



CAMPUS  
DE EXCELENCIA  
INTERNACIONAL

**POLITÉCNICA**

"Ingeniamos el futuro"

# Universidad Politécnica de Madrid

## Fundamentos del arranque mecánico de rocas

**"LABOREO DE MINAS I"**  
(Grado en Ingeniería en Tecnologías Mineras  
Grado en Ingeniería Geológica)

Department of Geological and Mining Engineering.  
Madrid School of Mines  
Technical University of Madrid

Sept - 2016



## EQUIPO DE PROFESORES

**Juan Herrera Herbert** (juan.herrera@upm.es).  
Coordinador de la asignatura

### ADVERTENCIA

El presente documento ha sido preparado con una finalidad exclusivamente divulgativa y docente. Las referencias a productos, marcas, fabricantes y estándares que pueden aparecer en el texto, se enmarcan en esa finalidad y no tienen ningún propósito comercial.

Todas las ideas que aquí se desarrollan tienen un carácter general y formativo y el ámbito de utilización se circunscribe exclusivamente a la formación de los estudiantes de la UPM. La respuesta ante un caso particular requerirá siempre de un análisis específico para poder dictaminar la idoneidad de la solución y los riesgos afrontados en cada caso, además de las incidencias en los costes de explotación. Consulte siempre a su ingeniería, consultor, distribuidor y fabricante de confianza en cada caso.



Este documento ha sido formateado para su visualización y uso en dispositivos electrónicos y permitir ahorrar en el consumo de papel y tóner.

Antes de imprimirlo, piense si es necesario hacerlo.

Copyright © 2016. Todos los derechos reservados

## Concepto de arranque de rocas

- Los trabajos de arranque tienen como finalidad separar la roca del terreno rocoso y disgregarla en trozos que puedan ser manipulados y transportados.
- Se arranca:
  - El mineral útil, que es el objeto de la explotación.
  - Los estériles que sea necesario para permitir la extracción del mineral.
- El cometido fundamental de la actividad minera es, por tanto, el arranque del mineral útil y su separación de la roca que lo rodea, por lo que el resto de las tareas mineras son trabajos preparatorios y auxiliares del arranque.
- El tipo de arranque depende:
  - De la dureza, resistencia y la composición del relleno del yacimiento.
  - De la magnitud, posición y condiciones de la formación.
- El mineral vale tanto más cuanto más puro sea, por lo que se evitará en el arranque su mezcla con el estéril.

- El arranque es necesariamente la primera de las operaciones para el movimiento de los materiales.
- El arranque incluye fragmentar éstos materiales a un tamaño adecuado para su posterior manipulación por los equipos de fases subsiguientes.
- La fragmentación de la roca puede efectuarse fundamentalmente por dos métodos bien definidos:
  - **Directos (arranque mecánico)**, por la acción mecánica de una herramienta montada sobre un equipo.
  - **Indirectos**, por medio de la energía liberada por los explosivos colocados en el interior de los macizos rocosos dentro de barrenos (**arranque por perforación y voladura**).

# Aplicación de clasificaciones geomecánicas en la determinación de las técnicas más adecuadas para el arranque de rocas

- Las clasificaciones geomecánicas se han convertido en una herramienta universal para:
  - La **selección y el diseño del método de excavación** más adecuado en cada caso
  - La **determinación del tipo de maquinaria** a emplear en el arranque de rocas.
- Las propiedades de las rocas, así como las discontinuidades existentes, influyen directamente sobre la determinación del sistema de arranque.
- Debido a que las propiedades de los macizos rocosos se determinan por medios empíricos, se requiere un estudio de los índices de ripabilidad, excavabilidad y volabilidad en función a las clasificaciones geomecánicas del macizo rocoso.
- La determinación de las propiedades de los macizos permitirá:
  - Delimitar los **rangos de utilización de los equipos mecánicos** (excavadoras y tractores por ejemplo) **o recurrir al empleo de explosivos** y a un arranque mediante **perforación y voladura**.
  - Contribuir a la **selección y evaluación de los rendimientos de la maquinaria de arranque**.

## Dificultades a afrontar

- Las técnicas de caracterización y sistemas de clasificación de los macizos rocosos han evolucionado desde la década de los años 40 hasta la actualidad.
- Sin embargo, las aplicaciones principales de dichas clasificaciones se centraron durante mucho tiempo en la selección del sostenimiento de cavidades subterráneas y túneles.
- Sólo a partir de la década de los 80, se publicaron diversas y significativas contribuciones dirigidas a la aplicación de las clasificaciones geomecánicas para evaluar la excavabilidad, ripabilidad y volabilidad de los terrenos.
- Hoy en día todavía no existe un sistema universal extendido para llegar a evaluar la facilidad del arranque de rocas por medios mecánicos, entre otras razones, por:
  - Las diferentes condiciones de trabajo que se presentan en las obras civiles y en minería, tanto por las dimensiones de las excavaciones, como por la disfunción geológica estructural de los macizos.
  - Las diferentes formas de arranque de rocas y el aumento espectacular de la potencia y automatización de la maquinaria como excavadoras, tractores de orugas, etc.

