

Criterios de excavabilidad de macizos rocosos. Factores de corrección. Su aplicación a desmontes en calizas y pizarras con areniscas.

Galindo, Rubén.⁽¹⁾ & Román, Fernando.⁽²⁾

(1) Prof. Dr. Civil Engineer, Universidad Politécnica de Madrid (UPM), Madrid (Spain).

(2) Prof. Dr. Civil Engineer, Universidad Politécnica de Madrid (UPM), Madrid (Spain).

Corresponding author: fernando.roman@upm.es

Abstract:

Since 2011 the works of the A-63 highway, between Cornellana and Salas, have been practically interrupted. The excavations then initiated remain open and, in most of them, there has not been time to implement stabilization treatments that had been raised at the beginning of the works. We must say that after these almost seven years, the current slopes present phenomena of superficial/deep instability of different pathology that should be considered in the coming months when the works are restarted. To plan the continuation of the excavation of a cut in which the slopes have been open for so long and the equipment was removed, it is necessary to establish the techniques and methodology of their excavation. Therefore, Dragados wanted an investigation on this aspect, so that the most appropriate excavation technique could be known. A campaign to collect geomechanical data on the open excavation fronts has been carried out with which the excavability indexes [proposed by Bieniawski (1989) and Barton et al (1974), Kirsten (1982), Weaver (1989), Abdul Latif and Cruden (1983), and by Franklin et al (1971)] have been established. In addition, the rippability tables suggested by Caterpillar and Komatsu have been handled based on the propagation velocities of waves resulting from various seismic refraction geophysics campaigns. Correction factors must be applied to these indices, depending on the homogeneity of the lithologies, the mobility and accessibility of the equipment and the reuse of the material in compacted fillings.

1. GENERAL

En 2010 y 2011 se estuvo investigando en la autovía A-63, entre Cornellana y Salas, acerca de la estabilidad y tratamientos de muchos de los desmontes entonces parcialmente abiertos. En los más de 7 años transcurridos desde entonces, las obras han estado prácticamente interrumpidas. Los desmontes entonces iniciados permanecen abiertos y, en casi ninguno, dio tiempo a poner en práctica los tratamientos recomendados.

Debemos decir que, transcurridos estos más de cuatro años, los taludes de desmonte actuales presentan numerosos fenómenos de inestabilidad superficial o profunda causados por varias razones, entre ellas la de no realización de los tratamientos de estabilización y, fundamentalmente, la entrada de agua de lluvia o de escorrentía por la ladera, taludes y berma de coronación.

Dragados, S.A., adjudicataria de las obras de este tramo, pretende reiniciarlas y ha desarrollado una Investigación acerca de la calificación que puede estimarse sobre las técnicas y criterios de excavar los desmontes de la autovía, teniendo en cuenta el estado de apertura parcial de la mayor parte de ellos.

No es lo mismo la excavación de un desmonte desde cero que hacerlo cuando se ha excavado una parte del mismo, a veces importante, cuando la morfología de lo existente ha evolucionado en los últimos años y cuando los equipos se retiraron en este período de inactividad.

Además, Dragados tiene especial interés en conocer la herramienta de excavación más apropiada para, después, poder plainificar la reutilización y puesta en obra del material como relleno, bien pedraplén o todo uno.

Debe decirse que la existencia de los frentes abiertos supone una ventaja para poder tomar datos geomecánicos del macizo rocoso, cosa que antes del inicio de las obras no se podía llevar a cabo por la intensa vegetación y por la meteorización que ocultaba el sustrato de roca.

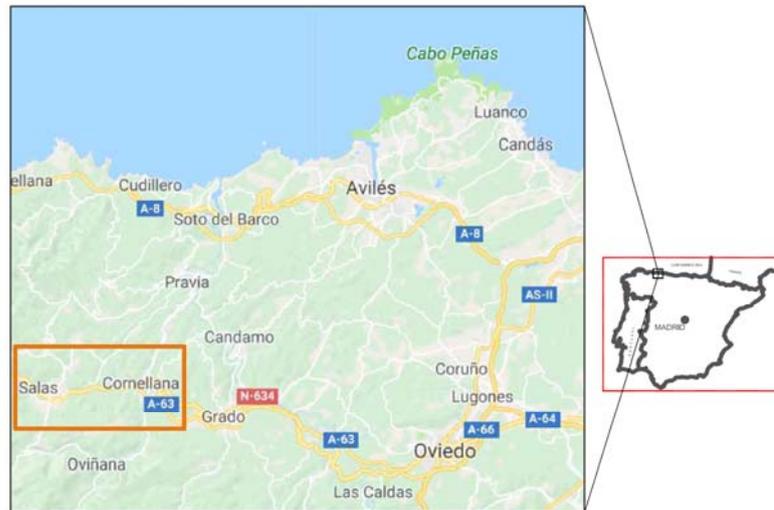


Figura 1: Situación del tramo de autovía

2. ENTORNO GEOLÓGICO

La mayor parte de los desmontes se excavan en la serie turbidítica del Carbonífero superior y del Devónico constituida por una alternancia rítmica de areniscas, pizarras y, en alguna ocasión, calizas.

En general la estructura presenta alineaciones Norte-Sur con las capas buzando hacia el Este, salvo algunos pliegues en uno de los desmontes. La autovía tiene una planta con distinta curvatura de forma que los taludes cortan normal u oblicuamente a las capas.

Las potencias de capas son desde milimétricas a centimétricas, en los niveles pizarrosos, o desde centimétricas hasta varios decímetros en los niveles areniscosos y calcáreos.

3. CRITERIOS DE EXCAVABILIDAD

Se han usado los criterios o clasificaciones siguientes:

- **Bieniawski (1989) y Barton et al (1974)** que combinadas son usadas por otros autores.
- **Kirsten (1982)** que define un índice N en función de la resistencia a la compresión simple, del RQD, del nº de juntas y de su rugosidad, y de la dirección de ripado. Nótese que usa los factores de Barton et al.
- **Weaver (1989)** que parte de los factores de Bieniawski y da un índice que asocia a una determinada potencia de tractor para ripar.
- **Abdul Latif y Cruden (1983)** que correlacionan los índices RMR de Bieniawski y Q de Barton.
- **Franklin (1971)** que parte de la resistencia a la compresión simple y de la fracturación.

Hay más clasificaciones como la de **Hadjigeorgiou y Scoble (1990)**, la de **Singh, R.N. y Denby (1989)** o la de **Pettifer and Fookes (1994)**, pero en esta investigación no pretendíamos hacer una tesis doctoral al respecto.

Además se ha revisado la geofísica sísmica por refracción que se hizo antes de abrir las excavaciones actuales y se han usado las tablas de ripabilidad de **Caterpillar (2000)** y de **Komatsu (2013)** para tractores de similar potencia al ripper.

Para la aplicación de estos criterios se ha realizado un minucioso trabajo de campo, levantando estaciones geomecánicas en los frentes abiertos en los que se han tomado datos como los que se muestran en la figura siguiente.

IV INTERNATIONAL SEMINAR: EARTHWORKS IN EUROPE

DPTO. INGENIERÍA Y MORFOLOGÍA DEL TERRENO

DATOS GENERALES ESTACIÓN GEOMECÁNICA	
PROYECTO:	
DESIGNACIÓN EST. GEOM.	COORDENADAS
SITUACIÓN	X
FECHA:	Y
REALIZADO POR:	Z

Circula de la zona, corte geológico, observaciones... etc.

