

Caracterización del comportamiento elástico de materiales pizarrosos del Sinclinal de Truchas mediante ultrasonidos

M. A. RODRÍGUEZ SASTRE y L. CALLEJA

Departamento de Geología, Universidad de Oviedo, c/Jesús Arias de Velasco, s/n, 33005 Oviedo, Asturias

marsast@hotmail.com, lcalleja@geol.uniovi.es

Resumen: Las pizarras del Sinclinal de Truchas (Zona Centroibérica) vienen siendo explotadas y muy utilizadas en la fabricación de pizarras de techar desde mediados del siglo pasado, con una aplicación industrial que reporta un importante beneficio económico en los sectores involucrados. El análisis petrográfico “de visu” y a escala microscópica junto con la determinación de las propiedades físicas contribuyen a un mejor conocimiento reológico de estos materiales. La aplicación de técnicas ultrasónicas permite establecer, de modo no destructivo, las constantes elásticas de estas rocas y pueden informar del posible comportamiento de las mismas frente a las operaciones extractivas durante su explotación en las canteras de pizarra. La fábrica planar y la distinta inclinación de los planos de foliación son los principales parámetros que condicionan la propagación de ondas ultrasónicas, sumado a las variaciones litológicas de las distintas muestras. Los valores máximos registrados para estos parámetros se corresponden con una inclinación de la foliación a 90°, es el caso en el que las ondas viajan paralelamente a estos planos, y mínimos a 0°, cuando las ondas se propagan perpendicularmente a los mismos. Los datos obtenidos, en relación con la distinta inclinación del plano de foliación, presentan una relación lineal con las constantes elásticas de los materiales pizarrosos estudiados a excepción del módulo de Poisson .

Palabras clave: Pizarras, Sinclinal de Truchas, Zona Centroibérica, comportamiento elástico, ultrasonidos.

Abstract: Truchas Syncline slates has been exploited since the second half of the last century to perform roof slate, as the main industrial application which implies an important economic profit to the mine companies working in this area. Petrographic studies from visu to microscopic scale, added to the physical property determinations report a better reological knowledge of this rocks. Ultrasonic measurements led us establish rock elastic constants, by a non destructive method, and it would inform about rock behaviour during exploitation works in slate quarries. Planar fabric and inclination of the cleavage planes are the main parameters involved in the propagation of the ultrasonic waves including lithologic changes. Maximum values obtained from the ultrasonic propagation are reached when foliation appears at 90° (waves travel along foliation planes) and minimum when waves travel at 0°, perpendicular way at foliation plane. Linear correlation has been obtained to the main elastic constant from slates but not to Poisson relation.

Key words: Slates, Centro Iberian Zone, Truchas Syncline, elastic behaviour, ultrasounds.

Geográficamente los materiales pizarrosos investigados se encuentran en el SO de la provincia de León y NE de la de Orense enmarcados en el denominado Sinclinal de Truchas. Dentro de las clásicas divisiones realizadas para la Península Ibérica por Lotze (1945), y modificadas posteriormente por Julivert *et al.* (1972), y Farias *et al.*

(1987) el sinclinal de Truchas se emplaza en la Zona Centroibérica (ZCI), próxima al borde con la zona Asturoccidental-leonesa (ZAOL). Este sinclinal constituye el flanco septentrional del anticlinal del Olló de Sapo, emplazado como una única lámina cabalgante poco compartimentada (Martínez Catalán *et al.*, 1992).