## Clasificaciones geomecánicas

- La resistencia a la compresión ha sido, y sigue siendo, una de las propiedades más representativas del comportamiento de las rocas frente al arranque.
- Si además se tiene en cuenta parámetros como tamaño de bloques, intensidad de fracturación, grado de meteorización y humedad, se consigue una rápida caracterización del macizo rocoso, obteniendo clasificaciones como:
  - **RQD** (Deere, 1967). El *Rock Quality Designation Index* proporciona un valor estimado cuantitativo de la calidad de la masa rocosa a partir de testigos perforados con diamante principalmente y de afloramientos en superficie. Aunque tiene algunas limitaciones, el uso más importante del RQD es como componente de los sistemas de clasificación RMR y Q.
  - **Q** (Barton, 1974). El índice de clasificación de Barton Q (Rock Quality Index), considera seis parámetros: RQD, número de sistemas de juntas ( $J_n$ ), rugosidad de las juntas ( $J_r$ ), alteración ( $J_a$ ), factor de reducción de agua ( $J_w$ ) y factor de reducción de los esfuerzos (SRF).
  - **RMR** (Bieniawski, 1989). El sistema de clasificación geomecánica de Bieniawski RMR (Rock Mass Rating System), valora al macizo rocoso en tipos, en cada dominio estructural. En la valoración este sistema considera cinco parámetros: resistencia a la compresión uniaxial, RQD, espaciamiento de las discontinuidades, condición de las discontinuidades y condición de agua.
  - Otros índices de caracterización denominados GSI (Hoek & Brown, 1994), RMI (Palmstrom, 1996), orientados a obtener la capacidad portante del macizo rocoso y el sostenimiento requerido en cada caso, y últimamente utilizados en la elección del tipo de maquinaria para el arranque de rocas.



- El índice de clasificación de Barton Q (Rock Quality Index), considera:

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

- El cociente  $RQD/J_n$  representa el tamaño de bloque
- $J_r/J_a$  describe las características de resistencia al corte
- $J_w/SRF$  representa la situación actual de tensiones.

- Comparando las escalas de valoración entre los sistemas Q y RMR, ambas clasificaciones tendrían las siguientes equivalencias:

Escalas de los sistemas Q y RMR.

Clases RMR	Valores RMR - Calidad		Clases Q	Valores Q
I	80 - 100	Muy buena	Extremadamente o excepcionalmente buena	> 200
II	60 - 80	Buena	Buena a muy buena	20 - 200
III	40 - 60	Regular	Muy mala a buena	0,3 - 20
IV	20 - 40	Mala	Extremadamente mala	0,003- 0,3
V	< 20	Muy mala	Excepcionalmente mala	< 0,003

- A comienzos de los años 70, el Imperial College de Londres, desarrolló un equipo hidráulico portátil para medir la Resistencia de las Rocas Bajo Carga Puntual ( $I_s$ ), parámetro que está totalmente correlacionado con la Resistencia a la Compresión Simple.
- En los ensayos diametral y axial sobre testigos de 50 mm de diámetro, la Resistencia de las Rocas Bajo Carga Puntual ( $I_s$ ) se calcula con la siguiente expresión:

– P = Carga de rotura (kN)

– D = Distancia entre los punzones de carga (mm)

$$I_s (MPa) = \frac{P}{D^2}$$

- Si los ensayos se realizan sobre muestras irregulares, la Resistencia a la Compresión Simple se estima a partir de:

$$RC (MPa) = 12,5 \cdot T_{500} \quad T_{500} = 211,5 \frac{P}{A^{0,75}} \quad A = D \times L \text{ (mm}^2\text{)}$$

- Este método es bastante fiable para rocas con resistencias entre 30 y 100 MPa.

- Franklin y sus colaboradores (1971), propusieron clasificar los macizos rocosos mediante el empleo de dos parámetros: **el Índice de Resistencia Bajo Carga Puntual ( $I_s$ ), y el Índice de Espaciamiento entre Fracturas ( $I_f$ )**
- Estos parámetros son obtenidos de los testigos de sondeos.
- El Índice de Espaciamiento entre Fracturas es un valor medio y puede oscilar desde milímetros hasta metros, por lo que su medida será aproximada y requerirá que vaya acompañada de un histograma o se presente en función de intervalos de variación.
- Actualmente, este método no es tan aplicable, pues las excavadoras hidráulicas de las últimas generaciones pueden ampliar la zona que corresponde al arranque directo, así como los tractores de más de 500 kW de potencia pueden hacer que se solape su área de aplicación con la de perforación y voladura.