LITOLOGÍA	RESISTENCIA (Mpa) (SRM, 1981) (4)				TIPO DE PLANO		CARACTERIZACIÓN DE LAS JUNTAS Y DISCONTINUIDADES DEL MACIZO ROCOSO										AGUA - HUMEDAD								
	1	2	3	4	1	2	ESPACIADO (mm) (RMR, 1989)					CONTINUIDAD (m) (RMR, 1989)					ABERTURA (RMR 1989)		RUGOSIDAD (RMR 1989)		RELLENO (RMR 1989)		ALTERACIÓN PARED (RMR 1989)		HUMEDAD (%) (Barnavski, 1989)
1	1	1	1	1	1	1	[Grid with 'X' marks]					[Grid with 'X' marks]					[Grid with 'X' marks]		[Grid with 'X' marks]		[Grid with 'X' marks]				
2	1	1	1	1	1	1	[Grid with 'X' marks]					[Grid with 'X' marks]					[Grid with 'X' marks]		[Grid with 'X' marks]		[Grid with 'X' marks]				
3	1	1	1	1	1	1	[Grid with 'X' marks]					[Grid with 'X' marks]					[Grid with 'X' marks]		[Grid with 'X' marks]		[Grid with 'X' marks]				
4	1	1	1	1	1	1	[Grid with 'X' marks]					[Grid with 'X' marks]					[Grid with 'X' marks]		[Grid with 'X' marks]		[Grid with 'X' marks]				
5	1	1	1	1	1	1	[Grid with 'X' marks]					[Grid with 'X' marks]					[Grid with 'X' marks]		[Grid with 'X' marks]		[Grid with 'X' marks]				

Figura 2: Impreso usado en campo para la toma de datos geomecánicos

3.1 Criterio de Kirsten (1982)

Kirsten propuso un sistema de clasificación para excavaciones a través de un índice de excavabilidad N dado por la expresión

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

donde:

M_s = Número de resistencia de la matriz rocosa. Se aproxima con la resistencia a la compresión uniaxial (MPa).

RQD = Rock Quality Designation (%).

J_n, J_r = Parámetros del sistema de clasificación Q de Barton.

J_s = Número que representa la orientación relativa de los bloques individuales respecto de la dirección de ripado. Para material intacto $J_s = 1,0$.

J_α = Factor de alteración de la junta.

Kirsten sugiere la forma de llegar a los distintos parámetros de su expresión con distintas tablas que no exponemos aquí.

El índice de excavabilidad N obtenido a partir de la ecuación anterior nos permite clasificar la facilidad de excavación de la forma siguiente:

- 1 < N < 10 Fácilmte ripable
- 10 < N < 100 Ripable duro (con cierta dificultad)
- 100 < N < 1000 Ripable muy duro (difícil)
- 1000 < N < 10000 Ripable extremadamente duro (muy difícil) / voladura
- N > 10000 Voladura

IV INTERNATIONAL SEMINAR: EARTHWORKS IN EUROPE

Tabla 1 Sistema de clasificación de la excavabilidad según Kirsten(1982)

Table C1: Definition of eight point excavation classification system for soil, detritus, rock and boulders

Material type	Class	Excavation class boundaries	Description of excavatability	Bulldozer characteristics					Backhoe characteristics			
				Type	Operating mass ¹ (Kg)	Flywheel power (kW)	Drawbar pull ¹ (Kn)		Type	Operating mass ¹ (kg)	Flywheel power	Max draw bar pull (kN)
							Stalling speed	1,6 km/h				
Soil/ Detritus	1	Less than 0.01	Hand spade	D3	6340	46	151	65				
	2	0.01-0.0999	Hand pick and spade	D4E/D5B	8820/11700	56/78	165/202	77/110	Cat 215 ²	17282	63	132
	3	0.1-0.999	Power tools	D6D	14270	104	250	147	Cat 225	23405	101	163
Rock	4	1.0-9.99	Easy ripping	D7G	20230	149	376	220	Cat 235	38297	145	263
	5	10.0-99.9	Hard ripping	D8K	31980	224	500	323	Cat 245	59330	242	472
	6	100.0-999	Very hard ripping	D9H	42780	306	667	445	RH 40	83200	360	—
	7	1 000.0-9 999	Extremely hard ripping/blasting	D10	77870	522	1230	778	—	—	—	—
	8	Larger than 10,000	Blasting	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Note: 1. Quoted in Caterpillar Performance Handbook², or equivalent
 2. All machines referred to are track mounted

3.2 Criterio de Weaver (1989)

Weaver publicó en 1975 una clasificación de la ripabilidad a partir del índice de Bieniawski de 1973 que puede verse en la tabla siguiente

Tabla 2. Carta de ripabilidad de Weaver(1975) tomada de Clark (1996)

Rock Class	I	II	III	IV	V
Description	Very good rock	Good rock	Fair rock	Poor rock	Very poor rock
Seismic velocity (ms ⁻¹)	> 2 150	2 150 - 1 850	1 850 - 1 500	1 500 - 1 200	1 200 - 450
Rating	26	24	20	12	5
Rock hardness	Extremely hard rock	Very hard rock	Hard rock	Soft rock	Very soft rock
Rating	10	5	2	1	0
Rock weathering	Unweathered	Slightly weathered	Weathered	Highly weathered	Completely weathered
Rating	9	7	5	3	1
Joint spacing (mm)	> 3 000	3 000 - 1 000	1 000 - 300	300 - 50	< 50
Rating	30	25	20	10	5
Joint continuity	Noncontinuous	Slightly continuous	Continuous No gouge	Continuous Some gouge	Continuous With gouge
Rating	5	5	3	0	0
Joint gouge	No separation	Slight separation	Separation <1 mm	Gouge < 5 mm	Gouge > 5 mm
Rating	5	5	4	3	1
Strike and dip orientation ¹	Very unfavourable	Unfavourable	Slightly unfavourable	Favourable	Very favourable
Rating	15	13	10	5	3
Total Rating	90 - 100	70 - 90 ²	50-70	25-50	< 25
Rippability assessment	Blasting	Extremely hard ripping and blasting	Very hard ripping	Hard ripping	Easy ripping
Tractor selection	-	D9G/DD9G	D8/D9	D7/D8	D7
Horsepower	-	385/770	270/385	180/270	180
Kilowatts	-	290/575	200/290	135/200	135

¹ The RMR discontinuity orientation now revised for rippability assessment.

² Ratings in excess of 75 should be regarded as unrippable without pre-blasting.

Posteriormente, se publicó en 1989 la carta anterior modificada a partir de la clasificación de Bieniawski de 1983. Es la de la tabla siguiente.

