

**JORNADA TECNICA SOBRE VOLADURAS Y
CONTROL DE VIBRACIONES EN OBRAS PUBLICAS**

**EXCAVABILIDAD DE MACIZOS ROCOSOS
CLASIFICACIONES GEOMECANICAS**

Fernando ROMAN

Dr. Ingeniero de Caminos, C. y P. INTECSA.
Prof. Dpto. Ingeniería y Morfología del Terreno
Universidad Politécnica de Madrid

LA CORUÑA 1996

EXCAVABILIDAD DE MACIZOS ROCOSOS CLASIFICACIONES GEOMECANICAS

ROMAN, Fernando.
Dr. Ingeniero de Caminos, C. y P. INTECSA.
Prof. Dpto. Ingeniería y Morfología del Terreno
Universidad Politécnica de Madrid

1.- INTRODUCCIÓN

Cuando, pretendiendo averiguar la excavabilidad de un macizo granítico, recabamos la opinión de un técnico en excavaciones o, simplemente, de una persona con experiencia en el tema, es frecuente oír calificativos que son difíciles de cuantificar salvo para la propia persona que los manifiesta. A juicio del encuestado y después de haber inspeccionado unos cuantos cortes en excavaciones próximas, la roca le puede parecer similar a la de otra obra es decir "compacta y masiva" pero "blanda", y "romperá bien con un marco de ..."; o podría calificarla como "muy dura" pero "completamente rota" por lo que la "bota" del D9 se la llevará con facilidad...

Es evidente que la experiencia adquirida por el técnico en la diferentes obras de excavación difícilmente puede ser transmitida a un tercero si se emplean los adjetivos calificativos anteriores para cuantificar la excavabilidad de la roca, salvo que la escala de valoración de ambos técnicos sea la misma.

Adjetivos frecuentes como: "compacta, masiva o fracturada", y "blanda o dura" tienen una íntima relación con el grado de excavabilidad, pero no es difícil imaginar una escala del grado de excavabilidad en función de determinados valores de la resistencia de la roca, por ejemplo. Es razonable pensar, que se pueda llegar a establecer una relación clara entre la energía mecánica necesaria para excavar una roca con los valores de la resistencia de la misma, por ejemplo la que tiene a compresión simple, o con el número de fracturas que presenta el macizo.

Como es evidente, y lo comentaremos más adelante, resistencia y fracturación son propiedades básicas para determinar el grado de excavabilidad pero otras características del macizo o matizaciones de las anteriores ayudan también al respecto.

En este documento se pretenden exponer algunos criterios de caracterización de un macizo que son comúnmente utilizados para estimar el grado de excavabilidad pero, por otra parte y puede que sea más importante, nos permita a diferentes técnicos calificar la roca con el mismo

patrón de referencia de tal forma que las experiencias obtenidas por nosotros puedan ser transmitidas a terceros de forma eficaz.

Sin embargo, los autores de estas clasificaciones o caracterizaciones geomecánicas de la roca, ponen en nuestra manos una herramienta peligrosa, a veces, ya que conlleva conclusiones que son tomadas como fielmente exactas cuando, normalmente, deberían ser tomadas como una buena recomendación, pero nunca como exactas. En el campo de los túneles, existen clasificaciones geomecánicas como alguna de las que aquí expondremos, que recomiendan de forma precisa determinados sostenimientos que pueden ser totalmente ineficaces (bulones y gunita en arcillas preconsolidadas, por ejemplo). Asimismo, alguna de las clasificaciones que se van a exponer tienen una antigüedad importante lo cual debe ser tenido en cuenta cuando, por ejemplo, tratan de la imposibilidad de excavarse con la ayuda de ripper..., de los existentes en la fecha de la clasificación.

2.- CARACTERISTICAS DEL MACIZO Y MECANISMO DE LA EXCAVACIÓN.

Para entender cuáles son las propiedades del macizo rocoso que influyen en el grado de excavabilidad es necesario abrir un paréntesis para comentar cómo es el mecanismo de excavación; qué fenómenos entran en juego cuando excavamos un macizo rocoso.

Hacemos un paréntesis para aclarar que hablamos de macizo rocoso o roca en el sentido geológico más amplio. Por masa rocosa entendemos a un agregado de partículas minerales (u orgánicas) unidas por fuerzas cohesivas que le confieren una determinada resistencia. Macizo rocoso es una masa rocosa más o menos compartimentada por juntas de discontinuidad geológicas.

Las partículas de la masa rocosa pueden ser cristales, en el caso de rocas primarias, cristalinas y sedimentarias, o pequeños fragmentos de masa rocosa, en el caso de las rocas detríticas por ejemplo. Hay casos en que las fuerzas cohesivas que aglutinan las partículas minerales no existen; es el caso de las arenas o gravas que, en términos de Mecánica de Rocas o de los Suelos entrarían en la denominación de "suelos"

Las juntas de discontinuidad pueden ser: superficies de estratificación, pizarrosidad o esquistosidad, diaclasas, fallas, etc., y cada una tener sus propias características.

En la tabla N°1 se han resumido los efectos que las distintas técnicas o herramientas de excavación producen en el macizo rocoso. Están ordenadas de mayor a menor dificultad de excavación y la última línea es la actividad final de todo proceso de excavación pues, siempre, el material fragmentado por las distintas herramientas tiene que ser cargado. Es decir, coincide con la fase de carga.

TABLA Nº 1.- EFECTO DE LOS METODOS DE EXCAVACION (ROMÁN 1996)

MASA ROCOSA	COMPARTIMENTACION DEL MACIZO ROCOSO	METODO DE EXCAVACION	EFEECTO
ROCA TENAZ	MASIVO	EXPLOSIVOS	Se crean grietas y fisuras (juntas de discontinuidad) en la masa. La presión de los gases que rellenan los nuevos huecos desarreglan el macizo produciendo un conjunto de fragmentos inconexos entre si y, en su mayor parte, desplazados del frente, más manejables por otras herramientas. La roca que permanece in situ queda con nuevas grietas y fisuras (juntas de discontinuidad) como la de la siguiente línea. (1)
		EXPLOSIVOS	En la masa rocosa compacta se crean nuevas juntas. Los gases rellenan las juntas preexistentes o nuevas con el mismo efecto que en el caso anterior, con fragmentación y despegue del frente. (2)
	DIACLASADO Y/O ESTRATIFICADO	EXPLOSIVOS (PREVOLADURA)	Solamente se busca la creación de juntas o la apertura de las preexistentes, es decir, la fragmentación en trozos más manejables por otras herramientas sin que se produzca el despegue. Es un desarreglo de la estructura. (3)
	EXPLOSIVOS	Desarreglo de la estructura convirtiéndola en un conjunto de fragmentos más manejables por otras herramientas, cuyo tamaño es función de la separación entre las juntas preexistentes y de su continuidad. (4)	
ROCA DE RESISTENCIA MEDIA	MASIVO	EXPLOSIVOS	Mismo efecto que (1) (2) y (3) aunque con menor consumo de explosivo.
	DIACLASADO Y/O ESTRATIFICADO	RIPPER	Mismo efecto que (4) aunque con mayor rendimiento de excavación y menor consumo de bolas.
ROCA BLANDA ^(a)	MASIVO O DIACLASADO	EXPLOSIVOS	Mismo efecto que (1) (2) y (3) aunque la mayor deformabilidad de la roca puede mermar la eficacia de la herramienta.
		RIPPER	Rotura de la masa creando nuevas juntas. Desarreglo de la nueva estructura convirtiéndola en un conjunto de fragmentos, más manejables por otras herramientas, cuyo tamaño es función de la separación entre las juntas preexistentes y las de nueva creación así como de su continuidad. Si la roca es muy blanda la eficacia del ripper puede disminuir.
ROCA MUY BLANDA. AGREGADO DE FRAGMENTOS SIN COHESIÓN ENTRE SI.	MASIVO O DIACLASADO	BULLDOZER. TRAHILLAS. PALA CARGADORA.	Los dientes, inicialmente y, a continuación, la hoja de estas máquinas vencen las pequeñas fuerzas de cohesión y las de fricción, separando una porción de material del resto del macizo pudiendo ser cargado o transportado a otra parte. Es el final del proceso de excavación.

(a) Empleamos aquí el calificativo coloquial de roca "blanda" o "muy blanda" para definir las rocas de baja resistencia.

TABLA Nº 2.- MECANISMO DE ROTURA DE LAS DISTINTAS HERRAMIENTAS. (ROMÁN, 1996)

ENERGIA	HERRAMIENTA	MECANISMO DE ROTURA DE LA MASA	EFEECTO EN EL MACIZO
MECANICA	MARTILLO O VAGON PERFORADOR, PORTANDO BARRENA CON BOCAS DE BISEL, BÓTONES, TRICONICAS.	Fallo de resistencia a compresión semiconfinada. Fallo por resistencia al corte (desgaste)	Se obtiene el taladro necesario para alojar un explosivo o para introducir un elemento que intente arrancar un fragmento.
	MARTILLO CON PICA, RIPPER	Fallo de resistencia a compresión semiconfinada. Fallo de resistencia a flexotracción	Las juntas preexistentes o las de nueva creación se abren.
	PALA	Fallo de resistencia a compresión semiconfinada. Fallo de la resistencia al corte debida a fuerzas cohesivas o de fricción.	Separación clara de un conjunto de fragmentos.
QUIMICA	EXPLOSIVO	Fallo de resistencia a compresión confinada. Fallo de resistencia a tracción	Se crean nuevas juntas además de las existentes que los gases abren

En la tabla nº2 se ha detallado cuál es mecanismo de rotura de cada tipo de herramienta que interviene en el proceso, ya sea a partir de una energía mecánica o química.

Como puede verse en ambas tablas, los siguientes parámetros aparecen con mayor o menor frecuencia:

Para la masa rocosa:

- Resistencia a la compresión de la masa rocosa (más o menos confinada)
- Resistencia a la tracción o flexotracción de la masa rocosa.
- Resistencia al corte (cohesión y ángulo de rozamiento) de la masa rocosa.
- Resistencia al desgaste de la masa rocosa

Para el macizo rocoso:

- Existencia de juntas de discontinuidad
- Separación entre ellas
- Continuidad
- Resistencia a la apertura de la junta
- Resistencia al corte de la junta (cohesión y ángulo de rozamiento)

Que no son más que las propiedades básicas de los macizos rocosos que intervienen en la mayor parte de los problemas ingenieriles.

3.- CLASIFICACIONES BASICAS DE LOS MACIZOS ROCOSOS. INDICES DE CALIDAD

Como no es objetivo de este documento hablar de las numerosas clasificaciones geomecánicas de los macizos rocosos, vamos a exponer aquí dos de ellas que son las más usuales y que, además, han sido objeto de aplicaciones para determinar el grado de excavabilidad. Son la de BARTON et al (1974) y la de BIENIAWSKI (1979 y 1981).

El objetivo es que el usuario tenga una base para poder calificar la calidad general de un macizo rocoso y que realice esta calificación de una manera sistemática de tal forma que vaya relacionando su grado de excavabilidad aprendido de su propia experiencia con el valor del índice anteriormente calculado

3.1.- CLASIFICACION DE BARTON ET AL (1974)

En primer lugar hay que decir la clasificación fue desarrollada y suscrita en 1974 por los autores Barton, Lien y Lunde del Instituto Geotécnico Noruego, aunque posteriormente ha quedado como la clasificación de Barton.