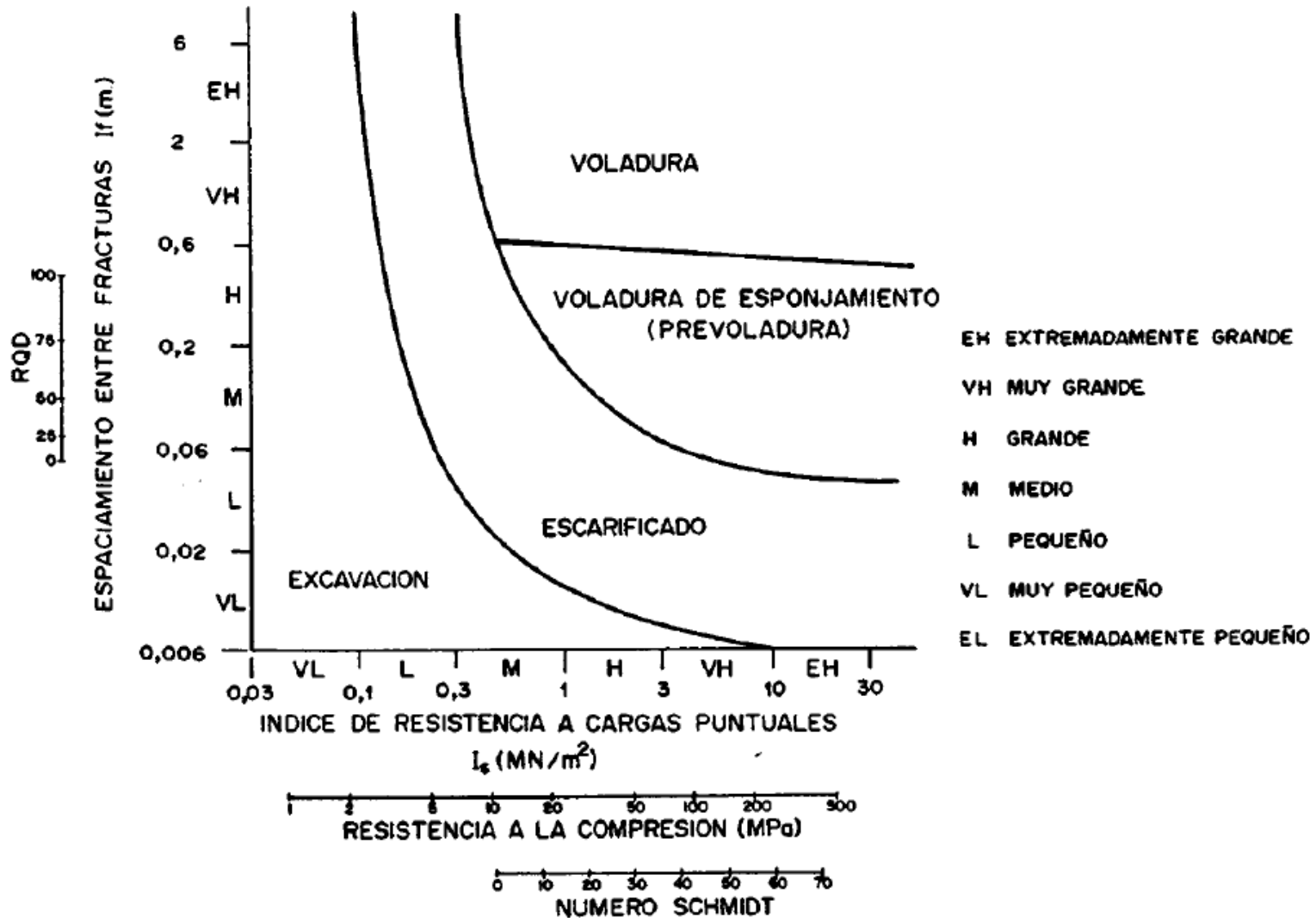


Figura 13.— Clasificación de los macizos rocosos para su excavación (Franklin et al. 1971).

- Atkinson (Universidad de Durham, 1977),
  - Propuso unas zonas de aplicación para cada tipo de maquinaria en función exclusivamente de la Resistencia a la Compresión Simple de las rocas
  - Lo hace sin considerar las discontinuidades presentes en los macizos rocosos, aspecto que tiene gran influencia en la excavación con equipos mecánicos, ya que en las rocas duras más que un corte de éstas lo que se realiza es un arranque aprovechando los planos de debilidad estructural o diaclasas abiertas.

