

CLASIFICACION DE BIENIAWSKI (RMR)

El sistema de Valoración del Macizo Rocosó (RMR), más conocido como clasificación Geomecánica RMR, fue desarrollado por Bieniawski durante 1972 y 1973. Fue modificado años más tarde de acuerdo con los casos históricos llegaron a estar disponibles y conforme a los estándares y procedimientos internacionales. En los pasados 25 años, el RMR ha tenido éxito, pasando la prueba del tiempo y beneficio de extensiones y aplicaciones por muchos autores en todas partes del mundo. Esta variedad de aplicaciones, en una cantidad de 351 casos históricos, señala la aceptación del sistema y su inherente facilidad de uso y versatilidad en la práctica ingenieril, tales como túneles, cámaras, minas, taludes y cimentaciones. Pero, es importante que el RMR sea usado para el propósito al cual fue desarrollado, y no sea una respuesta para todos los diseños de ingeniería.

DEFINICIÓN DEL SISTEMA

Debido a que el sistema RMR ha tenido varias modificaciones, y desde que el método cambio su nombre a clasificación Geomecánica RMR o Sistema de Valoración de Macizos Rocosos, es importante decir que el sistema ha permanecido esencialmente con el mismo principio a pesar de los cambios. Así, algunas modificaciones y extensiones fueron hechas para el mismo método básico y no deberían ser interpretadas como nuevos sistemas. Para evitar alguna confusión, las siguientes extensiones del sistema fueron aplicaciones valiosas, pero todavía formando parte del sistema RMR:

- Aplicaciones en la minería, Laubscher 1977,1984.
- Ripabilidad, Weaver 1975.
- Minería en roca dura, Kendorski 1983.
- Minería de carbón, Unal 1983; Newman y Bieniawski 1983.
- Cimentaciones para presas, Serafim y Pereira 1983.
- Tuneleo, Gonzales de Vallejo 1983.
- Estabilidad de taludes, romana 1985.
- Minas hindúes de carbón Venkateswarlu 1986.

Algunos usuarios del RMR hablan de la valoración CISR o clasificación CISR. Esto es incorrecto y nunca ha sido utilizado por Bieniawski. Las expresiones correctas son: Sistema de Valoración del Macizo Rcoso, Sistema RMR, o Clasificación Geomecánica RMR.

PROCEDIMIENTO DE CLASIFICACIÓN

Los siguientes parámetros son usados para clasificar un macizo rocoso utilizando el sistema RMR:

1. Resistencia a la compresión uniaxial de la roca.
2. Índice de Calidad de la Roca (RQD).
3. Espaciado entre discontinuidades.
4. Condición de las discontinuidades.
5. Condición de infiltraciones de agua.
6. Orientación de las discontinuidades.

Para aplicar la Clasificación Geomecánica, se debe realizar lo siguiente:

- ✓ Dividir el macizo rocoso en dominios estructurales (zonas de características geológicas similares como tipo de roca espaciado, etc.). En la mayoría de los casos, los límites de las regiones estructurales coincidirán con características geológicas mayores, tales como fallas, diques, contacto, etc.
- ✓ Después de que las regiones estructurales han sido identificadas, los parámetros de clasificación para cada región estructural son determinadas de las medidas en el campo y colocadas en una hoja de datos (Tabla 1).
- ✓ Se analizan la importancia de los valores que están asignados para cada parámetro de la sección A de la Tabla 2.
- ✓ Al respecto, el promedio de condiciones típicas es evaluado para cada set de discontinuidades y los valores son interpolados utilizando las curvas indicadas en las Figuras 1,2 y 3.

- ✓ Se debe señalar que la importancia de la valoración se dio para el espaciado entre discontinuidades, aplicando a macizos rocosos que tienen tres sets de discontinuidades.

Es decir, cuando solo dos familias de discontinuidades están presentes, se obtiene un valor conservativo y la valoración para el espaciado entre discontinuidades puede incrementarse en un 30 %.

