 10°
T	bj-bs	< 110°	110° - 120°	> 120°	
P/T	F3	0	-6	-25	-50	-60

Leyenda:

P = Falla Plana.

T = Falla por Vuelco.

as = Dirección de Buzamiento del talud.

bs = Buzamiento del talud.

aj = Dirección de Buzamiento de las juntas.

bj = Buzamiento de las juntas.

Cuadro N° 27

Factor de ajuste según el método de excavación (Romaña, 1985)

Método	Talud Natural	Precorte	Voladura Suave	Voladura Mecanizada	Voladura deficiente
F4	+15	+10	+8	0	- 8

Cuadro N° 28

Clases de estabilidad según el SMR (Romaña, 1985)

Clase N°	V	IV	III	II	I
SMR	0 - 20	21 - 40	41 - 60	61 - 80	81 - 100
Descripción	Muy Mala	Mala	Normal	Buena	Muy Buena
Estabilidad	Totalmente Inestable	Inestable	Parcialmente Estable	Estable	Totalmente Estable
Fallas	Grandes roturas por planos continuos o por masa	Juntas o grandes cuñas	Algunas juntas o muchas cuñas	Algunos bloques	Ninguna
Tratamiento	Reexcavación	Corrección	Sistemático	Ocasional	Ninguno

8.5.5.- El factor de ajuste según el método de excavación, F4, ha sido establecido empíricamente (Cuadro N° 27):

Los **taludes naturales** son más estables, a causa de los procesos previos de erosión sufridos por el talud, y de los mecanismos internos de protección que muchos de ellos poseen (vegetación, desecación superficial, drenaje torrencial, etc). $F4 = + 15$

El **precorte** aumenta la estabilidad de los taludes en media clase $F4 = + 10$.

Las técnicas de **voladura suave (recorte)**, bien ejecutadas, también aumentan la estabilidad de los taludes, $F4 = + 8$.

Las **voladuras normales** aplicadas con métodos razonables no modifican la estabilidad, $F4 = 0$.

Las **voladuras defectuosas** son muy frecuentes y pueden dañar seriamente a la estabilidad $F4 = - 8$.

La **excavación mecánica** de los taludes por ripado sólo es posible cuando el macizo rocoso está muy fracturado o la roca blanda. Con frecuencia se combina con prevoladuras poco cuidadas. Las caras del talud presentan dificultades de acabado. Por ello el método ni mejora ni empeora la estabilidad $F_4 = 0$.

El valor final del índice de clasificación **SMR** es:

$$SMR = RMR + (F_1 \times F_2 \times F_3) + F_4$$

La clasificación no tiene instrucciones específicas para las **fallas en cuña**. El procedimiento a seguir es obtener el índice **SMR** para cada una de las familias de las juntas. Se adoptará para el talud el valor menor del índice **SMR** obtenido para cada familia de juntas.

En **rocas meteorizadas** y en las **evolutivas** la clasificación debe ser aplicada dos veces: para la situación inicial de roca sana y para la situación futura de roca meteorizada. Los índices obtenidos serán distintos.

Según el valor del índice **SMR** se obtienen 5 clases de estabilidad, definidas simplificadaamente en el Cuadro N° 28.

Los valores límites del **SMR** encontrados empíricamente para cada forma de falla son:

Cuadro N° 29

FALLAS PLANAS	
SMR > 60	Ninguna
60 > SMR > 40	Importantes
40 > SMR > 15	Muy grandes

Cuadro N° 30

FALLAS EN CUÑA	
SMR > 75	Muy Pocas
75 > SMR > 49	Algunas
55 > SMR > 40	Muchas

Cuadro N° 31

FALLAS POR VUELCO	
SMR > 65	Ninguno
65 > SMR > 50	Menores
40 > SMR > 30	Muy grandes

Cuadro N° 32

FALLAS CIRCULARES (Tipo suelo)	
SMR > 30	Ninguna
30 > SMR > 10	Posible

Todos los taludes con valores del **SMR** inferiores a 20 se caen rápidamente. No se han encontrado taludes con valores del **SMR** inferiores a 10 lo que indica que no son físicamente factibles.

8.6.- GSI – INDICE DE RESISTENCIA GEOLOGICA

Paul Marinos, profesor de Ingeniería Geológica de la Universidad Nacional Técnica de Atenas - Grecia, y **Evert Hoek** Ingeniero Consultor de Vancouver, B.C. de Canadá, desarrollaron el **GSI**, índice de resistencia geológica, con la finalidad de estimar la resistencia del macizo rocoso.

