

VELOCIDAD DE PROPAGACION DE ONDAS EN ROCAS CARBONATADAS

F. J. ALONSO Y L. M. SUAREZ DEL RIO

TRABAJOS DE GEOLOGIA Alonso, F. J. y Suárez del Río, L. M. (1985).—Velocidad de propagación de ondas en rocas carbonatadas. *Trabajos de Geología*, Univ. de Oviedo, 15, 315-324. ISSN 0474-9588.



Se han determinado los valores de velocidad de propagación de ondas V_p y V_s en diferentes rocas de naturaleza carbonatada (calizas cristalinas a micríticas y dolomías cristalinas), tanto en condiciones de sequedad como de saturación en agua.

Se ha corroborado que el contenido en agua no presenta gran influencia sobre los valores obtenidos. De este hecho, así como de la relación V_s/V_p , se ha deducido la ausencia de fisuras en este tipo de rocas.

Finalmente, se ha realizado una interpretación petrográfica de dichas velocidades, correspondiendo los valores más elevados a las calizas más cristalinas, puras y densas, y los menores a las rocas más blandas, poco coherentes o alteradas.

Velocities of wave propagation (V_p - V_s) in dry and water saturated carbonated rocks (micritic to crystalline limestones and crystalline dolomite) were determined.

In those rocks, the obtained results are not influenced by their water content. According to this and to their V_s/V_p relationships, they can be considered as non fissured rocks.

The results are petrographically interpreted; the higher values belongs to the most crystalline, pure and dense limestones, and the lower to the weakest, less cohesive and mostly weatered rocks.

F. Javier Alonso y Luis Miguel Suárez del Río, Departamento de Petrología y Geoquímica, Facultad de Geología, Universidad de Oviedo, España. Manuscrito recibido el 10 de enero de 1985.

INTRODUCCION

La velocidad con la que se propagan las ondas elásticas a través de los materiales rocosos es una propiedad utilizada en la caracterización de los mismos, especialmente desde el punto de vista de su calidad o grado de alteración. Ello es debido a su relación con las características petrográficas y más específicamente con los espacios vacíos (Tatham 1982).

Dado que se trata de un ensayo sencillo no destructivo, se utiliza también en los estudios de alteración de rocas monumentales «in situ» (Mamillan 1976, Bouineau 1978), así como en laboratorio, donde permite seguir la degradación producida mediante los ensayos de envejecimiento acelerado (Accardo *et al.* 1981).

El ensayo ha sido normalizado por la I.S.R.M. (1978), A.S.T.M. (1978) y R.I.L.E.M. (1980). Un estudio detallado de las variables que intervienen en la medición de la velocidad de propagación de ondas elásticas puede verse

en Lama y Vutukuri (1978). Entre ellas existen unas que dependen de las características intrínsecas del material (mineralogía, textura, porosidad y anisotropía) y otras propias de las condiciones de ensayo (temperatura, presión y contenido en agua).

A partir de los valores obtenidos mediante dicho ensayo, se han considerado nuevos parámetros con el significado de índices de calidad (Tourenq *et al.* 1971; Delgado Rodríguez 1983).

Por otra parte es conocida la gran variabilidad, tanto petrográfica como de propiedades físicas, que presentan las rocas sedimentarias cuando se considera un volumen dado de roca. En este sentido, la velocidad de propagación de ondas puede ser útil a la hora de valorar la homogeneidad entre los distintos especímenes de una misma muestra.

En este trabajo se han determinado los valores de propagación de ondas en diversos especímenes de diferentes variedades petrográficas

carbonatadas, bajo distintas condiciones de ensayo. Esto ha permitido:

a) Conocer los valores de propagación de ondas elásticas de dichas rocas, previamente a los ensayos de envejecimiento acelerado a que serán sometidas.

b) Conocer el rango de variación de dichos valores entre las distintas rocas estudiadas, así como el grado de homogeneidad dentro de cada una de ellas.

c) Observar la influencia del contenido en agua de la roca sobre la velocidad de propagación de ondas en su seno.

d) Interpretar petrográficamente dichos valores, así como los correspondientes índices de calidad, atendiendo fundamentalmente a parámetros texturales y de porosidad.

ROCAS ESTUDIADAS

Se han seleccionado cuatro tipos rocosos diferenciados geográfica, geológica y petrográficamente, tomándose dos variedades dentro de cada uno de ellos. Se trata de calizas y dolomías cristalinas a calizas micríticas, con ligeras diferencias texturales y de porosidad dentro de cada tipo.

El primero es la *Caliza de Montaña* –Carbonífero–; las muestras analizadas (M-1 y M-2) corresponden a dos bloques extraídos en canteras próximas a Oviedo. Otro es la denominada *Caliza de Laspra*, situada dentro de una serie detrítica y margosa del Eoceno Superior a Oligoceno, cuyas muestras (L-1 y L-2) correspon-

den a bancos locales extraídos en la zona de Buenavista (Oviedo). El tercero es la *Caliza del Páramo* –Mioceno Superior–, correspondiendo las muestras analizadas (P-1 y P-2) a bloques tomados en las canteras de Campaspero (Valladolid). Finalmente se ha incluido la *Dolomía de Boñar* –Cretácico Superior–; las muestras consideradas (B-1 y B-2) se han tomado en distintos bancos de las canteras situadas en Boñar (León).

PETROGRAFÍA

La determinación de las características petrográficas se ha realizado mediante distintas técnicas de observación, considerándose fundamentalmente aspectos mineralógicos, texturales y de porosidad.