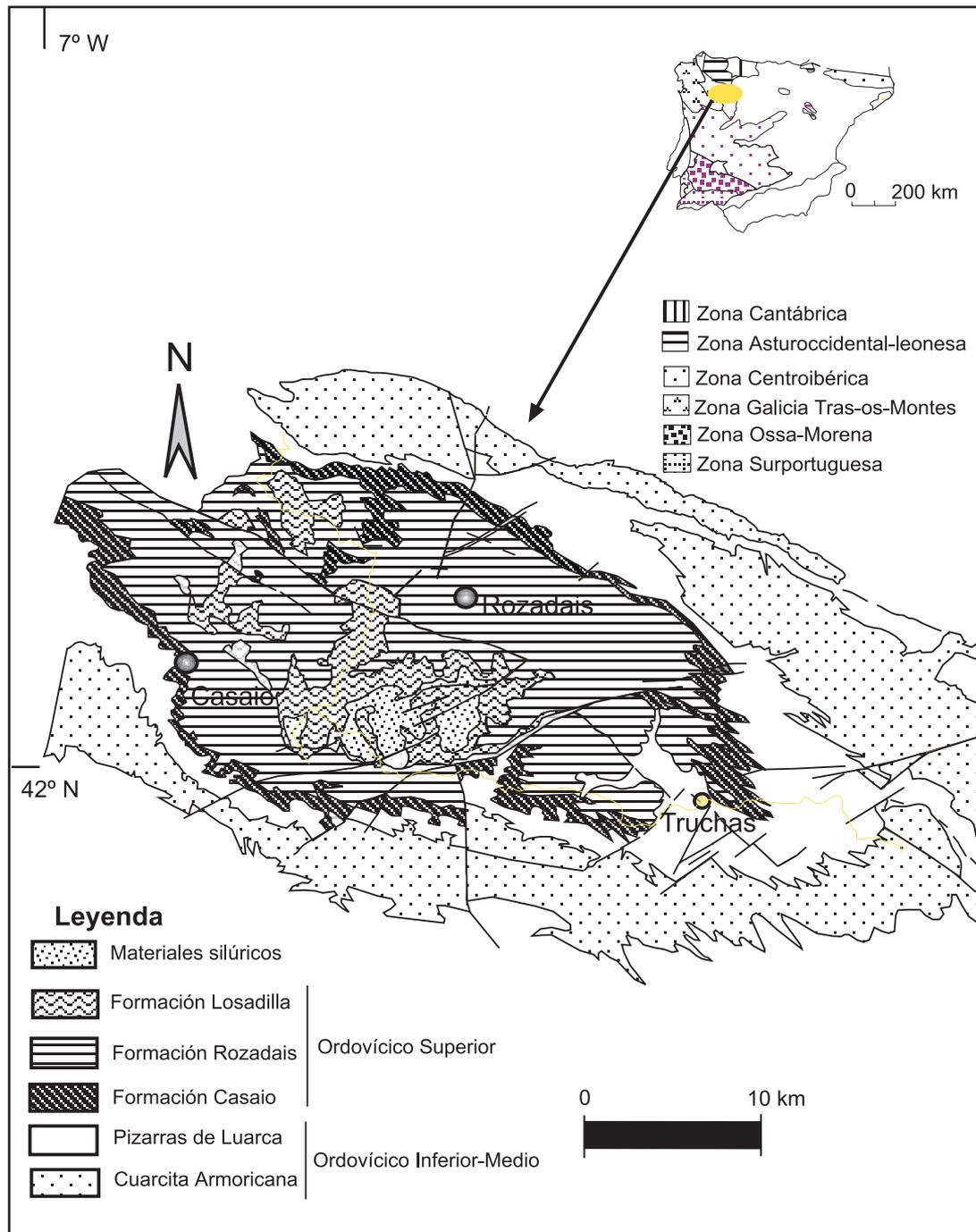


Figura 1. Marco geológico y situación de las explotaciones de pizarra estudiadas (basado en Arias *et al.*, 2002).

Este sinclinal está constituido por materiales paleozoicos de edad ordovícica, concretamente ordovícico superior, representado por las Formaciones Casaio, Rozadais y Losadilla (Sarmiento *et al.*, 1999) (Fig. 1). Los materiales han sido deformados principalmente durante la deformación Varisca en sus dos fases, originándose pliegues menores, de escala métrica, aso-

ciados a la estructura sinclinal principal de dirección axial NO-SE y vergencia al N. Estos pliegues van acompañados de una foliación de plano axial tipo clivaje pizarroso y constituye esta foliación la anisotropía principal de la roca, condicionando su desarrollo su desarrollo la extracción de estos materiales para pizarras de techar.

