

Ensayos destructivos y no destructivos (ultrasonidos) en la determinación de calidad de rocas ornamentales: aplicación a dolomías brechoides

Destructive and non-destructive ultrasonic tests for quality determination of ornamental rocks: application to brecciated dolostones

J. Martínez-Martínez ^(1,2), D. Benavente ^(1,2), M. A. Rodríguez ^(1,2) y M. A. García del Cura ^(2,3)

⁽¹⁾ Departamento de Ciencias de la Tierra y el Medio Ambiente, Universidad de Alicante, Ap. 99, 03080 Alicante, Alicante

⁽²⁾ Laboratorio de Petrología Aplicada, Unidad Asociada CSIC-UA, Alicante

⁽³⁾ Instituto de Geología Económica, CSIC-UCM, Madrid

ABSTRACT

Quality estimation of a brecciated dolostone (triassic-jurassic of the subbetic zone) is realised by using the ultrasonic technique. For this purpose, the relationship between ultrasonic parameters, compressive strength and petrographic characteristics is assessed. The ultrasonic parameters used in this study are: compressional and shear wave velocities, and their ratio; the signal attenuation and, the energy of the signal. Our study shows that the energy of the signal is the most appropriated parameter for predicting the quality of the brecciated dolostone. Thus, high values of energy of the signal imply a greater rock strength and, consequently, a better rock quality.

Key words: brecciated dolostones, building stone, petrophysics, ultrasonic technique, compressive strength.

Geogaceta, 35 (2004), 107-110

ISSN:0213683X

Introducción

La caracterización de las propiedades mecánicas de las rocas, puede abordarse con dos metodologías diferentes: bien mediante métodos estáticos (ensayos de compresión simple, ensayo Brasileño, etc) o bien con métodos dinámicos (método de ultrasonidos). La caracterización de las propiedades mecánicas estáticas del material se realiza comúnmente mediante el ensayo de compresión simple. Los métodos dinámicos, por otra parte, también informan de la calidad de la roca, permitiendo además repetir medidas y realizar otros ensayos sobre la misma probeta, ya que no generan su destrucción. En particular, los ultrasonidos se han usado para obtener la calidad mecánica de los materiales pétreos en cantera, siendo la velocidad de propagación de las ondas P, Vp, el parámetro utilizado (Jern, 2001; Kahraman, 2001, 2002a y 2002b).

El presente estudio supone una novedad en el empleo de los ultrasonidos como indicadores de la respuesta mecánica de los materiales, debido a que no sólo nos centramos en Vp, sino que también se estudia el comportamiento de la velocidad de propagación de las ondas S, Vs, la atenuación de la señal y la energía con la que se recibe la misma.



Fig. 1. Contexto geológico de la zona de los sondeos de las dolomías brechoides estudiadas. 1: Cuaternario. Arenas, gravas y conglomerados. 2: Mioceno superior. Calizas con algas y calizas arenosas. 3: Cretácico inferior. Margas verdes y margocalizas grises. 4: Jurásico (Sinemuriense - Pliensbachense). Calizas y calizas dolomíticas. 5: Retiense - Hettangiense. Dolomías y calizas dolomíticas. 6: Ubicación de los sondeos.

Fig. 1. Geological setting of the drilling zone of the studied brecciated dolostones. 1. Quaternary: sands, gravels and conglomerates. 2. Upper Miocene: algae limestones and sandy limestones. 3. Early Cretaceous: green marls and grey marly limestones. 4. Jurassic (Sinemurian- Pliensbachian). Limestones and dolomitic limestones. 5. Raethian - Hettangien. Dolostones and dolomitic limestones. 7. Location of drill holes.