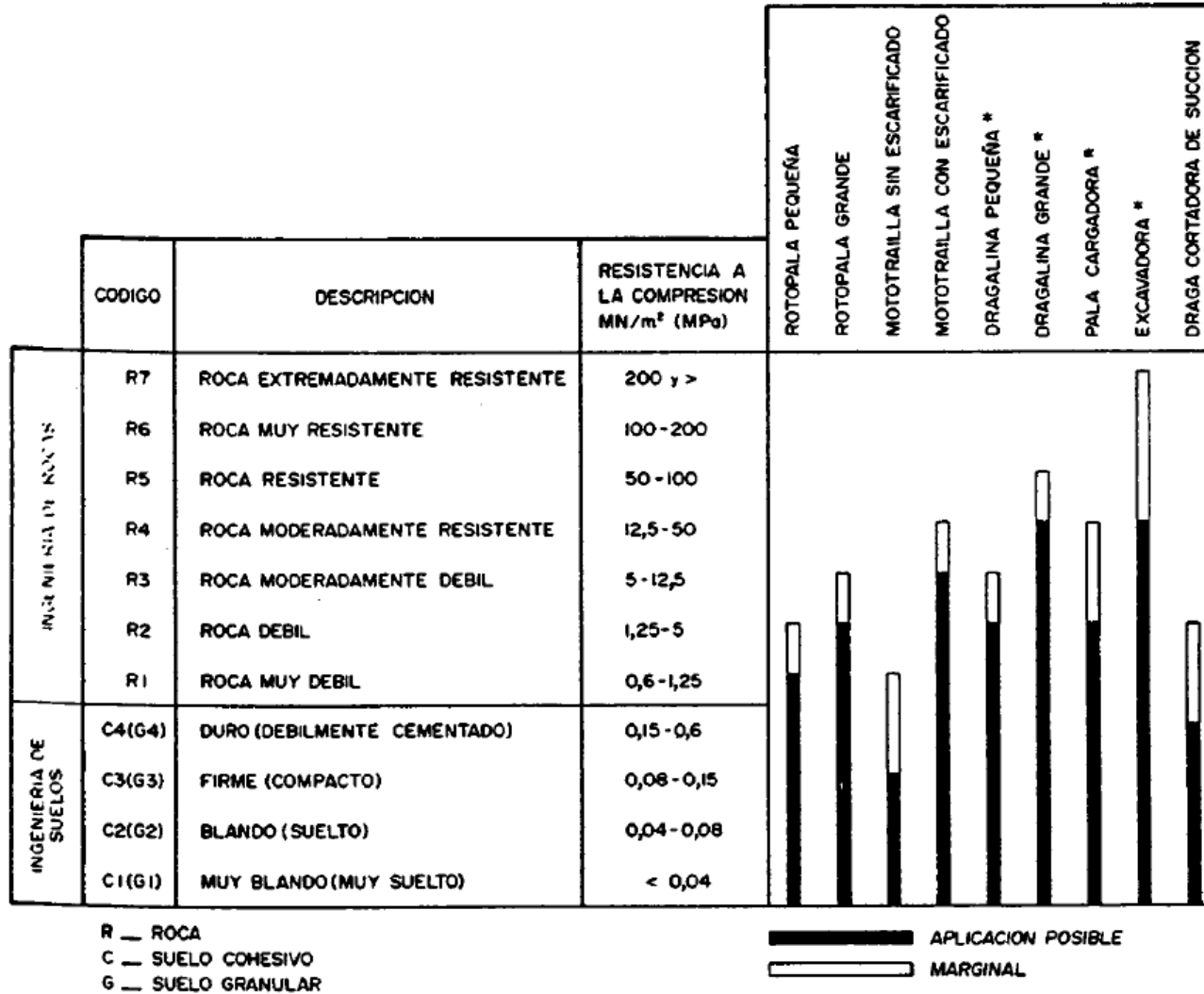


Figura 12.— Campos de aplicación de la maquinaria en función de la Resistencia a la Compresión (Atkinson. 1977)

## Índice de Excavabilidad (IE)

- Scoble y Muftuoglu (1984) definieron un Índice de Excavabilidad (IE) para yacimientos de carbón combinando cuatro parámetros geomecánicos:
  - Resistencia a la compresión simple
  - Extensión de la meteorización
  - Espaciamiento de juntas y
  - Planos de estratificación.
- Además de clasificar el macizo rocoso sugiere los equipos a utilizar en el arranque mecánico (ver cuadro siguiente).

$$IE = W + S + J + B$$

- W = Alteración por meteorización
- S = Resistencia a la compresión simple
- J = Separación entre diaclasas
- B = Potencia de estratos



Cuadro 2. Sistema de evaluación del índice de excavabilidad.

CLASE	FACILIDAD DE EXCAVACION	INDICE (W+S+J+B)	EQUIPO DE EXCAVACION	MODELOS DE EQUIPOS EMPLEADOS
1	MUY FACIL	< 40	TRACTORES DE RIPADO DRAGALINAS EXCAVADORAS	A. Tractor (Cat. D8) B. Dragalina > 5 m <sup>3</sup> (Lima 2400) C. Excavadora de Cables > 3 m <sup>3</sup> (Ruston Bucyrus 71 RB)
2	FACIL	40 - 50		A. Tractor (Cat. D9) B. Dragalina > 8 m <sup>3</sup> (Marion 195) C. Excavadora de Cables > 5 m <sup>3</sup> (Ruston Bucyrus 150 RB)
3	MODERADAMENTE DIFICIL	50 - 60	DRAGALINAS EXCAVADORAS	A. Tractor - Excavadora - Pala Cargadora (Cat. D9) B. Excavadora Hidráulica > 3 m <sup>3</sup> (Cat. 245)
4	DIFICIL	60 - 70		A. Tractor - Excavadora - Pala Cargadora (Cat. D10) B. Excavadora Hidráulica > 3 m <sup>3</sup> (Cat. 245 ó O&K RH40)
5	MUY DIFICIL	70 - 95		Excavadora Hidráulica > 3 m <sup>3</sup> (Cat. 245 ó O&K RH40)
6	EXTREMADAMENTE DIFICIL	95 - 100		Demag H111 Excavadoras Poclain 1000 CK Hidráulicas P & H 1200 > 7 m <sup>3</sup> R H 75
7	MARGINAL SIN VOLADURA	> 100		Demag H 185 Excavadoras Demag H 241 Hidráulicas O & K RH300 > 10 m <sup>3</sup>

Según los autores, la meteorización fue incluida para tener en cuenta el efecto reductor de la resistencia de las discontinuidades.