- ✓ Luego de analizar cada uno de los parámetros, sumamos sus valores y obtenemos el RMR básico.
- ✓ El siguiente paso es incluir el sexto parámetro, denominado, influencia del rumbo y buzamiento de las discontinuidades, para ajustar el RMR básico, de acuerdo con la sección B de las discontinuidades depende de las aplicaciones ingenieriles, tales como túneles, minas taludes o cimentaciones. Los valores de este parámetro son cualitativos. Para ayudar a decidir si el rumbo y el buzamiento son favorables o no en el tuneleo, debemos referirnos a la sección F de la Tabla 2, la cual está basada en estudios hechos por Wickham (1972). Para taludes y cimentaciones, el lector puede referirse al Apéndice V.

El parámetro “orientación de las discontinuidades”, se refleja en el significado de los varios sets de discontinuidades presentes en un macizo rocoso. El set principal, usualmente designado como set N° 1, controla la estabilidad de una excavación; por ejemplo, en túneles será el set cuyo rumbo sea paralelo a su eje. La sumatoria de la valoración de los parámetros de clasificación para cada set de discontinuidades constituirá el RMR.

De otra manera, en situaciones donde no hay un set de discontinuidades dominante y de importancia crítica, o cuando se estime la resistencia y deformación del macizo rocoso los valores para cada set de discontinuidades serán promediados para obtener la apropiada clasificación individual de parámetro.

Tabla 1. Hoja de recolección de datos para la Clasificación Geomecánica RMR (1989)

HOJA DE DATOS PARA CLASIFICACION GEOMECANICA(RMR)									
Nombre del proyecto _____				Condición de las discontinuidades					
Lugar de estudio _____ Recolectado por _____ Fecha _____		Región estructural	Abscisa(m)	Roca	Continuidad	Set1	Set2	Set3	Set4
					Muy baja <1m Baja 1-3m Media 3-10m Alta 10-20m Muy alta >20m				
Resistencia a la compresión		Núcleos de perforación RQD			Separación de la discontinuidad				
Compresión Carga Designación Uniaxial de punta Mpa Mpa		(%)			Muy pegadas <0.1mm Pegadas 0.1-0.5mm Ligeramente abierta 0.5-2.5mm Abierta 2.5-10mm Muy abierta >10mm				
Muy alta >250 >10 Alta 1000-250 4-10 Mediana 50-100 0-4 Moderada 25-50 1-2 Baja 5-25 <1 Muy baja 1-5		Excelente 90-100 Buena 75-90 Regular 50-75 Pobre 25-50 Muy pobre <25							
Rumbo y Buzamiento (°)				Rugosidad de discontinuidad (Estado Superficies: irregular, ondulada, plana)					
Set1 Rumbo de a Buza. Set2 Rumbo de a Buza. Set3 Rumbo de a Buza. Set4 Rumbo de a Buza.				Muy rugosa Rugosa Ligeramente rugosa Pulida Muy pulida					
				Relleno					
				Tipo Espesor Resistencia a la Compresión Mpa Filtración					
Espacio de discontinuidades									
		Set1	Set2	Set3	Set4				
Muy amplio >2m									
Amplio 0.6-20m									
Moderado 200-600mm									
Cerrado 60-200mm									
Muy cerrado <60mm									
Filtraciones de Agua				Estado de la pared de la Discontinuidad					
Flujo por cada 10 m		Condiciones generales (completamente seco, húmedo, goteo, flujo, Co baja presión, flujo Con alta presión)			Sana Ligeramente meteorizada Moderadamente Meteorizada Altamente meteorizada Completamente meteorizada Suelo Residual				
De longitud del túnel l/min									
Presión de agua kPa									
Esfuerzos in - situ									
				Estructuras Mayores					
				Abscisa Tipo Orientación					

Tabla 2. Clasificación Geomecánica RMR (Bieniawski1989).