IV INTERNATIONAL SEMINAR: EARTHWORKS IN EUROPE

Tabla 3. Carta de ripabilidad modificada de Weaver(1989) tomada de Clark (1996)

A: Classification parameters and their ratings

Parameter		Ranges of values							
1	Seismic velocity (ms^{-1})	> 2 500	2 100 - 2 500	1 800 - 2 100	1 500 - 1 800	< 1 500			
	Rating	35	27	20	12	3			
2	Strength of intact rock material	Point load strength index (kN/m^2)	> 10	4 - 10	2 - 4	1 - 2	For this low range, UCS is preferred		
		Uniaxial compressive strength (UCS, MPa)	> 250	100 - 250	50 - 100	25 - 50	5-25	1 - 5	<1
	Rating	15	12	7	4	2	1	0	
3	Spacing of discontinuities (mm)	> 2 000	600 - 2 000	200 - 600	60 - 200	< 60			
	Rating	20	15	10	8	5			
4	Condition of discontinuities	See below for detailed description							
	Rating	30	25	20	10	5			

B: Rating classification for discontinuity conditions

Parameter		Ranges of values				
Length (persistence/continuity)		< 1 m	1 - 3 m	3 - 10 m	10 - 20 m	> 20 m
	Rating	6	4	3	1	0
Separation		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	Slickensided
	Rating	6	5	3	1	0
Infilling		None	Hard filling		Soft filling	
	Rating	6	< 5 mm	> 5 mm	< 5 mm	> 5 mm
Weathering		Unweathered	Slightly weathered	Moderately weathered	Highly weathered	Extremely weathered
	Rating	6	5	3	1	0

C: Rating adjustment for discontinuity orientations

Parameter		Ranges of values				
5	Strike and dip orientations of discontinuities	Very unfavourable	Unfavourable	Fair	Favourable	Very Favourable
	Rating	0	-2	-5	-10	-12

D: Rock mass classes and rippability assessment

Combined Rating	81 - 100	61 - 80	41 - 60	21 - 40	< 20
Class Number	I	II	III	IV	V
Description	Very good rock	Good rock	Fair rock	Poor rock	Very poor rock
Rippability assessment	Extremely hard ripping / blasting	Very hard ripping	Hard ripping	Moderately hard ripping	Easy ripping

3.3 Criterio de Abdul Latif y Cruden (1983)

Estos autores encontraron una buena correlación entre los índices de Bieniawski (RMR) y de Barton (Q) junto con la facilidad de excavación en canteras inglesas.

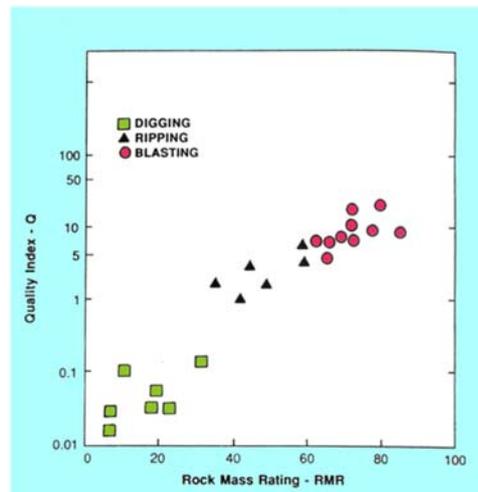


Figura 3. Criterio de excavabilidad según Abdul Latif y Cruden (1983)

3.4 Criterio de Franklin et al (1971)

Se esquematiza en las figuras siguientes:

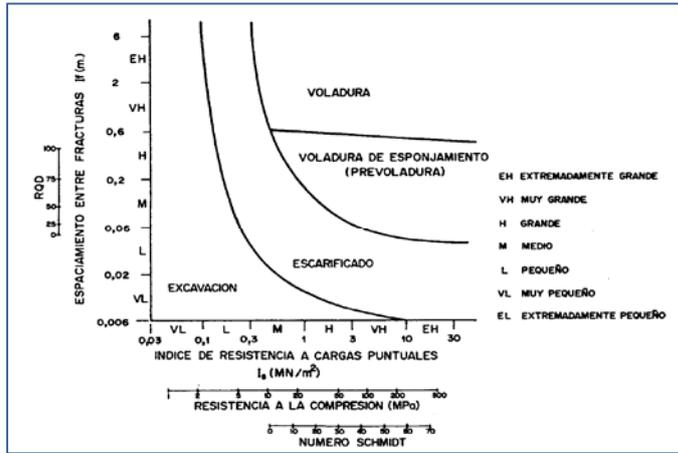
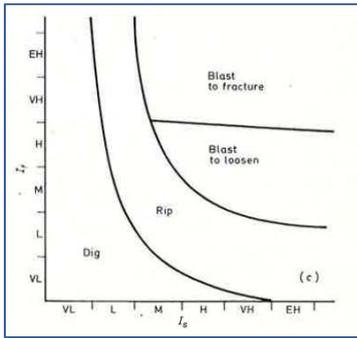


Figura 4 (izquierda). Criterio de excavabilidad según Franklin et al (1971).

Figura 5 (derecha). Criterio de excavabilidad según Franklin et al (1971) traducido y ampliado por García V. (2004)

3.5 Criterios de ripabilidad según Caterpillar y Komatsu

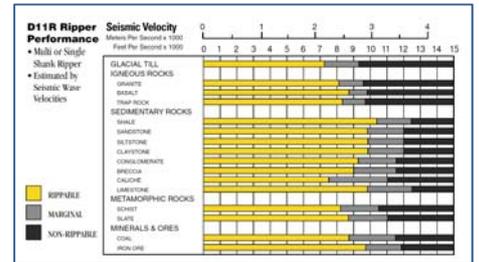
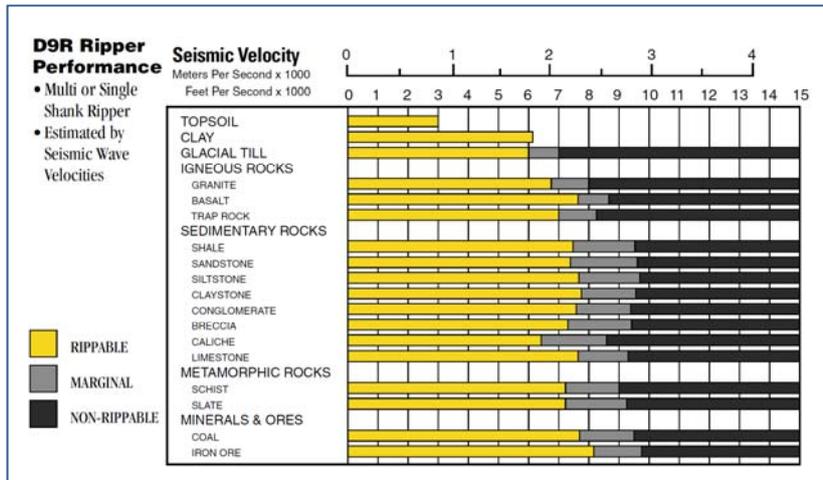


Figura 6. Criterio de ripabilidad según Caterpillar (2000) para un D9R y para un D11R

