

Diseño y Ejecución de Obras Subterráneas

Tema 4. Clasificación de los terrenos en función de su excavabilidad



Rubén Pérez Álvarez

Departamento de Transportes y Tecnología
de Proyectos y Procesos

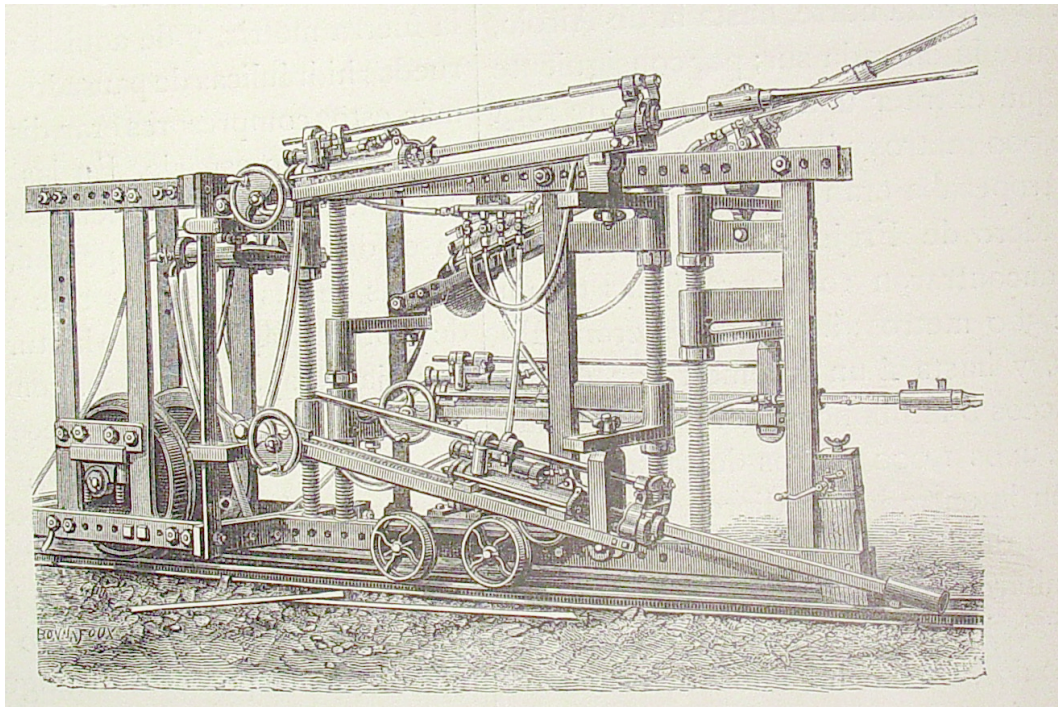
Este tema se publica bajo Licencia:

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

TEMA 4: CLASIFICACIÓN DE LOS TERRENOS EN FUNCIÓN DE SU EXCAVABILIDAD

4.1. Introducción.

4.2. Propiedades de los macizos rocosos que influyen en la excavabilidad.



«Nuevas máquinas perforadoras usadas en el túnel de San Gotardo».

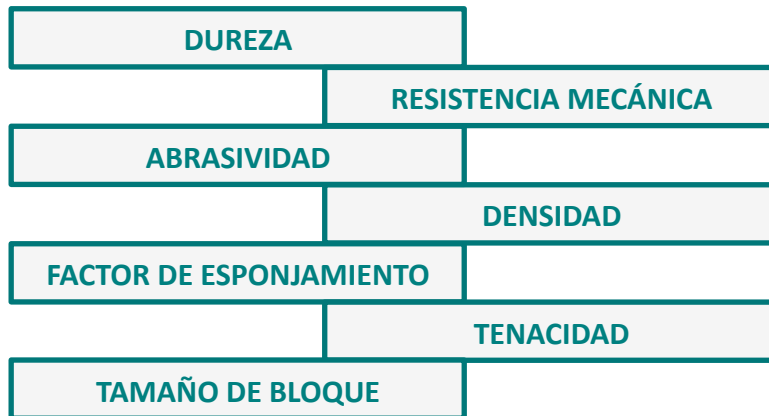
<https://www.flickr.com/photos/fdctsevilla/>.

<https://flic.kr/p/79cYL6>.

<https://creativecommons.org/licenses/by/2.0/>.

Al margen de las clasificaciones basadas en el origen geológico, tradicionalmente se han considerado otras características físicas para la clasificación de los terrenos, evaluando cuáles resultaban más idóneas como vía para la determinación del sistema de excavación más adecuado. Pueden destacarse las siguientes:

FACTORES INFLUYENTES EN LA EXCAVABILIDAD



CONDICIONARÁN LA SELECCIÓN DE LOS
SISTEMAS DE ARRANQUE



PERFORACIÓN Y VOLADURA

«Tunnel Excavation».

https://www.flickr.com/photos/stg_gr1/.

<https://flic.kr/p/71QYnh>.

<https://creativecommons.org/licenses/by/2.0/>.



MINADORES

«Minador Moderno». Silvia Alba.

<https://www.flickr.com/photos/barrenera>.

<https://flic.kr/p/6rv5Mn>.

<https://creativecommons.org/licenses/by/2.0/>.



TUNELADORAS

«ST U-Link TBM: Both TBMs».

<https://www.flickr.com/photos/atomictaco>.

<https://flic.kr/p/9o8Syl>.

<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0/>.

Propiedades de los macizos rocosos que influyen en su excavabilidad

Dureza y resistencia mecánica

DUREZA

- Resistencia de una capa determinada a la penetración en ella de otro cuerpo más duro. Es función de la propia dureza y composición de los minerales que la constituyan, pudiendo influir otros factores como porosidad, humedad, etc.
- Constituye la principal forma de resistencia a superar durante una perforación.
- La Escala de Mohs se emplea para la caracterización de la dureza de un determinado mineral, existiendo una cierta correlación entre la dureza y la propia resistencia a compresión de las rocas.

CLASIFICACIÓN	DUREZA MOHS	RESISTENCIA A COMPRESIÓN (MPa)
Muy blanda	< 2	< 10
Blanda	2 a 3	10 a 30
Media-Blanda	3 a 4,5	30 a 60
Media-Dura	4,5 a 6	60 a 120
Dura	6 a 7	120 a 200
Muy Dura	> 7	> 200

Relación entre la Dureza Mohs y la Resistencia a compresión. Adaptado de López Jimeno *et al.* (1994): «Manual de Perforación y Voladura de Rocas». Instituto Tecnológico GeoMinero de España. Madrid. 544 pp.



