

Aplicación a una cantera de Piedra Bateig.

Limitación de carga operante para voladuras en canteras de roca ornamental

En este artículo, se explica la metodología para la obtención de los criterios de daño para una masa de roca, con valor ornamental, próxima a una zona de voladuras. Al no ser un estudio de vibraciones convencional, sujeto a la normativa, se desarrolla un procedimiento adaptado al problema planteado. El interés, además, se centra en que se utilizan técnicas de la mecánica de rocas, de la geofísica sísmica y de control de vibraciones.

Palabras clave: AMORTIGUACIÓN, CANTERA, CARGA, DESMONTE, EXPLOSIVO, MONTERA, PROPAGACIÓN, ROCA ORNAMENTAL, VELOCIDAD, VIBRACIÓN, VOLADURA.



Emilio TRIGUEROS TORNERO.
U.P. DE CARTAGENA. Dpto. Ing. Minera
Juan MARTÍNEZ MARTÍNEZ.
U.P. DE CARTAGENA. Dpto. Ing. Minera

En las canteras de roca ornamental se suelen realizar voladuras para eliminar zonas de montera, más alterada y clasificada, o incluso, otras zonas en la que la piedra no tiene calidad a causa de manchas y variaciones de color. Estas voladuras se realizan habitualmente con pequeñas cantidades de explosivo y cortando con hilo una superficie inferior, para generar un plano, al que se denomina *levante*, que impida la propagación de la onda de choque y, con ello, evitar el daño a la roca infrayacente.

Cuando esas voladuras son de mayor importancia, como el caso que traemos aquí, sin que existan superficies de discontinuidad para la onda sísmica, se plantea la necesidad de conocer las cargas explosivas máximas para garantizar que la roca situada a determinada distancia no se verá afectada. La normativa relacionada con las vibraciones, UNE 22.381.93, tiene el objetivo de salvaguardar las estructuras próximas a las voladuras, normalmente en la superficie, por lo que no es aplicable a este tipo de situaciones.

El ejemplo concreto que se resuelve, una vez planteada de forma teórica la metodología, es el de unas voladuras de desmonte en una cantera de la capa de Piedra arenisca *Bateig*, que se encuentra en Novelda (Alicante). Se realizaron todas las pruebas de campo y laboratorio necesarias para disponer del conjunto de datos: Los sondeos para extracción de testigo y la determinación de resistencias y módulos de la roca, la determinación de las

velocidades de propagación con equipo de sísmica de 12 geófonos y el registro de vibraciones para conocer la ley de amortiguación de la zona.

El fenómeno ondulatorio

Se estima que el 40% de la energía liberada por el explosivo en una voladura se invierte en el movimiento ondulatorio provocada por la onda de choque en su recorrido por la masa de roca, es decir, en *vibraciones*. El desplazamiento de las partículas provocado por los frentes de ondas inducen tensiones internas en la matriz de roca que pueden llegar a superar las resistencias elásticas, provocando fisuras. Esto ocurrirá en las zonas más próximas, puesto que las tensiones se van reduciendo con rapidez, según nos alejamos de la fuente de energía, en relación con el inverso de la distancia ($1/D$).

Existen dos razones para la atenuación de la energía sísmica, la *amortiguación geométrica* y la *absorción del medio*. La amortiguación geométrica, ya sea cilíndrico o esférico el frente de ondas, se produce por el aumento continuo de la superficie afectada por éste, lo que requiere el reparto, también continuo, de la energía, entre superficies cada vez mayores.

La segunda atenuación, la absorción de energía por parte del medio propagador, es debida a la fricción interna de las partículas de este, y depende del coeficiente α , que expresa la proporción de energía perdida cada vez que se avanza lo equivalente a una longitud de onda λ . Este coeficiente alcanza valores de entre 0,25 y 0,75 dB cada pulso de onda, independientemente de la frecuencia. Para una velocidad de propagación de 3000 m/s, correspondiente a una roca media, una onda de 20 Hz avanza 150 m cada pulso, y una de 2Hz 1500 m. Este es el motivo por el que las ondas de alta frecuencia (*agudas*) se absorben con mucha más rapidez.