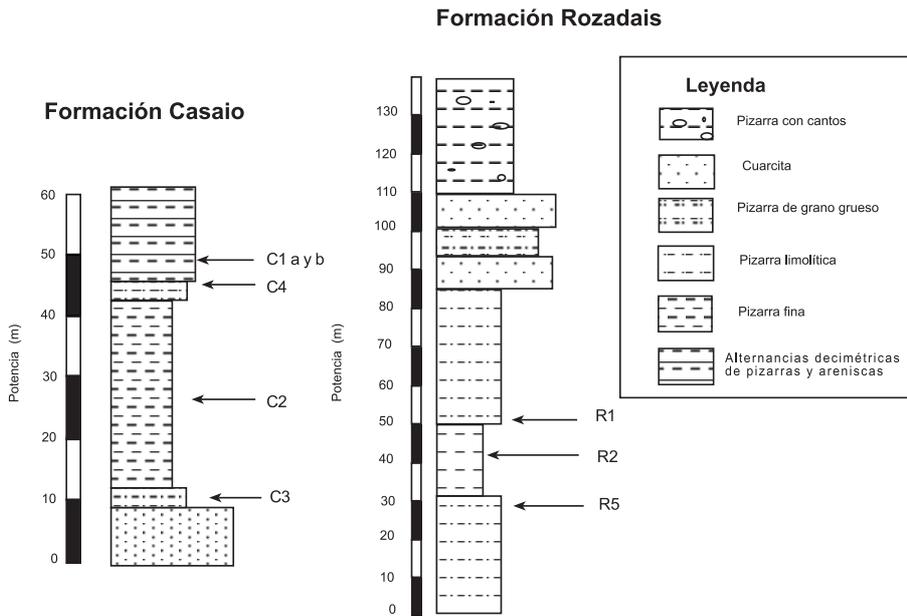


Figura 2. Secuencias estratigráficas y niveles muestreados en las dos localidades estudiadas.

Los materiales rocosos que constituyen este sinclinal se han visto sometidos a condiciones de metamorfismo de bajo grado dentro de la facies de la clorita (Mesa López-Colmenar, 2003) correspondientes a condiciones metamórficas de anquizona y comienzo de la epizona. Para efectuar la toma de muestras en el sinclinal se determinó una zona donde se llevó a cabo un levantamiento de la columna estratigráfica en el flanco sur (dentro de la Formación Casaio) y otra en el flanco norte (Formación Rozadais) (Fig. 2).

Toma de muestras

Se tomaron muestras de cada nivel litológico definido, dentro del ámbito de la unidad de pizarra explotable, así como a muro y techo en contacto directo con dicho nivel, tal y como refleja la Tabla I.

Las muestras inalteradas de roca fueron obtenidas de un centenar de bloques de cantera y cortadas según los planos XZ e YZ de la foliación principal (Rodríguez Sastre, 2003). Las muestras se conservaron húmedas durante todo el proceso de preparación y hasta el momento del ensayo. De los bloques seleccionados se tallaron probetas de 54 mm de diámetro para los distintos ensayos a realizar con el fin de enfatizar la relación en las distintas orientaciones de la anisotropía principal con los parámetros estudiados.

Además se ha tenido en cuenta, en los casos en que fue posible, la relación entre la foliación y la estratificación. Esto sólo se ha podido establecer en el caso de las pizarras con laminaciones arenosas ya que en el resto de las litologías la estratificación es difícilmente observable.

Tabla I. Nomenclatura y descripción del conjunto de muestras estudiadas.

Formación	Localización dentro del sinclinal	Posición estructural	Muestra	Litología
Casaio	Flanco Sur	Flanco normal	C1 a	Pizarra con laminaciones arenosas
			b	
		Charnela		
		Flanco normal	C2	Pizarra de grano fino
		Flanco normal	C3	Pizarra limolítica techo
Rozadais	Flanco Norte	Flanco normal	C4	Pizarra limolítica muro
			C5	Cataclasita
		Flanco normal	R1	Pizarra limolítica techo
			R2	Pizarra de grano fino
			R5	Pizarra limolítica muro

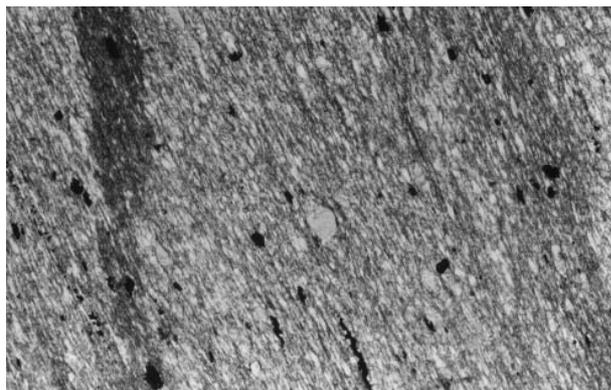


Figura 3. Pizarra de grano fino, Formación Casaio, muestra C2 (L.P.A.).