Picas en una cabeza de tipo Ripping de un minador. «Minador Moderno». Silvia Alba.
<https://www.flickr.com/photos/barrenera>.
<https://flic.kr/p/6rz7Kb>.
<https://creativecommons.org/licenses/by/2.0/>.

Propiedades de los macizos rocosos que influyen en su excavabilidad

Dureza y resistencia mecánica

RESISTENCIA MECÁNICA

- Propiedad que una roca presenta a oponerse a su propia destrucción, pudiendo deberse ésta a acciones exteriores, ya sean cargas estáticas o dinámicas.
- La máxima capacidad resistente de una roca es a compresión, siendo la de tracción entre un 10 y un 15% de ésta por lo general.



«Bonne Bay shale». Seldom Scene Photography.
https://www.flickr.com/photos/old_dog_photo/
<https://flic.kr/p/78ZCsg>
<https://creativecommons.org/licenses/by/2.0/>

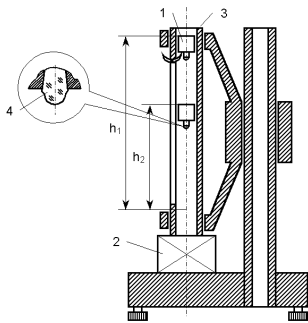
FACTORES INFLUYENTES EN LA RESISTENCIA MECÁNICA

COMPOSICIÓN MINERALÓGICA	El contenido en cuarzo incrementa sensiblemente la resistencia.
Variación inversamente proporcional.	TAMAÑO DE GRANO
COHESIÓN INTERGRANULAR	
Reduce la cohesión.	POROSIDAD
POSIBLE CEMENTACIÓN	En rocas sedimentarias. Una posible cementación silíceas incrementa la resistencia mecánica.
En rocas metamórficas principalmente. Incremento directamente proporcional.	PRESIÓN Y PROFUNDIDAD DE FORMACIÓN
POSIBLE ANISOTROPÍA	Distintas propiedades en función de la orientación de los esfuerzos. Por ejemplo en rocas que presenten pizarrosidad (ver Figura).

Propiedades de los macizos rocosos que influyen en su excavabilidad

Dureza y resistencia mecánica

- La resistencia a compresión simple ha sido la magnitud más medida desde antiguo, y puede obtenerse de forma sencilla a partir del **martillo de Schmidt** y el **esclerómetro Shore**.



«Esclerómetro Shore».
http://commons.wikimedia.org/wiki/File%3ATest_Shore_Scleroscope_scheme.png.
 Станислав Конда [CC BY-SA 3.0
<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0>].
 Vía Wikimedia Commons.

ESCLERÓMETRO SHORE

Permite determinar la dureza de la roca según el denominado «Índice Shore», y de forma indirecta, la resistencia a compresión simple, por su buena correlación.

<https://www.youtube.com/watch?v= QwFPfUq3I8>



«Martillo de Schmidt».
 Vía Wikimedia Commons.

MARTILLO DE SCHMIDT

Mide la dureza de un material rocoso por el rebote de un cilindro metálico. Utilizado frecuentemente para determinar la dureza del material rocoso con resistencias entre 400 y 20 Mpa.

<https://www.youtube.com/watch?v=gSq06sM60b8>

CORRELACIÓN DE SINGH Y CASSAPI (1987)

$$RC = 0.441 \cdot IHS + 8.73$$

- RC: resistencia a compresión simple (Mpa).
- IHS: índice de Dureza Shore.

Fuente: López Jimeno *et al.* (1997):
 «Manual de Túneles y Obra Subterránea».
 Entorno Gráfico. Madrid. 1082 pp.

Propiedades de los macizos rocosos que influyen en su excavabilidad

Dureza y resistencia mecánica

ENSAYO DE RESISTENCIA DE ROCAS BAJO CARGA PUNTUAL

- El Ensayo de Resistencia de las Rocas Bajo Carga Puntual (Imperial College, década de los 70). Se realiza sobre sondeos (ensayos diametral y axial) o sobre fragmentos irregulares de roca.

<https://www.youtube.com/watch?v=rNj7HydB5s8>



ENSAYO DIAMETRAL

- Relación longitud/diámetro ≥ 4 .

ENSAYO AXIAL

- Relación $D/L = 1,1 \pm 0,05$ (siendo L la distancia entre puntos de aplicación de la carga).

ENSAYO DE FRAGMENTOS

- D entre 20 y 35 mm. La longitud del plano de sección deberá estar entre 1 y 2 veces D.

Propiedades de los macizos rocosos que influyen en su excavabilidad

Dureza y resistencia mecánica

ENSAYO DE RESISTENCIA DE ROCAS BAJO CARGA PUNTUAL

- El Ensayo de Resistencia de las Rocas Bajo Carga Puntual (Imperial College, década de los 70). Se realiza sobre sondeos (ensayos diametral y axial) o sobre fragmentos irregulares de roca.

<https://www.youtube.com/watch?v=rNj7HydB5s8>



ENSAYO DIAMETRAL

ENSAYO AXIAL

PARA TESTIGOS DE
50 mm DE DIÁMETRO

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

- Relación longitud/diámetro ≥ 4 .

- Relación $D/L = 1,1 \pm 0,05$ (siendo L la distancia entre puntos de aplicación de la carga).

- P: carga de rotura en KN.
- D: distancia entre los puntos de aplicación de carga en mm.

$$RC(\text{MPa}) \approx 24 \cdot I_s$$

Propiedades de los macizos rocosos que influyen en su excavabilidad

Dureza y resistencia mecánica

ENSAYO DE RESISTENCIA DE ROCAS BAJO CARGA PUNTUAL

- El Ensayo de Resistencia de las Rocas Bajo Carga Puntual (Imperial College, década de los 70). Se realiza sobre sondeos (ensayos diametral y axial) o sobre fragmentos irregulares de roca.

<https://www.youtube.com/watch?v=rNj7HydB5s8>



ENSAYO DE FRAGMENTOS

- D entre 20 y 35 mm. La longitud del plano de sección deberá estar entre 1 y 2 veces D.