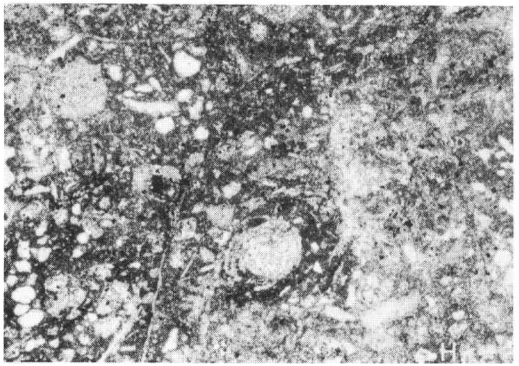
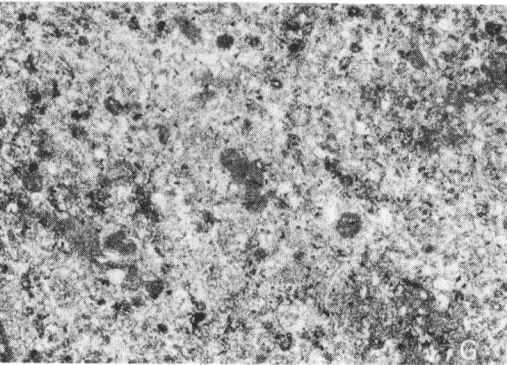
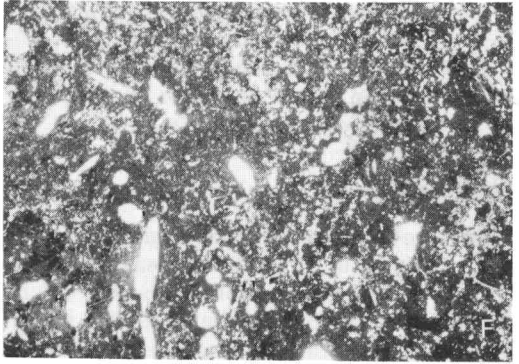
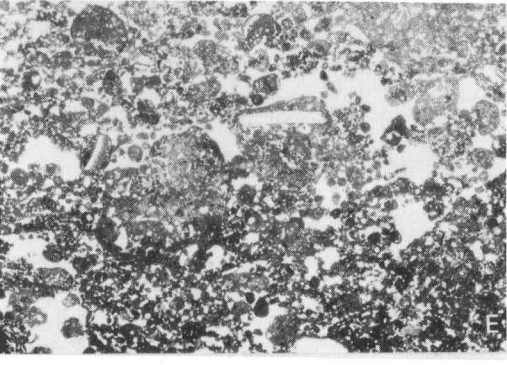
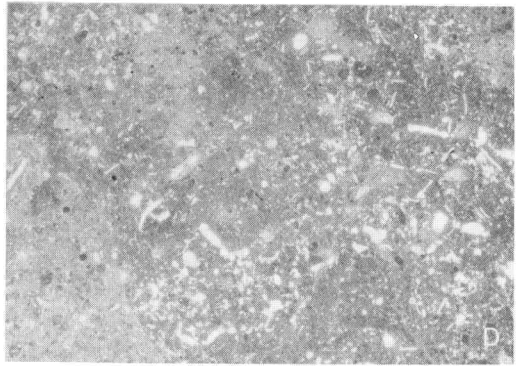
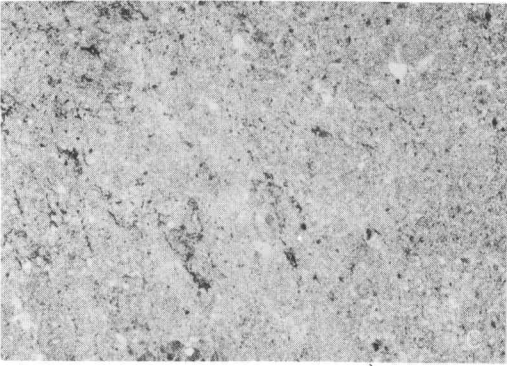
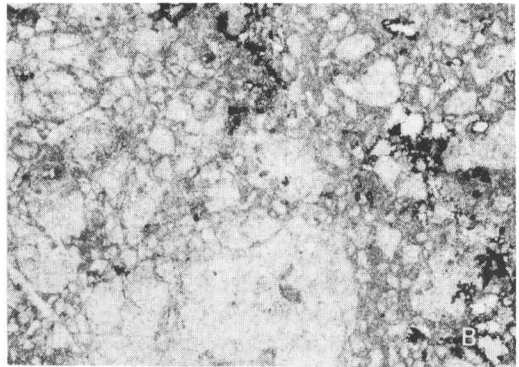
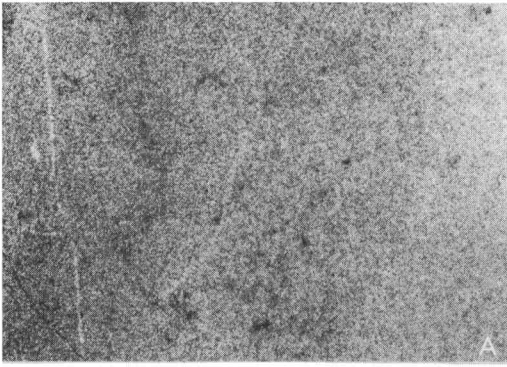
El estudio mineralógico se ha realizado sobre láminas delgadas teñidas, efectuándose además el análisis del residuo insoluble. La textura se ha estudiado bajo microscopía óptica de polarización y electrónica de barrido (S.E.M.), determinándose el tamaño medio de los cristales. La porosidad se ha obtenido por métodos físicos (porosidad accesible al agua bajo vacío), y se ha observado su disposición –cuando ha sido posible– mediante microscopía de fluorescencia, sobre láminas delgadas impregnadas con resinas fluorescentes bajo vacío.