El índice de calidad Q de barton es el resultado del producto de tres cocientes:

$$Q = (RQD / J_n) \times (J_r / J_a) \times (J_w / SRF)$$

en donde:

RQD:	Es el Rock Quality Designation de DEERE, o índice de fracturación de la roca. Se mide en un testigo de sondeo, como el cociente entre la suma de porciones mayores de 10 cm y la longitud de cada maniobra realizada para extraer el testigo inspeccionado.
J _n :	Es el índice de diaclasado.
J _r :	Es el índice de rugosidad
J _a :	Es el índice de alteración
J _w :	Es un coeficiente reductor por la presencia de agua.
SRF:	Es un factor que tiene en cuenta el estado tensional del macizo (Stress Reduction Factor)

El cociente (RQD/J_n) tiene en cuenta el tamaño de los bloques. El cociente (J_r/J_a) representa la resistencia al corte a lo largo de las juntas. El cociente (J_w/SRF) es indicativo con el estado tensional del macizo rocoso.

El índice de calidad se estableció inicialmente para calificar un macizo rocoso con vistas al proyecto y construcción de un túnel. Por éso, alguno de los factores sólo tienen sentido si se piensa en un túnel aunque no es difícil asignar algún valor razonable incluso si no estamos ante el caso de calificar la roca de una forma general.

En las tablas nº 3, 4, 5, 6 y 7 ^(b) se han reproducido los valores que toman cada uno de los seis índices.

Cuando no se dispone de un sondeo para determinar el RQD, puede estimarse a través de la expresión de PÄLMSTRON, en función de J_v (índice volumétrico de juntas) que es la suma del número de juntas diferentes que, por termino medio, afloran en tres caras contiguas de un cubo de un metro de lado. La expresión de Pålstrom es:

$$RQD = 115 - 3,3 J_v$$

con $RQD = 100$ para $J_v < 4,5$

En la tabla 3, se especifica que debe tomarse un valor de J_n doble del de la tabla cuando se trate de calificar la boquilla y triple cuando se trate de un macizo rocoso en la intersección de dos túneles. En nuestro caso esta observación no se tiene en cuenta.

En la tabla 6, referida al factor reductor de tensiones, parece razonable tomar un factor pequeño ya que, salvo en excavaciones de frentes de túneles, las tensiones principales que actúan sobre la roca van a ser mínimas. Sugerimos tomar $SRF = 2,5$

En la tabla 7, estaremos normalmente en los valores más altos de J_w pues no estamos hablando normalmente de excavaciones en superficie.

El índice finalmente obtenido Q , puede variar entre 0.001 y 1000 correspondiendo a las calidades siguientes:

INDICE Q	CALIDAD
$0.001 < Q \leq 0.01$	Excepcionalmente Mala
$0.01 < Q \leq 0.1$	Extremadamente Mala
$0.1 < Q \leq 1.0$	Muy Mala
$1.0 < Q \leq 4.0$	Mala
$4.0 < Q \leq 10.0$	Media
$10.0 < Q \leq 40.0$	Buena
$40.0 < Q \leq 100.0$	Muy Buena
$100.0 < Q \leq 400.0$	Extraordinariamente Buena
$400.0 < Q \leq 1000.0$	Excepcionalmente Buena

(b) Estos recuadros son reproducción de los que aparecen en el libro "Mecánica de rocas aplicada a la minería metálica subterránea" de R. OYANGUREN et al, editado por el IGME, que por estar traducidos al español nos ha parecido más conveniente su inclusión.

J_n - Número de familias de juntas, que es un índice del diaclasado.

DESCRIPCION	J_n
- Roca masiva	0,5 - 1
- Una familia de diaclasas	2
- Una familia y algunas juntas ocasionales	3
- Dos familias	4
- Dos familias y algunas juntas	6
- Tres familias	9
- Tres familias y algunas juntas	12
- Cuatro o más familias, roca muy fracturada, "terrones de azúcar," etc.	15
- Roca triturada terrosa	20

En boquillas, se utiliza $2 \times J_n$ y en intersecciones de túneles $3 \times J_n$.

Tabla 3.- Clasificación de Barton et al (1974). Valores del parámetro J_n

J_r . Índice de rugosidad de las juntas

* CONTACTO ENTRE LAS DOS CARAS DE LA JUNTA	
* CONTACTO ENTRE LAS DOS CARAS DE LA JUNTA MEDIANTE UN DESPLAZAMIENTO LATERAL DE MENOS DE 10 cm.	
	J_r
- Juntas discontinuas	4
- Junta rugosa o irregular ondulada	3
- Suave ondulada	2
- Espejo de falla, ondulada	1,5
- Rugosa o irregular, plana	1,5
- Suave plana,	1
- Espejo de falla, plana	0,5
* NO EXISTE CONTACTO ENTRE LAS DOS CARAS DE LA JUNTA CUANDO AMBAS SE DESPLAZAN LATERALMENTE	
- Zona conteniendo minerales arcillosos suficientemente gruesa para impedir el contacto entre las caras de la junta	1
- Arenas, gravas o zona fallada suficientemente gruesa para impedir el contacto entre las caras de la junta	1

NOTA: Si el espaciado de la familia de juntas es mayor de 3 m, hay que aumentar el J_r en una unidad

Para juntas planas con espejo de falla provisto de lineaciones, si éstas están orientadas favorablemente, se puede usar $J_r = 0,5$.

Tabla 4.- Clasificación de Barton et al (1974). Valores del parámetro J_r

J_a . Índice de alteración de las Juntas

DESCRIPCION	J_a	ϕ^*
* CONTACTO ENTRE LAS DOS CARAS DE LA JUNTA		
- Junta sellada, dura, sin reblandecimiento, relleno impermeable, p. ej. cuarzo paredes sanas	0,75	
- Caras de la junta únicamente manchadas.	1	25 - 30
- Las caras de la junta están alteradas ligeramente y contienen minerales no reblandecibles, partículas de arena, roca desintegrada libre de arcilla, etc.	2	25 - 30
- Recubrimiento de limo o arena arcillosa, pequeña fracción arcillosa no reblandecible	3	20 - 25
- Recubrimiento de minerales arcillosos blandos o de baja fricción, p.ej. caolinita, mica, clorita, talco, yeso, grafito, etc. y pequeñas cantidades de arcillas expansivas. Los recubrimientos son discontinuos con espesores máximos de 1 ó 2 mm.	4	8 - 16
* CONTACTO ENTRE LAS DOS CARAS DE LA JUNTA CON MENOS DE 10 cm DE DESPLAZAMIENTO LATERAL		
- Partículas de arena, roca desintegrada libre de arcilla	4	25 - 30
- Fuertemente sobreconsolidados, rellenos de minerales arcillosos no reblandecidos. Los recubrimientos son contínuos de menos de 5 mm de espesor	6	16 - 24
- Sobreconsolidación media o baja, reblandecimiento, rellenos de minerales arcillosos. Los recubrimientos son contínuos, de menos de 5 mm de espesor	8	12 - 16
- Rellenos de arcillas expansivas, p. ej. montmorillonita, de espesor contínuo de 5 mm. El valor J_a 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		
- Zonas o bandas de roca desintegrada o machacada y arcilla	6-8 ó 8-12	6 - 24
- Zonas blandas de arcilla limosa o arenosa, con pequeña fracción de arcilla sin reblandecimiento	5	6 - 24
- Milonitos arcillosos gruesos.	10-13 ó 13-20	6 - 24

Tabla 5.- Clasificación de Barton et al (1974). Valores del parámetro J_a .

SRF. (Stress reduction factor). Tensiones en el túnel.

1. Zonas débiles que intersectan la excavación y pueden causar caídas de bloques, según avanza la misma.			<u>SRF</u>
A – Varias zonas débiles conteniendo arcilla o roca desintegrada químicamente, roca muy suelta alrededor (cualquier profundidad)			10
B – Sólo una zona débil conteniendo arcilla o roca desintegrada químicamente (profundidad de excavación menor de 50 m)			5
C – Sólo 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 – Sólo una zona fracturada en roca competente (libre de arcilla), (profundidad de excavación menor de 50 m)			5
F – Sólo una zona fracturada en roca competente (libre de arcilla), (profundidad mayor de 50 m)			2,5
G – Juntas abiertas sueltas, muy fracturadas, etc. (cualquier profundidad)			5
2. Rocas competentes, problemas de tensiones en las rocas	<u>σ_c/σ_1</u>	<u>σ_t/σ_1</u>	<u>S.R.F.</u>
H – Tensiones pequeñas cerca de la superficie	> 200	> 13	2,5
J – Tensiones medias.	200–10	13–0,66	1,0
K – Tensiones altas, estructura muy compacta (normalmente favorable para la estabilidad, puede ser desfavorable para la estabilidad de los hastiales).	10–5	0,66–0,33	0,5–2,0
L – Explosión de roca suave (roca masiva)	5–2,5	0,33–0,16	5–10
M – Explosión de roca fuerte (roca masiva)	< 2,5	< 0,16	10–20
σ_c y σ_t son las resistencias a compresión y tracción, respectivamente, de la roca. σ_1 es la tensión principal máxima que actúa sobre la roca.			
3. Roca fluyente, flujo plástico de roca incompetente bajo la influencia de altas presiones litostáticas.			<u>S. R. F.</u>
N – Presión de flujo suave.			5 – 10
O – Presión de flujo intensa			10 – 20
4. Rocas expansivas, actividad expansiva química dependiendo de la presencia de agua.			
P – Presión de expansión suave.			5 – 10
R – Presión de expansión intensa			10 – 15

Tabla 6.- Clasificación de Barton et al (1974). Valores del parámetro SRF

J_w . Índice de presencia de agua	J_w	Presión agua kg/cm ²
- Excavaciones secas o de fluencia poco importante, p. ej. menos de 5 l/min, localmente	1	< 1
- Fluencia o presión medias, ocasional lavado de los rellenos de las juntas	0,66	1-2,5
- Fluencia grande o presión alta; considerable lavado de los rellenos de las juntas	0,33*	2,5-10
- Fluencia o presión de agua excepcionalmente altas al dar las pegas, decayendo con el tiempo.....	0,1-0,2*	> 10
- Fluencia o presión de agua excepcionalmente altas y continuas, sin disminución	0,05-0,1*	> 10

Los valores presentados con el signo * son sólo valores estimativos. Si se instalan elementos de drenaje, hay que aumentar J_w .

Tabla 7.- Clasificación de Barton et al (1974). Valores del parámetro J_w

3.2.- CLASIFICACION DE BIENIAWSKI (1989)

El índice de calidad de Bieniawski es el RMR (Rock Mass Ratio) y es la suma de los cinco factores siguientes:

- Factor de Resistencia de la roca intacta, cuya puntuación varía de 0 a 15.
- Factor del RQD. En la última clasificación, Bieniawski le llama "Calidad del testigo perforado". Su puntuación varía de 3 a 20.
- Factor de espaciado entre juntas. Varía de 5 a 30 puntos.
- Factor de condición de las juntas, cuya puntuación varía de 0 a 25.
- Factor agua. Varía de 0 a 10 puntos.

La suma de la puntuación de estos cinco factores tiene un máximo de 100. Del mismo modo que para el índice de Barton, la clasificación de Bieniawski está pensada para estimar el comportamiento resistente de un macizo en un túnel, en un talud o como cimentación y tiene determinados factores de corrección en función de la disposición relativa de las juntas con relación al eje del túnel. En nuestro caso sugerimos no usar dichos factores de corrección.