PARA ENSAYO CON MUESTRAS IRREGULARES

$$t^* = 211,5 \cdot P / (D \cdot L)^{0,75}$$

$$RC(MPa) = 12,5 \cdot t^*$$

- P debe introducirse en KN, D y L en mm.

Propiedades de los macizos rocosos que influyen en su excavabilidad

Abrasividad

DEFINICIÓN

Capacidad de la roca para desgastar a la superficie de contacto de otro cuerpo más duro, como consecuencia del rozamiento registrado durante el desplazamiento relativo existente entre ambas durante la excavación.

FACTORES QUE CONDICIONAN LA ABRASIVIDAD

DUREZA DE LOS GRANOS MINERALES QUE CONSTITUYEN LA ROCA

Las rocas que presentan granos de cuarzo resultan más abrasivas.

Los más angulosos resultan más abrasivos.

FORMA DE LOS GRANOS

TAMAÑO DE LOS GRANOS

Genera superficies irregulares de contacto en las que se producen concentraciones puntuales de tensiones.

POROSIDAD DE LA ROCA

HOMOGENEIDAD DE LA ROCA

Las rocas mono-minerálicas suelen presentar menor abrasividad. Las poli-minerálicas muestran por el desgaste superficies ásperas asociadas a los granos más duros.



«Granodiorite (Giant Forest Granodiorite, mid-Cretaceous, 97-102 Ma; Moro Rock, Sequoia National Park, California, USA) 8». James St. John.
<https://www.flickr.com/photos/jsigeology>.
<https://flic.kr/p/riWNCN>.
<https://creativecommons.org/licenses/by/2.0/>.

Propiedades de los macizos rocosos que influyen en su excavabilidad

Abrasividad

El modo en el que el arranque de la roca se produzca condicionará los desgastes en los útiles empleados para el corte o la excavación. Esto hace que si se recurre a corte o rozado, incluso en trabajo con rocas blandas pueda producirse un notable desgaste. Existen varios métodos para la determinación de la abrasividad, dependientes del método empleado e incluso del propio país en el que se desarrollen. Se recogen a continuación los más notables.

COEFICIENTE DE SCHIMAZEK (F) (Schimazek y Knazt, 1976)

Permite determinar la **rozabilidad** de una determinada roca a través de la siguiente expresión:

$$F = Q^* \cdot d_{50} \cdot RT$$

- ☛ **F** = Coeficiente de abrasividad en N/mm.
- ☛ **Q*** = Contenido equivalente en cuarzo de minerales abrasivos (%).
- ☛ **d₅₀** = Diámetro promedio del grano de cuarzo.
- ☛ **RT** = Resistencia a tracción en N/mm².

$$Q^* = 1,00 \cdot (\% \text{Cuarzo}) + 0,33 \cdot (\% \text{Feldespatos}) + 0,40 \cdot (\% \text{Filosilicatos}) + 0,03 \cdot (\% \text{Carbonatos})$$

F (kp/cm)	ROZABILIDAD
0,8 - 1,0	Muy mala
0,6 - 0,8	mala
0,5 - 0,6	Regular
0,4 - 0,5	Moderada
0,3 - 0,4	Buena
0,2 - 0,3	Muy buena

Propiedades de los macizos rocosos que influyen en su excavabilidad

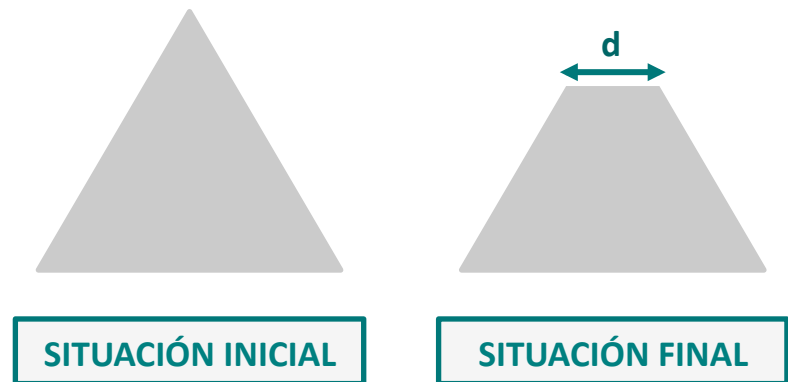
Abrasividad

ÍNDICE Y ENSAYO C.E.R.C.H.A.R.R. (Centre de Etudes et Recherches des Charbonages) (Década de los 70)

Desarrollado para el análisis de la abrasividad asociado a rocas encajantes de carbón. El ensayo consiste en pasar una aguja de acero con extremo cónico por la superficie de una muestra concreta, con un recorrido total de 10 mm, un ángulo de 90° y un peso total de 7 kg. La abrasividad de la roca se expresa en base al diámetro producido por el desgaste en la aguja, representando el índice de Cerchar ése diámetro expresado en décimas de milímetro, en una escala que suele oscilar entre 1 y 6.

<https://www.youtube.com/watch?v=266d7FfWCio>

ÍNDICE CERCHAR (C.A.I., 10 ⁻⁴ m)	TIPO DE ROCA	CLASIFICACIÓN
> 4,5	Gneis, pegmatita, granito	Extremadamente abrasiva
4,25 - 4,50	Anfibolita, granito	Altamente abrasiva
4,00 - 4,25	Granito, gneis, esquistos, piroxenita, arenisca	Abrasiva
3,50 - 4,00	Arenisca	Moderadamente abrasiva
2,50 - 3,50	Gneis, granito, dolerita	Abrasividad media
1,20 - 2,50	Arenisca	Poco abrasiva
< 1,20	Caliza	Muy poco abrasiva



Propiedades de los macizos rocosos que influyen en su excavabilidad

Abrasividad

ÍNDICE Y ENSAYO C.E.R.C.H.A.R. (Centre de Etudes et Recherches des Charbonages) (Década de los 70)

Bougard propuso en 1974 una modificación consistente en el empleo de un acero más blando, para poder caracterizar las características de rocas menos abrasivas. En base a dicho método modificado, Johnson consiguió determinar el consumo medio de herramientas de corte en base al índice de abrasividad obtenido, expresado en número de picas por metro cúbico.

Fuente: López Jimeno *et al.* (1997):
«Manual de Túneles y Obra Subterránea».
Entorno Gráfico. Madrid. 1082 pp.