En la Tabla I se expresan las características petrográficas más significativas de las rocas estudiadas, realizándose seguidamente una descripción más detallada de cada una de las mues-

TABLA I.–Características petrográficas cuantificadas

Muestra		Calcita (%)	Dolomita (%)	Residuo Insol. (%)	Tamaño Crist. (µm)	Porosidad (%)
Caliza de Montaña	M-1	99,3	0,0	0,7	40	0,25
	M-2	94,4	5,0	0,6	40	0,52
Caliza de Laspra	L-1	97,6	0,0	2,4	10	1,35
	L-2	93,2	0,0	6,8	2	6,4
Caliza del Páramo	P-1	92,9	0,0	7,1	2; 8; 60	9,0
	P-2	94,3	0,0	5,7	2; 8	12,5
Dolomía de Boñar	B-1	12,3	83,7	4,0	20	13,6
	B-2	5,6	90,8	3,6	20	14,6

Fig. 1.–Aspecto textural de las muestras estudiadas. L.N., × 7. A y B) Caliza de Montaña: muestra M-1 y M-2, respectivamente. C y D) Caliza de Laspra: L-1 y L-2. E y F) Caliza del Páramo: P-1 y P-2. G y H) Dolomía de Boñar: B-1 y B-2.



tras. La Fig. 1 nos permite su comparación textural.

Caliza de Montaña

Muestra M-1.—Es una caliza de color gris oscuro, finamente cristalina, de aspecto homogéneo y a veces difusamente bandeado. *Mineralogía:* Presenta calcita casi exclusivamente, con un residuo insoluble muy bajo de naturaleza bituminosa. *Textura:* Cristalina alotriomórfica más o menos equigranular, con cierta tendencia bandeada, probablemente en relación con texturas relictas laminadas. *Porosidad:* Sumamente baja (0,25 %) y no localizable mediante observación microscópica.

Muestra M-2.—Caliza de color gris ligeramente más claro, finamente cristalina, de aspecto brechoide, con manchas amarillentas, debidas a óxidos de hierro, en relación con cristales de dolomita. *Mineralogía:* Compuesta mayoritariamente por calcita, aunque presenta algo de dolomita en granos de algunos milímetros de tamaño; el residuo insoluble es igualmente bajo y bituminoso. *Textura:* Cristalina alotriomórfica más bien heterogranular, con cierto aspecto brechoide, probablemente en relación con texturas relictas granudas groseras; los cristales de dolomita son más idiomórficos. *Porosidad:* Muy baja (0,52 %), apareciendo asociada a los núcleos dolomíticos, presentándose los espacios vacíos tanto en los bordes como en el interior de los cristales de dolomita (Fig. 2 A).

Caliza de Laspra

Muestra L-1.—Caliza de color gris pardo, microcristalina, de aspecto difusamente brechoide. *Mineralogía:* Sólo presenta calcita como mineral carbonatado y el residuo insoluble es principalmente arcilloso. *Textura:* Microcristalina (mudstone recristalizada) observándose la textura primitiva muy difuminada; localmente puede presentar algo de micrita y destaca la presencia de cristales dispersos de calcita de mayor tamaño (50 μm). *Porosidad:* Es baja (1,35 %) atribuida a microporos.

Muestra L-2.—Caliza de color blanquecino, criptocristalina, en la que se puede observar un bajo porcentaje de granos de cuarzo y esparita. El bloque considerado presenta a techo un ligero incremento en el contenido en arcillas. *Mineralogía:* Igualmente sólo aparece calcita—fundamentalmente de tamaño micrita— como

componente carbonatado; el residuo insoluble es arcilloso con algo de cuarzo, y en las zonas mencionadas de techo puede llegar a alcanzar valores del 14 %, presentando pérdida de coherencia. *Textura:* Wackestone con bajo contenido en fósiles, heterogénea por removilización

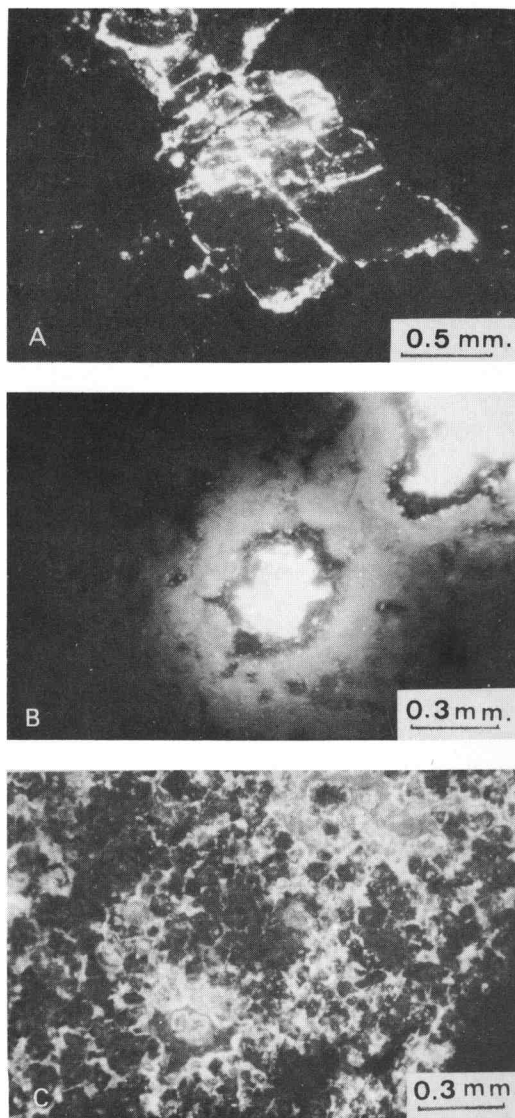


Fig. 2.—Localización de la porosidad observada mediante microscopía de fluorescencia. Los vacíos impregnados aparecen en blanco. A) Caliza de Montaña (M-2): la porosidad aparece restringida a los cristales de dolomita. B) Caliza del Páramo (P-2): macroporos rodeados por esparita y microporos en las zonas micríticas. C) Dolomías de Boñar (B-2): porosidad intercrystalina en la dolomita.