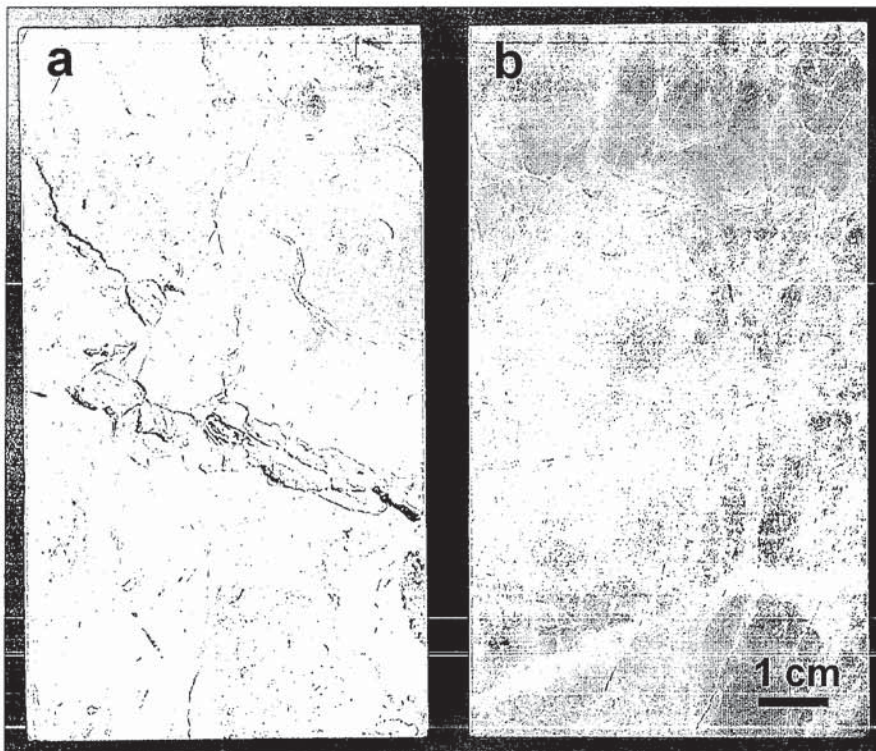


Fig. 2.- Ejemplos de testigos de sondeo estudiados: a) Caliza oncolítica dolomitizada; b) Dolomía afanítica brechificada.

Fig. 2.- Examples of studied drill cores: a) Dolomitized oncolitic limestone b) Brecciated aphanitic dolomite.

En este trabajo se pretende caracterizar las propiedades mecánicas de una dolomía brechoide, similar a las descritas como Marrón Emperador (García del Cura *et al.*, 1999) y por tanto potencialmente comercializable con dicha denominación. Para ello, por una parte, se han determinado las características ultrasónicas y mecánicas (resistencia a compresión) de un conjunto de muestras representativas. Estudiando las correlaciones existentes entre estas características, junto con las petrográficas, se puede obtener la variable ultrasónica que mejor nos indica la calidad del material. Posteriormente se extrapolan los resultados obtenidos a todas las muestras, analizando las relaciones de los parámetros ultrasónicos con el grado de brechificación, porosidad, grado de karstificación, la mineralogía, el contenido y tipo de cemento, etc.

Materiales

Las rocas estudiadas en el presente trabajo son unas dolomías brechificadas triásico - jurásicas que forman parte de los testigos extraídos de una serie de sondeos destinados a la prospección de roca ornamental en la pedanía de Topares (Velez-Rubio), provincia de Almería en su límite con Murcia. Concretamente las perforaciones se han realizado en la ladera Sur del Cerro Gordo. (Fig. 1).

Las rocas estudiadas pertenecen a una formación de potencia variable que puede llegar a alcanzar los 350 m y que Guzmán del Pino y Baena (1978) dataron como Retiense - Lías Inferior que se enmarca en el dominio subbético, en la parte más meridional de las Zonas Externas de la Cordillera Bética (Fig. 1).

Esta formación está constituida principalmente por dolomías afaníticas brechificadas (Fig. 2b) con textura cristalina de variado tamaño de cristal (microcristalinas-medianamente cristalinas) (Fig. 3b). Estas dolomías hacia arriba, y a veces lateralmente, pasan gradualmente a calizas oncolíticas

dolomitizadas (bioesparitas oncolíticas) (Fig. 2a y 3a). El conjunto está heterogeneamente brechificado y dedolomitizado. Asociadas a la brechificación aparecen vénulas calcíticas en relación con las cuales se observan procesos de dedolomitización. En muchos puntos puede hablarse de una cementación calcítica de las facies brechoides. En las rocas menos dedolomitizadas la calcita sólo aparece en vénulas y rellenando porosidad tanto primaria como secundaria (Fig. 3b). La porosidad presente en la actualidad es fundamentalmente secundaria y experimenta notables variaciones; es relativamente frecuente la presencia de porosidad de hueco en forma de grandes huecos y cavernas relacionados con procesos de karstificación.