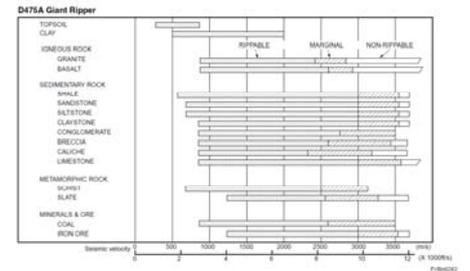
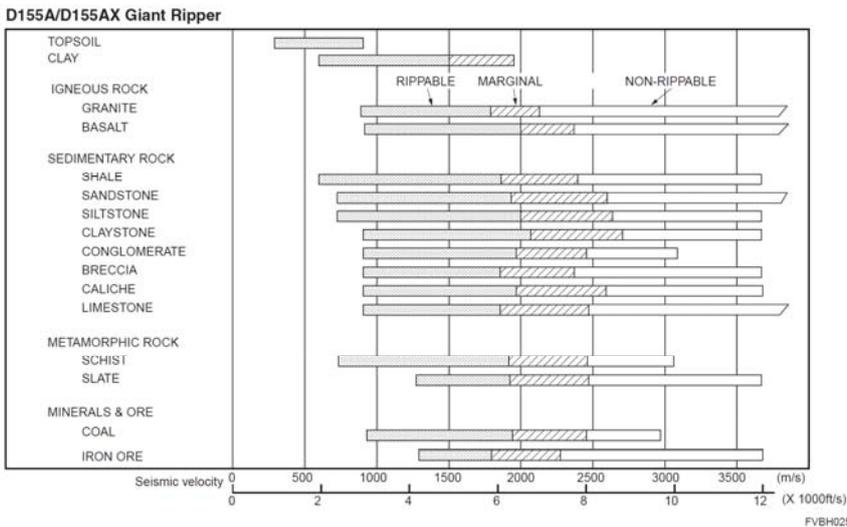


Figura 7. Criterio de ripabilidad según Komatsu (2013) para un D155A y para un D475A

4. DESMONTES ANALIZADOS

4.1 Desmante 5

De la geofísica se obtienen las secciones de las figuras 8 y 9 en las que se ha representado la sección teórica de proyecto y la sección excavada actualmente. Se indican además las áreas que corresponden a los distintos grados de excavabilidad según la geofísica sísmica y el valor de sus superficies para que, junto con la escala, el lector pueda tener una idea de las dimensiones de la obra en este punto.

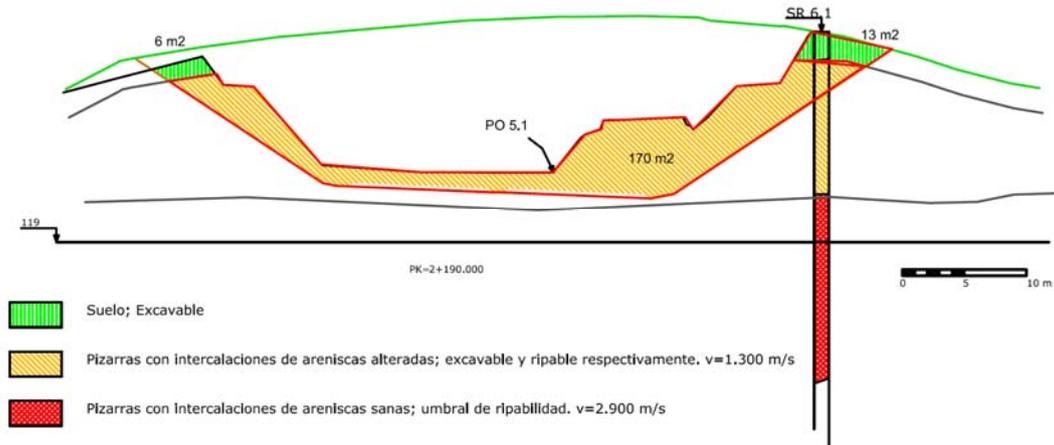


Figura 8. Excavabilidad deducida de la geofísica en el PK 2+190.

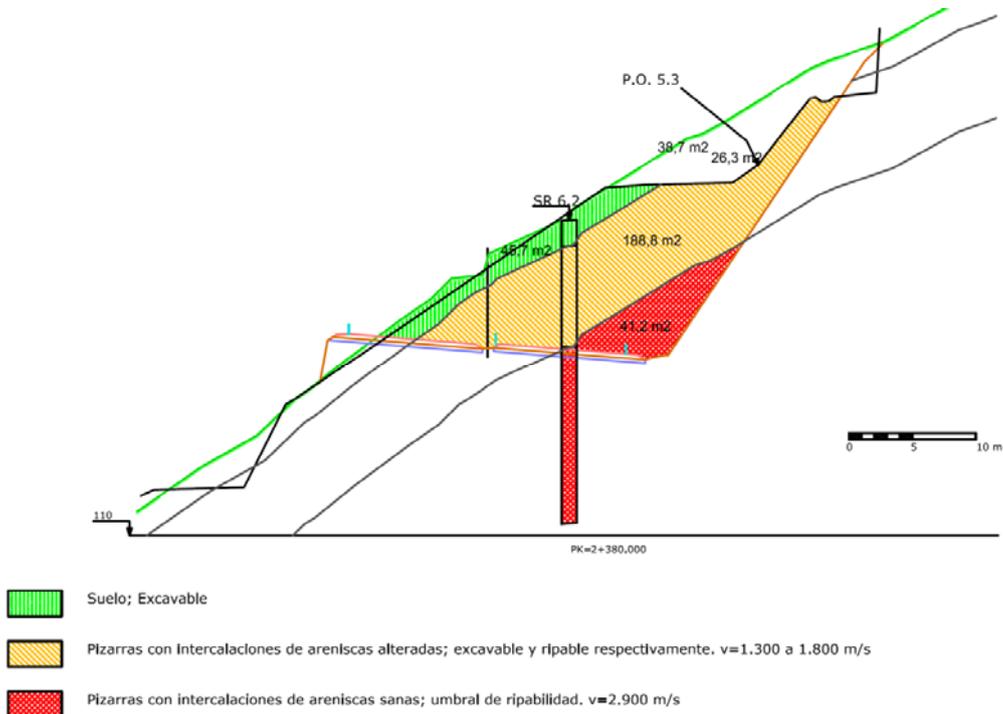


Figura 9. Excavabilidad deducida de la geofísica en el PK 2+380.

Hemos llamado "Puntos de Observación (PO)" a aquellos donde se han levantado estaciones geomecánicas para el establecimiento de los índices de excavabilidad. En los puntos de observación PO 5,1, 2 y 3 de este desmante los datos tomados han conducido a los siguientes índices de Excavabilidad:

IV INTERNATIONAL SEMINAR: EARTHWORKS IN EUROPE

Tabla 4 Excavabilidad deducida de los índices de excavabilidad

	Bieniawski 1989	Barton, 1974	Kirsten, 1982		Weaver, 1989	Abdul Latif y Cruden, 1983	Franklin, 1971
DESMONTE	RMR	Q	N		IW	I AC	IF
5.1a) P.K 2+150 a 2+260	48	4	37	Rip.moderada D7/D8. HP>250	19-Ripable facil	Ripable	Excavacion mecanica ligera
5.1b) P.K 2+150 a 2+260	53	9	75	Rip.moderada D7/D8. HP>250	21-Ripable	Ripable	Excavacion mecanica ligera
5.2) P.K 2+260 a 2+360	52	3	11	Rip.moderada D7/D8. HP>250	19-Ripable facil	Ripable	Excavacion mecanica ligera
5.3a) P.K 2+360 a 2+410	65	10	86	Rip.moderada D7/D8. HP>250	38-Ripable	Ripable	Ripable
5.3b) P.K 2+360 a 2+410	67	10	86	Rip.moderada D7/D8. HP>250	42-Ripable duro	Voladura	Ripable
5.3c) P.K 2+360 a 2+410	54	10	86	Rip.moderada D7/D8. HP>250	25-Ripable	Ripable	Ripable
5.3d) P.K 2+360 a 2+410	56	10	86	Rip.moderada D7/D8. HP>250	27-Ripable	Ripable	Ripable



Foto 1: Alternancia de areniscas con lutitas pizarrosas en el PK 2+380 en el nivel considerado como ripable duro.