y bioturbación, con algo de esparita intersticial, así como con núcleos más cristalinos muy esporádicamente. *Porosidad*: Es mucho mayor que en la muestra L-1 (6,4 %), igualmente microporosa.

Caliza del Páramo

Muestra P-1.—Es una caliza blanquecina, criptocristalina, de aspecto ligeramente moteado por la presencia de varios tipos de granos, abundantes núcleos cristalinos y algunos poros. *Mineralogía*: Entre los componentes carbonatados sólo presenta calcita, predominando el tamaño micrita, si bien existe también microesparita (30 %) y algo de esparita (7 %); el residuo insoluble es fundamentalmente arcilloso, presentando algo de cuarzo. *Textura*: Micrita grumelar, ligeramente fosilífera, con mayor proporción de granos tipo pisolito (más ricos en arcillas). *Porosidad*: Fundamentalmente microporosa, apenas presenta grandes poros; la microporosidad aparece localizada en las zonas micríticas.

Muestra P-2.—También blanquecina, ligeramente más clara de color, criptocristalina, de aspecto moteado igualmente, con mayor proporción de poros y menor de núcleos cristalinos. *Mineralogía*: Igualmente sólo presenta calcita, predominando el tamaño micrita aunque, en menor proporción, aparece microesparita (28 %) y esparita (2,5 %); el residuo insoluble es arcilloso, con menor proporción de cuarzo. *Textura*: Micrita grumelar (más próxima a la micrita), ligeramente fosilífera, a veces con cierto aspecto microdrusiforme. *Porosidad*: Presenta grandes poros así como microgeodas y canalillos de origen móldico y cástico y una importante microporosidad; dicha microporosidad aparece igualmente localizada en las zonas micríticas (Fig. 2 B). La porosidad comunicada es del 12,5 %.

Dolomía de Boñar

Muestra B-1.—Es una dolomía de color amarillento uniforme, finamente cristalina y de aspecto difusamente moteado, muy homogénea. *Mineralogía*: Predomina la dolomita, aunque existe calcita con disposición intersticial; el residuo insoluble es fundamentalmente arcilloso. *Textura*: Cristalina subidiomórfica relativamente equigranular, reflejando una textura relictiva clásica muy homogénea y bien calibrada.

Porosidad: Es microporosa fundamentalmente, con poros de tipo intercristalino muy homogéneamente repartidos; los poros de mayor tamaño (60 μm) se sitúan en posiciones intersticiales respecto a la textura granuda relictiva. La porosidad comunicada es del 13,6 %.

Muestra B-2.—Dolomía de color amarillo más grisáceo que B-1, finamente cristalina, muy porosa y en algunas zonas no muy coherente. Dichos caracteres presentan variaciones en relación con granos relictos, confiriendo a la roca cierto aspecto heterogéneo. *Mineralogía*: La dolomita —componente esencial— es en esta muestra de aspecto más oscuro; presenta calcita en menor proporción, localizándose preferentemente en granos relictos. El residuo insoluble es también arcilloso. *Textura*: Cristalina subidiomórfica, relativamente equigranular, reflejando texturas primarias de aspecto heterogéneo. *Porosidad*: Es del 14,6 %. Abundan grandes poros (0,5 mm) de origen móldico que pueden suponer la mitad del volumen poroso total; el resto correspondió a poros intercristalinos e intracristalinos, localizados siempre en la dolomita (Fig. 2 C).

VELOCIDAD DE PROPAGACION DE ONDAS

El método de ensayo utilizado ha sido el de los impulsos ultrasónicos. En dicho ensayo se suministra una vibración a la muestra y se mide el tiempo requerido para la propagación de la onda a lo largo de la longitud de la muestra, entre dos caras paralelas.

Mediante este ensayo puede obtenerse la velocidad de propagación de las ondas de compresión o longitudinales, (V_p), y la velocidad de las ondas de cizalla o transversales, (V_s), aunque estas últimas —más lentas— se superponen en el registro a las primeras, resultando a veces difícil su determinación.

A partir de dichos valores se han definido otros, a los que se atribuye un significado de índices de calidad de las rocas. Estos índices han sido desarrollados fundamentalmente en rocas cristalinas, donde la alteración está en relación esencialmente con el grado de fisuración que presentan los materiales.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El equipo utilizado está constituido por un generador de impulsos, dos transductores (emisor y recep-

tor) equipados con cristal de cuarzo y un osciloscopio para el análisis de las ondas recibidas. El acoplamiento entre las muestras y los transductores fue rígido, utilizándose como interfase de unión «phenyl saliylate».

Para cada una de las muestras estudiadas, se han preparado cinco probetas cilíndricas de 35 mm de diámetro y unos 65 mm de altura, extraídas de bloques de «roca matriz» o «intact rock», o sea, sin discontinuidades de macizo. Sobre dichas probetas se ha determinado la porosidad (cuyos valores figuran en la Tabla I), por el método de la pesada hidrostática.