En la tabla nº8 (tomada de R. OYANGUREN et al, 1984) aparecen los criterios de puntuación según la clasificación de 1979 y en el nº9 los de la clasificación de 1989.

Parámetros de Clasificación

1	Resistencia de la roca sana	Ensayo de carga puntual	> 100 kp/cm ²	40-80 kp/cm ²	20-40 kp/cm ²	10-20 kp/cm ²	Compresión simple (kp/cm ²)		
		C. simple	> 2.500 kp/cm ²	1.000-2.500 kp/cm ²	500-1.000 kp/cm ²	250-500 kp/cm ²	50-250	10-50	10
Valoración			15	12	7	4	2	1	0
2	RQD		90%-100%	75%-90%	50%-75%	25%-50%	< 25%		
	Valoración			20	17	13	8	3	
3	Separación entre diaclasas		> 2 m.	0,6-2 m.	0,2-0,6 m.	0,06-0,2 m.	< 0,06 m.		
	Valoración			20	15	10	8	5	
4	Estados de las diaclasas		Muy rugosas Discontinuas Sin separaciones Bordes sanos y duros	Ligeramente rugosas Abertura < 1 mm. Bordes duros	Ligeramente rugosas Abertura < 1 mm. Bordes blandos	Espejos de falla o con relleno < 5 mm. o abiertas 1-5 mm. Diaclasas continuas	Relleno blando > 5 mm. o abertura > 5 mm. Diaclasa continua		
	Valoración			30	25	20	10	0	
5	Agua freática	Caudal por 10 m de túnel	Nulo	< 10 litros/min	10-25 litros/min	25-125 litros/min	> 125 litros/min		
		Relación entre la presión de agua, y la tensión principal mayor	0	0,0-0,1	0,1-0,2	0,2-0,5	> 0,5		
		Estado general	Seco	Lig. húmedo	Húmedo	Goteando	Fluyendo		
	Valoración			15	10	7	4	0	

Corrección por la Orientación de las Diaclasas

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

Clasificación

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

Características

Clase	I	II	III	IV	V
Tiempo de mantenimiento y longi.	10 años con 5 m de vano	6 meses con 8 m. de vano	1 semana con 5 m. de vano	10 horas con 2,5 m. de vano	30 min. con 1 m. de vano
Cohesión	> 4 kp/cm ²	3-4 kp/cm ²	2-3 kp/cm ²	1-2 kp/cm ²	< 1 kp/cm ²
Angulo de rozamiento	> 45°	35°-45°	25°-35°	15°-25°	15°

Orientación de las Diaclasas

Dirección perpendicular al eje del túnel				Dirección paralela al eje del túnel		Buzamiento 0°-20° cualquier dirección
Excav. con buzamiento		Excav. contra buzamiento				
Buz. 45-90	Buz. 20-45	Buz. 45-90	Buz. 20-45	Buz. 45-90	Buz. 20-45	
Muy favorable	Favorable	Media	Desfavorable	Muy Desfavorable	Media	desfavorable

Tabla nº 8. Clasificación de Bieniawski (1979). Índice RMR para macizos rocosos diaclasados.

A. CLASSIFICATION PARAMETERS AND THEIR RATINGS									
Parameter		Range of values							
1	Strength of intact rock material	Point-load strength index	>10 MPa	4-10 MPa	2-4 MPa	1-2 MPa	For this low range - uniaxial compressive test is preferred		
		Uniaxial comp. strength	>250 MPa	100-250 MPa	50-100 MPa	25-50 MPa	5-25 MPa	1-5 MPa	< 1 MPa
	Rating	15	12	7	4	2	1	0	
2	Drill core Quality <i>RQD</i>	90%-100%	75%-90%	50%-75%	25%-50%	< 25%			
	Rating	20	17	13	8	3			
3	Spacing of discontinuities	> 2 m	0.6-2 m	200-600 mm	60-200 mm	< 60 mm			
	Rating	20	15	10	8	5			
4	Condition of discontinuities (See E)	Very rough surfaces Not continuous No separation Unweathered wall rock	Slightly rough surfaces Separation < 1 mm Slightly weathered walls	Slightly rough surfaces Separation < 1 mm Highly weathered walls	Stickensided surfaces or Gouge < 5 mm thick or Separation 1-5 mm Continuous	Soft gouge > 5 mm thick or Separation > 5 mm Continuous			
		Rating	30	25	20	10	0		
5	Ground water	Inflow per 10 m tunnel length (l/m)	None	< 10	10-25	25-125	> 125		
		(Joint water press./ (Major principal σ))	0	< 0.1	0.1-0.2	0.2-0.5	> 0.5		
	General conditions	Completely dry	Damp	Wet	Dripping	Flowing			
	Rating	15	10	7	4	0			
B. RATING ADJUSTMENT FOR DISCONTINUITY ORIENTATIONS (See F)									
Strike and dip orientations		Very favourable	Favourable	Fair	Unfavourable	Very Unfavourable			
Ratings	Tunnels & mines	0	-2	-5	-10	-12			
	Foundations	0	-2	-7	-15	-25			
	Slopes	0	-5	-25	-50				
C. ROCK MASS CLASSES DETERMINED FROM TOTAL RATINGS									
Rating	100 ← 81		80 ← 61		60 ← 41		40 ← 21		< 21
Class number	I		II		III		IV		V
Description	Very good rock		Good rock		Fair rock		Poor rock		Very poor rock
D. MEANING OF ROCK CLASSES									
Class number	I		II		III		IV		V
Average stand-up time	20 yrs for 15 m span		1 year for 10 m span		1 week for 5 m span		10 hrs for 2.5 m span		30 min for 1 m span
Cohesion of rock mass (kPa)	> 400		300-400		200-300		100-200		< 100
Friction angle of rock mass (deg)	> 45		35-45		25-35		15-25		< 15
E. GUIDELINES FOR CLASSIFICATION OF DISCONTINUITY conditions									
Discontinuity length (persistence)	< 1 m		1-3 m		3-10 m		10-20 m		> 20 m
Rating	6		4		2		1		0
Separation (aperture)	None		< 0.1 mm		0.1-1.0 mm		1-5 mm		> 5 mm
Rating	6		5		4		1		0
Roughness	Very rough		Rough		Slightly rough		Smooth		Stickensided
Rating	6		5		3		1		0
Infilling (gouge)	None		Hard filling < 5 mm		Hard filling > 5 mm		Soft filling < 5 mm		Soft filling > 5 mm
Rating	6		4		2		2		0
Weathering	Unweathered		Slightly weathered		Moderately weathered		Highly weathered		Decomposed
Rating	6		5		3		1		0
F. EFFECT OF DISCONTINUITY STRIKE AND DIP ORIENTATION IN TUNNELLING**									
Strike perpendicular to tunnel axis					Strike parallel to tunnel axis				
Drive with dip-Dip 45-90°		Drive with dip-Dip 20-45°			Dip 45-90°		Dip 20-45°		
Very favourable		Favourable			Very favourable		Fair		
Drive against dip-Dip 45-90°		Drive against dip-Dip 20-45°			Dip 0-20° Irrespective of strike*				
Fair		Unfavourable			Fair				

*Some conditions are mutually exclusive. For example, if infilling is present, the roughness of the surface will be overshadowed by the influence of the gouge. In such cases use A.4 directly.

**Modified after Wickham et al. (1972).

Tabla nº 9. Clasificación de Bieniawski (1989). Índice RMR para macizos rocosos diaclasados.

Es curioso ver alguna diferencia entre ambas clasificaciones, destacando cómo en la más reciente se da un mayor peso al factor de condiciones de las juntas que en la antigua, lo que se considera razonable pues, a partir de una determinada resistencia no muy elevada, son las juntas y su estado las que gobiernan el comportamiento del macizo rocoso.

El índice de calidad del macizo se corresponde con los siguientes adjetivos:

INDICE RMR	CALIDAD
< 20	MUY MALA
21-40	MALA
41-60	MEDIA
61-80	BUENA
81-100	MUY BUENA

4. INDICES DE EXCAVABILIDAD

4.1.- RELACION DE ABDULLATIF Y CRUDEN, 1983.

En la figura 1 se reproduce la figura de Abdullatif y Cruden (1983) en la que estos autores exponen sus experiencias en cuanto a la técnica de excavación en función de los índices de calidad Q y RMR. Esta figura sólo es válida en el estrecho rango de la nube de puntos dibujados pues además no puede extrapolarse en sentido transversal ya que tiene que existir una estrecha relación entre ambos índices.

Según estos autores, en 1983, se habían utilizado explosivos para macizos rocosos con índices Q mayores de 4 y RMR mayores de 65, mientras que con índices Q menores de 0.2 o RMR menores de 30 se había podido excavar con pala mecánica.

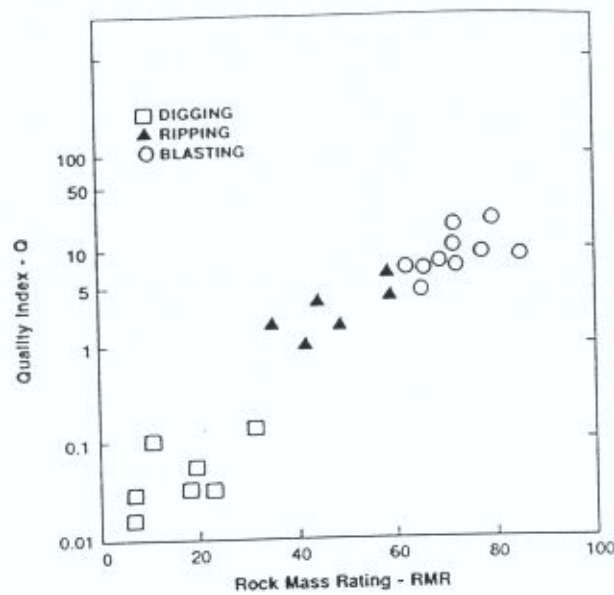


Figura 1.- Técnicas de excavación en función de los índices de calidad RMR y Q. Abdullatif y Cruden (1983). Tomada de Bieniawski (1989)

4.2.- INDICE DE KIRSTEN (1982)

El índice de Kirsten es una adaptación del índice de Barton para el tema de la excavabilidad.

Es el producto de cuatro factores según la expresión siguiente:

$$N = M_s \times (RQD / J_n) \times J_s \times (J_r / J_a)$$

donde:

- M_s:** Es el número de resistencia de la masa rocosa (Mass Strength Numer) y representa el esfuerzo necesario para excavar una masa rocosa saca y masiva. En la tabla nº 10 (a) se indica el valor que toma en función de la tenacidad de la masa rocosa que puede aproximarse con la ayuda de una guía descriptiva para un reconocimiento manual.
- RQD:** Es el RQD de DEERE medible en testigos de sondeos de buena calidad, o estimable a partir del índice volumétrico J_v, mediante la aproximación de Palmstrom que viene tabulada en la tabla nº 10 (b).
- J_n:** Es el factor del número de juntas cuyo valor se indica en la tabla nº 10 (c).