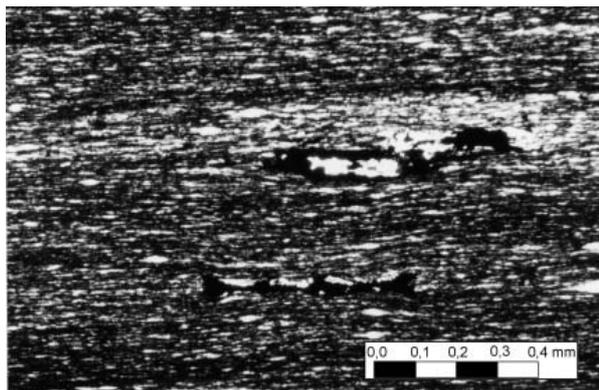


Figura 4. Pizarra de grano fino, Formación Rozadais, muestra R2a (L.P.A.).

Petrografía

Descripción macroscópica de las muestras

Dentro de la Formación Casaio (muestras C) se diferenciaron los niveles correspondientes a los términos de pizarra fina, limolíticos y con intercalaciones areniscosas, mientras que en la Formación Rozadais (muestras R) se determinaron los términos finos y limolíticos fundamentalmente.

Muestra C1: Pizarra gris con foliación dominante y laminaciones de areniscas a modo de bandas, constituidas principalmente por cuarzo, con un espesor de 3-5 cm, que representan el relictos de las superficies de estratificación del protolito sedimentario. En las superficies de foliación son frecuentes las lineaciones de minerales de sulfuros metálicos. La muestra se ha subdividido en dos tipos, en función de la relación que presentan las laminaciones con la foliación principal:

C1a: con posiciones subhorizontales de la estratificación (S_o) que se inclina ligeramente, en torno a 20° , con respecto a la foliación (S_p).

C1b: determina posiciones de la estratificación (S_o) subverticales, en torno a 50° de la foliación (S_p).

El litotipo "a" es más homogéneo en general que el litotipo "b", que sufre particiones internas más fácilmente a través de los planos de foliación.

Muestra C2: Pizarra de grano fino, con contenido variable de cuarzo, presencia de abundantes sulfuros en algunos tramos. El tamaño de los sulfuros es del orden milimétrico a centimétrico y están presentes principalmente según los planos de foliación.

Muestra C3: Pizarra limolítica gris con nódulos de 1-2 cm, constituidos principalmente por cuarzo y sulfuros, presentando finas intercalaciones areniscosas de orden milimétrico.

Muestra C4: Pizarra gris limolítica.

Muestra R1: Pizarra limolítica gris azulada con presencia de sulfuros de hierro de grano fino y otros de mayor tamaño (en torno a 1 cm).

Muestra R2: Pizarra gris de tonalidad azulada con sulfuros de tamaño milimétrico y finamente diseminados.

Muestra R5: Pizarra gris limolítica con tonalidades azuladas y presencia de sulfuros.

Descripción microscópica

La descripción mineralógica y textural de las muestras se realizó mediante estudios de microscopía óptica de polarización por transmisión y reflexión sobre secciones delgadas y pulidas.

Muestra C2 (pizarra de grano fino de la Formación Casaio): constituye una lámina orientada según el plano YZ, y presenta las siguientes características petrográficas:

a) Composición mineralógica: La roca está formada por moscovita (40%), cuarzo (35%), clorita (15%), opacos (7%), plagioclasa (2%) y otros (turmalina, circón y materia carbonosa < 1%).

b) Características texturales: Textura lepidoblástica y bandeada; en el borde de la lámina aparece una banda continua, con límites paralelos, de grano más grueso. La roca es de grano fino, con minerales de tamaño de grano medio algo menor a 0,3 mm, correspondiente a los blastos mayores de clorita, inmersos en una matriz constituida por clorita, cuarzo y moscovita de grano fino (<0,1 mm). También se observa la presencia de un dominio de carácter bandeado limolítico-areniscoso con espesor variable entre 1,7 a 2,3 mm, que constituyen los planos de la estratificación original de la roca.

c) Microestructura: Clivaje pizarroso (slaty cleavage), grosero generalizado en los dominios pizarrosos y esquistosidad grosera en los dominios de mayor tamaño (Fig. 3).

d) Clasificación petrográfica: Pizarra.