En cada una de las probetas se determinó V_p y V_s , tanto en condiciones de sequedad como después de saturadas en agua. El secado se realizó manteniendo las probetas durante un día en un horno a 80° C. La saturación tuvo lugar al vacío, de acuerdo con el siguiente procedimiento: 14 horas de vacío seco; introducción lenta de agua sin romper el vacío; otras 10 horas de vacío sumergidas las muestras en agua, y, finalmente, 36 horas más de inmersión libre en agua. Bajo estas mismas condiciones se determinó la porosidad accesible al agua.

VALORES OBTENIDOS

En la Tabla II se expresan los valores de V_p y V_s , —incluyendo el valor medio (\bar{x}) y la desviación típica (σ_{n-1})— para cada una de las muestras estudiadas, tanto en estado seco como después de saturadas.

Se ha representado V_p frente a V_s (Fig. 3), observándose una buena correlación lineal entre ambos valores. También puede verse el rango de variación

entre los diferentes especímenes de una misma muestra, para ambas condiciones de ensayo, así como las diferencias existentes entre las diferentes muestras.

INDICES DE CALIDAD

Se ha considerado, en primer lugar, la relación V_s/V_p . Experimentalmente se ha demostrado que la fisuración que presentan los materiales —ya sea natural o inducida— afecta más a los valores de V_p que a los de V_s . Consecuentemente, dicha relación ha sido tomada como una medida del grado de fisuración de la roca. Los valores experimentales oscilan entre 0,5 y 0,75 para rocas nada fisuradas a muy fisuradas respectivamente; valores inferiores a 0,6 corresponderían a rocas «no fisuradas».

Por otra parte, también se ha obtenido el índice de calidad IQ (Tourenq *et al.* 1971), definido como la relación entre la velocidad de propagación de las ondas P, obtenida experimentalmente (V_p), y la calculada teóricamente a partir de la composición modal de la roca (V_p^*). Dicho cálculo se realiza conociendo las velocidades de propagación de ondas P, (V_{pi}), de cada uno de los minerales (i) que constituyen la roca, así como su porcentaje (p_i) a partir de la siguiente expresión:

$$1/V_p^* = \sum p_i/100 \cdot V_{pi}$$

El índice IQ queda definido como:

$$IQ = (V_p/V_p^*) \cdot 100$$

Dicho índice presenta siempre valores inferiores a 100, correspondiendo los valores más elevados a las rocas que presentan menores discontinuidades texturales (bordes de grano, fisuras, poros).

TABLA II.—Velocidad de propagación de ondas

Muestra	Estado	v_p (m/s)		v_s (m/s)	
		\bar{x}	σ_{n-1}	\bar{x}	σ_{n-1}
M-1	seco	5450	100	2820	170
	satur.	5510	70	2990	300
M-2	seco	5360	120	2630	90
	satur.	5450	50	2620	110
L-1	seco	4840	170	2350	120
	satur.	5010	40	2350	60
L-2	seco	3640	100	2130	90
	satur.	3730	40	2190	90
P-1	seco	4260	120	2400	110
	satur.	4330	80	2430	210
P-2	seco	4040	110	2270	60
	satur.	4110	100	2150	110
B-1	seco	4200	80	2360	70
	satur.	4120	120	2500	120
B-2	seco	3520	60	1950	70
	satur.	3500	140	1960	130

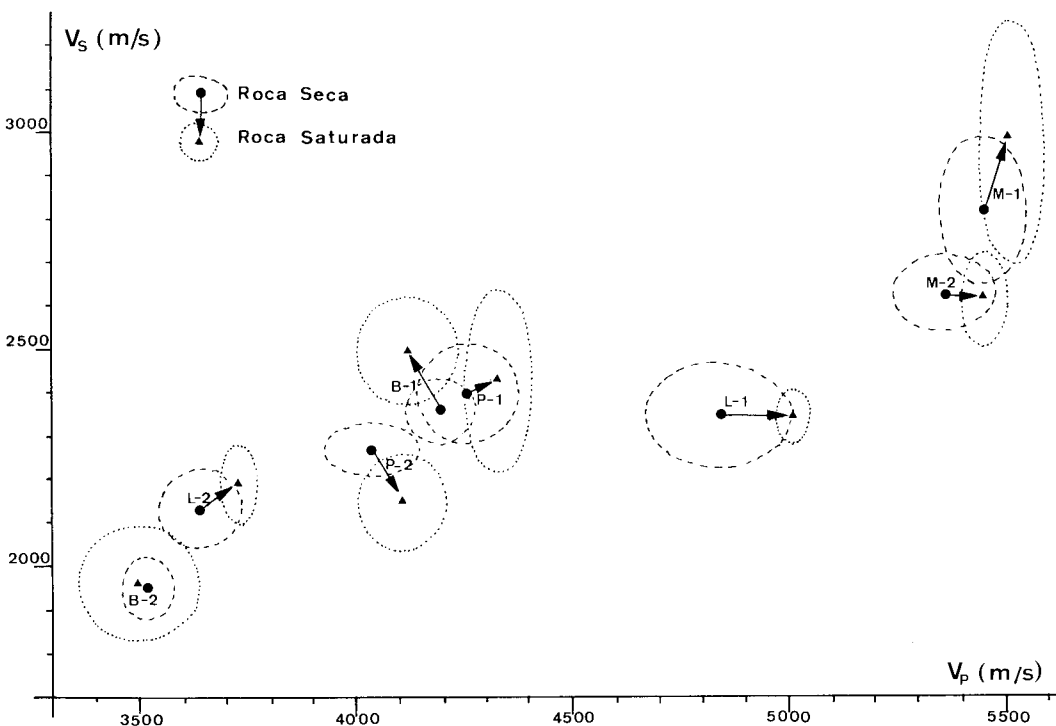


Fig. 3.- V_p respecto a V_s en los materiales estudiados. Se ha representado el valor medio y la desviación típica dentro de cada una de las muestras analizadas, tanto en estado seco (●) como saturado (▲).