4.2 Desmonte 5

De la geofísica se obtienen las secciones de las figuras 10 y 11.

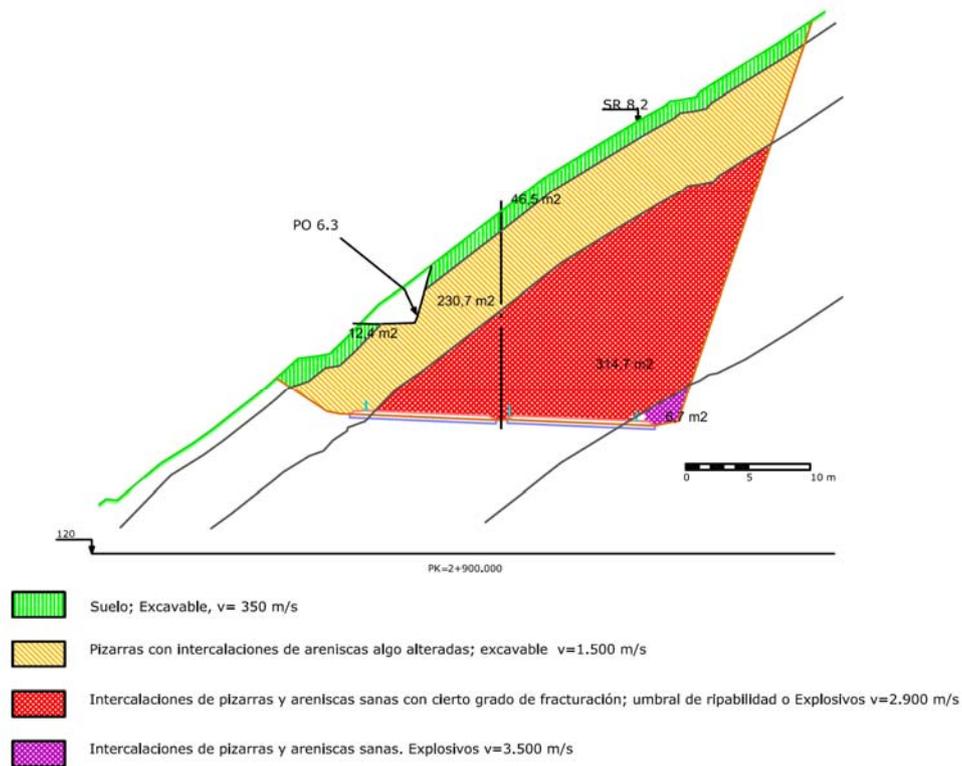


Figura 10. Excavabilidad deducida de la geofísica en el PK 2+900.

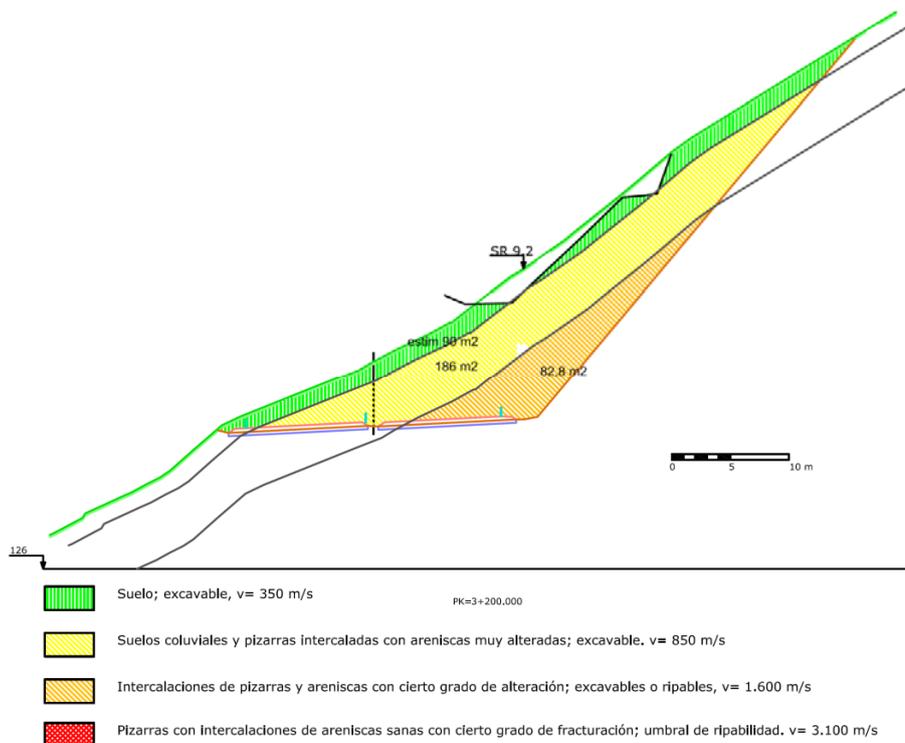


Figura 11. Excavabilidad deducida de la geofísica en el PK 3+200.

IV INTERNATIONAL SEMINAR: EARTHWORKS IN EUROPE

En los Puntos de Observación PO 6.1, 2, 3 y 4 se han tomado datos que han conducido a los siguientes índices de Excavabilidad, todos ellos referidos a los taludes del camino de obra que es lo único que se ha excavado en este desmonte:

Tabla 5 Excavabilidad deducida de los índices de excavabilidad

	Bieniawski 1989	Barton, 1974	Kirsten, 1982		Weaver, 1989	Abdul Latif y Cruden, 1983	Franklin, 1971
DESMONTE	RMR	Q	N		IW	I AC	IF
6.1) P.K 2+620 a 2+700	56	10	86	Rip.moderada D7/D8. HP>250	25-Ripable	Ripable	Ripable
6.2) P.K 2+720 a 2+830	56	10	86	Rip.moderada D7/D8. HP>250	22-Ripable	Ripable	Ripable

4.3 Desmonte D-8

De la geofísica se obtienen la sección de la figura 12.

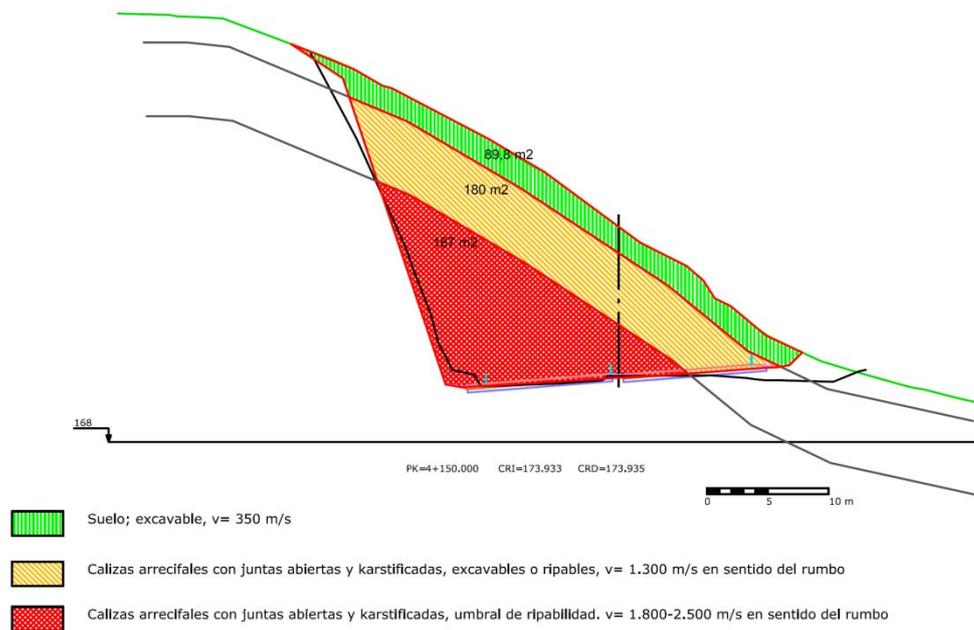


Figura 12. Excavabilidad deducida de la geofísica en el PK 4+150

En los Puntos de Observación PO 8.a y 8.b ambos en el PK 4+150 se han tomado datos que han conducido a los siguientes índices de Excavabilidad:

IV INTERNATIONAL SEMINAR: EARTHWORKS IN EUROPE

Tabla 6 Excavabilidad deducida de los índices de excavabilidad

	Bieniawski, 1989	Barton, 1974	Kirsten, 1982		Weaver, 1989	Abdul Latif y Cruden, 1983	Franklin, 1971
DESMONTE	RMR	Q	N		IW	IAC	IF
8a)	66	30	2813	Rip. extr. costosa D10/D11. HP>500, o explosivos	63-Ripable muy duro	Voladura	Prevoladura
8b)	62	30	2813	Rip. extr. costosa D10/D11. HP>500, o explosivos	58-Ripable duro	Ripable	Prevoladura

Es probablemente el desmonte de estructura más complicada de interpretar. Se produce en las denominadas "calizas de Candás" constituidas por calizas arrecifales de color grisáceo con frecuentes juntas en las que existe una pátina rojiza de meteorización que da un tono rojizo a todo el paramento excavado. Existen zonas en las que la karstificación ha dejado juntas abiertas que individualizan bloques del macizo.

El desmonte se encuentra totalmente excavado y la foto 2 ilustra la naturaleza y estado de la primera mitad del desmonte.



Foto 2. Calizas rojizas con karstificación en la primera mitad del desmonte D-8

En estas calizas, los índices de excavabilidad apreciados por nosotros hablan mayoritariamente de excavación con explosivos y aunque no se han podido tomar datos fidedignos en la parte superior, opinamos que los explosivos son necesarios desde muy cerca de la superficie por lo que la celeridad sísmica menor de 1.300 m/s en los primeros 8 metros no es representativa de la excavabilidad. Es posible que las oquedades del karst hayan sido la causa.

4.4 Desmonte D-11

La investigación se ha centrado en una zona donde abundan las areniscas sobre las lutitas y llegan a tener un grado de cementación que prácticamente podrían ser calcarenitas. Una sección representativa es la de la figura 13

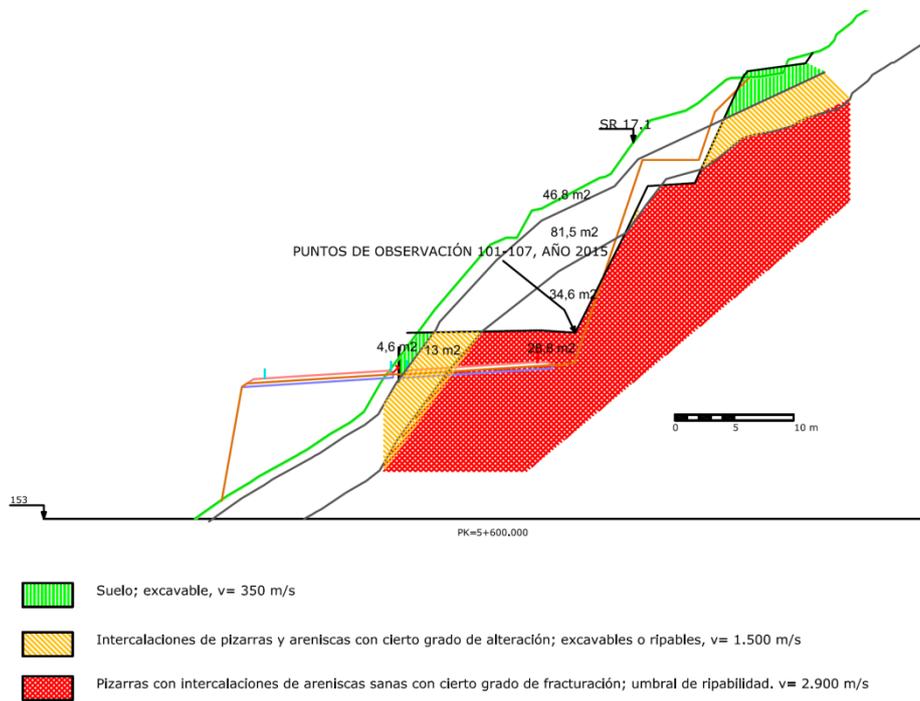


Figura 13. Excavabilidad deducida de la geofísica en el PK 5+600.

En este desmonte se han tomado numerosos puntos de observación PO que han permitido dar los índices de excavabilidad de la tabla 7. Prácticamente todos los índices contemplan un grado de excavación con explosivos.



Fotos 3 y 4. Desmonte D-11 en su PK 5+570. Panorámica y detalle ampliado del extremo izquierdo de la foto.

Las discrepancias podrían considerarse importantes. Todo radica en el espesor de los niveles compactos areniscos. La foto 3 en el PK 5+570 es claramente significativa. Puede haber niveles con cierta predominancia de lutitas pizarrosas pero basta que se intercalen niveles areniscos no ripables, y que necesiten voladuras, para que todo el desmonte deba ser considerado como no ripable. Véanse las cañas en el detalle de la foto 4.

La foto 5, entre los PK 5+590 y 5+680 es aún más significativa de la excavabilidad con explosivos.

IV INTERNATIONAL SEMINAR: EARTHWORKS IN EUROPE

Tabla 7. Excavabilidad deducida de los índices de excavabilidad en los PO del desmonte D-11