Estas brechas están asociadas a un amplio número de fracturas, vénulas y canales, rellenos de cemento más claro, predominantemente calcítico, que delimitan clastos de dimensiones muy heterométricas. Su color, excluidas las vénulas, oscila entre 10 YR 7/4, 10 YR 8/2, 5 Y 5/6, y 5 Y 7/2.

Metodología

Para medir las variables ultrasónicas, primero se prepara la probeta, limpiándola de posibles restos de lodos adheridos a su superficie, eliminando la humedad de la muestra, etc. Una vez preparada la probeta se realiza la propagación de las ondas ultrasónicas a través de ella, registrando la señal resultante. Para ello se ha dispuesto de un equipo receptor y emisor de señales, el Sonic Viewer 170. Los transductores empleados poseen una frecuencia de 500 kHz (para la propagación de las ondas P) y de 33 kHz (para las ondas S).

Una vez recogida y digitalizada la señal en el equipo, se graba y se procede a su tratamiento y al cálculo de los diferentes parámetros ultrasónicos (Valdeón *et al.*, 1996). Éstas variables medidas son V_p , V_s ,

Muestra	σ_c (Mpa)	V_p (m/s)	V_s (m/s)	V_p/V_s	$\varepsilon \cdot 10^{-16}$	$\alpha \cdot 10^{-4}$ (μs^{-1})
M3	155,09	5927	3221	1,84	34,30	2,98
M4	113,94	5603	2582	2,17	30,40	7,84
N1	76,69	5889	2932	2,01	4,77	5,63
N3	73,78	4938	3338	1,48	2,55	0,39
N4	73,89	5178	2789	1,86	2,50	2,65
N6	94,57	5302	2925	1,81	4,06	2,74
N7	101,01	5812	3560	1,63	4,13	1,79
N9	66,1	5268	3399	1,55	2,82	4,72

Tabla I.- Medidas realizadas en las probetas de 6 cm.

Table I. Compressive strength and ultrasonic parameters of 6 cm samples.

Vp/Vs, la energía con la que se recibe la señal (ϵ) y la atenuación de la misma (α).

Las velocidades de propagación se obtienen a partir del cociente entre el tiempo de vuelo de la señal (tiempo que tarda la onda en recorrer la probeta), corregido del tiempo de retardo (tiempo que tarda la onda en llegar del transductor emisor al receptor cuando se enfrentan sin probeta), y la longitud de la probeta. La energía se obtiene haciendo el cuadrado de la gráfica resultante (de esta forma hacemos todos los valores positivos), e integrando estos valores. Se puede decir, pues, que ϵ se obtiene calculando el cuadrado del área contenida entre los máximos y mínimos relativos de la señal. Para el cálculo de la atenuación se define la exponencial decreciente de primer orden que envuelve a los máximos relativos de la parte positiva de la señal.

Las características mecánicas del material se obtienen realizando el ensayo de compresión simple sobre las probetas. La resistencia a compresión se ha realizado, según la norma ASTM (Anon, 1985), sobre 12 muestras representativas, y cuya geometría es cilíndrica 6 cm de diámetro y 6 cm de longitud. La prensa empleada es la MEH-2000-H/FIB-50 (IBERTEST).

Debido a que el estudio de los ultrasonidos se realiza tanto en los testigos de sondeos (18 cm de longitud) como sobre las probetas en que se va a realizar el ensayo de compresión (6 cm de longitud), las medidas de las señales se realizan antes y después de cortarlas. De esta forma obtenemos una correlación más precisa de ambas técnicas.

Las características petrográficas se han abordado desde dos escalas distintas. Por una parte se ha realizado la descripción de las probetas, obteniendo características como el color, la porosidad, el grado y tipo de fracturación, la intensidad de la karstificación, etc. Por otra parte, se ha realizado el

estudio microscópico de preparaciones de láminas delgadas del material, estudiando la porosidad, el grado de fracturación, la mineralogía, el contenido y tipo de cemento, etc.

Resultados obtenidos

Estudio comparativo de ultrasonidos con la resistencia a compresión de las muestras

En este estudio se va a comparar las medidas de las variables ultrasónicas realizadas con los valores de resistencia a compresión de las dolomías, para obtener qué parámetro es el mejor indicador de la calidad del material (Tabla I).