Parameters for determination of excavability index (after Kirsten, 1982)

(a) Mass strength number for rocks (M_s)

Hardness	Identification in profile	Unconfined compressive strength (MPa)	Mass strength number (M_s)
Very soft rock	Material crumbles under firm (moderate) blows with sharp end of geological pick and can be peeled off with a knife. It is too hard to cut a triaxial sample by hand	1.7	0.87
		1.7-3.3	1.86
Soft rock	Can just be scraped and peeled with a knife; indentations 1-3 mm show in the specimen with firm (moderate) blows of the pick point	3.3-6.6	3.95
		6.6-13.2	8.39
Hard rock	Cannot be scraped or peeled with a knife; hand-held specimen can be broken with hammer end of a geological pick with a single firm (moderate) blow	13.2-26.4	17.70
Very hard rock	Hand-held specimen breaks with hammer end of pick under more than one blow	26.4-53.0	35.0
		53.0-106.0	70.0
Extremely hard rock (very, very hard rock)	Specimen requires many blows with geological pick to break through intact material	106.0-212.0	140.0
		212.0	280.0

(b) Joint count number (J_c)

Number of joints per cubic metre (J_c)	Rock quality designation (RQD)	Number of joints per cubic metre (J_c)	Rock quality designation (RQD)
33	5	18	55
32	10	17	60
30	15	15	65
29	20	14	70
27	25	12	75
26	30	11	80
24	35	9	85
23	40	8	90
21	45	6	95
20	50	5	100

(c) Joint set number (J_n)

Number of joint sets	Joint set number (J_n)
Intact, no or few joint/fissures	1.00
One joint/fissure set	1.22
One joint/fissure set plus random	1.50
Two joint/fissure sets	1.83
Two joint/fissure sets plus random	2.24
Three joint/fissure sets	2.73
Three joint/fissure sets plus random	3.34
Four joint/fissure sets	4.09
Multiple joint/fissure sets	5.00

Note: For intact granular materials take $J_n = 5.00$

(d) Relative ground structure number (J_r)

Dip direction* of closer spaced joint set (degrees)	Dip angle† of closer spaced joint set (degrees)	Ratio of joint spacing, r			
		1:1	1:2	1:4	1:8
180/0	90	1.00	1.00	1.00	1.00
0	85	0.72	0.67	0.62	0.56
0	80	0.63	0.57	0.50	0.45
0	70	0.52	0.45	0.41	0.38
0	60	0.49	0.44	0.41	0.37
0	50	0.49	0.46	0.43	0.40
0	40	0.53	0.49	0.46	0.44
0	30	0.63	0.59	0.55	0.53
0	20	0.84	0.77	0.71	0.68
0	10	1.22	1.10	0.99	0.93
0	5	1.33	1.20	1.09	1.03
0/180	0	1.00	1.00	1.00	1.00
180	5	0.72	0.81	0.86	0.90
180	10	0.63	0.70	0.76	0.81
180	20	0.52	0.57	0.63	0.67
180	30	0.49	0.53	0.57	0.59
180	40	0.49	0.52	0.54	0.56
180	50	0.53	0.56	0.58	0.60
180	60	0.63	0.67	0.71	0.73
180	70	0.84	0.91	0.97	1.01
180	80	1.22	1.32	1.40	1.46
180	85	1.33	1.39	1.45	1.50
180/0	90	1.00	1.00	1.00	1.00

* Dip-direction of closer spaced joint set relative to direction of rip

† Apparent dip angle of closer spaced joint set in vertical plane containing direction of ripping

For intact material take $J_r = 1.0$

For values of r less than 0.125 take J_r as for $r = 0.125$

Tabla n° 10 (a, b, c y d). Clasificación de Kirsten (1982). Tomada de Bell (1994)

(c) Joint roughness number (J_r)

Joint separation	Condition of joint	Joint roughness number (J_r)
Joints tight or closing during excavation	Discontinuous joint	4.0
	Rough or irregular, undulating	3.0
	Smooth undulating	2.0
	Slickensided undulating	1.5
	Rough or irregular, planar	1.5
	Smooth planar	1.0
Joints open and remain open during excavation	Slickensided planar	0.5
	Joints either open or containing relatively soft gouge of sufficient thickness to prevent joint wall contact upon excavation	1.0

(f) Joint alteration number (J_a)

Description of gouge	Joint alteration number (J_a) for joint separation (mm)		
	<1.0†	1.0-5.0‡	>5.0‡
Tightly healed, hard, non-softening impermeable filling	0.75	-	-
Unaltered joint walls, surface staining only	1.0	-	-
Slightly altered, non-softening, non-cohesive rock mineral or crushed rock filling	2.0	4.0	6.0
Non-softening, slightly clayey non-cohesive filling	3.0	6.0	10.0
Non-softening strongly over-consolidated clay mineral filling, with or without crushed rock	3.0§	6.0§	10.0§
Softening or low-friction clay mineral coatings and small quantities of swelling clays	4.0	8.0	13.0
Softening moderately over-consolidated clay mineral filling, with or without crushed rock	4.0§	8.0§	13.0§
Shattered or micro-shattered (swelling) clay gouge, with or without crushed rock	5.0	10.0	18.0

* Joint walls effectively in contact

† Joint walls come into contact after approximately 100 mm shear

‡ Joint walls do not come into contact at all upon shear

§ Values added to Barton's data

Excavation classification system for rock masses

Material type	Class	Excavation class boundaries	Description of excavatability	Bulldozer characteristics				Backhoe characteristics				
				Type	Operating mass* (kg)	Flywheel power (kW)	Drawbar pull† (kN)		Type	Operating mass (kg)	Flywheel power	Man-draw bar pull (kN)
							Stalling speed	1.6 km/h				
Rock	1	1.0-9.99	Easy ripping	D7G	20230	149	376	220	Cat 235	38297	145	263
	2	10.0-99.9	Hard ripping	D8K	31980	224	500	323	Cat 245	59330	242	472
	3	100.0-999	Very hard ripping	D9H	42780	306	667	445	RH 40	83200	360	-
	4	1000.0-9999	Extremely hard ripping/blasting	D10	77870	522	1230	778	-	-	-	-
	5	Larger than 10000	Blasting	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Quoted in *Caterpillar Performance Handbook†*, or equivalent
 All machines referred to are track mounted

Tabla nº 10 (e, f y g). Clasificación de Kirsten (1982). Tomada de Bell (1994)

- Js: Representa el efecto reductor que la forma del bloque y la orientación relativa respecto de la fuerza aplicada al excavar tienen en el esfuerzo de excavar el material ideal. Su valor se indica en la tabla nº 10 (d). La primera columna indica el ángulo que forma a dirección de buzamiento de las juntas menos espaciadas con la dirección del esfuerzo de ripado, con un margen de $\pm 90^\circ$. La segunda columna indica el buzamiento aparente de las juntas menos espaciadas en el plano vertical que contiene la dirección del ripado.
- Jr: Es el mismo Factor de rugosidad de la junta de Barton. Su valor se indica en la tabla nº 10 (e).
- Ja: Es el factor de alteración de la junta y su valor, indicado en la tabla nº 10 (f), es similar a la de Barton.

Si comparamos con la clasificación de Barton, vemos que han desaparecido los dos factores de menos influencia en la excavabilidad (J_w y SRF), y se han introducido dos nuevos. Por una parte, se introduce el término Ms representativo de la resistencia de la masa rocosa, que le faltaba a Barton, y por otro se ha introducido la dirección en que se hace el esfuerzo para excavar, lo cual es de suma importancia en rocas muy diaclasadas.

El índice final así calculado varía de 1 a más de 10.000. En la tabla nº 10 (g) se indican los distintos niveles de excavabilidad así como las características de algunos equipos comerciales de movimiento de tierras que permiten su excavación. A este respecto hay que recordar que la clasificación es del año 1982 en el que un tractor de gran potencia era el D10 de Caterpillar.

4.3.- CRITERIO DE FRANKLIN ET AL (1971)

En la figura 2 se ha reproducido el criterio clásico de Franklin, algo obsoleto actualmente dada su antigüedad y el progreso de la maquinaria de excavación. Pero es indudable que sigue siendo válido en los límites inferiores.

En abscisas viene representada la resistencia a la compresión simple o la resistencia bajo carga puntual (Point load); en ordenadas se entra con el espaciado de juntas por metro lineal.

Unos años después, Louis (1974) publicó una clasificación parecida de los macizos rocosos en cuanto a la excavabilidad de un túnel introduciendo en ordenadas el índice RQD.

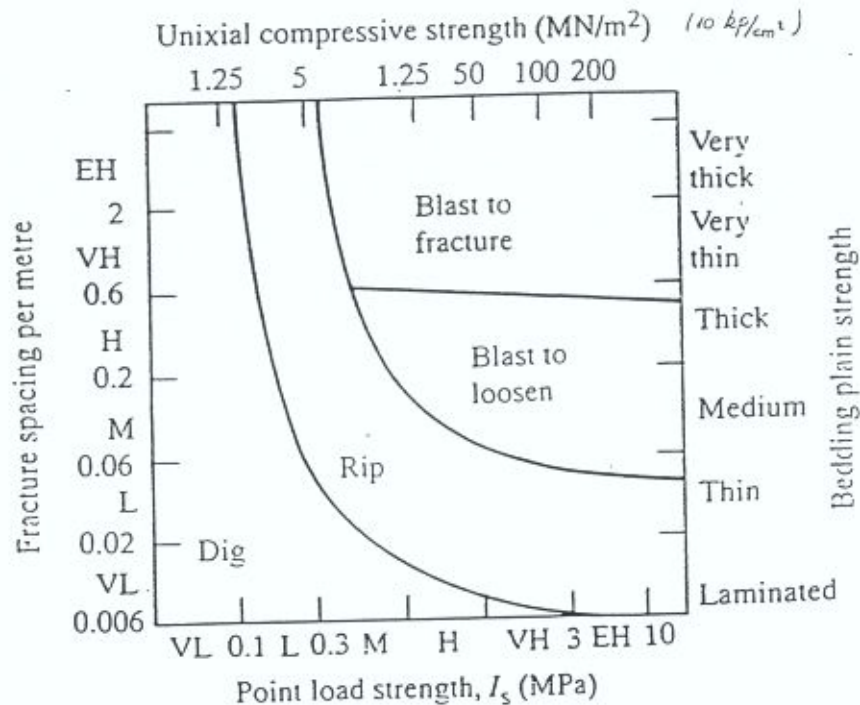


Figura 2.- Criterio de excavabilidad de Franklin (1971). Tomada de Bell (1994)

4.4.- INDICE DE EXCAVABILIDAD DE HADJIGEORGE Y SCOBLE (1988)

ADUVIRE et al (1994) han presentado en un artículo reciente, varios índices de excavabilidad entre los que entresacamos, como ilustrativo, el índice de excavabilidad de HADJIGEORGE y SCOBLE (1988), que se define con la expresión:

$$IE = (I_s + B_s) W \times J_s$$

donde:

- I_s es el índice de resistencia bajo carga puntual
- B_s es el índice de tamaño de bloque
- W es el índice de alteración
- J_s es el índice de disposición estructural relativa

En las tablas 11 y 12 aparecen los valores de los índices que intervienen en la expresión de IE así como la clasificación de un macizo rocoso con vistas a su excavabilidad

CLASE	1	2	3	4	5
RESISTENCIA BAJO CARGA PUNTUAL : $L_p(50)$ Valoración (R_p)	0,5 0	0,5 - 1,5 10	1,5 - 2,0 15	2,0 - 3,5 20	> 3,5 25
TAMAÑO DE BLOQUE J_v (Juntas/m ³) Valoración (B_p)	Muy Pequeño 30 5	Pequeño 10 - 30 15	Medio 3 - 10 30	Grande 1 - 3 45	Muy Grande 1 50
ALTERACION Valoración (W)	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
DISPOSICION ESTRUCTURAL RELATIVA Valoración (I_r)	Muy Favorable 0,5	Favorable 0,7	Ligeramente Favorable 1,0	Desfavorable 1,3	Muy Desfavorable 1,5