COMPARATIVA ENTRE LOS ÍNDICES DE SCHIMAZEK Y C.E.R.C.H.A.R.


CLASIFICACIÓN	C.A.I. (10^{-1} mm)	TIPO DE ROCA	F de SCHIMAZEK (N/mm)
No abrasiva	<0,5	Caliza joven	< 0,5
Muy ligeramente abrasiva	<1,2	Caliza joven	< 0,5
Ligeramente abrasiva	1,2 a 2,5	Arenisca joven	0,5 a 2
Medianamente abrasiva	2,5 a 3,5	Granito meteorizado / dolerita	2 a 4
Moderadamente abrasiva	3,5 a 4,0	Arenisca	4 a 5
Abrasiva	4,0 a 4,2	Granito / Esquistos / Piroxenita	5 a 8
Áltamente abrasiva	4,2 a 4,5	Anfibolita	8 a 11
Extremadamente abrasiva	> 4,5	Cuarcita/Gneiss/Pegmatita	> 11

Propiedades de los macizos rocosos que influyen en su excavabilidad

Abrasividad

Mide el poder de abrasión de la roca, molida a menos de 1 mm, que se hace pasar con un disco bajo una pieza de acero sometida a un empuje de 10 Kg. Se define el valor AVS como la pérdida de peso en mg que sufre el útil de corte tras 20 vueltas. Con frecuencia se maneja el CLI (Índice de vida de los útiles de corte), que se calcula a partir de los ensayos AVS y de los ensayos de perforabilidad SJ, que se estudiará con posterioridad.

AVS: http://folk.ntnu.no/bnilsen/T%26Tpart2_0406.pdf


$$CLI = 13,84 \cdot (SJ/AVS)^{0,3847}$$

Propiedades de los macizos rocosos que influyen en su excavabilidad

Abrasividad

DENSIDAD Y POROSIDAD

La densidad influye de forma indirecta en el rendimiento de los equipos de excavación. Tras fragmentarse, las rocas ocupan un volumen superior al original, en un incremento comúnmente conocido como Factor de Esponjamiento, de gran influencia en la carga y el transporte del material arrancado.

TENACIDAD

Energía elástica requerida para deformar la roca con un determinado útil de corte. Éste parámetro se obtiene de la curva tensión-deformación. El Índice de Tenacidad resulta de gran interés en el análisis de la posible aplicación de los minadores, y se define conforme a la expresión, donde RC es la resistencia a compresión en MPa y E el Módulo de Young en Gpa:

$$Ti = \frac{50 \cdot RC^2}{E}$$

TAMAÑO DE BLOQUE

Es posible establecer la siguiente relación entre el número total de juntas por metro cúbico y el RQD, a través de la expresión siguiente:

$$RQD = 115 - 3.3 Jv$$

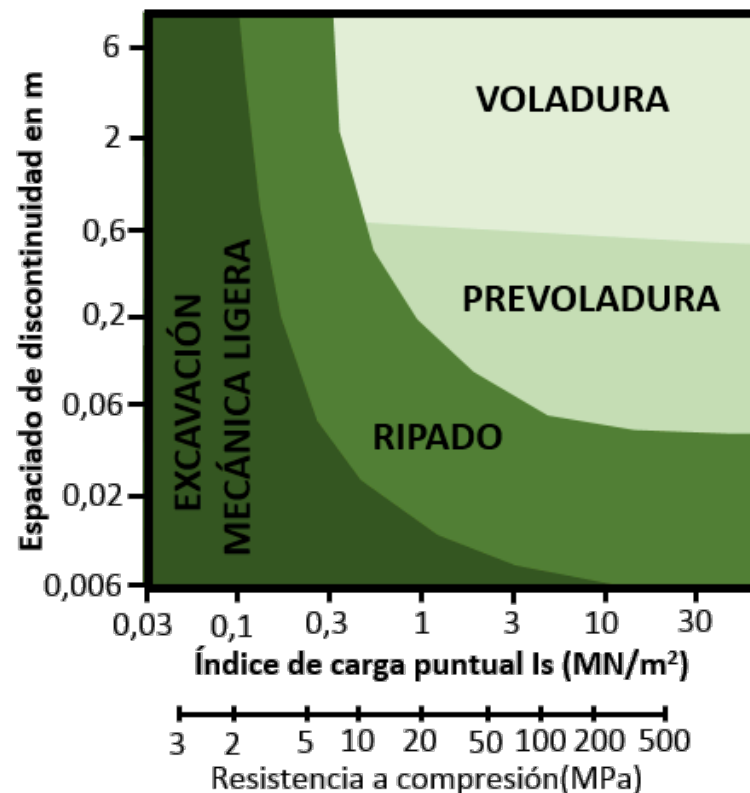
Jv (Juntas/m ³)	TAMAÑO DE BLOQUE
< 1,0	Masivos ó Muy grandes
1 a 3	Grandes
3 a 10	Medios
10 a 30	Pequeños
> 30	Muy Pequeños

Propiedades de los macizos rocosos que influyen en su excavabilidad

Clasificación de los materiales en base a su excavabilidad

CLASIFICACIÓN DE FRANKLIN (1971)

Propone clasificar los macizos rocosos en base al Índice de resistencia bajo carga puntual (I_s), y al espaciado entre fracturas. Permite distinguir entre el método más adecuado para la excavación, considerando como variables la excavación mecánica ligera, el ripado, las prevoladuras (voladuras suaves o de esponjamiento), y las voladuras ordinarias, sin precisar la tipología de los equipos o las capacidades más adecuadas para desarrollar dichas tareas asociadas al arranque. Si bien es cierto que en la actualidad existe maquinaria más potente que la existente en los tiempos en los que la presente metodología se desarrolló, con lo que los límites de las zonas de ripado y voladuras han sido claramente difuminados. En cualquier caso es aconsejable ser crítico con el área de ripado al evaluar un proyecto.