La correlación existente entre cada variable ultrasónica y la resistencia a compresión de la probeta se ha cuantificado mediante el coeficiente de correlación lineal de Pearson (R). El parámetro que posee un coeficiente de correlación mayor es la energía con la que se recibe la señal ($R_e = 0.904$). Debido a su cálculo sencillo, su rapidez de obtención y su buena correlación, éste es el parámetro idóneo para obtener una noción de cómo se comporta mecánicamente la roca (y por tanto su calidad) a partir de ultrasonidos. El valor obtenido de ϵ en la señal depende en buena medida del grado de fracturación de las probetas, ya que al aumentar el número de superficies de discontinuidad en la muestra, las ondas sufren mayor refracción, scattering, etc. por lo que la energía con la que llega la onda al extremo de la probeta es menor. El comportamiento mecánico de las probetas, por otro lado, también depende básicamente del grado de fracturación de las mismas, por lo que es evidente la relación existente entre la resistencia mecánica del material y la energía con la que se recibe la onda propagada por él.

La atenuación que sufre la onda y la velocidad de propagación de las ondas P por el material también presentan un coeficiente de correlación lineal elevado con respecto a la resistencia a compresión del material ($R_\alpha = 0.880$ y $R_{v_p} = 0.629$). La atenuación está cuantificada mediante α pudiendo así ser interesante emplearla en algún caso concreto. Su comportamiento, paralelo al de la resistencia a compresión del material, es consecuencia del aumento de las superficies de discontinuidad que deben atravesar las ondas, aumentando la dispersión de éstas. Dicha dispersión prolonga en el tiempo la recepción de la señal en el transductor receptor, disminuyendo así su atenuación.

El coeficiente de correlación de Vp respecto de la resistencia a compresión en estas dolomías brechificadas es mucho mayor que el obtenido en otros materiales carbo-

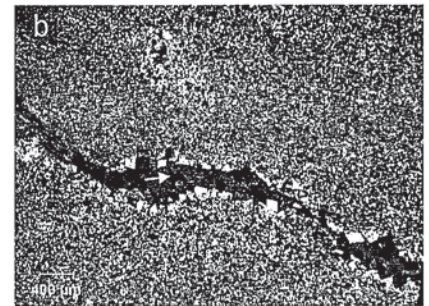
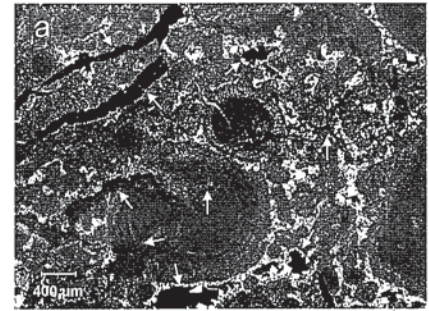


Fig. 3.- Fotomicrografías con nicoles cruzados (las flechas señalan calcita teñida con solución de Rojo de Alizarina): a) Bioesparita dolomitizada b) dolomía microcristalina

Fig. 3.- Photomicrograph with crossed nicols (stained calcite with Alizarin red solution arrowed): a) Dolomitized biosparite b) Microcrystalline dolostone.

natados de características petrográficas mucho más homogéneas (calizas fosilíferas, Martínez-Martínez, 2003 y Benavente et al en prep.). Esto se explica porque al poseer las dolomías una alta heterogeneidad, las medidas realizadas de Vp se distribuyen dentro de un rango de valores mucho mayor que en las calizas fosilíferas, por lo que la tendencia que presenta la relación $V_p - \sigma_c$ es mucho más clara.

El resto de parámetros (Vs y Vp/Vs) presentan una correlación baja con los valores de resistencia a compresión, por lo que no son interesantes a la hora de predecir el comportamiento mecánico de la roca a partir de ensayos no destructivos.