Para el cálculo de V_p^* se han tomado los siguientes valores: calcita: 6660 m/s; dolomita: 7500 m/s; residuo insoluble: 5800 m/s.

En la Tabla III se muestran los valores resultantes para ambos índices, obtenidos a partir de los valores de propagación de ondas correspondientes a rocas secas. Dichos valores pueden ser comparados en la Fig. 4.

TABLA III.-Índices de calidad

Muestra	V_s / V_p	IQ (%)
M-1	0,52	82
M-2	0,49	80
L-1	0,49	73
L-2	0,59	55
P-1	0,56	65
P-2	0,56	61
B-1	0,56	58
B-2	0,55	48

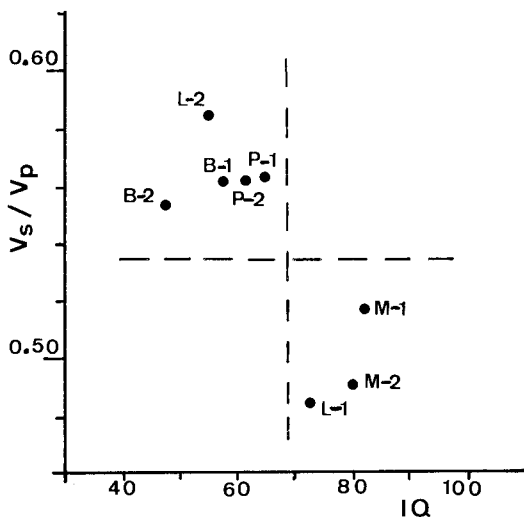


Fig. 4.-Relación V_s/V_p respecto al índice de calidad IQ: se observan dos grupos de rocas claramente diferenciados.

RESULTADOS

HOMOGENEIDAD DE LAS MUESTRAS

Las desviaciones observadas -tanto para V_p como para V_s - se presentan de forma aleatoria,

sin que puedan llegar a establecerse diferencias significativas en el grado de homogeneidad de las distintas muestras estudiadas. Por otra parte, puede verse que los valores de V_p son los que presentan menores desviaciones, situándose su

valor medio en un 2 %; los valores de V_s —concordantemente con la mayor complejidad que presenta su determinación— muestran desviaciones del orden del 5 %. Estas dispersiones son semejantes a las obtenidas por Bousquie (1979) también en rocas carbonatadas.

Dentro de cada muestra se observa una relación inversa entre los valores individuales de V_p y los correspondientes de porosidad (Fig. 5); esta relación es más evidente en las calizas micríticas. En algunos casos han podido observarse rasgos petrográficos particulares a los que atribuir las diferencias que presentan los valores de V_p . Así, una fractura en una probeta de la muestra B-1, y una veta en otra probeta de la muestra M-1 han supuesto en ambos casos una pérdida del 6 % en el valor de V_p . Dichos valores no han sido tenidos en cuenta en la elaboración de los valores medios.

INFLUENCIA DEL CONTENIDO EN AGUA

Comparando los valores obtenidos en condiciones de sequedad con los de saturación, se observa que las diferencias no son significativas. Así, para V_p la dispersión media se sitúa alrededor del 2 %, y para V_s , próxima al 3 %. En ambos casos las diferencias obtenidas son ligeramente menores a las dispersiones de las muestras. En consecuencia, se comprueba que —dentro del rango de las rocas carbonatadas estudiadas— el contenido en agua apenas modifica los valores de velocidad de propagación de ondas. Esto sin duda guarda relación con la ausencia de fisuración que presentan estos materiales, y que es concordante con las observaciones realizadas por otros autores en rocas carbonatadas (Houpert *et al.* 1978).

No obstante, analizando estas pequeñas diferencias, se constata que V_p aumenta en las rocas saturadas dentro de las calizas y disminuye en las dolomías. Teniendo en cuenta que las dolomías son las rocas estudiadas que presentan mayores valores de porosidad (alrededor del 14 %), esta disminución de V_p concuerda con los resultados obtenidos por Tourenq *et al.* (1971), en el sentido de que la saturación en agua en rocas de elevada porosidad hace disminuir V_p , mientras que en rocas de porosidad media o baja, dichos valores aumentan.

Respecto a V_s , se ha observado en general un mantenimiento o ligero aumento en la roca saturada, coincidiendo con las observaciones realizadas por diversos autores (ver Delgado Rodríguez 1983).

INTERPRETACIÓN PETROFÍSICA

Al analizar los valores de velocidad de propagación de ondas, así como los índices de calidad obtenidos, puede observarse la existencia de varios grupos de muestras, correlacionables con tipos rocosos diferenciados petrográficamente.

En primer lugar destaca la presencia de dos grandes grupos (Figs. 3 y 4), uno constituido por las calizas cristalinas y el otro por las calizas micríticas y dolomías cristalinas. El primero siempre presenta valores de V_p e IQ superiores al segundo, mientras ocurre lo contrario para la relación V_s/V_p .