Este escrito presenta una revisión de la estimación de propiedades de resistencia del macizo rocoso a través del uso de **GSI**.

El sistema de clasificación **GSI** grandemente respeta las restricciones geológicas que ocurren en la naturaleza y están reflejadas en la información geológica. Un debate relaciona los rangos del índice de resistencia geológica (Strength Geological Index) para macizos rocosos típicos, enfatizando para macizos rocosos heterogéneos.

8.6.1.- ESTIMACION DE LAS PROPIEDADES DEL MACIZO ROCOSO.

La entrada básica consta de estimaciones o medidas de la resistencia compresiva uniaxial (**dc**) y una constante del material (**mi**), esto es relacionada con las propiedades de fricción de la roca. Idealmente, estas propiedades básicas deberían calcularse en el laboratorio, descrito por Hoek y Brown (1997) empero, en muchos casos, la información es requerida antes de que las pruebas del laboratorio hayan sido completadas. Razón para estimar estos parámetros reproducimos el cuadro N° 33. Notándose que esta actualizada de la versión (Marinos y Hoek, 2000).

El componente más importante de Hoek – Brown, para determinar la calidad del macizo rocoso es el proceso de reducir la **dc** del material y la constante **mi**, calculados en el laboratorio, valores que serán asignados en relación a los valores in-situ. Esto se calculará a través del Geological Strength Index – **GSI**.

El **GSI** ha sido desarrollado, como resultado de muchos años de debates con geólogos, con quienes **E. Hoek** ha trabajado alrededor del mundo. La consideración ponderada ha sido dado al léxico preciso en cada caso y a los pesos relativos asignados a cada combinación de las condiciones estructurales de la superficie y, para respetar las condiciones geológicas existente en la naturaleza.

Cuadro Nº 33

Estimación en el campo de la resistencia Compresiva Uniaxial de la roca intacta.

GRADO *	TERMINO	d _c MPa	I _s MPa	Estimación de la resistencia en el Campo	Ejemplos
R6	Extremadamente dura	> 250	> 10	Solo se pueden romper esquirlas de la muestra con el martillo de geólogo.	Basalto, Diabasa Gneiss, Granito, Chert.
R5	Muy dura	100 - 250	4 – 10	Se necesitan muchos golpes con el martillo de geólogo para romper la muestra.	Anfibolita, Gneiss, Grabo. Granodiorita, Basalto.
R4	Dura	50 - 100	2 – 4	Se necesita más de un golpe con el martillo de geólogo para romper la muestra.	Caliza, Mármol Esquisto, arenisca.
R3	Media	25 - 50	1 - 2	No se puede rayar o desconchar con una navaja, las muestras se pueden romper con un golpe firme con el martillo.	Concreto, Esquisto, Siltstone.
R2	Débil	5.0 - 25	**	Puede desconcharse con dificultad con Una navaja, se pueden hacer marcas poca profundas golpeando fuertemente la roca con la punta del martillo.	Yeso, Esquisto, Shale.
R1	Muy débil	1.0 - 5.0	**	Deleznable bajo golpes fuertes con la Parte puntiaguda del martillo de geólogo puede desconcharse con una navaja.	Roca alterada, Shale.
R0	Extremadamente Débil	0.25 - 1	**	Rayado por la uña del dedo pulgar.	Falla delgada rígida.

* Grado adecuado por Brown (1981).

** La prueba de carga puntual sobre rocas con una resistencia compresiva uniaxial debajo de 25 MPa. es probable que los resultados son ambiguos.

8.7.- PROPIEDADES FISICO-MECANICAS DEL MACIZO ROCOSO

Para la determinación de las propiedades físico-mecánicas del macizo rocoso, se deben considerar los siguientes parámetros.

8.7.1.- Datos Iniciales:

8.7.1.1.- CLASIFICACIONES GEOMECAICAS:

La Clasificación Geomecánica de Bieniawski – RMR (Rock Mass Rating).

La Clasificación Geomecánica de Barton – “Q” (Índice de Calidad Tunelera).

8.7.1.2.- ENSAYO DE LABORATORIO:

“d_c” Resistencia Compresiva de la roca Intacta.

8.7.1.3.- CALCULO DE CONSTANTES:

m, s, A y B.