Los límites relativos superiores de S, J y B se definieron tomando como referencia el rendimiento de las excavadoras hidráulicas.

Todas los macizos rocosos con Índices menores a 70 podrían arrancarse con equipos medianos, entre 70 y 100 con equipos grandes y los de índices mayores a 100 solo con voladuras.



- Hadjigeorgiou y Scoble (1988) propusieron un nuevo sistema de clasificación empírica para evaluar la facilidad de excavación de los macizos rocosos combinando los valores de cuatro parámetros geomecánicos:
  - Resistencia Bajo Carga Puntual
  - Tamaño de Bloque
  - Alteración y
  - Disposición Estructural Relativa.

**Cuadro 3. Nuevo sistema de evaluación del Índice de Excavabilidad.**

C L A S E	1	2	3	4	5
RESISTENCIA BAJO CARGA PUNTUAL : $I_s(50)$ Valoración ( $I_s$ )	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 <sup>3</sup> ) Valoración ( $B_s$ )	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 ( $J_s$ )	Muy Favorable 0,5	Favorable 0,7	Ligeramente Favorable 1,0	Desfavorable 1,3	Muy Desfavorable 1,5
VALORACION $iE$ Facilidad de Excavación	Muy Fácil < 200,5	Fácil 20 - 30	Difícil 30 - 45	Muy Difícil 45 - 55	Voladura > 55

- El *Índice de Excavabilidad (IE)* se define mediante la expresión:

$$I E = ( I_s + B_s ) W x J_s$$

- $I_s$  = Índice de resistencia bajo carga puntual
  - $B_s$  = Índice de tamaño de bloque
  - $W$  = Índice de alteración
  - $J_s$  = Índice de disposición estructural relativa
- 
- Tanto la resistencia como el tamaño de bloque son dos de los parámetros más importantes que condicionan la propagación de la rotura a través del material, y consecuentemente la facilidad de excavación.
  - Estos dos parámetros configuran el núcleo o estructura básica del sistema de clasificación.
  - En algunos casos la mayor alteración o meteorización de los materiales rocosos puede ayudar a hacer una excavación más fácil, razón por la cual aparecen en la expresión anterior. De igual manera la disposición espacial de la estructura rocosa con respecto a las direcciones y sentidos de los elementos de arranque juega un papel significativo que llega a afectar a la excavabilidad de los macizos, y es por ello que también interviene en el sistema de evaluación.
  - Según los valores que resulten del Índice de Excavabilidad los macizos rocosos se clasifican en cinco categorías.

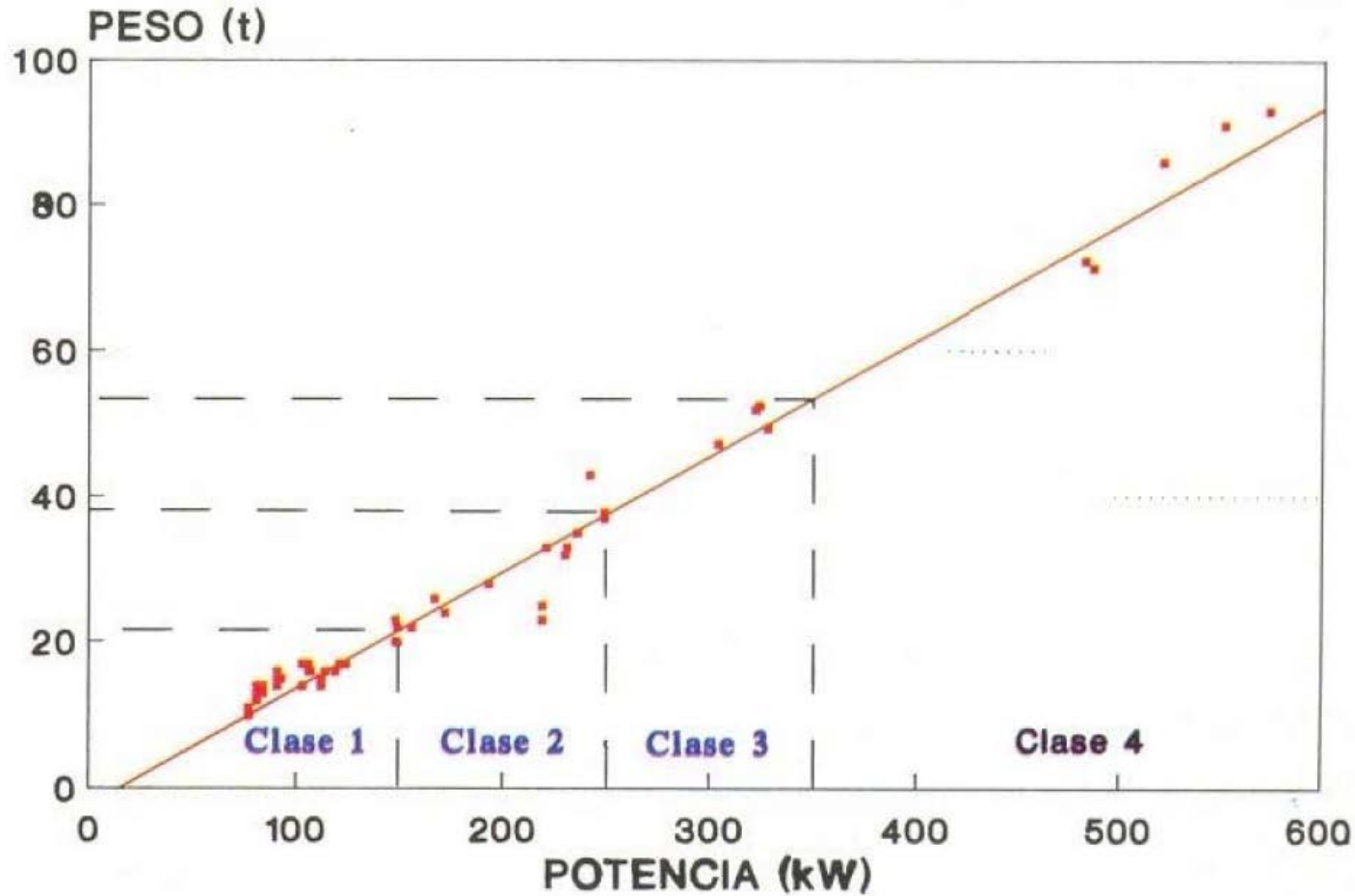
## Índice de Ripabilidad (IR)