Extrapolación de los resultados obtenidos, comparando variables ultrasónicas con las propiedades petrográficas de las rocas

Los parámetros obtenidos de las medidas ultrasónicas realizadas en las probetas de 18 cm (antes de cortarlas para realizar el ensayo de compresión simple) se muestran en la Tabla II. Estos parámetros se han relacionado con la intensidad de la brechificación y karstificación del material. Estos rasgos petrográficos son un fuerte condicionante de la resistencia a compresión de la probeta, por lo que en definitiva lo que vamos a hacer es extrapolar, a todas

Muestra	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Vp/Vs	$\epsilon \cdot 10^{12}$	$\alpha \cdot 10^{-4}$ (μs^{-1})
M1	6424	3260	1,97	23,10	0,85
M2	6514	2868	2,27	12,01	1,59
M3	6541	2708	2,41	6,43	0,66
M4	6380	3096	2,06	4,11	0,57
M5	6107	3270	1,87	68,34	1,40
M6	5655	2811	2,01	22,21	1,43
M7	5225	3001	1,74	2,38	0,60
M8	6424	2963	2,17	42,42	1,47
N1	5971	3215	1,86	2,25	0,16
N2	5740	3692	1,55	3,51	0,85
N3	5074	2818	1,80	1,57	0,22
N4	5086	3344	1,52	1,56	0,23
N5	6170	3402	1,81	3,31	1,49
N6	6195	4007	1,55	3,92	0,98
N7	6372	3056	2,08	21,80	1,24
N8	5429	3137	1,73	3,07	0,97
N9	5766	2967	1,94	3,08	0,95

Tabla II. Valores de las variables ultrasónicas obtenidos en las probetas de 18 cm.

Table II. Ultrasonic parameters of 18 cm samples.

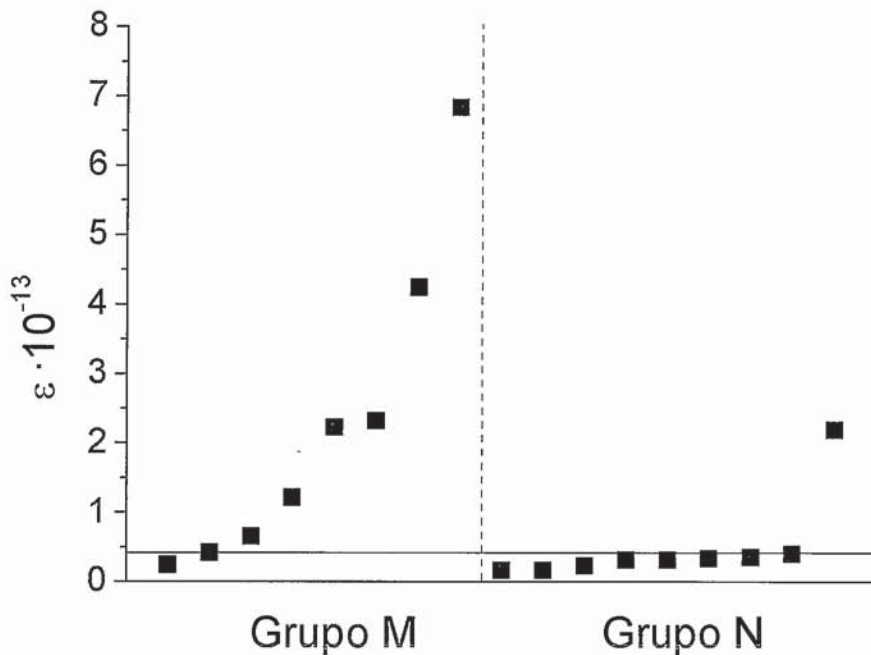


Fig. 4.- Energía de la señal, ϵ , para las probetas de los grupo M (poco brechificadas) y N (muy brechificadas).

Fig. 4.- Energy of the signal, ϵ , for samples of group M (low degree of breccification) and group N (high degree of breccification).

las probetas disponibles, el estudio realizado con la resistencia a compresión.

Por otro lado, las muestras se han agrupado en dos conjuntos según su grado de brechificación (M y N). El grupo M está formado por aquellas muestras poco brechificadas, asociadas por lo tanto a un contenido menor de superficies de discontinuidad (véculas, fracturas, etc) y de cemento calcítico. El grupo N, por el contrario, engloba a todas las probetas de material muy brechificado. Estas probetas presentarán, por lo tanto, numerosas superficies de fractura y véculas, y un contenido importante en cemento calcítico.