	Bienawski 1989	Barton, 1974	Kirsten, 1982		Weaver, 1989	Abdul Latif y Cruden, 1983	Franklin, 1971
DESMONTE	RMR	Q	N		IW	IAC	IF
11.1a) P.K 5+410	72	30	3878	Rip. extr. costosa D10/D11. HP>500, o explosivos	60-Ripable duro	Voladura	Prevoladura
11.1b) P.K 5+410	61	30	3878	Rip. extr. costosa D10/D11. HP>500, o explosivos	49-Ripable duro	Ripable	Prevoladura
11.1c) P.K 5+410	74	30	3878	Rip. extr. costosa D10/D11. HP>500, o explosivos	62-Ripable muy duro	Voladura	Prevoladura
11.1d) P.K 5+410	63	30	3878	Rip. extr. costosa D10/D11. HP>500, o explosivos	51-Ripable duro	Ripable	Prevoladura
11.2) P.K 5+415 (3 m)	34	7	26	Rip.moderada D7/D8. HP>250	12-Ripable facil	Excavacion mecanica ligera	Excavacion mecanica ligera
11.3a) P.K 5+430 (3 m)	72	30	3878	Rip. extr. costosa D10/D11. HP>500, o explosivos	60-Ripable duro	Voladura	Prevoladura
11.3b) P.K 5+430 (3 m)	61	30	3878	Rip. extr. costosa D10/D11. HP>500, o explosivos	49-Ripable duro	Ripable	Prevoladura
11.3c) P.K 5+430 (3 m)	74	30	3878	Rip. extr. costosa D10/D11. HP>500, o explosivos	62-Ripable muy duro	Voladura	Prevoladura
11.3d) P.K 5+430 (3 m)	63	30	3878	Rip. extr. costosa D10/D11. HP>500, o explosivos	51-Ripable duro	Ripable	Prevoladura
11.4) P.K 5+430 a 5+480	34	7	26	Rip.moderada D7/D8. HP>250	12-Ripable facil	Excavacion mecanica ligera	Excavacion mecanica ligera
11.5a) P.K 5+480 a 5+600	72	30	3878	Rip. extr. costosa D10/D11. HP>500, o explosivos	60-Ripable duro	Voladura	Prevoladura
11.5b) P.K 5+480 a 5+600	61	30	3878	Rip. extr. costosa D10/D11. HP>500, o explosivos	49-Ripable duro	Ripable	Prevoladura
11.5c) P.K 5+480 a 5+600	74	30	3878	Rip. extr. costosa D10/D11. HP>500, o explosivos	62-Ripable muy duro	Voladura	Prevoladura
11.5d) P.K 5+480 a 5+600	63	30	3878	Rip. extr. costosa D10/D11. HP>500, o explosivos	51-Ripable duro	Ripable	Prevoladura
11.6) P.K 5+600 a 5+620	39	7	64	Rip.moderada D7/D8. HP>250	16-Ripable facil	Excavacion mecanica ligera	Excavacion mecanica ligera
11.7) P.K 5+620 a 5+640	68	20	1225	Rip. extr. costosa D10/D11. HP>500, o explosivos	41-Ripable duro	Voladura	Prevoladura
11.8) P.K 5+640 a 5+680	78	15	919	Rip. costosa D8/D9. HP>350	51-Ripable duro	Voladura	Prevoladura
11.9) P.K 5+680 (2 m)	66	30	1810	Rip. extr. costosa D10/D11. HP>500, o explosivos	32-Ripable	Ripable	Ripable
11.10) P.K 5+680 a 5+695	46	10	257	Rip. costosa D8/D9. HP>350	32-Ripable	Ripable	Excavacion mecanica ligera
11.11) P.K 5+695 a 5+700	66	3	905	Rip. costosa D8/D9. HP>350	39-Ripable	Ripable	Ripable



Foto 5. Desmante D-11 en su PK 5+650.

4.5 Conclusiones de la comparación de criterios

En los tres casos que hemos expuesto en este documento, puede decirse que existe una buena correlación entre los distintos criterios de excavabilidad, tanto entre los sugeridos por los autores elegidos, como si los comparamos con las sugerencias de los dos fabricantes de tractores.

Por ello, parece recomendable el uso de estos criterios cuando estamos estudiando la excavabilidad de un macizo rocoso, bien entendido que existan buenos afloramientos rocosos, que los perfiles sísmicos se tomen en la misma alineación y dirección del ataque de los rippers y que haya suficiente espacio para garantizar la eficacia del trabajo de los equipos.

5. FACTORES DE CORRECCIÓN

Creemos que los índices anteriores de excavabilidad deben ser tomados a efectos comparativos entre macizos rocosos pero, si se quieren aplicar a determinar el grado de excavabilidad específico para una excavación determinada y, aún mas, si de ellos depende que se fije un precio de excavación generalmente asociado a su posterior reutilización en un relleno, hay que establecer unos factores de corrección.

5.1 Factor homogeneidad

Cuando se determinan los índices de excavabilidad tomamos datos de determinados afloramientos rocosos que creemos representativos e, inconscientemente, aplicamos unos valores promedios a todo el macizo rocoso. Lo mismo ocurre con las velocidades de propagación de las ondas, que nos pueden dar unos promedios de espesores de capas potentes de velocidad alta (en nuestra obra algunas areniscas muy compactas) con velocidades muy bajas de capas muy delgadas (en nuestra obra niveles de 1-2 cm de pizarras). El promedio puede ser una velocidad por debajo de 2.000 m/s. Pero cuando el ripper trabaja, se encuentra con notables dificultades de la movilización de bloques de esas capas potentes. La fotografía 6 es un ejemplo de lo que decimos.



Foto 6. Desmante en capas de areniscas compactas y pizarras. El martillo de geólogo da la escala de tamaños.

IV INTERNATIONAL SEMINAR: EARTHWORKS IN EUROPE

No dudamos de que que el tractor termine ripando el macizo de la fotografía pero a costa de un mayor tiempo y un mayor coste que penaliza el precio del m³ excavado como ripable.

5.2 Factor reutilización

Relacionado con el factor anterior, está el factor del aprovechamiento de los productos de la excavación como ocurre normalmente en las obras viarias de cierta longitud en las que se busca una buena compensación de "tierras" en aras de una mejor economía y, tanto más importante, para disminuir el impacto ambiental de vertederos o canteras.

El relleno que se puede ejecutar con los productos de una excavación con ripper del macizo rocoso de la foto anterior, estará formado por fragmentos de 10 a 50 cm con contactos entre aristas envueltos en una matriz de fragmentos de pizarras y suelo arcilloso, como el de la figura 14. Es un relleno que por mucho que se compacte va a evolucionar en el tiempo con asentamientos importantes.

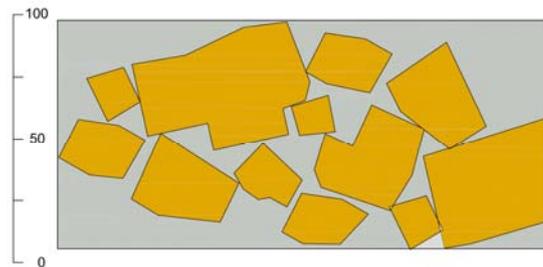


Figura 14. Esquema de relleno con los fragmentos de la foto 6.

Por ello, caben varias opciones:

- Mecanizar el producto excavado, con sucesivas pasadas de los equipos de forma que se troceen los fragmentos grandes, como se ilustra en la foto 7.
- Uso del martillo neumático localmente.
- Programar y ejecutar voladuras específicas para estas alternancias.



Foto 7. Troceando areniscas con la teja del ripper.

En cualquiera de estas opciones, el coste de la excavación es mayor que lo que se deduce de los criterios de excavabilidad.

5.3 Factor movilidad y accesibilidad

Cuando tenemos que trabajar con pendientes tan acusadas como las de este tramo de autovía, la eficacia de los tractores está limitada al espacio de la plataforma en la que pueden trabajar y cuenta con la necesidad de crear accesos a los bancos de trabajo. En la figura 15 hemos dibujado a escala dos tractores D-9R de Caterpillar que muestran las escasas anchuras de las plataformas de trabajo. Si antes hemos hablado de la heterogeneidad a pequeña escala, ahora es la heterogeneidad a una escala mayor de diferentes capas, que hace también mermar la eficacia del ripado.