- Propuesto por R. N. Singh y otros investigadores, evalúa la facilidad del arranque mecánico con tractores.
- Los parámetros geomecánicos que se registran para proceder a la clasificación de los macizos rocosos son los siguientes:
  - Espaciamiento entre discontinuidades, medido mediante registro lineal.
  - Resistencia a tracción, estimado a partir del Índice de Resistencia Bajo Carga Puntual
  - Grado de meteorización, obtenido mediante observación visual.
  - Grado de abrasividad, estimado por medio del Índice de Abrasividad Cerchar.
- La clasificación del Índice de Ripabilidad es el resultado de un amplio conjunto de experiencias y observaciones llevadas a cabo en minas de carbón en Gran Bretaña y Turquía, así como de la revisión de diversas clasificaciones de ripabilidad.

Cuadro 4. Clasificación de macizos rocosos según su ripabilidad.

PARAMETROS	CLASES DE MACIZOS ROCOSOS				
	1	2	3	4	5
<b>RESISTENCIA A TRACCION (MPa)</b>	< 2	2 - 6	6 - 10	10 - 15	> 15
Valoración	0 - 4	4 - 8	8 - 12	12 - 16	16 - 20
<b>GRADO DE ALTERACION</b>	Completo	Alto	Moderado	Ligero	Nulo
Valoración	0 - 4	4 - 8	8 - 12	12 - 16	16 - 20
<b>GRADO DE ABRASIVIDAD</b>	Muy Bajo	Bajo	Moderado	Alto	Extremo
Valoración	0 - 4	4 - 8	8 - 12	12 - 16	16 - 20
<b>ESPACIAMIENTO ENTRE DISCONTINUIDADES (m)</b>	< 0,06	0,06 - 0,3	0,3 - 1	1 - 2	> 2
Valoración	0 - 10	10 - 20	20 - 30	30 - 40	40 - 50
<b>VALORACION TOTAL</b>	< 22	22 - 44	44 - 66	66 - 88	> 88
<b>RIPABILIDAD</b>	Fácil	Moderado	Difícil	Marginal	Voladuras
<b>TRACTOR RECOMENDADO</b>	Ninguno - Clase 1 Ligero	Clase 2 Medio	Clase 3 Pesado	Clase 4 Muy Pesado	Clase 5 —
<b>POTENCIA (kW)</b>	< 150	150 - 250	250 - 350	> 350	—
<b>PESO (t)</b>	< 25	25 - 35	35 - 55	> 55	—

- Para cada uno de los cuatro parámetros geomecánicos considerados y, en función de los resultados que se obtengan, se le asigna una valoración general.
- La suma de dichas valoraciones independientes permite proceder a la evaluación de la ripabilidad, distinguiéndose los siguientes grupos:
  - Macizos fácilmente ripables (<22),
  - Moderadamente ripables (22-44),
  - Difícilmente ripables (44-66),
  - Ripabilidad marginal (66-88) y
  - Fragmentación con voladuras (>88).
- Los tractores de orugas considerados son de tipo convencional, pues para las técnicas más modernas de arranque con riper de impactos u otros, no se disponía de datos suficientes.
- Los tractores de orugas, a su vez, se han clasificado en cuatro grupos, según la potencia o peso de los mismos.
- Entre ambas características existe una buena correlación, tal como puede verse en la figura siguiente.



. Clasificación de tractores de orugas en base a su peso y potencia.