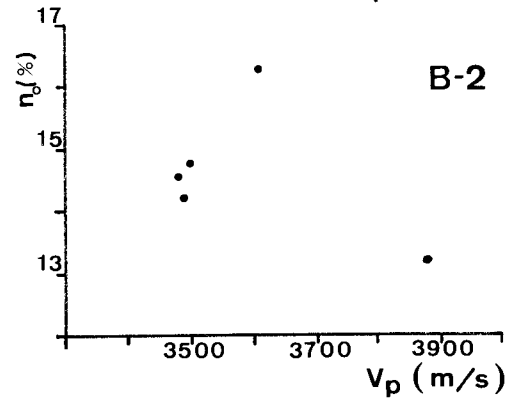
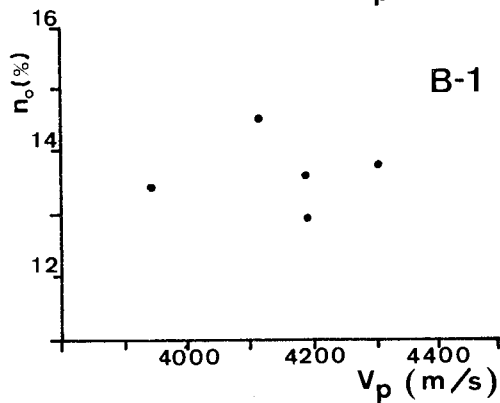
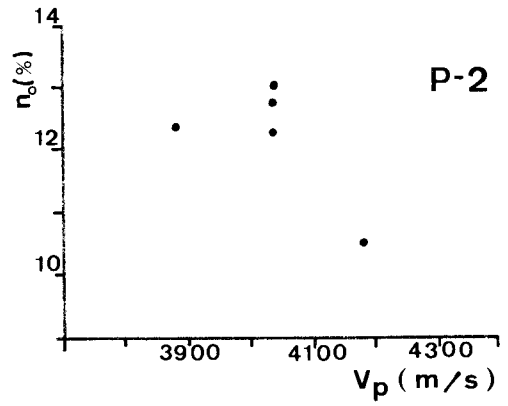
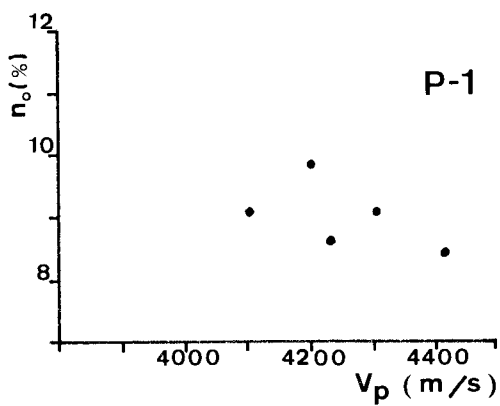
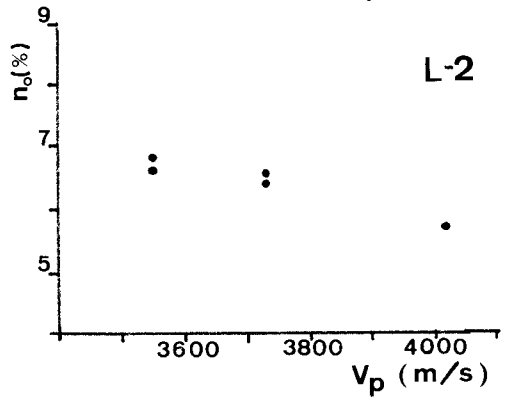
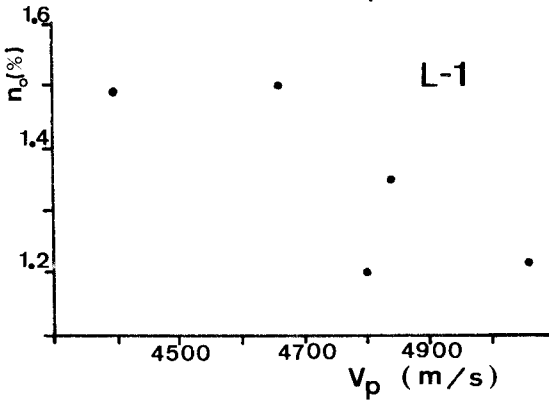
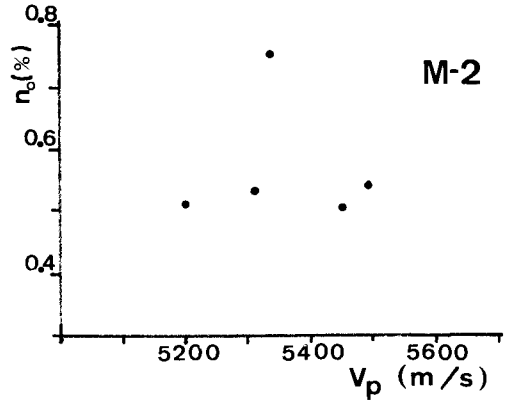
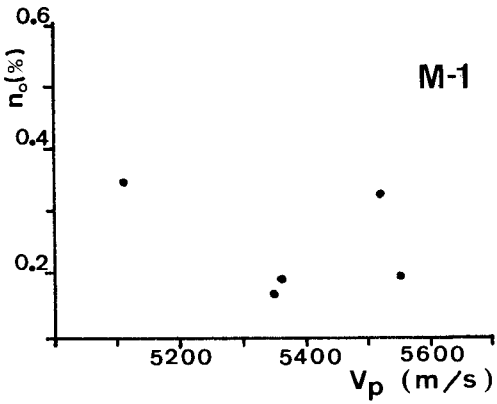
Dentro de las calizas cristalinas, tanto los valores de V_p como los de IQ guardan relación con el grado de pureza y cristalinidad de las rocas, así como con la porosidad. Los valores mayores corresponden a las rocas de más baja porosidad, más puras y cristalinas (mayor tamaño de grano). Puede observarse cómo pequeñas diferencias en estas variables petrográficas —muestra L-1— tienen gran influencia sobre los valores de V_p e IQ obtenidos.