A cualquier punto alcanzado por el frente de ondas de la voladura llega un tren de ondas elástico complejo. Dentro del medio heterogéneo y fracturado que constituye el terreno, un primer análisis simplificado revela la existencia de dos tipos de ondas, **P** y **S**, que generan *vibraciones longitudinales* y *transversales* a la dirección de propagación, respectivamente. Además, en la superficie del terreno se producen *vibraciones elípticas* en el plano vertical y horizontal,



■ [Foto 1].- Resultado de la voladura sobre la zona ornamental.

denominadas *ondas Rayleigh y Love*. La discriminación de los diferentes tipos de ondas se puede realizar porque la velocidad de propagación es distinta en cada caso, pero solo será posible cuando el punto de recepción se encuentre muy alejado.

Estudios de vibraciones

El objetivo fundamental de estos estudios es el cálculo de las cargas que garanticen que no habrá repercusión sobre estructuras de tipo urbano o industrial próximas a las áreas extractivas. Por este motivo se han regulado estos controles y estudios con el fin de normalizar los procedimientos y la forma de exponer los resultados,

El estudio de vibraciones se realiza mediante geófonos que se colocan en la superficie del terreno, alrededor de la zona de las voladuras, y en las direcciones o puntos de los elementos que se quiere proteger. A estos puntos llegarán los trenes de ondas provocados mediante una serie de voladuras de prueba, con pequeñas cargas. Los geófonos más utilizados son los de velocidad, puesto que son capaces de reproducir la onda de *velocidad de vibración*.

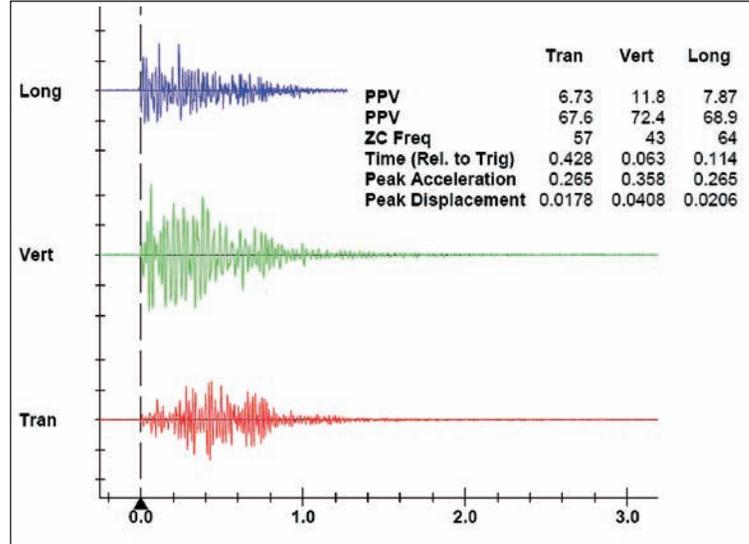
Lo que realmente miden y registran es la corriente producida en una bobina eléctrica en cuyo interior se encuentra una masa de inercia con características magnéticas. El desplazamiento relativo masa-bobina genera una corriente proporcional a la velocidad de vibración. No se debe confundir la velocidad de propagación, que es con la que avanza el frente de la onda sísmica generada en la voladura, con la de vibración de las partículas alcanzadas por dicho frente, en torno a su posición de equilibrio. En la **Fig. 1** se puede ver el registro con un sismógrafo y geófono de tres direcciones.

El estudio de vibraciones estará completo cuando se tengan los registros sismográficos alrededor de la zona de voladuras, y se haya calculado la **ley de transmisividad** o amortiguación. Esta ley, que es de la forma dada por la ecuación [1] o sus transformaciones [2] y [3], es la relación matemática existente entre la velocidad de vibración v (mm/s), la masa de explosivo Q (kg) y la distancia D (m).

$$v = \frac{k}{D^\beta} \cdot Q^\alpha \quad [1]$$

$$v = \frac{k}{\left(\frac{D}{Q^{\alpha/\beta}}\right)^\beta} \quad [2]$$

$$\log v = \log k - \beta \log \left(\frac{D}{Q^{\alpha/\beta}}\right) \quad [3]$$



[Figura 1].- Registros de una voladura con un sismógrafo (geófono tridireccional).

Permite modelizar, de manera simplificada, este fenómeno físico, relacionando la *causa*, que es la carga de explosivo, con el *efecto*, que es la velocidad de vibración observada, mediante las variables y constantes que hacen intervenir los aspectos relevantes del mismo: la distancia (variable D), la naturaleza geológica del medio (constante k), la geometría de la voladura (constante α) y la topografía de la zona (constante β).