Tabla 11.- Parámetros para evaluar el índice de excavabilidad de HADJIGEORGE y SCOBLE (1988). Tomada de ADUVIRE et al (1994)

CLASES	FACILIDAD DE EXCAVACION	INDICE DE EXCAVABILIDAD
1	Muy Fácil	< 20
2	Fácil	20 - 30
3	Difícil	30 - 45
4	Muy Difícil	45 - 55
5	Voladura	> 55

Tabla 12.- Clasificación de macizos rocosos según el índice de excavabilidad de HADJIGEORGE y SCOBLE (1988). Tomada de ADUVIRE et al (1994)

PARAMETROS	CLASES DE MACIZOS ROCOSOS				
	1	2	3	4	5
RESISTENCIA A TRACCION (MPa)	< 2	2 - 6	6 - 10	10 - 15	> 15
Valoración	0 - 4	4 - 8	8 - 12	12 - 16	16 - 20
GRADO DE ALTERACION	Completo	Alto	Moderado	Ligero	Nulo
Valoración	0 - 4	4 - 8	8 - 12	12 - 16	16 - 20
GRADO DE ABRASIVIDAD	Muy Bajo	Bajo	Moderado	Alto	Extremo
Valoración	0 - 4	4 - 8	8 - 12	12 - 16	16 - 20
ESPACIAMIENTO ENTRE DISCONTINUIDADES (m)	< 0,05	0,05 - 0,3	0,3 - 1	1 - 2	> 2
Valoración	0 - 10	10 - 20	20 - 30	30 - 40	40 - 50
VALORACION TOTAL	< 22	22 - 44	44 - 66	66 - 88	> 88
RIPABILIDAD	Fácil	Moderado	Difícil	Marginal	Voladuras
TRACTOR RECOMENDADO	Ninguno - Clase 1 Ligero	Clase 2 Medio	Clase 3 Pesado	Clase 4 Muy Pesado	Clase 5
POTENCIA (kW)	< 150	150 - 250	250 - 350	> 350	—
PESO (t)	< 25	25 - 35	35 - 55	> 55	—

Tabla 13.- Clasificación de macizos rocosos según el índice de ripabilidad de Singh et al (1989). Tomada de ADUVIRE et al (1994)

4.5.- INDICE DE RIPABILIDAD DE SINGH Y DENBY (1989)

El índice de ripabilidad de SINGH y DENBY (1989) es la suma de cuatro parámetros:

- Espaciamiento entre discontinuidades
- Resistencia a tracción
- Grado de meteorización
- Grado de abrasividad, estimado con el índice de abrasividad Cerchar.

En la tabla 13 aparece la clasificación de los macizos rocosos, de acuerdo con este índice de ripabilidad, en la que se indica el tipo de tractor recomendado para ripar si bien hay que hacer la salvedad de que no están considerados los riper de impacto modernos.

4.6.- INDICE DE EXCAVABILIDAD DE WEAVER (1975)

Es la suma de la puntuación de 7 factores de los que los dos más importantes (suponen el 56% de la puntuación) son los del espaciado entre juntas y la velocidad sísmica (que aparece por primera vez en estas clasificaciones).

De manera análoga a como hemos comentado anteriormente, la fecha de la clasificación hace que la valoración de la ripabilidad deba ser tomada con cierta prudencia para los índices superiores a 70 pues actualmente muchos tractores superan ampliamente la potencia de 385 CV.

En la tabla nº 14 se han traducido los criterios de la citada clasificación.

4.7.- INDICE DE RIPABILIDAD BAJO EL AGUA (DRAGABILIDAD) DE SMITH (1987)

Por su singularidad, ya que se trata de excavabilidad bajo el agua, en la tabla nº 15 se ha traducido la carta de clasificación de Smith (1987) en la que intervienen parámetros como los de las clasificaciones anteriores.

El índice varía de 9 a 75

Clase de Roca	I	II	III	IV	V
Descripción	Roca muy buena	Roca buena	Roca media	Roca mala	Roca muy mala
Velocidad sísmica m/s.	> 2150	2150-1850	1850-1500	1500-1200	1200-450
Puntuación	26	24	20	12	5
Dureza	Roca extr.dura	Roca muy dura	Roca dura	Roca blanda	Roca muy blanda
Puntuación	10	5	2	1	0
Alteración	Sana	Ligeramente alterada	Alterada	Muy alterada	Completamente alterada
Puntuación	9	7	5	3	1
Espaciado de juntas (mm)	> 3000	3000-1000	1000-1300	300-50	< 50
Puntuación	30	25	20	10	5
Continuidad juntas	Discontinuas	Poco continuas	Continuas sin relleno	Continua con algún relleno	Continua con relleno
Puntuación	5	5	3	0	0
Relleno en las juntas	Cerradas	Algo separadas	Separación < 1 mm.	Relleno < 5 mm.	Relleno > 5 mm.
Puntuación	5	5	4	3	1
Orientación de dirección y buzamiento	Muy desfavorable	Desfavorable	Poco desfavorable	Favorable	Muy favorable
Puntuación	15	13	10	5	3
Puntuación total	100-90	90-70 *	70-50	50-25	< 25
Valoración de la ripabilidad	Voladura	Extr. difícil de repar. Voladura	Muy difícil de repar	Difícil de repar	Fácilmente ripable
Selección de maquinaria	-	DD9G/D9G	D9/D8	D8/D7	D7
Potencia (CW)	-	770/385	385/270	270/180	180
Kilowatios	-	575/290	290/200	200/135	135

* La puntuación por encima de 75 se considera como no ripable sin prevoladura.

Tabla 14.- Índice de ripabilidad de Weaver (1975).

Clasificación Descriptiva	Dureza de la Roca (MPa) *	Alteración	Orientación	Espaciado de Juntas **
Ripabilidad muy difícil. Voladura	> 70	Sana	Muy favorable	> 3D
Puntuación	10	10	15	30
Ripabilidad difícil	25-70	Ligeramente alterada	Desfavorable	D a 3D
Puntuación	5	7	13	25
Ripabilidad media	10-25	Alterada	Algo desfavorable	D/3 a D
Puntuación	2	5	10	20
Ripabilidad fácil	3-10	Muy alterada	Favorable	D/20 a D/3
Puntuación	1	3	5	10
Ripabilidad muy fácil	< 3	Completamente alterada	Muy favorable	< D/20
Puntuación	0	1	3	5

* Corresponde a la resistencia a compresión uniaxial

** Expresada en función de la profundidad D

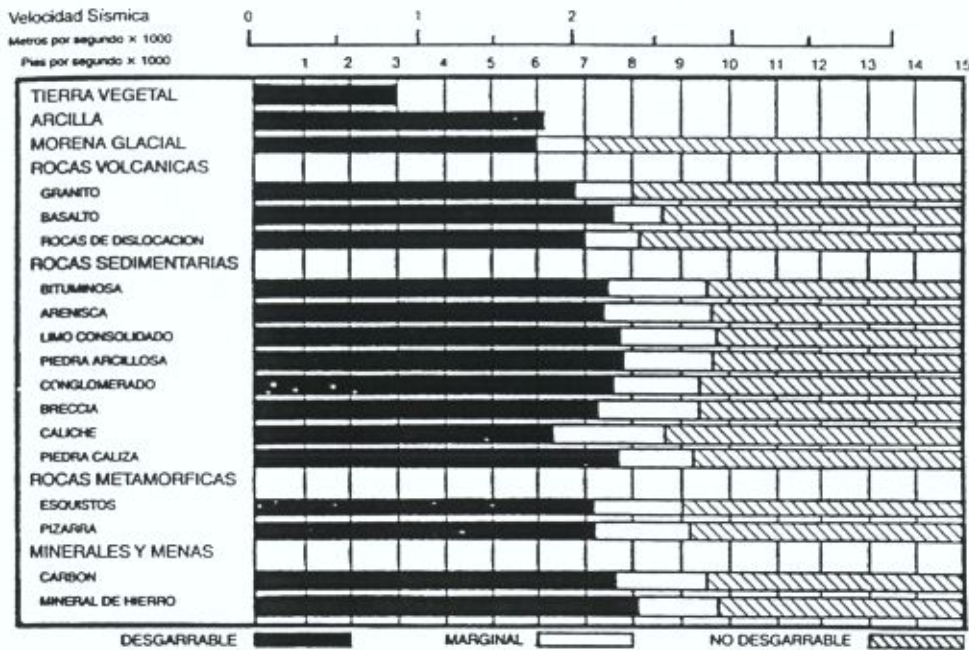
Tabla 15.- Clasificación de dragabilidad de Smith (1987)

4.8.- CLASIFICACION DE LA EXCAVABILIDAD EN FUNCION DE LA VELOCIDAD SISMICA

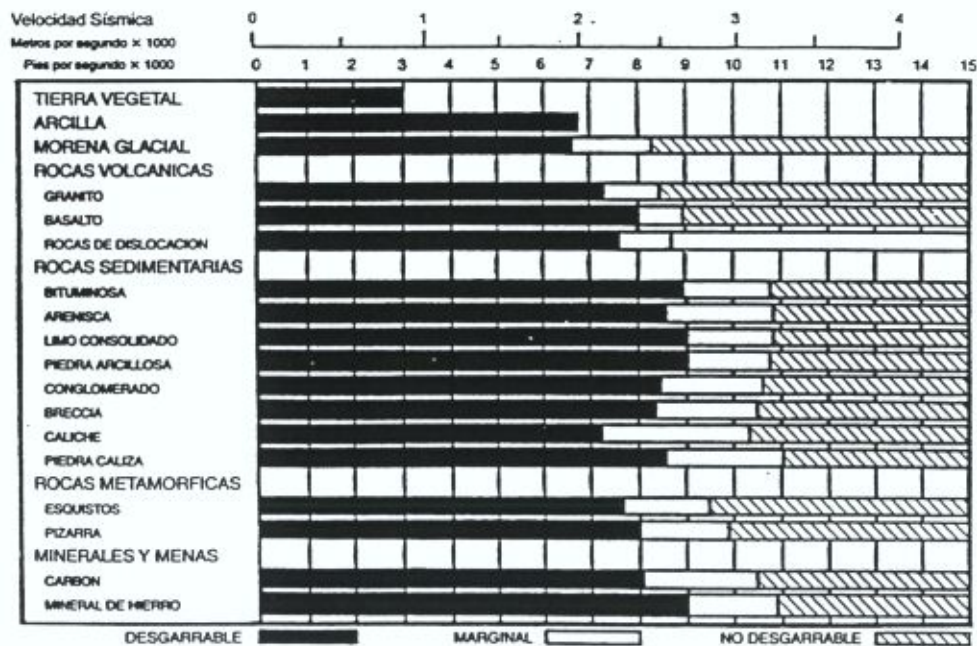
Un criterio comunmente aceptado, para determinar si una formación rocosa es ripable o no, se basa en la medición de la velocidad de propagación de las ondas sísmicas longitudinales.

Esta velocidad sísmica varía con la resistencia de la roca matriz y con la fracturación del macizo rocoso.