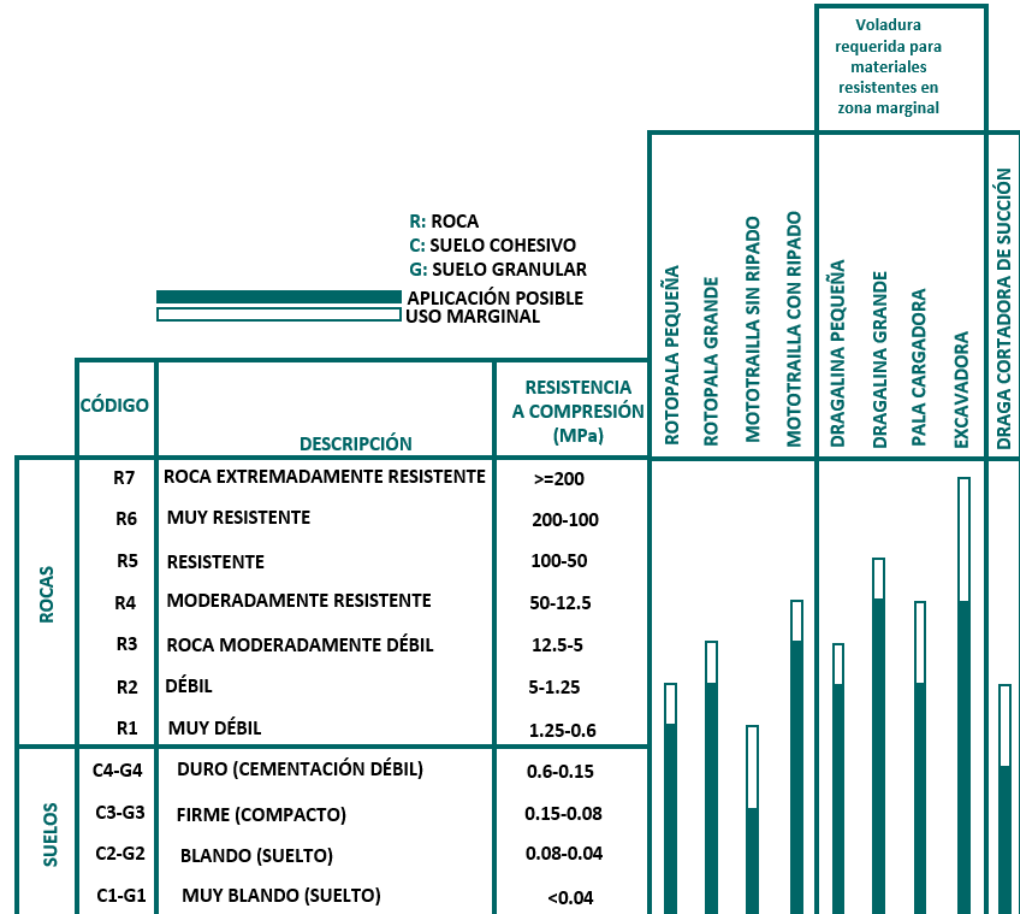


Propiedades de los macizos rocosos que influyen en su excavabilidad

Clasificación de los materiales en base a su excavabilidad

MÉTODO DE ATKINSON (1971)

Propuso sectores de idoneidad para cada tipo de maquinaria en función de la resistencia a Compresión Simple de las rocas, no teniendo en cuenta las discontinuidades presentes en los macizos, un aspecto de gran importancia, ya que en rocas duras el arranque se aprovecha de diaclasas o planos de debilidad.



Propiedades de los macizos rocosos que influyen en su excavabilidad

Clasificación de los materiales en base a su excavabilidad

CLASIFICACIÓN DE WEAVER (1975)

Define el grado de ripabilidad de un determinado macizo en base a siete factores, dando un peso del 56% del total a los dos principales (espaciado de juntas y velocidad sísmica).

El método postula que puntuaciones superiores a 75 se consideran como no ripables sin prevoladura.

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 extremadamente 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 - 300	300 - 50	< 50
Puntuación	30	25	20	10	5
CONTINUIDAD DE LAS JUNTAS	Discontinuas	Poco continuas	Continuas sin relleno	Continuas con algún relleno	Continua con relleno
Puntuación	5	5	3	0	0
RELLENO EN LAS JUNTAS	Cerradas	Algo separadas	Separadas < 1 mm	Con relleno < 5 mm	Con relleno > 5 mm
Puntuación	5	5	4	3	1
ORIENTACIÓN DE LA DIRECCIÓN Y BUZAMIENTO	Muy desfavorable	Desfavorable	Poco desfavorable	Favorable	Muy favorable
Puntuación	15	13	10	5	3
VALORACIÓN TOTAL	100 - 90	90 - 70*	70 - 50	50 - 25	< 25
VALORACIÓN DE LA RIPABILIDAD	Voladura	Extremadamente difícil de repar	Muy difícil de repar	Difícil de repar	Fácilmente ripable
Selección de la maquinaria	–	DD9G/D9G	D9/D8	D8/D7	D7
Potencia (CV)	–	770/385	385/270	270/180	180
KW	–	575/290	290/200	200/135	125

Propiedades de los macizos rocosos que influyen en su excavabilidad

Clasificación de los materiales en base a su excavabilidad

MÉTODO DE KIRSTEN (1982)

En estudios realizados sobre ripabilidad afirmó que la velocidad sísmica no resultaba un parámetro adecuado para evaluar la aptitud del macizo rocoso frente al arranque, ya que existirían otros factores influyentes. Propone el siguiente sistema de clasificación:

$$N = M_s \cdot \frac{RQD}{J_n} \cdot J_s \cdot \frac{J_r}{J_a}$$

- 🔍 **Ms:** resistencia a compresión de las rocas (MPa).
- 🔍 **RQD:** Rock Quality Designation (%).
- 🔍 **Jn, Jr:** parámetros de Barton.
- 🔍 **Js:** disposición relativa de los bloques inclinados con respecto a la dirección de arranque. Si el material está intacto, valdrá 1.0.
- 🔍 **Ja:** factor de alteración de la junta.

VALORACIÓN	N
Voladura	> 10 000
Ripado extremadamente duro/voladura	1000 a 10 000
Ripado muy duro	100 a 1000
Ripado duro	10 a 100
Ripable con facilidad	1 a 10

Propiedades de los macizos rocosos que influyen en su excavabilidad

Clasificación de los materiales en base a su excavabilidad

MÉTODO DE SINGH *et al.* (1989)

Definen un nuevo índice de ripabilidad (IR). En base al espaciamiento entre discontinuidades, resistencia a tracción, grado de meteorización (determinable por observación visual) y el grado de abrasividad en base al índice C.E.R.C.H.A.R.