8.7.2.- Para determinar las constantes (m, s, A y B), es necesario calcular mediante el cuadro del anexo referido a (relaciones aproximadas entre la calidad del macizo rocoso y las constantes empíricas), aplicando la formula estadística de regresión exponencial

$$Y = A \cdot e^{BX}$$

$$B = \frac{n\sum(xLnY) - \sum x * \sum LnY}{n\sum x^2 - (\sum x)^2}$$

$$A = e^{\left(\frac{\sum LnY - B * \sum x}{n}\right)}$$

Es necesario considerar que el calculo, es para cada uno de las constantes.

Basado en la experiencia, práctica y teórica **Hoek and Brown**, desarrollan por medio de un proceso de aproximaciones la relación empírica entre los esfuerzos principales que intervienen en el fenómeno del debilitamiento de la roca.

$$s_1 = s_3 + \sqrt{ms_c s_3 + ss_c^2}$$

Donde:

s₁ = Esfuerzo Principal mayor en el debilitamiento.

s₃ = Esfuerzo principal menor aplicado a la muestra.

s_c = Resistencia Compresiva de la roca inalterada.

m y s son constantes que dependen de las propiedades de la roca y el

grado de su fracturación antes de ser sometida a los esfuerzos s_1 y s_3 .

En función a este criterio de fallamiento de Hoek and Brown se determina las propiedades mecánicas del macizo rocoso:

- Resistencia Compresiva del Macizo Rocos:

$$s_{cmr} = s_c \sqrt{s}$$

- Resistencia a la Tracción del Macizo Rocos:

$$s_{tmr} = s_c T$$

Siendo:

$$T = \frac{1}{2} \langle m - \sqrt{m^2 + 4s} \rangle$$

- Esfuerzo al Corte del macizo Rocos:

$$i_{cmr} = A s_c \left\langle \frac{s_n}{s_c} - T \right\rangle^B$$

Siendo:

s_n = Esfuerzo de campo vertical máximo, donde esta ubicado la labor minera en estudio, se determina :

$$s_n = dh$$

Donde:

d = Peso específico Aparente del terreno o roca de recubrimiento o suprayacente (Kn/m^3).

h = Altura de la roca suprayacente.

- Modulo de Deformación “In-situ”, del Macizo Rocos:

$$E_{mr} = 1.75 \text{ RMR} - 85$$

Valida para valores de RMR superiores a 48, en GPa.

- Cohesión y Angulo de Fricción del Macizo Rocos:

Los parámetros de Cohesión y Angulo de fricción del macizo Rocos, se transcribe de la tabla de Clasificación Geomecánica de Bieniawski (Cohesión y ϕ de Rock Mechanic's Desing in Mining And Tunneling By Z.T. Bieniawski – 1984).

- Densidad de macizo Rocoso:

Para determinar la densidad del macizo Rocoso, se aplica la siguiente formula matemática:

$$\rho_{mr} = (RMR \times 0.002 + 0.8) \times D_r$$

Donde:

ρ_{mr} = Densidad del macizo Rocoso.

D_r = Densidad de la roca intacta.

Hoek and Brown (1988) sugirieron que estas constantes podrían ser estimadas a partir de la versión de 1976 de la [Valoración del Macizo Rocoso \(RMR\) de Bieniawski](#), asumiendo condiciones completamente secas y orientaciones muy favorables de las discontinuidades.

Mientras que este procedimiento es aceptable para macizos rocosos con valores de [RMR](#) de más de 25, este no es aplicable para macizos rocosos de mala calidad, donde el valor mínimo que se determina del [RMR](#) es de 18.

A fin de superar esta limitación, se introduce un nuevo índice llamado [Índice de resistencia Geológica \(GSI\)](#). Los valores del GSI varia desde cerca de 10, para macizos rocosos extremadamente malas, hasta 100, para la roca intacta.