Las tablas 16 (a, b, c y d) reproducen las propuestas de CATERPILLAR para sus modelos de tractores D9N, D10N, y D11N de potencias 370, 520 y 770 HP respectivamente; en las tablas 17 (a, b, c y d) se reproducen las propuestas similares por KOMATSU para sus tractores D155 A-2, D355 A-3, D475 A-2 y D575 A-2 de potencias 320, 410, 770, 1050 HP respectivamente.

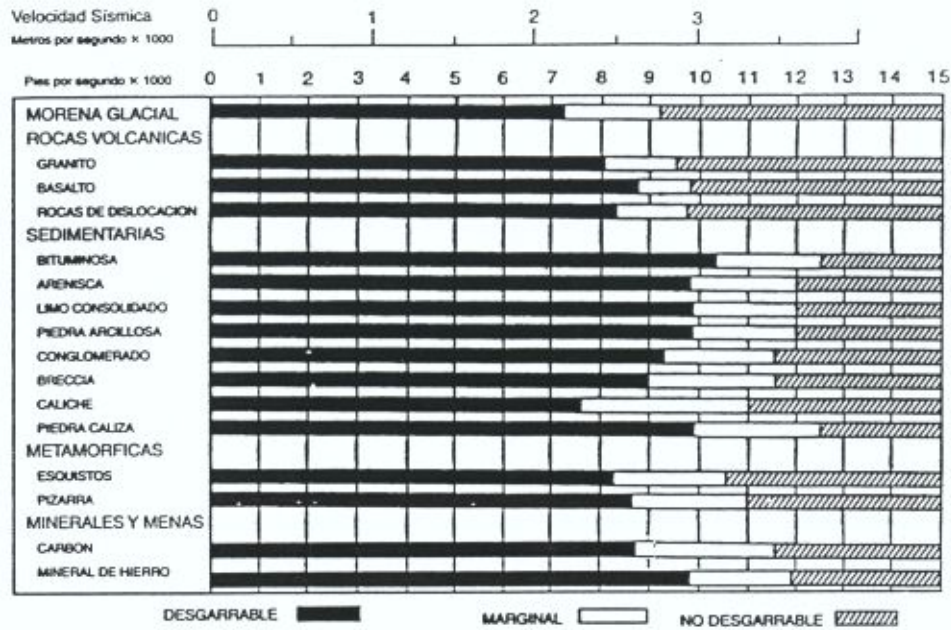


D9N

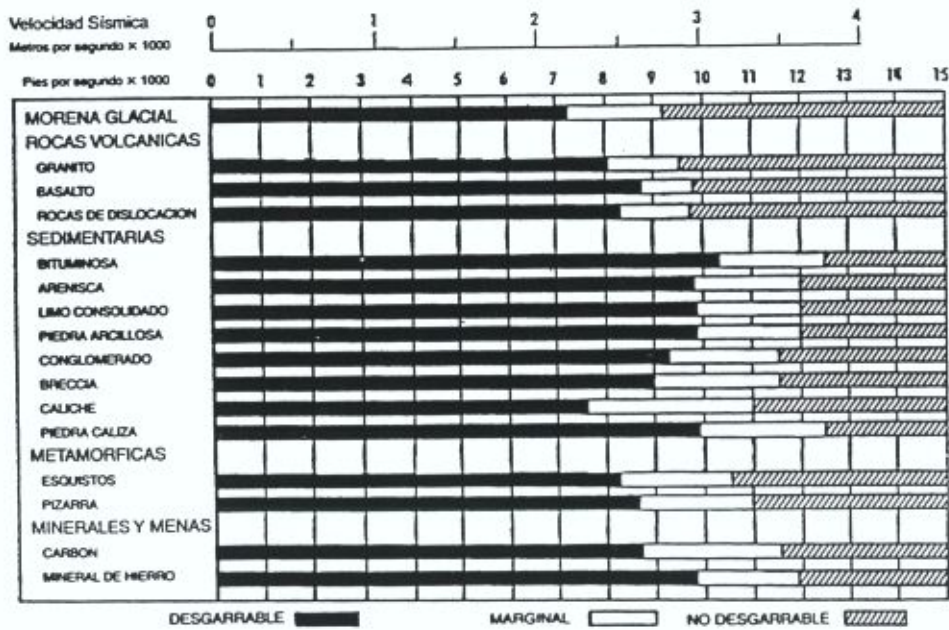


D10N

Tablas 16 a y b. Ripabilidad de diferentes rocas en función de la celeridad de ondas sísmicas para tractores D9N y D10N con ripper convencionales de CATERPILLAR. (CATERPILLAR, 1994)

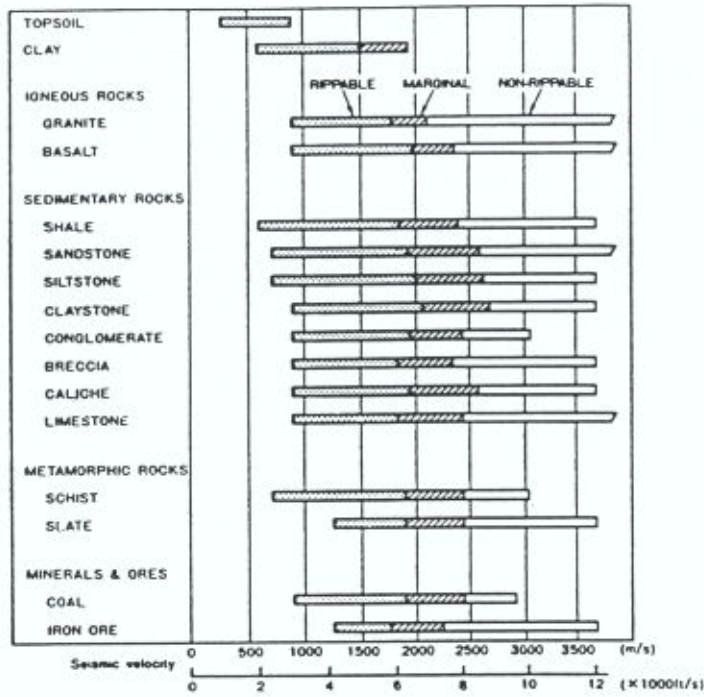


D10N
impacto

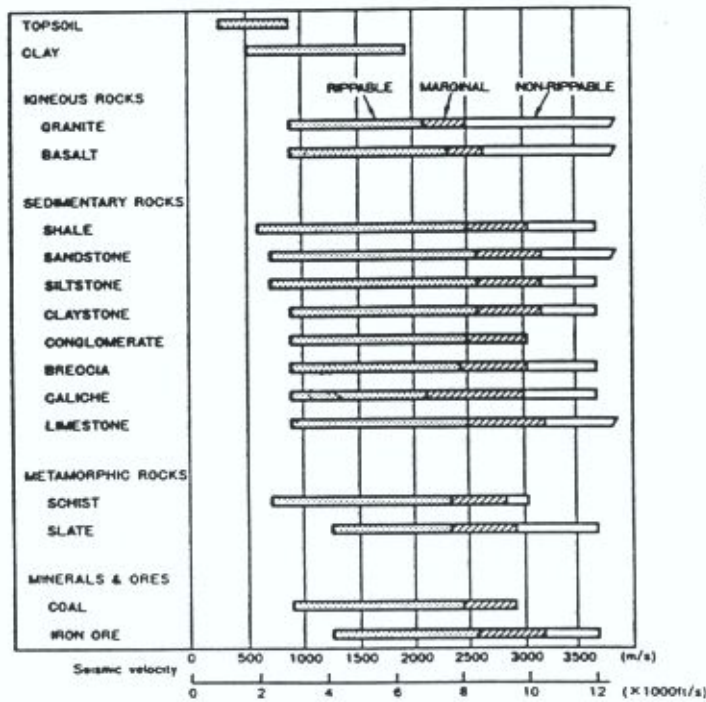


D11N

Tablas 16 c y d. Ripabilidad de diferentes rocas en función de la celeridad de ondas sísmicas para tractores D10N con ripper de impacto y D11N con ripper convencional de CATERPILLAR. (CATERPILLAR, 1994)

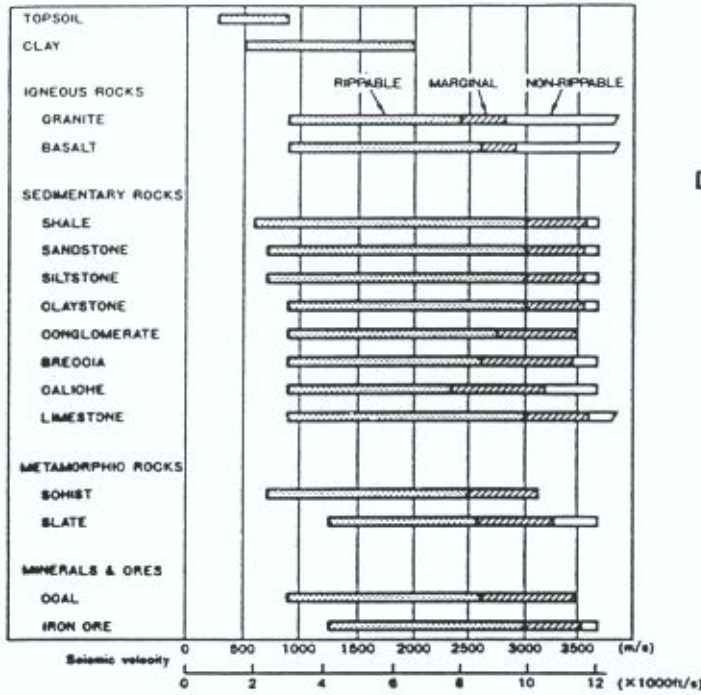


D155A Giant Ripper

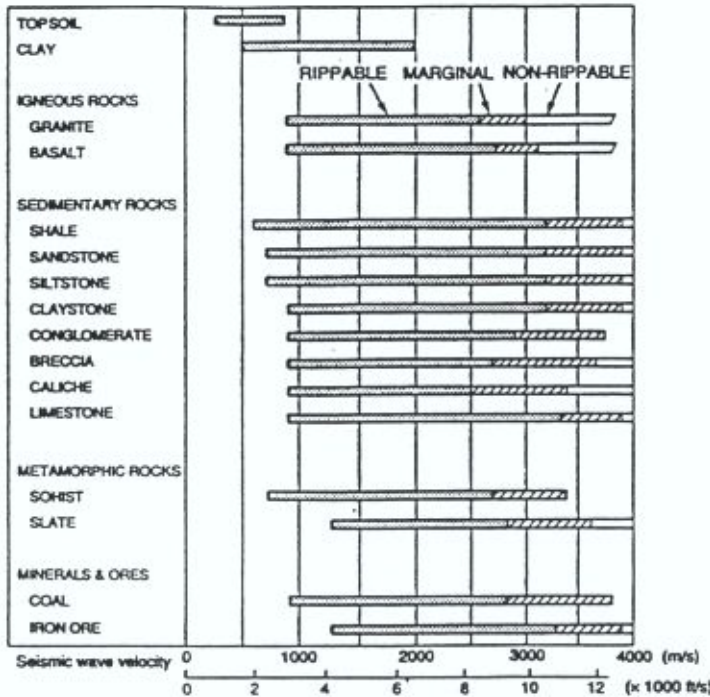


D275A Giant Ripper
D355A Giant Ripper

Tablas 17 a y b. Ripabilidad de diferentes rocas en función de la celeridad de ondas sísmicas para tractores D155A y D355A de KOMATSU. (KOMATSU, 1992)