PARÁMETROS	CLASES DE MACIZOS ROCOSOS				
	1	2	3	4	5
RESISTENCIA A TRACCIÓN (MPa)	< 2	2 - 6	6 - 10	10 - 15	> 15
Puntuación	0 - 4	4 - 8	8 - 12	12 - 16	16 - 20
GRADO DE ALTERACIÓN	Muy alto	Alto	Moderado	Ligero	Nulo
Puntuación	0 - 4	4 - 8	8 - 12	12 - 16	16 - 20
ABRASIVIDAD	Muy bajo	Bajo	Moderado	Alto	Extremo
Puntuación	0 - 4	4 - 8	8 - 12	12 - 16	16 - 20
ESPACIADO DE DISCONTINUIDADES (m)	< 0,06	0,06 - 0,3	0,3 - 1	1 - 2	> 2
Puntuación	0 - 10	10 - 20	20 - 30	30 - 40	40 - 50
Puntuación total (IR)	< 22	22 - 44	44 - 66	66 - 88	> 88
RIPABILIDAD	Fácil	Moderada	Difícil	Marginal	Voladura
TRACTOR RECOMENDADO	Ligero	Medio	Pesado	Muy pesado	Ninguno
POTENCIA (kW)	< 150	150 - 250	250 - 350	> 350	–
PESO (t)	< 25	25 - 35	35 - 55	> 55	–

Propiedades de los macizos rocosos que influyen en su excavabilidad

Clasificación de los materiales en base a su excavabilidad

MÉTODO DE SCOBLE Y MUFTUOGLU (1984)

Definen el Índice de Excavabilidad (IE) en base a la resistencia a compresión simple, la meteorización, el espacio de juntas y los planos de estratificación.

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

- 👉 **W:** Alteración por meteorización.
- 👉 **S:** Resistencia a compresión simple.
- 👉 **J:** Separación entre diaclasas.
- 👉 **B:** Potencia de los estratos.

Simplificado de: López Jimeno *et al.* (1997):
«Manual de Túneles y Obra Subterránea».
Entorno Gráfico. Madrid. 1082 pp.

VALORACIÓN

PARÁMETROS	CLASE DE MACIZO				
	1	2	3	4	5
ALTERACIÓN	INTENSA	ALTA	MODERADA	LIGERA	NULA
W	< 0	5	15	20	25
RESISTENCIA DE LA ROCA (Mpa)	< 20	20 - 40	40 - 60	60 - 100	> 100
S	0	10	15	20	25
SEPARACIÓN ENTRE DIACLASAS (m)	0,3	0,3 - 0,6	0,6 - 1,5	1,5 - 2	> 2
J	5	15	30	45	50
POTENCIA DE ESTRATOS (m)	< 0,1	0,1 - 0,3	0,3 - 0,6	0,6 - 1,5	> 1,5
B	0	5	10	20	30

EXCAVABILIDAD

	CLASES						
	1	2	3	4	5	6	7
IE	< 40	40 - 50	50 - 60	60 - 70	70 - 95	95 - 100	> 100
FACILIDAD DE EXCAVACIÓN	MUY ÁCIL	FÁCIL	MODERADAMENTE DIFÍCIL	DIFÍCIL	MUY DIFÍCIL	EXTREMADAMENTE DIFÍCIL	APLICACIÓN MARGINAL SIN VOLADURA
EQUIPO	TRACTORES DE RIPADO, DRAGALINAS, EXCAVADORAS		DRAGALINAS, EXCAVADORAS		EXCAVADORAS		

Propiedades de los macizos rocosos que influyen en su excavabilidad

Clasificación de los materiales en base a su excavabilidad

MÉTODO DE HADJIGEORGIOU Y SCOBLE (1984)

Reformulan el Índice de Excavabilidad en base a la resistencia bajo carga puntual, el tamaño de bloque, la alteración y la disposición estructural relativa.

Simplificado de: López Jimeno *et al.* (1997): «Manual de Túneles y Obra Subterránea». Entorno Gráfico. Madrid. 1082 pp.

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

- Is:** parámetro de puntuación en base a la resistencia bajo carga puntual (IS(50)).
- Bs:** tamaño de bloque.
- W:** alteración.
- Js:** índice de disposición estructural relativa con respecto a los elementos de arranque.

VALORACIÓN

CLASE	1	2	3	4	5
Is(50) (MPa)	0,5	0,5 - 1,5	1,5 - 2,0	2,0 - 3,5	> 3,5
Puntuación(Is)	0	10	15	20	25
Tamaño del bloque	Muy pequeño	Pequeño	Medio	Grande	Muy grande
J _v (juntas/m ³)	30	10 a 30	3 a 10	10 a 1	1
Puntuación (Bs)	5	15	30	45	50
Alteración	Completa	Alta	Moderada	Ligera	Nula
Puntuación (W)	0,6	0,7	0,8	0,9	1
Disposición estructural relativa	Muy favorable	Favorable	Ligeramente favorable	Desfavorable	Muy desfavorable
Puntuación (Js)	0,5	0,7	1	1,3	1,5

EXCAVABILIDAD

IE	< 20	20 - 30	30 - 45	45 - 55	> 55
FACILIDAD DE EXCAVACIÓN	Muy fácil	Fácil	Difícil	Muy difícil	Voladura

Propiedades de los macizos rocosos que influyen en su excavabilidad

Clasificación de los materiales en base a su excavabilidad

MÉTODO DE ROMANA (1981-1983)

Clasificación propuesta por Manuel Romana, de carácter muy simplificado y basada en dos parámetros: la resistencia a compresión simple y el RQD. La vigencia se fundamenta en el mantenimiento de los mecanismos de actuación de los equipos considerados (tuneladoras y minadores), al margen de las mejoras experimentadas. La actualiza en 1983, considerando como parámetros la resistencia a compresión simple de la matriz rocosa, el RQD y la abrasividad. Hace una consideración sobre la excavabilidad de los terrenos mediante medios mecánicos.