Las calizas micríticas y dolomías cristalinas aparecen más o menos agrupadas y con valores de V_p y de IQ claramente inferiores a los de las calizas cristalinas. Estas son rocas más impuras (residuo insoluble próximo al 5 %) y más porosas (porosidad alrededor del 10 %).

En las dos variedades de la Caliza del Páramo, la roca menos porosa y más cristalina (muestra P-1) es la que presenta mayores valores de V_p e IQ, a pesar de su mayor contenido en arcillas. Por tanto, los factores texturales mencionados parecen poseer mayor influencia sobre V_p e IQ que el residuo insoluble.

En las Dolomías de Boñar las diferencias son más acusadas. La muestra B-1, respecto al resto de las calizas micríticas y dolomías cristalinas, posee valores semejantes de V_p y ligeramente inferiores de IQ, lo cual está relacionado con su porosidad ligeramente superior. La

Fig. 5.—Relación entre V_p de la roca seca y la porosidad accesible al agua, n_p , para cada uno de los especímenes ensayados, dentro de cada una de las muestras estudiadas.



muestra B-2 es la que presenta los valores más bajos, tanto de V_p como de IQ.

En la Caliza de Laspra, la muestra L-2 presenta también valores bajos y próximos a los de la muestra anterior (B-2). Este hecho puede relacionarse con el aspecto ligeramente menos coherente y más blando que presentan ambas muestras.

CONCLUSIONES

Los valores de V_p pueden ser utilizados directamente como un índice de calidad de la roca, dada la naturaleza esencialmente monomineralica de estas variedades petrográficas carbonatadas.

La velocidad de propagación de ondas –dentro del tipo de rocas considerado– es práctica-

mente independiente del contenido en agua que pueda presentar la muestra.

Las semejanzas entre los valores obtenidos para la roca seca y saturada en agua, así como la baja relación V_s/V_p , indica que se trata de rocas no fisuradas, es decir, su porosidad se debe a espacios vacíos de tipo poro.

En las calizas, la velocidad de propagación de ondas aumenta con el grado de recristalización de la roca, lo cual, normalmente, está en relación con su pureza, así como con la disminución de porosidad. En principio, esta conclusión no debe extrapolarse a rocas carbonatadas de gran tamaño de grano, como los mármoles.

V_p , V_s e IQ disminuyen con la falta o pérdida de cohesión de las rocas, lo que puede ser debido, tanto a un bajo grado de consolidación, como a procesos de alteración, guardando relación, en general, con aumentos de porosidad.

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. J. Ferry Borges, Director del Laboratorio de Ingeniería Civil de Lisboa, en donde se realizaron las medidas de velocidad de propagación de ondas, así como al Dr. J. Delgado Rodrigues, del mismo Laboratorio, por su ayuda y consejos durante la realización

de los ensayos. Al Prof. M. Montoto, del Dpto. de Petrología y Geoquímica de la Universidad de Oviedo, por sus comentarios y precisiones en la elaboración del manuscrito.

BIBLIOGRAFIA

- Accardo, G., Massa, S., Rossi-Doria, P., Sammuri, P. y Tabasso, M. (1981).—Artificial weathering of Carrara marble. Relationships between the induced variations of some physical properties. In: R. Rossi Manaresi (Ed.), *The Conservation of Stone II*, Bolonia, 243-273.
- A. S. T. M. (1978).—Standard method for laboratory determination of pulse velocities and ultrasonics elastic constants of rocks. In: *Annual Book of A.S.T.M. Standards*, Parte 19, Norma D 2845-69.
- Bouineau, A. (1978).—L'intérêt des essais non destructifs utilisés pour l'étude de la restauration des monuments et des sculptures. *Proc. Int. Symp. on Deterioration and Protection of Stone Monuments, Paris*, 7, 15, 29 pp.
- Bousquie, P. (1979).—*Texture et porosité de roches calcaires*. Tesis, Univ. Pierre et Marie Curie, Paris VI, 191 pp.
- Delgado Rodrigues, J. (1983).—Laboratory study of thermally-fissured rocks. *Memoria n.º 583, Laboratorio Nacional de Engenharia Civil, Lisboa*, 13 pp.
- Houpert, R.; Koromi, N. y Tisot, J. P. (1978).—Structure, propriétés physiques et comportement mécanique des roches calcaires. *Proc. III Cong. Assoc. Int. Geol. Ing., Madrid*, Secc. II, 191-199.
- I. S. R. M. (1978).—Suggested methods for determining sound velocity. *Int. J. of Rock Mech. and Min. Sci.*, 15 (2), 55-58.
- Lama, R. D. y Vutukuri, V. S. (1978).—*Handbook of mechanical properties of rocks*. Vol. II, Trans. Tech. Publications, 195-311.
- Mamillan, M. (1976).—Méthodes d'essais physiques pour évaluer l'altération des pierres des monuments. In: R. Rossi Manaresi (Ed.), *The Conservation of Stone I*, Bolonia, 595-634.
- R. I. L. E. M. (1980).—Essais recommandés pour mesurer l'altération des pierres et évaluer l'efficacité des méthodes de traitement. *Matériaux et Constructions*, 13 (75), 216-220.
- Tatham, R. H. (1982).— V_p/V_s and lithology, *Geophysics*, 47 (3), 336-344.
- Tourenq, C., Fourmaintraux, D. y Denis, A. (1971).—Propagation des ondes et discontinuités des roches. *Symp. Soc. Int. Mec. Roches, Nancy*, 15 pp.