D475A Giant Ripper



D575A Giant Ripper

Tablas 17 c y d. Ripabilidad de diferentes rocas en función de la celeridad de ondas sísmicas para tractores D475A y D575A de KOMATSU. (KOMATSU, 1992)

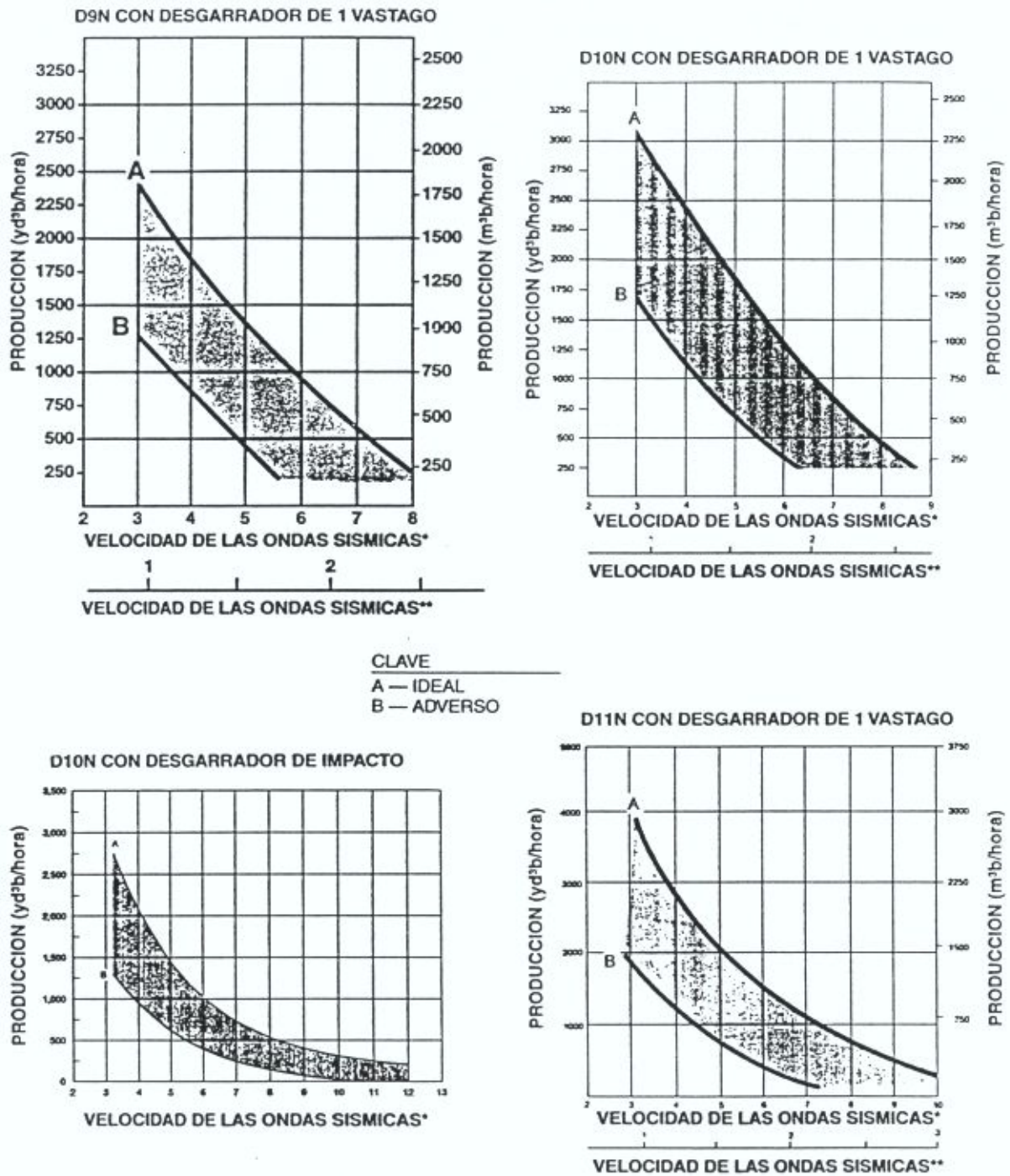


Figura 3. Rendimientos de tractores de CATERPILLAR. (CATERPILLAR, 1994)

Conditions	Job Efficiency (E)	
	Operation conditions	E
1. Ripping production only 2. Bulldozers with single shank rippers 3. 100% job efficiency	Good	0.75
	Average	0.58
	Rather poor	0.50
	Poor	0.40

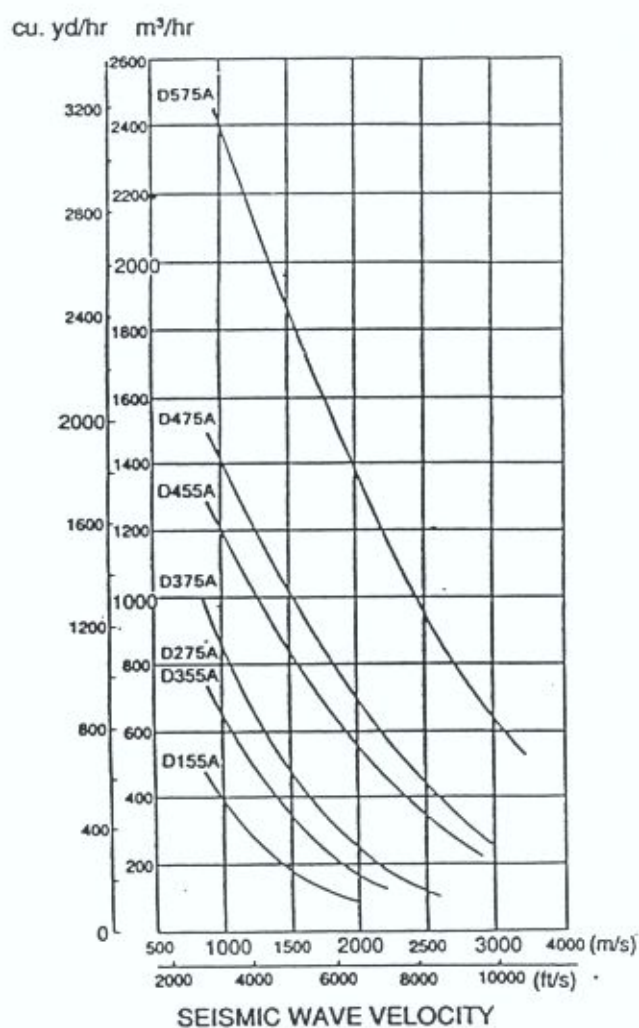


Figura 4. Rendimientos de tractores de KOMATSU. (KOMATSU, 1992)

Aunque la ripabilidad varía con la potencia del tractor, puede decirse que por debajo de 1.800 m/s parece ser todo ripable y por encima de 3.500 m/s se ripa con extrema dificultad y a un coste muy alto.

Este tipo de tablas debe ser tomado como una orientación, sobre todo cerca de los dos límites que confinan la zona de ripabilidad marginal, y no planificar un tajo de excavación sin antes efectuar otros estudios. La geofísica sísmica por refracción no es siempre fácil de interpretar y, utilizada por sí sola, puede llevar a cometer errores importantes.

Por ejemplo, la existencia de una capa dura superficial, aún de poco espesor, podría conducir a calificar todo el conjunto como no ripable, cuando posiblemente con una prevoladura se pudiera conseguir la total escarificación.

Otro caso significativo podría ser el de una velocidad de $V = 2.000$ m/s medida sobre un macizo granítico que, en el caso de estar sano y muy diaclasado, se traduciría en la posibilidad de ser escarificable mientras que en el caso de tratarse de un granito alterado pero poco fracturado sería muy difícil de ripar.

Por ello merece la pena tener en cuenta algunos consejos como los siguientes, en relación al reconocimiento:

- La velocidad de las ondas se debe medir en la misma dirección que las pasadas del tractor (o viceversa).
- Debe completarse el reconocimiento previo con otros estudios; por ejemplo, la utilización de un martillo neumático con el que comprobar las variaciones de velocidad de penetración; la realización de sondeos con extracción de testigos donde registrar inmediatamente el índice de calidad RQD; medidas de abrasividad con las que elegir el tipo de cuña adecuada, etc...
- Con todos los reconocimientos previos se podrá tener una idea bastante exacta de las características de la roca (sobre todo de su fracturación) en la zona a trabajar. De este modo se pueden seleccionar zonas donde realizar pruebas de ripado con la maquinaria disponible y "tarar" las restantes zonas.

Las tablas anteriores indican la ripabilidad de diferentes tractores en opinión de sus fabricantes. Pero un aspecto importante es qué rendimiento se obtiene en dicha operación pues de nada vale decir que somos capaces de ripar un macizo rocoso si para ello necesitamos varias pasadas del diente con una producción horaria final reducida.

Los rendimientos que pueden obtenerse en el ripado dependen de la potencia del tractor aplicada al diente y del grado de ripabilidad de la roca. Los fabricantes de tractores manejan gráficos de rendimientos en función de la velocidad sísmica. En las figuras 3 y 4 aparecen los rendimientos indicados por los fabricantes CATERPILLAR y KOMATSU para sus tractores más

pesados. Para velocidades del orden de 1500 a 2000 m/s son normales producciones superiores a 500 m³/h con coeficientes de utilización igual a la unidad y para tractores pesados.

Un factor que debe tenerse en cuenta al manejar los gráficos suministrados por los fabricantes es que se refieren a la máxima capacidad de ripar, siempre que el tractor sólo se dedique a ese trabajo. La realidad es que el tractor, que en general va provisto de empujador delantero, dedica una buena parte de su tiempo a empujar y retirar el material de la zona de trabajo, lo que hace que los rendimientos horarios de las tablas y gráficos puedan reducirse notablemente.

Evidentemente, esto no ocurre cuando las labores de empuje y las de escarificar están realizadas por tractores distintos. En todo caso, una producción inferior a 150 - 200 m³/h se considera el límite inferior de rentabilidad.

El rendimiento obtenido durante la extracción no es el único criterio a tener en cuenta. Es necesario también que el material ripado esté suficientemente troceado para ser cargado, transportado y, en su caso, para ser utilizado para el fin propuesto.

Así pues, en el caso de que el material excavado fuera a utilizarse en un relleno con unas limitaciones de tamaño máximo muy estrictas, sería frecuentemente necesario una fragmentación adicional cuyo coste incidiría en el estudio económico sobre la factibilidad de excavar con ripper.

4.9.- INDICE DE VOLABILIDAD DE LILLY (1986)

En los apartados anteriores se han expuesto índices de excavabilidad de un macizo rocoso con los que podemos tener una idea de la ripabilidad del terreno y por exclusión, o en el límite superior, de la necesidad de un arranque con explosivos. Existen índices específicos para determinar el "grado de volabilidad" de un macizo. LILLY (1986) propuso un índice de volabilidad BI (Blastability Index) dado por la expresión:

$$BI = 0.5 (RMD + JPS + JPO + SGI + RSI)$$

donde:

- RMD es un parámetro que describe el macizo rocoso
- JPS se refiere al espaciamiento entre juntas
- JPO se refiere a la orientación de los planos de juntas con relación al frente
- SGI es un parámetro relativo al peso específico
- RSI es el parámetro relativo a la resistencia que se puede estimar como un cinco por ciento de la resistencia a la compresión simple en MPa

En la tabla 18 se indican los valores de estos parámetros.