A. Parámetros de clasificación con sus valores									
Parámetros			Rango de valores						
1	Resistencia De la roca intacta	Índice de resistencia de carga puntual (Is)	>10MPa	4-10MPa	2-4MPa	1-2MPa	Para estos rangos es recomendable, ensayos de resistencia a la compresión uniaxial		
		Resistencia a la compresión uniaxial	>250Mpa R6	100-250Mpa R5	50-100Mpa R4	25-50Mpa R3	5-25 MPa R2	1-5 MPa R1	<1 MPa R0
	Puntaje		15	12	7	4	2	1	0
2	RQD (%)		90-100	75-90	50-75	25-50	<25		
	Puntaje		20	17	13	8	3		
3	Espacio de las discontinuidades.		>2m	0,6-2m	200-600mm	60-200mm	<60mm		
	Puntaje		20	15	10	8	5		
4	Condición de las discontinuidades(ver E)		Superficies muy rugosas, sin continuidad, sin separación, paredes de rocas sin alteración.	Superficies ligeramente rugosas con separación < 1mm. Paredes altamente meteorizadas.	Superficies ligeramente rugosas con separación <1mm Paredes altamente meteorizadas	Superficies pulidas o relleno <5mm se espesura o separación 1-5mm. Continuas.	Relleno blando>5mm de espesor Separación >5mm continuas.		
	Puntaje		30	25	20	10	0		
5		Flujo por cada 10 m de longitud del túnel (l/m)	Ninguno	<10	10-25	25-125	>125		
	Aguas subterráneas	(Presión de agua en la diaz)(Tensión principal mayor x1).	0	<0,1	0,1-0,2	0,2-0,5	>0,5		
		Condiciones generales	Completamente seco	Húmedo	Mojado	Goteo	Flujo		
	Puntaje		15	10	7	4	0		
B. Ajuste la orientación de las discontinuidades									
Orientación de rumbo y buzamiento		Muy favorable	Favorable	Regular	Desfavorable	Muy desfavorable			
Puntaje	Túneles y minas	0	-2	-5	-10	-12			
	Cimentaciones	0	-2	-7	-15	-25			
	Taludes	0	-5	-25	-50	-60			
C. Tipos de macizos rocosos determinados a partir de la valuación total									
Puntaje		100-81	80-61	60-41	60-21	<21			
Tipo de roca		I	II	III	IV	V			
Descripción		Muy buena	Buena	Regular	Mala	Muy mala			

D. Significado de los tipos de roca					
Tipo de roca	I	II	III	IV	V
Tiempo medio de sostén	20 años, claro de 15 m	1 año, claro de 10m	1 semana, claro de 5m	10 horas, claro 2.5m	30min, claro de 1m
Cohesión del macizo rocoso (KPa)	>400	300 - 400	200 - 300	100 - 200	<100
Angulo de fricción del macizo rocoso (°)	>45	35 - 45	25 - 35	15 - 25	<15
E. Guías para la clasificación según las condiciones de las discontinuidades.					
Longitud (Persistencia Puntaje)	< 1m 6	1 – 3m 4	3 – 10 m 2	10 -20 m 1	>20m 0
Separación (abertura) Puntaje	Ninguna 6	< 0.1m 5	0.1 – 1.0 m 3	1 -5 mm 1	>5mm 0
Rugosidad Puntaje	Muy rugosa 6	Rugosa 5	Ligeramente rugosa 3	Lisa 1	Superficies pulidas 0
Relleno Puntaje	Ninguno 6	Duro < 5mm 4	Duro > 5mm 2	blando < 5mm 2	Blando > 5mm 0
Meteorización Puntaje	Inalterada 6	Ligeramente meteorizada 5	Moderadamente meteorizada 3	Altamente meteorizada 1	Descompuesta 0
F. Efecto de la orientación del rumbo y buzamiento de las discontinuidades en los túneles.					
Rumbo perpendicular al eje del túnel			Rumbo paralelo del túnel		
Avance en el sentido del buzamiento- Buz 45° - 90°		Avance en el sentido del buzamiento- Buz 20° - 45°	Buzamiento 45° - 90°	Buzamiento 20° - 45°	
Muy favorable		favorable	Muy favorable	Regular	
Avance en el sentido del buzamiento- Buz 45° - 90°		Avance en el sentido del buzamiento- Buz 20° - 45°	Buzamiento 0 – 20° independiente del rumbo		
Regular		Desfavorable	Regular		

Figura 1. Valores para la resistencia a la compresión uniaxial.