RESISTENCIA DE LA MATRIZ ROCOSA

RC (MPa)	MATERIAL	RESISTENCIA
< 0,6	Suelo	–
0,6 - 0,2	Transición	–
2 - 6	Roca	Muy baja
6 - 20	Roca	Baja
20 - 60	Roca	Media
60 - 200	Roca	Alta
> 200	Roca	Muy alta

CALIDAD DEL MACIZO

RQD (%)	CALIDAD DEL MACIZO
0 - 25	Muy mala
25 - 50	Mala
50 - 75	Mediana
75 - 90	Buena
90 - 100	Muy buena

ABRASIVIDAD

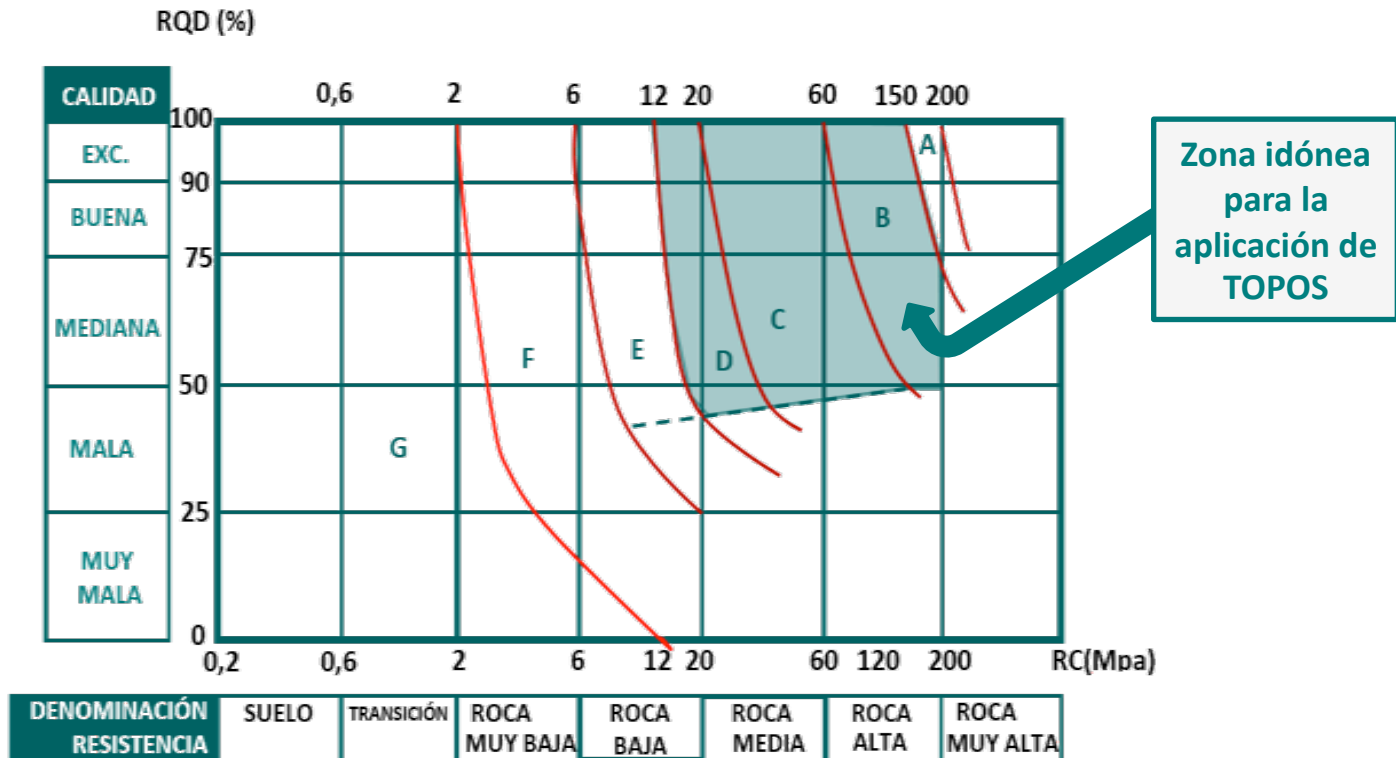
CUARZO EQUIVALENTE (%)	VIABILIDAD DE LA EXCAVACIÓN MECÁNICA
< 40	Viable económicamente
40 - 60	Posible. Los costes crecen con el contenido en cuarzo equivalente
60 - 80	Posible. Costes altos, rendimientos bajos
> 80	Inviabile económicamente

Propiedades de los macizos rocosos que influyen en su excavabilidad

Clasificación de los materiales en base a su excavabilidad

MÉTODO DE ROMANA (1981-1983)

El principal aporte es la clasificación compuesta por la figura y tabla siguientes, que según el autor sólo resulta adecuada para estudios previos o anteproyectos.



Propiedades de los macizos rocosos que influyen en su excavabilidad

Clasificación de los materiales en base a su excavabilidad

MÉTODO DE ROMANA (1981-1983)

El principal aporte es la clasificación compuesta por la figura y tabla siguientes, que según el autor sólo resulta adecuada para estudios previos o anteproyectos.

ZONA	TOPO		ROZADORA			MARTILLO	PALA
	> 25 t	< 25 t	> 80 t	50 - 80 t	< 50 t		
A	Posible ?						
B	Adecuado	Posible ?	Posible ?				
C	Adecuado	Adecuado	Adecuado	Adecuado			
D	Adecuado	Adecuado	Adecuado	Adecuado	Posible	Posible ?	
E	Posible	Posible	Posible	Adecuado	Adecuado	Posible	Posible ?
F				Posible	Adecuado	Adecuado	Posible
G					Posible	Posible ?	Adecuado

Adaptado de: López Jimeno *et al.* (1997): «Manual de Túneles y Obra Subterránea». Entorno Gráfico. Madrid. 1082 pp.

Propiedades de los macizos rocosos que influyen en su excavabilidad

Clasificación de los materiales en base a su excavabilidad

RECOMENDACIONES ACERCA DE LA EXCAVACIÓN DE ROMANA, EN BASE AL RMR (2003)

Romana establece una propuesta de excavación en base al RMR de Bieniawski, adecuadas para túneles de anchura comprendida entre los 10 y los 14 metros de ancho. El gráfico adjunto es una versión simplificada en la que únicamente se alude al método de excavación, sin adjuntar la información relativa al pase de excavación o a las posibles particiones de la sección, que se verán en el Tema 11.

Adaptado de: Romana Ruiz, M. (2003): «Nuevas Recomendaciones de Excavación y Sostenimiento para Túneles y Boquillas».

http://www.stmr.es/recursos/downloads/STMR_Art_NuevasRecomendaciones.pdf.