## Indice de Volabilidad "BI" (Blastability Index)

- Propuesto por Lilly (1986, 1992) en trabajos con rocas blandas y duras, y calculado como la suma de las calificaciones asignadas a cinco propiedades geomecánicas:

$$BI = 0,5 (RMD + JPS + JPO + SGI + RSI)$$

- RMD = Descripción del macizo rocoso
  - JPS = Espaciamiento de las juntas planares
  - JPO = Orientación de las juntas planares
  - SPG = Gravedad específica
  - RSI = Dureza de la roca
  - RC = Resistencia a la compresión simple (MPa)
- En el cuadro siguiente se indican los factores de ponderación de cada una de las propiedades consideradas.
  - El ratio de influencia de la resistencia (RSI) se estima a partir de la expresión:

$$RSI = 0,05 \cdot RC;$$

donde RC = resistencia a la compresión (MPa).

## Factores de ponderación de los parámetros del índice de volabilidad.

PARAMETROS GEOMECHANICOS	CALIFICACIÓN
1.- Descripción del macizo rocoso (RMD)	
* Friable / poco consolidado.	10
* Diaclasado en bloques.	20
* Poco masivo.	50
2.- Espaciamiento entre planos de juntas (JPS)	
* Pequeño (< 0,1 m)	10
* Medio (0,1 a 1 m)	20
* Grande (> 1 m)	50
3.- Orientación de los planos de juntas (JPO)	
* Horizontal.	10
* Buzamiento normal al frente.	20
* Dirección normal al frente.	30
* Buzamiento coincidente con el frente.	40
4.- Influencia del peso específico (SGI) (SG es el peso específico en t/m3)	SGI = 25 * SG - 50

- A partir del Índice de Volabilidad se puede determinar los consumos específicos de explosivo (CE) y los factores de energía (FE), que se calculan con las expresiones siguientes:

$$\text{CE (kg ANFO/t)} = 0,004 \cdot \text{BI} ;$$

$$\text{FE (MJ/t)} = 0,015 \cdot \text{BI}$$

- El índice planteado por Lilly, se puede corregir por nuevos parámetros, como la alteración y la abundancia. Estos valores entran restando al índice original, y la relación queda de la siguiente forma:

$$\text{BI} = 0,5 \times (\text{RMD} + \text{JPS} + \text{JPO} + \text{SGI} + \text{RSI} - \text{ALTxAB})$$

- En marzo de 2006, la empresa ASP Blastronic presentó un nuevo criterio para calcular el Índice de Volabilidad en función de:
  - La Velocidad de Penetración,
  - Mineralización,
  - RQD,
  - Litología y
  - Densidad de Roca.
- En el cuadro siguiente se adjunta la valoración y los parámetros de cálculo.
- Además del consumo específico y el factor de energía se puede obtener el **Factor de Roca (A)** según la siguiente expresión:

$$(A) = 0,12 \cdot BI.$$

ASP Blastronic 2006.