El parámetro que mejor representa la resistencia a compresión de las probetas es la energía con la que se recibe la señal, tal y como hemos visto. Ahora vemos que esta variable ultrasónica también responde bastante bien al grado de brechificación que posee la muestra, por lo que se reafirma la validez de este parámetro como indicador de la calidad del material. Los valores de ϵ obtenidos en las probetas del grupo M toman, por lo general, valores superiores a los medidos en las del grupo N (Fig. 4). En base a esta tendencia podemos establecer un límite entre los valores de ϵ que permitan diferenciar materiales con distinto grado de brechificación. Este límite se puede fijar en el valor de $\epsilon = 4 \cdot 10^{12}$, aunque sería conveniente aumentar el número de medidas para poder comprobar la eficacia de este valor como límite entre calidades.

Por otra parte, la velocidad de propagación de las ondas P por las dolomías también presentaba un alto coeficiente de correlación con la resistencia a compresión, por lo que es de esperar que los valores de V_p presenten una buena correlación con el grado de brechificación de las muestras. Estudiando los resultados obtenidos de las medidas de V_p en cada uno de los dos grupos establecidos, vemos que, efectivamente, las muestras con un grado de brechificación menor (grupo M) presentan valores menores de V_p que las muestras más brechificadas (grupo N).

Además, se ha observado que el grado de karstificación de las probetas está relacionado con la atenuación de la señal. Así, en general, ésta tiende a disminuir cuando aumenta la karstificación de la probeta.

Estas conclusiones constituyen una aproximación a la aplicación del método de ultrasonidos a las dolomías brechificadas, por lo que el número de probetas empleado no es excesivamente elevado. Los resultados obtenidos pueden sufrir pequeñas variaciones al aumentar los estudios realizados sobre estos materiales, actualmente en curso.

Conclusiones

En este estudio se ha puesto de manifiesto la eficacia de las técnicas no destructivas en la determinación de la calidad de rocas ornamentales (en este caso, unas do-

lomías brechificadas comercializables como Marrón Imperial). Estos métodos no destructivos presentan múltiples ventajas, entre las que destaca la conservación de la muestra estudiada, dando la oportunidad de repetir medidas, ampliar los estudios con otros ensayos sobre la misma probeta, etc. Por otra parte, la alta manejabilidad de la instrumentación empleada permite realizar medidas in situ en la propia cantera, durante la campaña de sondeos, etc.

La calidad de las rocas tipo Marrón Imperial viene determinada, mediante parámetros ultrasónicos, por la energía que posee la señal registrada. El límite entre materiales de buena y mala calidad se establece en el valor de $\epsilon = 4 \cdot 10^{12}$, encontrándose los materiales de baja calidad por debajo de este valor y los de buena calidad por encima. En las dolomías brechificadas, un valor mayor de ϵ implica, en rasgos generales, una mayor resistencia mecánica y por ende una mejor calidad, lo que se corresponde con un menor grado de brechificación del material. Por otra parte, la atenuación de la señal es el parámetro ultrasónico que mejor responde al grado de karstificación de las probetas.

Agradecimientos

Este trabajo se ha realizado en el marco del Proyecto del MCYT: MAT 2003-01823.

Referencias

Anon (1985): Standard C170-85, ASTM, Philadelphia.
 García del Cura, M.A., Rodríguez, M.A., Pina, J.A., Cañaveras, J.C., Baltuille, J.M. y Ordóñez, S. (1999): *Bol. Geol. Min.*, 110, 67-76.
 Guégen, Y. y Palciauskas, V. (1994): *Introduction to the physics of rock*. Princeton, University Press. Princeton, 294 pp.
 Guzmán del Pino, J.L y Baena, J. (1978): Mapa Geológico de España, e:1:50.000, hoja 930 (La Puebla de Don Fadrique), IGME. 24 pp.
 Jern, M. (2001): *Bull. Eng. Geol. Env.*, 60: 157-166.
 Kahranman, S. (2001): *Inter. Jour. Rock Mech. Min. Sci.*, 38, 729-733.
 Kahranman, S. (2002a): *Engin. Geol.*, 63, 347-350.
 Kahranman, S. (2002b): *Inter. Jour. Rock Mech. Min. Sci.*, 39, 101-104.
 Martínez-Martínez, J. (2003): *Proy. Fin de Carrera. Ingeniería Geológica*. Univ. de Alicante. 112 pp. (Inédito).
 Valdeón, L., de Freitas M.H. y King, M.S. (1996): *Quat. Jour. Engin. Geol.*, 29, 299-308.