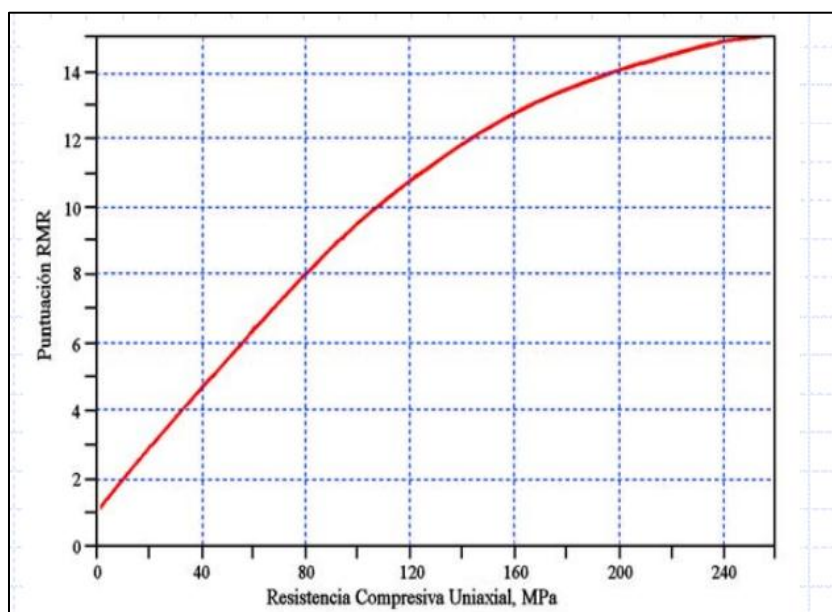


Figura 2. Valores para el RQD.

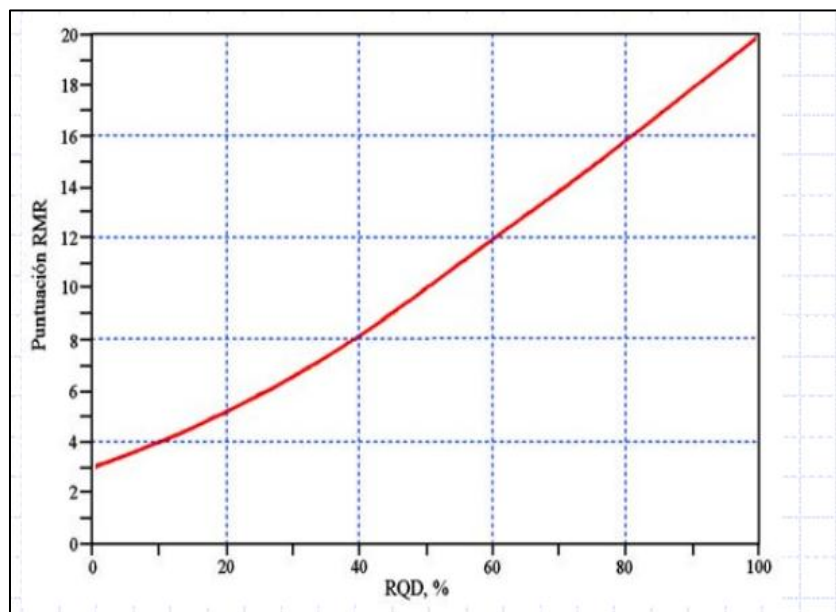
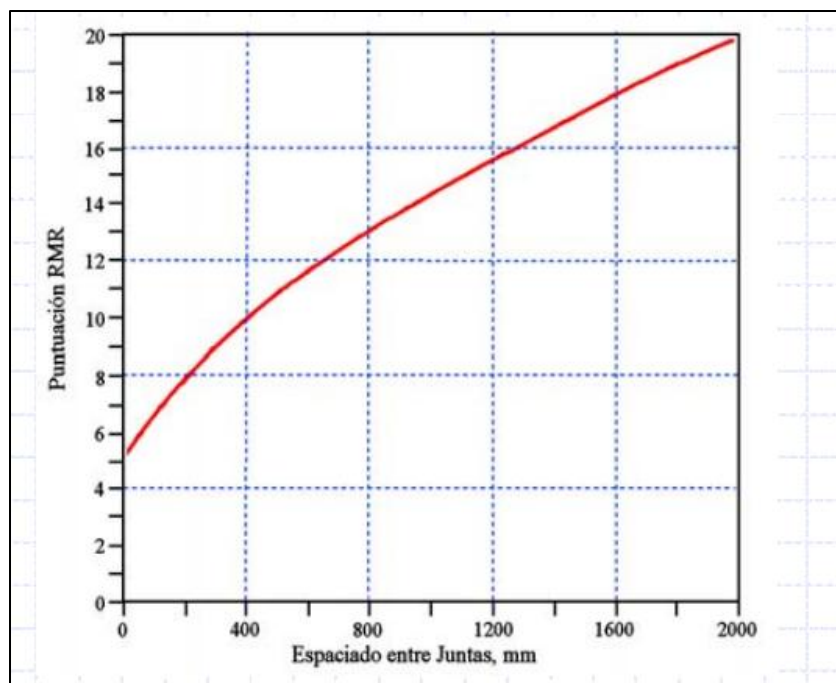