La razón para organizar la ecuación [1] en la forma de recta logarítmica [4] es la de obtener los coeficientes de la recta de regresión, con la nube de puntos obtenidos en las observaciones de campo. La nueva variable D_r es denominada *distancia reducida*.

$$\log v = \log k - \beta \log D_r \quad [4]$$

con:

$$D_r = \frac{D}{Q^{\alpha/\beta}}$$

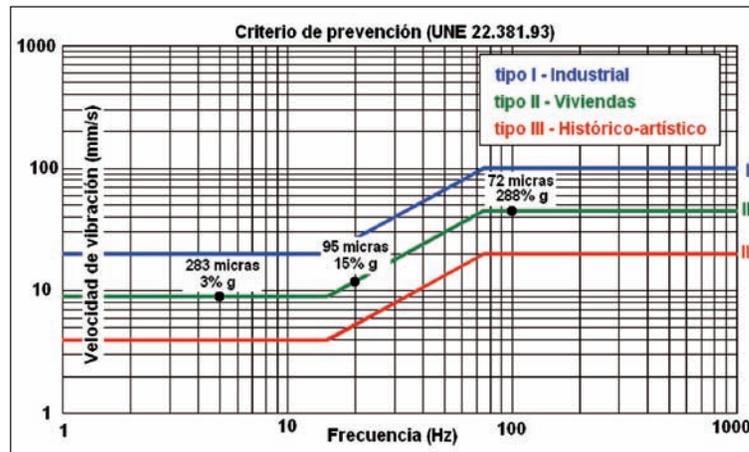
Hay que aclarar, en este punto, que la carga explosiva, no es la carga total de la voladura sino la **carga operante**: la máxima carga que interviene en el conjunto secuenciado de detonaciones de la voladura, con una secuen-

ciación siempre superior a 8 milisegundos entre cada dos detonaciones independientes.

Influencia de la frecuencia

La velocidad de vibración corresponde con la máxima amplitud de la onda de velocidad que se registra en los sismógrafos, aunque habrá que tener en cuenta la frecuencia con que se propaga esa onda. La energía sísmica que llega a una estructura puede afectarle de manera importante si se produce resonancia, que es el solapamiento geométrico de la longitud de la onda con los modos de vibración característicos de la estructura (**Fig. 2**). Estos modos de vibración están relacionados con sus dimensiones y con los momentos de inercia de sus secciones.

El espectro de frecuencias se consigue por un tratamiento de la señal bruta recibida en el geófono, con la simplificación de que se trata de una suma de funciones periódicas seno-coseno (en senos y cosenos), cuyos coeficientes de *Fourier* pueden ser calculados. Los aparatos que tratan la señal del geófono calculan las transformadas de *Fourier* para pasar del dominio de tiempos al dominio de frecuencias, de forma que se disponga de los valores

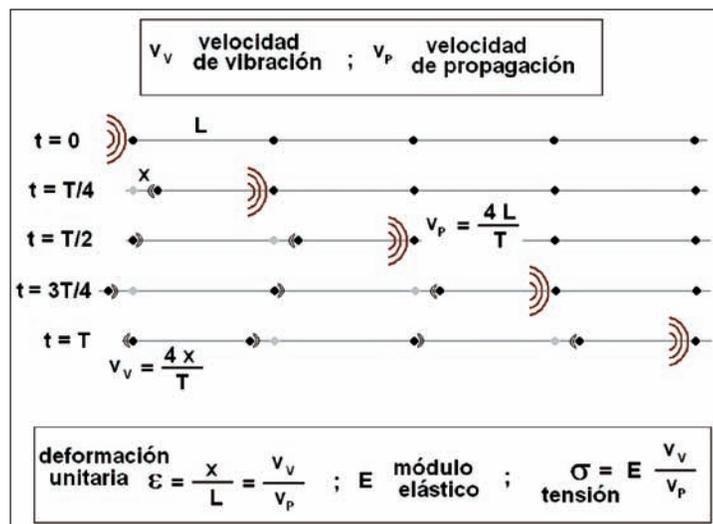


[Figura 2].- Velocidades de vibración admisibles para cada frecuencia, según las estructuras a proteger.