A partir del índice de volabilidad, Lilly confeccionó un conjunto de gráficos como los expuestos en la figura 5, con los cuales pueden realizarse estimaciones comparativas de costes de excavación con explosivos.

Los gráficos están confeccionados para determinadas hipótesis, entre ellas las siguientes:

- Barrenos verticales al tresbolillo con espaciamiento igual a 1.16 veces la piedra.
- Explosivo ANFO
- Sobreperforación igual a 8 diámetros.
- Retacado igual a la piedra

PARÁMETROS GEOMECÁNICOS	CALIFICACIÓN
1.- Descripción del Macizo Rocoso (RMD)	
1.1. Friable/Poco consolidado	10
1.2. Diaclasado en bloques	20
1.3. Totalmente masivo	50
2.- Espaciamiento entre Planos de Juntas (JPS)	
2.1. Pequeño (< 0,1 m)	10
2.2. Intermedio (0,1 a 1 m)	20
2.3. Grande (> 1 m)	50
3.- Orientación de los Planos de Juntas (JPO)	
3.1. Horizontal	10
3.2. Buzamiento normal al frente	20
3.3. Dirección normal al frente	30
3.4. Buzamiento coincidente con el frente	40
4.- Influencia del peso específico (SGI)	
SGI = $25 \cdot SG - 50$ (donde SG es el peso específico en t/m ³)	

Tabla 18.- Valores de los parámetros de la clasificación de LILLY (1986). Tomado de LOPEZ JIMENO (1994)

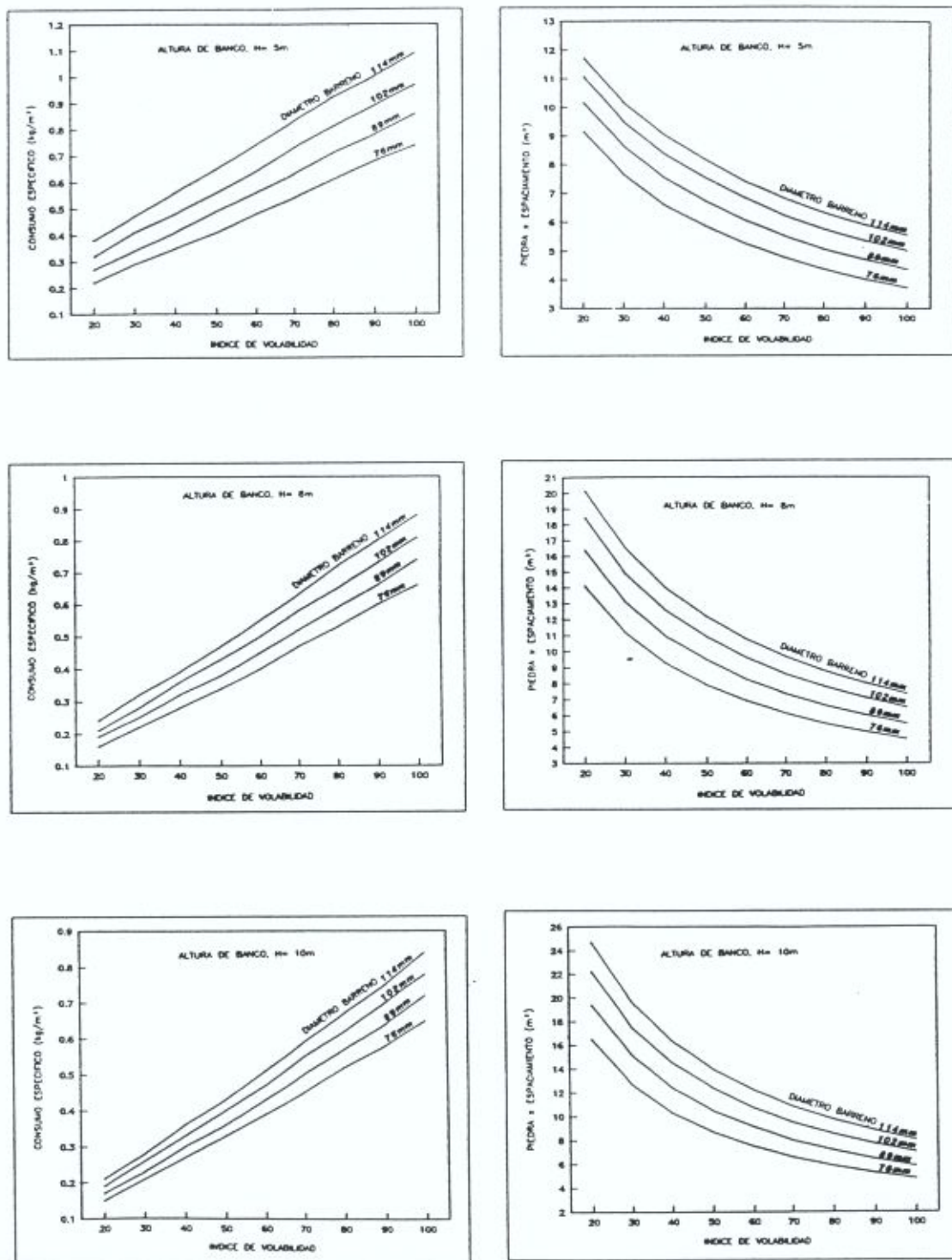


Figura 5.- Abacos para el diseño de voladuras. Lilly (1986). Tomado de LOPEZ JIMENO (1994)

4.10.- INDICE DE VOLABILIDAD DE GHOSE (1988)

GHOSE (1988) propuso una clasificación geomecánica para macizos rocosos de carbón con vistas a determinar el consumo específico de explosivo en voladuras a cielo abierto y que, para determinadas rocas similares, podría ser utilizado.

El índice de volabilidad de Ghose es la suma de los cuatro parámetros de la tabla 18, similares a los ya vistos en otras clasificaciones, y una corrección posterior por factores de ajuste función de las condiciones de ejecución de la voladura. Esta corrección se indica en la tabla 19.

En la tabla final n°20 se indica la correlación entre el índice de volabilidad y el consumo específico de explosivo para un hidrogel de 3.800 m/s de velocidad de detonación. Esta correlación se obtuvo de las experiencias de 12 minas de carbón a cielo abierto.

PARÁMETRO	RANGO DE VALORES				
1. Densidad	1,3 - 1,6	1,6 - 2,0	2,0 - 2,3	2,3 - 2,5	> 2,5
Ratio	20	15	12	6	4
2. Espaciamiento entre discontinuidades (m)	< 0,2	0,2 - 0,4	0,4 - 0,6	0,6 - 2,0	> 2,0
Ratio	35	25	20	12	8
3 Índice de resistencia bajo carga puntual (MPa)	< 1	1 - 2	2 - 4	4 - 6	> 6
Ratio	25	20	15	8	5
4 Orientación de los planos de discontinuidad.	Buzando hacia el frente	Rumbo con ángulo agudo respecto al frente	Rumbo normal al frente	Buzando contra el frente	Horizontal
Ratio	20	15	12	10	6

Tabla 18.- Parámetros para la determinación del índice de Ghose.

FACTORES DE AJUSTE	VALOR
1. Grado de confinamiento Muy confinada Razonablemente libre	-5 0
2. Esbeltez del banco Longitud del barreno/Piedra > 2 Longitud del barreno/Piedra < 1,5 Longitud del barreno/Piedra 1,5 - 2	-7

Tabla 19.- Corrección del índice de Ghose por condiciones de ejecución

ÍNDICE DE VOLABILIDAD	CONSUMO ESPECÍFICO DE EXPLOSIVO (kg/m ³)
80 - 85	0,2 - 0,3
60 - 70	0,3 - 0,5
50 - 60	0,5 - 0,6
40 - 50	0,6 - 0,7
30 - 40	0,7 - 0,8

Tabla 20.- Consumo específico de explosivo en función del índice de Ghose.

6. BIBLIOGRAFIA

ABDULLATIF, O.M. and CRUDEN, D.M. (1983). " The Relationship between Rock Mass Quality and case of Excavation". Bull. Int. Assoc. Eng. Geol. 28.

ADUVIRE, O., LOPEZ JIMENO, C., LLOPIS, C. (1993) "Arranque y ripado de macizos". Ingeopres. Madrid.

ATKINSON, T. (1970) "Ground preparation by ripping in open pit mining". Min. Mag-122.

AYALA, F. et al. (1987) "Manual de Taludes". Inst. Geol. Minero de España (IGME). Madrid

BELL, F.G. (1994). "Engineering in Rock Masses". Butterworth-Heinemann Ltd. Oxford.

BIENIAWSKI, Z.T. (1989) "Engineering Rock Mass Clasifications". John Wiley and Sons Ltd.

CATERPILLAR (1994) "Manual de rendimiento Caterpillar" Ed. Octubre 1994. Caterpillar. Peoria (Illinois).

CHURCH, H. (1981). "Excavation handbook". Ed. McGraw Hill Bool Company.

FRANKLIN, J.A., BROCH, E. and WALTON, G. (1971). " Logging the mechanical character of rock". Trans. Inst. Mining Metallurgic 80, Section A. Mining Industry 11-9

HOEK, E., KAISER, P.K., BAWDEN, W.F. (1995). "Support of Underground Excavations in Hard Rock". A.A. Balkema, Rotterdam, Brookfield.

KIRSTEN, H.A.D. (1982) "A classification system for excavation in natural materials". The Civil Engineerinf in South Africa, 24.

- KOMATSU (1992) "Specifications and application handbook". Edition 15. Komatsu. Tokio.
- LOPEZ, G. (1981). "Normas prácticas sobre utilización de ripper". Dragados y Construcciones. Boletín Técnico.
- LOPEZ JIMENO, C., BLANCO GONZALEZ, R. (1994) "Diseño de voladuras usando el índice de volabilidad". Ingeopres. Madrid.
- RAMIREZ OYANGUREN, P et al. (1984) "Mecánica de rocas aplicada a la minería metálica subterránea". Inst. Geol. Minero de España (IGME). Madrid
- ROMAN, F. (1985). "Sistemas de excavación de Taludes". Curso de Estabilidad de Taludes. CEDEX. Madrid.
- ROMAN, F. (1988). "Problemas de inestabilidad de taludes ligados al método de excavación". II Simposio sobre taludes y laderas inestables. Andorra.
- ROMAN, F. (1995). "Excavación de taludes en roca". XI Curso Internacional de Carreteras.
- ROMAN, F. (1996). "Caracterización Geomecánica de macizos rocosos en obras lineales". Jornada Técnica sobre Voladuras y Control de Vibraciones en Obras Públicas. EPM. UEE. La Coruña.
- SINGH, R.N., DEMBY, B. and EGRETTI, I.(1987). "Developement od New Rippability Index for Coal Mesure". Proc. 28th. U.S. Symp. Rock. Mech. A.A. BALKEMA, BOSTON.
- SMITH, H.J.(1986). "Estimating the Mechanical Dredgeability of Rock". Proc. 28th U.S. Symp. Rock. Mech. AIME, New York.
- UNION EXPLOSIVOS RIO TINTO, S.A. (1980) Información Técnica.
- WEAVER, J.M. (1975). "Geological factors significant in the assesment of rippability". The Civil Engineerinf in South Africa, 17.