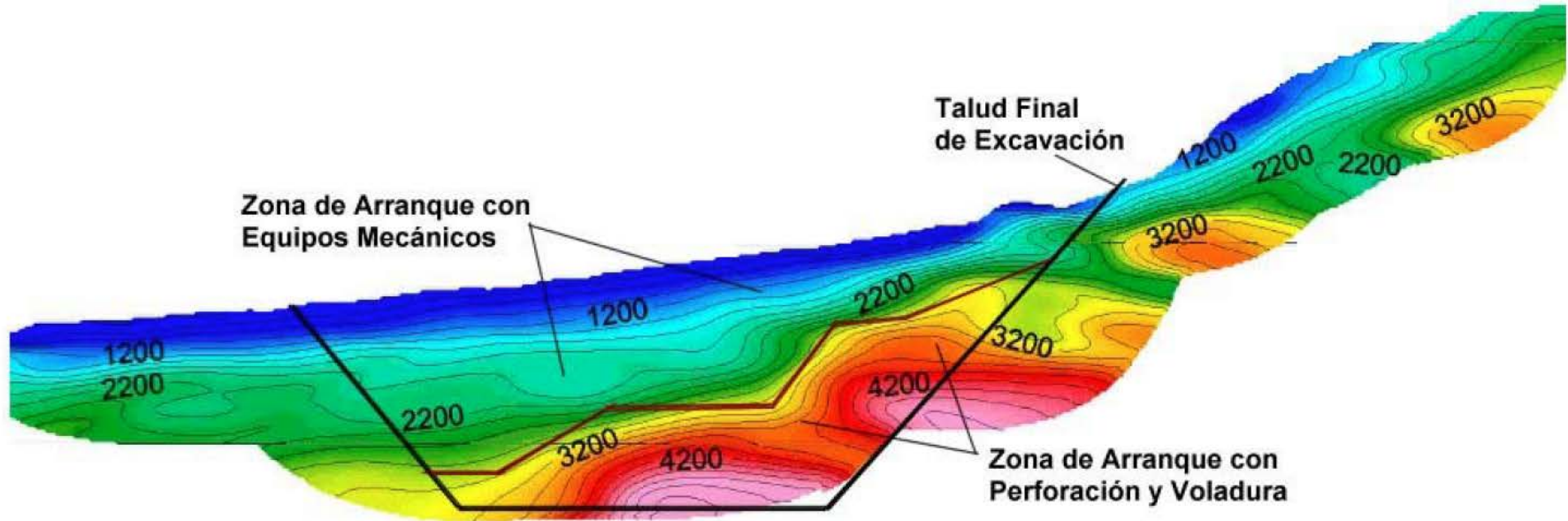
Diferentes tipos de Dureza

Caracterización para voladura				15Mpa	25Mpa	37Mpa	50Mpa	75Mpa	100Mpa
1.-	Influencia de la Dureza	Rango	Clase	10	20	30	40	50	50
	Rango de penetracion	>75	10						
		44 a 75	20						
	RP ( m/h)	25 a 44	30						
		18 a 25	40						
		0 a 18	50						
2.-	Mineralizacion			30	30	50	50	50	50
		1.- Esteril	30						
		2.- Mineral	50						
3.-	Influencia del fracturamiento (RQD)			10	20	30	40	50	60
	Influencia del fracturamiento	0 - 15	10						
		15 - 30	20						
	Rango RQD	30 - 45	30						
		45 - 60	40						
		>60	50						
4.-	Litologia			10	20	30	40	50	60
		1.- Mat aluvial	10						
		2.- Sedimentos	20						
		3.- Andecita inferior	30						
		4.- Andecita superior	40						
		5.- Toba	50						
5.-	Influencia de peso epesifico (SGI)			20	22.5	25	27.5	30	32.5
		2.8	20.0						
	SGI = 25SG - 50SG	2.9	22.5						
		3.0	25.0						
	SG = 2.5	3.1	27.5						
	SG = Peso especifico (ton/m <sup>3</sup> )	3.2	30.0						
		3.3	32.5						
	Indice de Volabilidad			40	56.25	82.5	98.75	115	126.25
	Factor de Energia (Kj/ton)			0.60	0.84	1.24	1.48	1.73	1.89
	Factor de Carga (kg/ton)			160	225	330	395	460	505
	Factor de Roca (A)			4.8	6.75	9.9	11.85	13.8	15.15

## Velocidad Sísmica y Arranque de Rocas

- En el arranque de rocas, el parámetro más significativo es el de la Velocidad Sísmica o celeridad de las ondas de compresión al recorrer el macizo rocoso.
- La velocidad sísmica de las rocas es una característica de las mismas que las clasifica significativamente en cuanto a su dureza y, se viene utilizando tradicionalmente para clasificarlas en cuanto a su ripabilidad o volabilidad.
- Aunque es un parámetro muy significativo, no puede ni debe ser tenido en cuenta aisladamente como "decisor único", sino visto en conjunto con otros factores del macizo rocoso a considerar.
- Su significado físico es la velocidad con que se transmiten las ondas sísmicas a través del material estudiado:
  - Está relacionado con el comportamiento mecánico de la roca, en concreto con su módulo de elasticidad.
  - Así, cuanto más dura es una roca, mayor es su módulo de elasticidad y mayor su velocidad sísmica.
  - La dureza de una roca puede venir dada por su litología o por su grado de alteración.

- Para la medición de la velocidad sísmica del terreno se emplean fundamentalmente dos métodos:
  - El método de reflexión, que se emplea para definir grandes estructuras a distancias kilométricas.
  - El método de refracción:
    - Se emplea para definir estructuras en rangos de distancias de centenares o decenas de metros.
    - Consiste en la medida de la señal sísmica producida por un foco emisor en varios puntos alineados a distancias conocidas.
    - Se mide la diferencia de tiempos de llegada a los distintos puntos y, por consiguiente, la velocidad de propagación de la onda sísmica.
    - Debido a que la onda viaja a través del terreno y va profundizando en el mismo (de ahí el nombre de Sísmica de Refracción), los tiempos entre puntos de medida consecutivos corresponden a las zonas más superficiales, mientras que los tiempos entre los puntos más alejados (en concreto, entre el punto más cercano y el más lejano al foco emisor), corresponden a las zonas más profundas.
- Así, empleando el método de refracción se puede conocer la velocidad sísmica de cada zona del terreno y, además, la profundidad en cada caso y, por consiguiente, la estructura del macizo rocoso.



Perfil sísmico con determinación de zonas con arranque mecánico y con voladura.

- Teniendo en cuenta el avance tecnológico incorporado en los equipos de arranque y las potencias que alcanzan los equipos de última generación (por ejemplo retroexcavadoras con capacidades de 25 m<sup>3</sup> y potencias de más de 2.400 HP ó 1.790 kW, o de excavadoras frontales de 30 m<sup>3</sup> y 2.400 HP ó 1.790 kW), hoy día es posible realizar el arranque con equipos mecánicos hasta rocas con velocidades sísmicas menor a 3.000 m/s, mientras que las rocas con velocidad sísmica superior a 3000 m/s todavía requieren de perforación y voladura.



POLITÉCNICA

"Ingeniamos el futuro"

CAMPUS  
DE EXCELENCIA  
INTERNACIONAL



Universidad Politécnica de Madrid



## Dudas y preguntas