frecuencia Hz	Para $v = 10$ mm/s		
	a mm/s ²	a %g	desplazamiento (mm)
5	0,314	3,21%	0,318
20	1,257	12,82%	0,080
100	6,283	64,11%	0,016
frecuencia Hz	Para $v = 20$ mm/s		
	a mm/s ²	a %g	desplazamiento (mm)
5	0,628	6,41%	0,637
20	2,513	25,65%	0,159
100	12,566	128,23%	0,032
frecuencia Hz	Para $v = 50$ mm/s		
	a mm/s ²	a %g	desplazamiento (mm)
5	1,571	16,03%	1,592
20	6,283	64,11%	0,398
100	31,416	320,57%	0,080

Calculados como M.A.S.: $v = A w \cos(\omega t)$; $a = A \omega^2 \sin^2(\omega t)$

[Tabla 1].- Desplazamientos y aceleraciones producidas por la onda sísmica según la frecuencia.



[Figura 3].- Deformaciones y tensiones producidas por las ondas P.

de velocidad de vibración para cada rango de frecuencias.

Como se puede ver en la **Tabla 1**, la influencia, en términos de aceleración (cargas dinámicas) y desplazamiento, correspondientes a tres niveles de velocidad, de 10, 20 y 50 mm/s respectivamente, es muy variable con la frecuencia (calculados como movimiento armónico simple se aproximan suficientemente a la realidad). Se han trasladado a la **Fig. 2** los valores de aceleración y desplazamiento correspondientes a algunos de los puntos que marcan el límite admisible para las estructuras de viviendas, *tipo II*.

Velocidades de propagación

Considerando las ondas sísmicas como ondas elásticas, las velocidades de propagación de las ondas longitudinales y transversales están relacionadas con la densidad ρ y con los módulos elásticos de Young E y de Poisson ν , según las expresiones [5] y [6].

$$v_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad [5]$$

$$v_s = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \quad [6]$$

$$\frac{v_s}{v_p} = \sqrt{\frac{2(1-\nu)}{1-2\nu}} \quad [7]$$

La relación entre velocidades [7] para valores del módulo de Poisson ν de 0,25, habitual en las rocas, es de $v_s = 1,73 v_p$, lo que explica que lleguen antes a los geófonos los frentes de ondas de cizalladura.

Tensiones inducidas por las ondas P y S

Considerando que se trata de ondas en un medio de propagación elástico, y teniendo en

cuenta que el movimiento que provocan, es fácil deducir las tensiones que provocan a partir de las deformaciones (unidimensional).

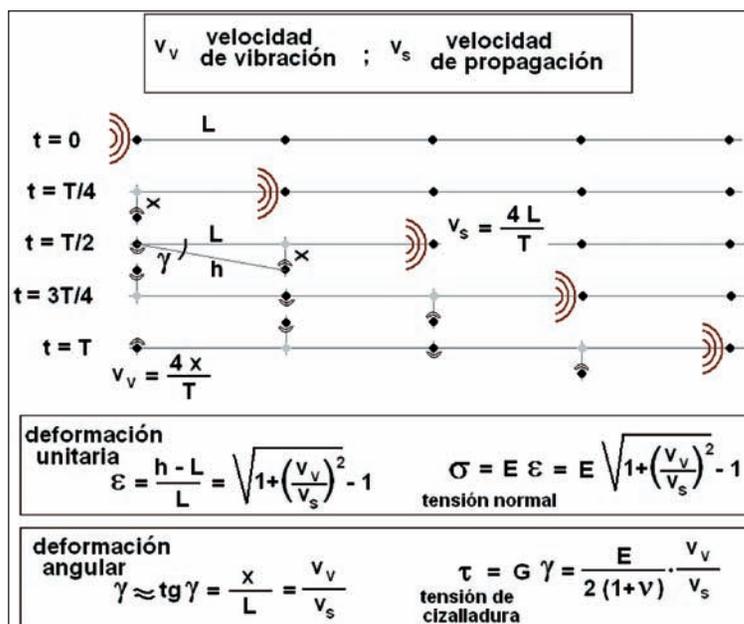
En la **Fig. 3** aparece el recorrido de la perturbación a lo largo del tiempo, de forma que, en un cuarto de período $T/4$, cuando la vibración alcanza la máxima amplitud x , el frente llega a otra partícula situada a distancia L . Los dos segmentos están directamente relacionados con las velocidades de vibración y propagación, y son los que permiten conocer la deformación unitaria longitudinal ϵ .