Las relaciones entre m/m_i , s y a y el Índice de resistencia Geológica (GSI) son como siguen:

Para $GSI > 25$ (Macizo Rocoso no disturbado)

$$m / m_i = \exp\left(\frac{GSI - 100}{28}\right) \dots\dots\dots \text{Ec. 1}$$

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9}\right) \dots\dots\dots \text{Ec. 2}$$

$$a = 0.5 \dots\dots\dots \text{Ec. 3}$$

Para $GSI < 25$ (Macizo Rocoso no disturbado)

$$S = 0 \dots\dots\dots \text{Ec. 4}$$

$$a = 0.65 - \frac{GSI}{200} \dots\dots\dots \text{Ec. 5}$$

En términos del criterio de falla de [Mohr – Coulomb](#), se estima un conjunto

equivalente de parámetros de cohesión y fricción para valores Hoek and Brown dados, lo cual puede hacerse aplicando una solución por [Balmer \(1952\)](#), en el cual los esfuerzos normal y de corte son expresados en términos de los correspondientes esfuerzos normales como sigue:

$$s_n = s_3 + \frac{s_1 - s_3}{\partial s_1 / \partial s_3 + 1} \dots\dots\dots \text{Ec. 6}$$

$$t = (s_1 - s_3) \sqrt{\partial s_1 / \partial s_3} \dots\dots\dots \text{Ec. 7}$$

Para GSI < 25 cuando a = 0.5:

$$\frac{\partial s_1}{\partial s_3} = 1 = \frac{ms_c}{2(s_1 - s_3)} \dots\dots\dots \text{Ec. 8}$$

Para GSI < 25 cuando a = 0:

$$\frac{\partial s_1}{\partial s_3} = 1 + am^a \left(\frac{s_3}{s_c} \right)^{a-1} \dots\dots\dots \text{Ec. 9}$$

Una vez calculados un conjunto de valores (s_n , t) a partir de las ecuaciones 6 y 7, se puede calcular mediante análisis de regresión lineal, valores promedios de la **Cohesión "C"** y del **ángulo de fricción "F"**, en la cual el mejor ajuste de la línea recta es calculado para el rango de pares (s_n , t).

La **resistencia compresiva uniaxial del macizo rocoso** definida por una resistencia cohesiva "C" y un ángulo de fricción F esta dada:

$$s_{cm} = \frac{2c \cos \Phi}{1 - \text{Sen} \Phi} \dots\dots\dots \text{Ec. 10}$$

8.7.3.- USO DE LAS CLASIFICACIONES GEOMECAICAS DEL MACIZO ROCOSO PARA LA ESTIMACIÓN DEL GSI

[Hoek and Brown\(1980\)](#), propusieron utilizar para la estimación de las **constantes del material: m y s**, las clasificaciones geomecánicas de [Bieniawski \(1974\)](#) y de [Barton \(1974\)](#), sin embargo, hay un problema potencial en el uso de estos sistemas de clasificación geomecánica, de tomar en cuenta doblemente algún factor.

A fin de minimizar estos problemas potenciales, se ofrecen las siguientes guías para la selección de parámetros cuando se utilizan las clasificaciones geomecánicas del macizo rocoso como base para la estimación de los valores m y s del criterio de falla de Hoek and Brown.

8.7.4.- CLASIFICACION GEOMECANICA RMR DE BIENIAWSKI DE 1976

El artículo de [Bieniawski de 1976](#) es la referencia básica para el presente análisis. En el cuadro N° 9, se muestra los parámetros que se consideran para determinar la calidad del macizo rocoso.

Parte del cuadro N° 9 de Bieniawski de 1976, que define la Clasificación Geomecánica o valoración del macizo rocoso ([RMR](#)), los parámetros que se tomaran en cuenta para los cálculos estarán referidos a:

- resistencia Compresiva de la roca.
- RQD (Rock Quality designation).
- Espaciamiento de juntas.
- Condición de juntas.

Para estimar el valor de [utilizando la valoración del Macizo rocoso \(RMR\) de Bieniawski de 1976](#), se debe usar el cuadro N° 9, con los parámetros descritos anteriormente, asumiendo que el macizo rocoso esta completamente seco y al valor de la [presencia de agua subterránea](#) se le debe asignar una [valoración de 10](#), También se deberá asumir que la [orientación de juntas](#) corresponde a una [condición favorable](#) y el valor de [ajuste por orientación de juntas será \(0\)](#). La valoración final, llamada [RMR₇₆](#), puede luego ser utilizada para estimar el valor de GSI.

Para [RMR₇₆ > 18](#)

$$\text{GSI} = \text{RMR}_{76} \dots\dots\dots \text{Ec. 11}$$

Para [RMR₇₆ < 18](#)

No se puede utilizar la Clasificación Geomecánica de Bieniawski de 1976 para estimar GSI, en cambio se debería usar el valor de Q de Barton, Lien y Lunde.