Figura 3. Valores para el espaciado.



Luego del ajuste por orientación de discontinuidades, el macizo rocoso es clasificado de acuerdo con la sección C de la tabla 2. Nótese que las clases de

macizo rocoso están agrupados con valores de 20 puntos cada una. Esto le permite al ingeniero o al geólogo captar el sentido de la calidad de un macizo rocoso o de la ausencia de este.

La sección D de la tabla 2 da un sentido práctico de cada clase del macizo rocoso con relación a problemas específicos de ingeniería. En el caso de túneles, cámaras y minas, se refiere al tiempo máximo que puede tenerse una excavación sin sostenimiento para un determinado claro o espacio.

Cuando diferentes tipos de calidades de roca son encontrados en una superficie excavada, como por ejemplo, roca de buena calidad y roca de mala calidad, es esencial identificar la condición más crítica para la valoración del macizo rocoso. Esto significa que las características geológicas más importantes para los propósitos de estabilidad tendrán una influencia decisiva. Por ejemplo, una falla en una superficie con una alta calidad jugara un rol muy importante, independiente de una alta resistencia de la roca circundante.

Es recomendable que cuando hay dos o más zonas claramente diferentes en un frente de roca, se deben obtener los valores e RMR para cada zona y luego computar los valores para el frente de roca correspondiente a cada zona en relación con el área total, como también, la influencia que tiene cada zona en la estabilidad total de la excavación.

RECOMENDACIONES DEL SOSTENIMIENTO.

La clasificación Geomecánica RMR provee una guía para la selección del sostenimiento para túneles de acuerdo con la siguiente tabla.

Tabla 3. Guía de excavación y sostenimiento de túneles en roca en concordancia con el RMR.

Clase del macizo rocoso	Excavación	Sostenimiento		
		Pernos (Ø 20 mm, adhesión total)	Hormigón lanzado	Marcos de acero
Roca muy buena I RMR: 81 – 100	Avances de 3m de sección completa	Generalmente no se necesita sostenimiento, excepto algunas arcillas para refuerzo local		
Roca buena II RMR: 61 – 80	Avances de 1.0 a 1.5 a sección completa. Sostenimiento total a 20 del frente	Pernos locales en el techo, 3 m de largo espaciado de 2.5 con malla ocasional	50mm en el techo donde fuera necesario	No
Roca regular III RMR: 41 – 60	Media sección banqueo, progresiones de 1.5 a 3.0m en la media sección, sostenimiento primario después de calda voladura sostenimiento completo a 10 m del frente.	Empernado sistemático de 4m de largo; espaciado de 1.5 a 2m en el techo y paredes con malla en el techo	50 – 100 mm en el techo 30 mm en las paredes	No
Roca mala IV RMR: 21 – 40	Media sección y banqueo, progresiones de 1.0 a 1.5m en la media sección. Hay que instalar los refuerzos conforme el avance, a 10m del frente.	Empernado sistemático de 4 a 5m de largo con espaciado de 1 a 1.5m en el techo y paredes con malla	100 150 mm en el techo y 100 mm en las paredes.	Marcos ligeros a medianos separados 1.5 m donde haga falta.
Roca muy mala V RMR: <20	Etapas múltiples. A veces de 0.5 a 1.5 m en la media sección. Instalación del sostenimiento a medida que se excava. Hormigón lanzado con la mayor brevedad después de las voladuras	Empernado sistemático de 5 a 6 m de largo, espaciado 1 – 1.5m en la clave y paredes con malla. Instalación de pernos en el piso o contraboveda	150 a 200 mm en el techo. 100 mm en las paredes y 50 mm en el frente	Marcos medianos a pesados espaciados a 0.75 m con tablaestacado donde se necesite.