Dado que las velocidades de propagación y vibración son de un orden conocido: $v_p \approx 10^3$ m/s, y $v_v < 10^{-1}$ m/s, las deformaciones unitarias serán del orden de $\epsilon \approx 10^{-4}$ y las tensiones inducidas $\sigma \approx 10^{-4} E$ (módulo de Young de la roca).

Si se consideran ahora las vibraciones

transversales, un razonamiento parecido, ahora en un plano de vibración (bidimensional), conduce a un esfuerzo combinado de dilatación y cizalladura, como se puede comprobar en la **Fig. 4**.

Nuevamente se pueden acotar los valores de tensión en base a los valores normales de las variables elásticas de un medio de propagación como es una roca. Dado que las velocidades de propagación y vibración son de un orden conocido: $v_s \approx 10^3$ m/s, y $v_v < 10^{-1}$ m/s, la deformación unitaria en dirección a la tensión de dilatación será del orden de $\epsilon \approx 10^{-6}$ y las tensiones inducidas $\sigma \approx 10^{-6} E$ (módulo de Young de la roca). La tensión de cizalladura, analizada separadamente a la de tracción, y considerando que el módulo de Poisson se mueve en valores próximos a 0,25 en las rocas, será del orden de $\tau \approx 0,4 \cdot 10^{-4} E$. La ac-



[Figura 4].- Deformaciones y tensiones producidas por las ondas S.



[Foto 2].- Aspecto de la roca masiva de la capa de Bateig y su estratificación.



[Foto 3].- Trabajos de sísmica, línea de sísmica de refracción (Grupo GEOMEX).

ción combinada del esfuerzo normal y cizallante provoca tensiones inferiores a las de las ondas P , puesto que el esfuerzo combinado lleva tensiones de tracción totales de $0,5 \cdot 10^{-4} E$.

Estas ecuaciones elásticas de las **Figs. 3 y 4** que se recogen en las ecuaciones [8], [9] y [10], relacionen las velocidades de propagación de las ondas sísmicas S y P con la velocidad de vibración y permiten pensar a la inversa, deduciendo las velocidades de vibración para las que la roca se fractura al paso de las ondas sísmicas que será aquella en las que las tensiones superan su resistencia.

$$\sigma_x(P) = E \frac{V_v}{V_p} \quad [8]$$

$$\sigma_x(S) = E \left(\sqrt{1 + \left(\frac{V_v}{V_s} \right)^2} - 1 \right) \quad [9]$$

$$\tau_{xy}(S) = \frac{E}{2(1+\nu)} \cdot \frac{V_v}{V_s} \quad [10]$$

Aplicación a las canteras de piedra Bateig

La capa de *Piedra Bateig* es una capa de arenisca terciaria, de color gris y de un espesor de hasta 50 m, que es explotada por diversas empresas en Novelda (Alicante). Es una capa subhorizontal, con buzamiento de 17-20° subparalelo a la estratificación y orientado monótonamente en dirección 254-256°. Como se observa en la **Foto 2**, la roca es masiva y bastante sana, y solamente se encuentra afectada por algunas diaclasas subverticales muy espaciadas.

Trabajos de campo y laboratorio

Para conocer la velocidad de propagación del frente de ondas se realizaron trabajos de sísmica de refracción (primeras llegadas), en las direcciones de máxima pendiente y de rumbo de la estratificación. se utilizó un geófono PASI de 12 canales, ver **Foto 3**.

La velocidad de propagación de la onda sísmica provocada, en este caso, con una maza, dio valores medios de 3.070 m/s en la propagación que afecta a la estratificación (tiros orientados hacia 75 y 255°) y de 4.040 m/s para los tiros orientados según el rumbo (165 y 345°).

Para conocer las características mecánicas de la roca se extrajeron testigos de 75 mm con perforadora manual en la roca sana, tal como se puede ver en las **Fotos 4 y 5**. Los resultados medios de los ensayos de laboratorio, de compresión con módulos de *Young* y *Poisson* y de tracción indirecta Brasileños aparecen en la **Tabla II**, de características mecánicas.