RMR	CLASE	MÉTODO DE EXCAVACIÓN
0	Vb	<p>ESCUDO (línea continua)</p> <p>TBM ABIERTO (línea continua)</p> <p>VOLADURAS (línea discontinua)</p> <p>ROZADORA (MINADOR) (línea discontinua)</p> <p>FRESADO (línea discontinua)</p> <p>RIPADO/PALA (línea discontinua)</p>
10	Va	
20	IVb	
30	IVa	
40	IIIb	
50	IIIa	
60	IIb	
70	IIa	
80	Ib	
90	Ia	
100		



La líneas continuas indica que el método es adecuado y habitualmente se emplea.
La discontinuas, que su uso es posible y en ocasiones se emplea.

Propiedades de los macizos rocosos que influyen en su excavabilidad

Clasificación de los materiales en base a su excavabilidad

RME DE BENIAWSKI *ET AL.* (2006)

La investigación comienza en el año 2004, con el fin de establecer un parámetro similar al RMR, pero para la predicción de la excavación de macizos rocosos, y que permitiese seleccionar el método de excavación, ya fuese mediante explosivos, tuneladoras, o ataque puntual. Éste valor se puede correlacionar con la velocidad media de avance (ARA), expresada en m/día. Permite obtener igualmente la Energía Específica de Excavación, y la velocidad de penetración.

Resistencia a Compresión uniaxial de la roca intacta [0 - 15 puntos]										
σ_{ci} (MPa)	< 5		5 - 30		30 - 90		90 - 180		> 180	
Puntuación	0 (Para simple escudo)		10		15		5		0	
Perforabilidad [0 – 15 puntos]										
DRI	> 80		80 - 65		65 - 50		50 - 40		< 40	
Puntuación	15		10		7		3		0	
Discontinuidades en el frente de excavación [0 - 40 puntos]										
Homogeneidad		Nº de juntas por metro				Orientación con respecto al eje del túnel				
Homogéneo		Mixto	0 - 4	4 a 8	8 a 15	15 a 30	> 30	Perpendicular	Oblicua	Paralela
Puntuación	10	0	5	10	20	15	0	10	5	0
Tiempo de autoestabilidad [0 - 25 puntos]										
Horas	< 5		5 a 24		24 a 96		96 a 192		> 192	
Puntuación	0		2		10		15		25	
Afluencia de agua [0 - 5 puntos]										
Litros/seg.	> 100		70 - 100		30 - 70		10 a 30		< 10	
Puntuación	0		1		2		4 (Para rocas arcillosas)		5	

Propiedades de los macizos rocosos que influyen en su excavabilidad

Clasificación de los materiales en base a su excavabilidad

INCISO: RIPABILIDAD VS. VOLADURA

Como se estudia en este bloque, existen varias sistemáticas clásicas de estimación de la excavabilidad del terreno, como por ejemplo la de Weaver que se adjunta. Dichas estimaciones en ocasiones atribuyen condiciones de ripabilidad a terrenos en los que realmente la operación de ripado no se puede realizar en condiciones rentables de operación. (El precio pagado de metro cúbico volado puede alcanzar el doble del ripado, por lo que deberá procederse a una cuidadosa caracterización del material a volar).

MAXAM realiza en el artículo una serie de recomendaciones a considerar a la hora de hacer una adecuada caracterización del terreno y de la operación a realizar.

Fuente: Luengo Rodríguez, F.J. & González Solís, S: «Definición racional de ripabilidad o volabilidad de los macizos rocosos. Factores económicos y técnicos». http://www.consejominas.org/archivos/docs/RevistaMYS_28.pdf.



«IDF CAT D9R - rear ripper». Zahci Evenor.
<https://www.flickr.com/photos/zachievenor>.
<https://flic.kr/p/7XtqgA>.
<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0/>.

ESCARIFICACIÓN/RIPADO

Escarificación o Ripado. Rótura del terreno mediante ripper. El rendimiento se expresa en m³/h.

PREVOLADURA

También llamadas voladuras de esponjamiento. Se emplea malla cuadrada ($S = B$), barrenos verticales y diámetros entre 2 y 4 pulgadas. La sobreperforación será $J = 0,5 B$ (la mitad de la piedra), y se aconseja una altura máxima de tongada inferior a 10 m. Se aplican para «aflojar» y posteriormente ripar rocas blandas (resistencia a compresión inferior a 1000 kg/cm²), con un consumo específico inferior a 200 gr/m³.

Propiedades de los macizos rocosos que influyen en su excavabilidad

Clasificación de los materiales en base a su excavabilidad

INCISO: RIPABILIDAD VS. VOLADURA

1. TOMA DE DATOS DE CAMPO

Adecuada caracterización en base a malla idónea de muestreo, de las condiciones existentes del macizo (carga puntual, RC, Vsísmica, Densidad, índice de juntas, relleno, cohesión, orientación de diaclasas...).

2. APLICACIÓN DE CRITERIOS CLÁSICOS

Weaver, etc. SI SE SUPERAN LOS UMBRALES DE ARRANQUE MECÁNICO, ADOPTAR DIRECTAMENTE VOLADURA. SI INDICA QUE ES POSIBLE, SER CRÍTICO, NO CLASIFICAR AÚN COMO RIPABLE (SEGUIR CON LOS PASOS SIGUIENTES).

3. ESTUDIAR LOS COSTES DE PERFORACIÓN Y VOLADURA

Por ejemplo, costes de personal en voladura por lo general más bajos que en excavación.

4. CONSIDERAR LOS CONDICIONANTES GEOMÉTRICOS DE LA EXCAVACIÓN

Desmontes bajos/excesivamente altos, muy amplios o estrechos...

5. ¿CUÁLES SON LAS NECESIDADES DE PRODUCCIÓN?

El volumen y el tiempo son condicionantes. ¿Conviene hacer prevoladura? ¿Cuáles son los rendimientos de los equipos de carga y transporte? ¿Se exige una granulometría?...

6. ANÁLISIS AMBIENTAL Y DE SEGURIDAD

Vibraciones, polvo, ruido, onda aérea,... Los equipos hidráulicos y de carga y transporte puede resultar más molesto que la voladura.

7. ESTIMACIÓN GLOBAL DE COSTES

Hacer una estimación global permite valorar de forma más racional el coste asociado al metro cúbico.