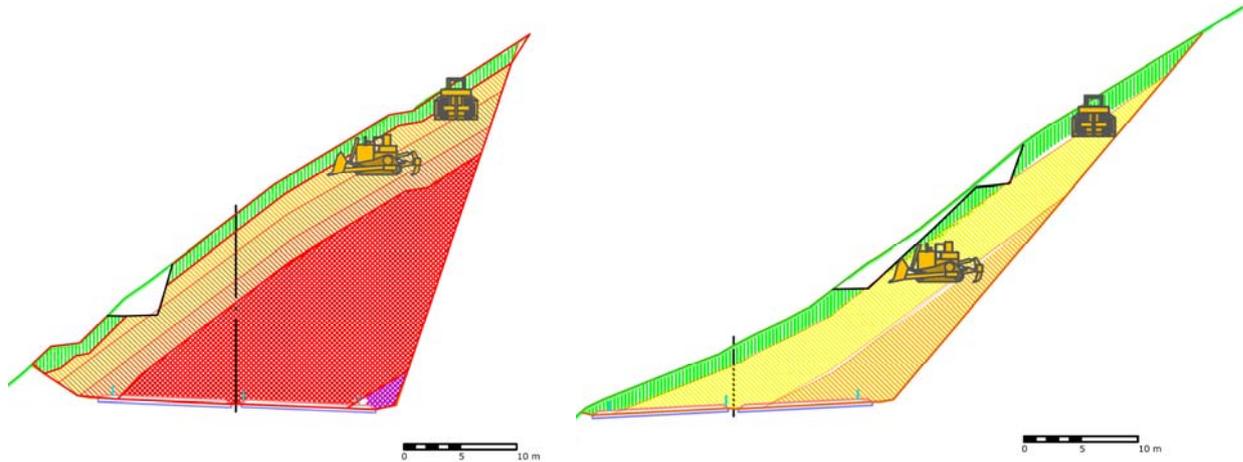


Figura 15. Secciones representativas de las dificultades de trabajo del ripper.

5.4 Conclusión

Es claro que, si bien los índices de excavabilidad de nuestros macizos rocosos daban ciertos espesores de terreno ripable, cuando les aplicamos estos factores de corrección se llega a una calificación que debería llamarse de "eficazmente ripable", mucho más circunscrita a espesores menores.

Esta afirmación encaja con los datos del movimiento de tierras ejecutado hasta la fecha.

Por ello, en estos desmontes "teóricamente ripables" habrá que ir a un uso importante de un martillo neumático e, incluso, a voladuras.

6. RESUMEN Y CONCLUSIONES

Se ha analizado la excavabilidad de los desmontes de la autovía usando criterios publicados por distintos autores y contrastándolos con el criterio de ripabilidad a partir de la geofísica sísmica. Hemos visto que existe una buena concordancia entre todos estos criterios.

Sin embargo, estos criterios se corresponden con macizos homogéneos en todo el espesor de capas y en topografías sin pendientes muy acusadas. Cuando no sea así, como es nuestro caso, creemos que es necesario aplicar unos factores de corrección para llegar a índices de excavabilidad eficaces sobre todo si queremos asociar los índices a precios unitarios de excavación.

Referencias bibliográficas (en alguna de ellas se incluye la página web donde puede bajarse dicha referencia)

ABDUL LATIF, O.M. & CRUDEN, D.M. (1983). *The relationship between rock mass quality and ease of excavation*. Bulletin Int. Assoc. Eng. Geol., 28: 183-187.

ATLAS COPCO. (1984): "*Manual Atlas Copco*". Cuarta edición.

BARTON, N.R., LIEN, R. & LUNDE, J. 1974. *Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support*. Rock Mech. 6(4), 189-239

https://www.researchgate.net/publication/226039636_Engineering_Classification_of_Rock_Masses_for_the_Design_of_Tunnel_Support

IV INTERNATIONAL SEMINAR: EARTHWORKS IN EUROPE

https://www.rocscience.com/documents/hoek/corner/04_Rock_mass_classification.pdf

BIENIAWSKI, Z.T. (1973), *Engineering classification of jointed rock masses*. Trans SA Instn of Civ Engrs, Vol 1 5, No 12, pp 335 - 344. (https://journals.co.za/content/civeng/15/12/AJA10212019_17397)

BIENIAWSKI, Z.T. (1989). *Engineering Rock Mass Classifications*. Wiley, New York, p. 238.
https://www.rocscience.com/documents/hoek/corner/04_Rock_mass_classification.pdf

CATERPILLAR (2000). *Handbook of Ripping*. 12th edition. Peoria, Illinois.
(http://www.dot.ca.gov/hq/esc/geotech/references/Rock_Cut_Slope_References/31_Handbook_of_Ripping_Caterpillar.pdf)

CLARK, P.B. (1996). *Rock mass and rippability evaluation for a proposed open pit mine at Globe-Progress near Reefton A*. University of Cambridge. (<https://ir.canterbury.ac.nz/handle/10092/9361>)

DRAGADOS (2004). *Secciones transversales de la obra ejecutada*. Autovía A-63 de Oviedo-La Espina. Tramo Cornellana-Salas

FRANKLIN, J.A., BRANCH, E. & WALTON, G. (1971): *Logging the mechanical character of rock*. Transactions of the Mining and Metallurgy, volumen 80A, pages 1-9. (http://www.rockmass.no/filer/Broch-et-al_Logging_rocks.pdf)

GARCÍA V, G. (2004), *Análisis de factibilidad de excavación mecánica como alternativa al método convencional. Túnel Corral de Piedras de la línea de Metro "Las Adjuntas- Los Teques"*. Trabajo especial de Grado. Universidad Central de Venezuela.
(<file:///C:/Users/user/Downloads/Analisis%20de%20Factibilidad%20de%20Excavaci%C3%B3n%20Mecanica%20como%20Altern.pdf>)

HADJIGEORGIOU, J & SCOBLE, M. (1990), *Ground Characterization for assessment of ease of excavation*. Mine Planning and equipment Selection. Calgary, Canadá.

KIRSTEN, H.A.D. (1982). *A classification system for excavation in natural materials*. The Civil Engineer in South Africa, 24, 293-308.
(https://journals.co.za/content/civeng/24/7/AJA10212019_15379)

KOMATSU (2013). *Specifications and Application Handbook*. Edition 31. (<https://www.directminingservices.com/performance-handbooks/attachment/edition31>)

OCSA & IBERINSA (2004-2006). *Estudio Geofísico con sísmica de refracción para el Proyecto de Trazado y Construcción de la Autovía A-63 de Oviedo-La Espina. Tramo Cornellana-Salas*.

OCSA & AEPO (2000). *Reconocimiento Geofísico con sísmica de refracción. Autovía del Cantábrico. Carretera Nacional 634. Tramo Grado-Salas*.

PETTIFER, G. S. and FOOKES, P. G., (1994), *A Revision of the Graphical Method for Assessing the Excavatability of Rock*, Quarterly Journal of Engineering Geology, Vol. 27, pp. 145 – 164.

ROMAN, F. (2016). *Investigación geotécnica de la excavabilidad de los desmontes para determinar los horizontes de excavabilidad. (Avance y resumen de resultados)*. Autovía A-63, Oviedo – La Espina. Tramo Cornellana-Salas. Fundación Agustín de Betancourt.

SINGH, R. & DENBY, B. (1989): "*Aspects of Ground Preparation by Mechanical Methods in Surface Mining*". Symposium of Surface Mining - Future Concepts. April, Nottingham.

WEAVER, J.M. (1975). *Geological factors significant in the assessment of rippability*. Civil Eng. South Afr., 17(12): 313-316.
(<file:///C:/Users/user/Downloads/15510017012000313.pdf>)