E	σ_c	σ_t	ν
19.750 MPa	34,5 MPa	1,7 MPa	0,20

[TABLA II].- Valores geomecánicos medios de la arenisca Bateig.

Para finalizar los trabajos se realizó un estudio de vibraciones con objeto de disponer de la ley de amortiguación de las velocidades de vibración [11] para este caso concreto, seleccionando el 95% de probabilidad. Este estudio se realizó en colaboración con los técnicos de la empresa *Maxam*, con la que la *Universidad Politécnica de Cartagena* tiene un convenio de colaboración.

$$v = \frac{339}{D^{1.14}} \cdot Q^{1.03} \quad [11]$$



[Fotos 4 y 5].- Trabajos geotécnicos sobre la roca de Bateig (Grupo GEOMEX).

Resultados

Aplicando estos datos, si en la ecuación [8] despejamos la velocidad de vibración, y sustituimos el módulo E por el valor de la *Tabla II*, y la tensión de la onda longitudinal por la resistencia a tracción de la *Tabla II*, así como la velocidad media de propagación de menor valor (más dañina), se calcula la *velocidad de vibración* que debe producir la onda longitudinal para romper la roca [12].

$$V_v = \frac{\sigma_t V_p}{E} = \frac{1,7 \text{ MPa} \cdot 3,07 \cdot 10^6 \text{ mm/s}}{19.750 \text{ MPa}} = 264,25 \text{ mm/s} \quad [12]$$

A nivel práctico, si se quiere que esta velocidad sirva como criterio para evitar el daño a la roca, debemos introducir un factor de seguridad. Si adoptamos el valor de $FS = 2$, será la mitad de esa velocidad de vibración la que admitamos, es decir $v_v = 132 \text{ mm/s}$. Introduciendo este valor límite en la *ley de amortiguación* y despejando en la expresión [11] la carga operante, tendremos la *ley de cargas distancias* [13] y la *Tabla III* que surge calculando la carga para valores de distancia concretos.

$$Q_{m\acute{a}x} = 0,401 \cdot D^{1,11} \quad [12]$$

D (m)	Q (Kg)
50	30,8
100	66,6
150	104,4
200	143,7
250	184,1

[TABLA III].- *Tabla cargas distancias para evitar el daño de la arenisca de Bateig.*

Un último resultado puede revelar hasta que punto el medio se ha comportado como elástico. Se obtiene introduciendo los valores elásticos de la *Tabla II* en la ecuación [5], de manera que tendremos la velocidad de propagación v_p teórica. Para $E = 19.750 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$, $\nu = 0,2$ y $\rho = 2.500 \text{ kg/m}^3$, la velocidad v_p es de 2.962 m/s muy similar a la adoptada.

Agradecimientos

A Santiago Soravilla y Jesús Domínguez, por la confianza depositada en nuestro equipo y por la colaboración técnica en este trabajo concreto. A la empresa Tomás García, Transportes y Excavaciones, S.L. por facilitar la ejecución del

trabajo. A la empresa MAXAM por la permanente colaboración con nuestra Universidad. Al resto de miembros del grupo Geomex intervinientes en los trabajos de campo.

Bibliografía

- AENOR. 1993. *Control de vibraciones producidas por voladuras*. UNE 22.381.93.
- KEAREY, P., BROOKS, M. 1984. *An Introduction to Geophysical Exploration, cap. 3: Elements of Seismic Surveying*. Blackwell Scientific Publications. USA.
- LANGFORS, U. 1987. *Técnica moderna de voladura de rocas*. Urmo. España.
- PASCUAL, J.A., RAMOS, P., FUENTES, J.M. 2007. *Mejoras en el control de vibraciones en voladuras en canteras de áridos*. Rev. Canteras y Explotaciones, nº 487. España.
- PERSSON, P., HOLMBERG, R., LEE, J. 1994. *Rock Blasting and Explosives Engineering*. CRC Press. USA.
- SHERIFF, R.E., GELDART, L.P. 1983. *Exploration Seismology, Vol 2: Data processing and interpretation*. Cambridge University Press. UK.

UNIVERSIDAD POL. DE CARTAGENA
 Grupo GEOMEX (Geotecnia y Explot.)
 Pº Alfonso XIII, 52 • 30203 Cartagena (Murcia).
 ☎: 968 338 844
 E-mail: geomex@upct.es