Esta guía de sostenimiento es aplicable para túneles de ingeniería civil, que tengan aproximadamente 10 m y que se excava en roca con el sistema de perforación y voladura a profundidades menores de 900 metros bajo terreno natural, es decir, con una tensión vertical < a 25 MPa. Nótese que el significado de estas recomendaciones representa el sostenimiento permanente y no el preliminar.

CORRELACIONES

La carga para el sostenimiento puede ser determinada del RMR propuesto por Unal (1983).

$$P = \frac{100 - RMR}{100} \gamma B$$

donde:

P: carga para el sostenimiento, KN;

B: ancho dle tunel, m;

γ : peso especifico de la roca, Kg/m³

Se debe enfatizar que todas estas aplicaciones implican la selección del tipo de sostenimiento y la determinación de la carga de la roca o el esfuerzo del macizo y la deformación. Se debe utilizar el valor del RMR y no la clase del macizo, dentro del cual este valor cae. De esta manera, el RMR es muy sensitivo a los parámetros individuales, porque dentro de una clase de macizo rocoso, tal como “roca buena”, hay mucha diferencia entre un RMR= 80 y un RMR=61.

A este respecto, Romana (2000) propone la sustitución de las 5 clases a 10 subclases, donde cada una de estas tiene un rango de 10 puntos; que se denominan con el numera romano de Bieniawski (I, II, III, IV, V), seguido de una letra, seguido de una letra: a para la mitad superior y b para la mitad inferior de la clase. Estas modificaciones ya están en uso en el sistema SMR para taludes ver tabla 4. Cabe anotar que la subclase Ia y Vb son casi imposibles de encontrar, pues el primer caso son escasos los macizos rocosos con escasas discontinuidades y de gran calidad, y en el segundo, no existe un macizo cuyo RMR<10 corresponda a un terreno que se asimile a un macizo rocoso, pues este tipo de terrenos más bien correspondería un suelo plástico con muy baja resistencia la cizallamiento.

Finalmente, cabe puntualizar, que los rangos de la tabla 2 siguen las recomendaciones de la ISRM su comisión de Estandarización y Clasificación.

El RMR ha encontrado una aplicación en varios tipos de proyectos ingenieriles tales como túneles, taludes, cimentaciones y minas. La mayoría de aplicaciones han sido en el campo de la tuneleria (Bieniawski, 1984).

En el sistema de clasificación ha sido utilizado también ampliamente en minería particularmente en USA, India y Australia. Más recientemente el RMR fue aplicado en minas de carbón, así como también en minas de roca dura.

El RMR es también aplicable a taludes y cimentaciones. Este uso ha permitido el diseño de taludes cerca de los portales de túneles, así como también ha servido con la finalidad de estimar la deformación de la roca para cimentaciones, en las estructuras para puentes y presas.

Tabla 4. Clasificación modificada de Bieniawski en subclases (Romana, 2000)

RMR	Modificado		Original (Bieniawski)	
	Clase	Denominación	Denominación	Clase
100	I a	Excelente	Muy buena	I
90	I b	Muy buena		
80	II a	Buena a muy buena	Buena	II
70	II b	Buena a media		
60	III a	Media a buena	Media	III
50	III b	Media a mala		
40	IV a	Mala a media	Mala	IV
30	IV b	Mala a muy mala		
20	V a	Muy mala	Muy mala	V
10	V b	pésima		

En el caso de cimentaciones de roca, el conocimiento del módulo de deformación del macizo rocoso es de vital importancia. El RMR provee una correlación para estimar el módulo de deformación del macizo rocoso in situ:

$$E_m = 2RMR - 100, \text{ si } RMR > 50$$

$$E_m = 10^{(RMR-10)/40}, \text{ si } RMR < 50$$

donde:

E_m : es el modulo de deformacion in situ en GPa;

Una correlación fue propuesta entre el RMR y el índice Q, así como también entre el RMR y el RSR. Basado en 111 casos históricos, Bieniawski propuso la siguiente correlación para túneles de ingeniería civil.

$$RMR = 9 \ln Q + 44$$

Para excavaciones mineras, Abad (1983) analizo 187 casos para excavaciones de transporte sobre rieles en minas de carbón, llegando a la siguiente correlación:

$$RMR = 10.5 \ln Q - 42$$

Rutledge y Preston (1978) determinaron la siguiente correlación de 7 proyectos de túneles en Nueva Zelanda:

$$RSR = 0.77 RMR + 12.4$$

EJEMPLO DE CÁLCULO

Un túnel es construido atravesando un granito ligeramente meteorizado y con un sistema principal de discontinuidad buzando 60° en contra del sentido del avance del túnel. Se obtuvo a partir de ensayos de laboratorio un valor de índice de resistencia de carga puntual igual a 8 MPa (resistencia de la roca). El RQD promedio es de 70%. Las discontinuidades son ligeramente rugosas y sus paredes están ligeramente meteorizadas, con una separación entre ellas < 1 mm, las discontinuidades están espaciadas cada 30 cm. El túnel se encuentra húmedo. Determinar la clase de macizo rocoso y el tipo de sostenimiento o refuerzo en caso que se necesite.

Parámetro	Valor	Puntaje
Índice de resistencia de carga puntual	8 MPa	12
RQD	70%	13
Espaciado de discontinuidades	300 mm	10
Condición de discontinuidades	Nota 1	22
Infiltraciones de agua	Húmedo	-7
Ajustes por orientación	Nota 2	59

Nota 1: para discontinuidades con superficies rugosas, ligeramente meteorizadas y con separación < 1 mm, de la tabla xxxx sección xxx, tenemos un puntaje de 25. Pero cuando informacion mas detallada esta disponible, la tabla 2 se la puede utilizar para obtener un puntaje más refinado. Entonces, es este caso, el puntaje es la suma de 4(1 a 3m de longitud de la discontinuidad), 4 (separación 0.1 a 1.0 mm), 3 (ligeramente rugosa), 6 (sin relleno) y 5 (ligeramente meteorizada); lo que nos da un total de 22.

Nota 2: la tabla 2 da una descripción de “Regular” para las condiciones donde el túnel atraviesa la roca en contra del buzamiento con un Angulo de 60° . Usando esta descripción para túneles y minas en la tabla 2 da un puntaje de ajuste de -5.

Para el caso considerado, con un RMR=59, la tabla 3 sugiere que el túnel puede ser excavado a media sección y banqueo con progresiones de 1.5 a 3.0 m en la sección superior. Algunos refuerzos se pueden colocar después de cada voladura y los refuerzos completos a 10 m del frente. Se puede utilizar anclaje sistemático con pernos de 4 m de longitud, 20 mm de diámetro, espaciados de 1.5 a 2 m en el techo y paredes, malla en el techo. Se puede utilizar también de 50 a 100 mm de hormigón lanzado en el techo y 30 mm en las paredes.

Un puntaje de RMR igual a 59 nos indica que el macizo rocoso está en el límite de las categorías re “roca regular” y “roca buena”. En las etapas iniciales de construcción, es permisible utilizar el sostenimiento para una roca regular. Si la construcción va progresando sin problemas de estabilidad y el sostenimiento utilizado es apropiado, es posible reducir los requerimientos de sostenimiento a los

que se siguieren en roca buena. Además, si la excavación requiere estabilidad para un corto tiempo, entonces se debe tratar de utilizar el sostenimiento menos costoso y complicado para un macizo de calidad buena. De todas formas, si el macizo rocoso es susceptible de sufrir variación en los campos de tensión, entonces el sostenimiento para una roca de calidad regular debe ser instalado. Este ejemplo indica que es necesario tener un buen criterio para la aplicación de una correcta selección y diseño de sostenimiento en un determinado macizo rocoso.