8.7.5.- CLASIFICACION GEOMECANICA DE BIENIAWSKI DE 1989

La [clasificación geomecánica de Bieniawski de 1989](#), puede ser utilizada para estimar el [valor GSI](#) de una manera similar a lo descrito para versión de 1976. en este caso, se asigna un valor de [15 a la valoración del agua subterránea](#) y de nuevo se considera como [cero \(0\) el ajuste por orientación de Juntas](#). Nótese que el valor mínimo que se puede obtener con la clasificación geomecánica de 1989 es 23 y que, en general, esta da un valor ligeramente más alto que la clasificación de 1976. la valorización final, llamada [RMR₈₉](#), puede ser utilizada para estimar el valor de GSI.

Para [RMR₈₉ > 23](#)

$$\text{GSI} = \text{RMR}_{89} - 5 \dots \text{Ec. 12}$$

Para $\text{RMR}_{89} < 23$

No se puede utilizar la clasificación geomecánica de Bieniawski de 1989 para estimar el valor GSI, en cambio se debería usar el valor de Q de Barton, Lien y Lunde.

Valores de la constante m_i para rocas intactas por grupos de roca
Los valores entre paréntesis son estimados

Tipo de Roca	Clase	Grupo	Textura			
			Grueso	Mediano	Fino	Muy fino
Sedimentaria	Clástica	Conglomerado (22)	Arenisca 19	Limonita 9	Lutita 4	
		Grauvaca..... (18)			
	No Clástica	Orgánica	Greda..... 7		
		Carbonatada	Brecha (20)	Caliza Esparítica (10)	Caliza Micrítica 8	
	Química		Yeso 16	Anhidrita 13		
Metamórfica	No foliada	Mármol 9	Hornfels (19)	Cuarcita 24		
	Ligeramente foliada	Magmatita 30	Anfibolita 31	Milonita 6		
	Foliada *	Gneis 33	Esquisto (10)	Filita (10)	Pizarra 9	
Ignea	Transparente	Granito 33		Riolita (16)	Obsidiana (19)	
		Granodiorita (30)		Dacita (17)		
		Diorita (28)		Andesita 19		
	Opaco	Gabro 27	Dolerita (19)	Basalto (17)		
		Norita 22				
Tipo extrusiva piroclástica	Aglomerado (20)	Brecha (18)	Tufo (15)			

(*) Estos valores son para especímenes rocosos intactos ensayados normal a la foliación. Los valores de m_i serán significativamente diferentes si la falla ocurriera a lo largo de los planos de foliación (Hoek, 1983).

8.7.6.- CLASIFICACION GEOMECANICA “Q” MODIFICADA DE BARTON LIEN Y LUNDE

Para estimar el valor de GSI utilizando esta clasificación geomecánica, se deben usar el RQD (Rock Quality Designation), el número del sistema de juntas (Jn), el número de la rugosidad de las Juntas (Jr) y el número de alteración de las Junta (Ja), exactamente como están definidas en los cuadros N° 18, N° 19, N° 20, N° 21, N° 22, N° 23, y N° 24, de Barton (1974).

Para el factor de reducción por agua en juntas (Jw) y el factor de reducción por esfuerzos (SRF), se debe utilizar un valor de 1 para ambos parámetros, lo que equivale a condiciones secas del macizo rocoso sometido a esfuerzos medios.

De aquí para sustituir a partir de la ecuación N° 1, el Índice de calidad Tunelera modificada (Q´) es calculada a partir de:

$$Q' = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \dots\dots\dots \text{Ec. 13}$$

Este Valor de Q´ puede ser utilizado para estimar el valor GSI a partir de:

$$GSI = 9 \text{Log}_e Q' + 44 \dots\dots\dots \text{Ec. 14}$$

Estimación de las constantes m/m_i , s , a , Modulo de Deformación “E” y la relación de Poisson “ ν ” para el criterio de falla generalizado de Hoek and Brown, basado en la estructura del macizo rocoso y en la condición de las superficies de discontinuidades. Es necesario observar que los valores del cuadro corresponden a un macizo rocoso no disturbado.

(*) Criterio Generalizado de Hoek and Brown:

$$s_1' = s_3' + s_c (m_3 (s_3' / s_c) + s)^a$$

Donde:

d_1' = Esfuerzo efectivo principal máximo de falla.

d_3' = Esfuerzo efectivo principal mínimo de falla.

dc = Resistencia Compresiva uniaxial de las piezas de la roca intacta.

m , s , y a , son las constantes de la composición, estructura y condiciones superficiales del macizo rocoso.