Muestra R2 (pizarra de grano fino de la Formación Rozadais): en lámina orientada según el plano YZ, presenta las siguientes características petrográficas:

a) Composición mineralógica: moscovita (40%), cuarzo (35%), clorita (20%), otros (opacos, turmalina, circón, plagioclasas, < 5%).

b) Características texturales: Textura lepidoblástica. La roca es de grano fino. Predominan las moscovitas junto con el cuarzo y la clorita, que son los minerales que mayor tamaño presentan en la lámina observada, junto con los minerales opacos postcinemáticos que están dispersos en una matriz más fina constituida por clorita+moscovita+opacos fundamentalmente (Fig. 4).

c) Microestructura: clivaje pizarroso (slaty cleavage).

d) Clasificación petrográfica: Pizarra de grano fino.

Propiedades físicas

Se han determinado un conjunto de parámetros físicos fundamentales a la hora de hacer una interpretación del comportamiento de las rocas y que pueden además servir como índices de calidad de la misma; a saber: contenido en humedad, índice de vacíos, absorción libre de agua, y densidades aparente (γ_{ap}) y seca (γ_{seca}).

Se incluye también en este apartado la medida de la velocidad de propagación de las ondas elásticas longitudinales y transversales y el estudio de la influencia de la anisotropía principal, constituida por la foliación, en su transmisión a través de la masa rocosa.

Ensayos de identificación y resultados

Los ensayos que se utilizan para determinar el contenido en humedad, densidad seca y aparente de las rocas están normalizados, siguiendo los procedimientos propuestos por las normas UNE (AENOR, 1999). Se trabajó con un total de 36 muestras de morfología discoidal, cinco de cada uno de los litotipos definidos en cada serie litoestratigráfica. Para la medida de la humedad natural se utilizaron en total 62 muestras que, a su vez, fueron aprovechadas para la determinación de la velocidad de propagación de las ondas elásticas.

Los resultados obtenidos se recogen en las Tablas II y III. De los valores de densidades obtenidos para las pizarras de Rozadais (R1, R2 y R5), se deduce que las rocas de tamaño de grano más fino presentan ligeramente mayor densidad, mientras que a mayor contenido en cuarzo los valores de las densidades de las pizarras son menores ($2,79 \text{ g/cm}^3$ para las pizarras con laminaciones de areniscas).

Los parámetros analizados se caracterizan por presentar rangos de valores muy próximos para ambos tipos de litologías.

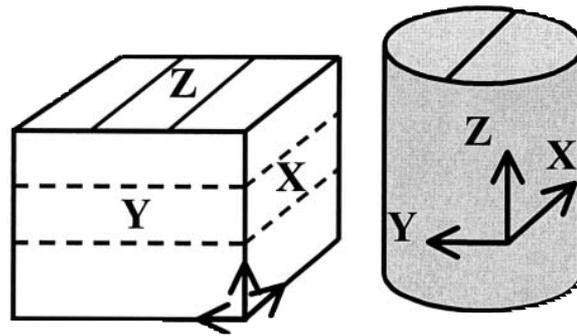


Figura 5. Orientación de las lineaciones principales (lineación de intersección entre la foliación y la estratificación en traza continua) en las probetas ensayadas cuando la foliación se encuentra horizontal, ($\beta=0^\circ$).

Velocidad de propagación de ondas elásticas

Los métodos sísmicos se basan principalmente en la medida de la velocidad de propagación de las ondas elásticas tanto en campo como en laboratorio, estando relacionada intrínsecamente la transmisión de estas ondas a través de un material rocoso con las propiedades elásticas del medio. El comportamiento elástico puede también determinarse a partir de las constantes elásticas; las más usadas son: el módulo de Young, la relación de Poisson, el módulo de cizalla o rigidez, el módulo de compresibilidad y la constante de Lamé.

En la aplicación de los métodos sísmicos a la geología, la propiedad más usada es la velocidad de propagación de las ondas P. Para las rocas del tipo de las pizarras y lutitas las velocidades de las ondas P varían entre 2.400 y 5.000 m/s (González de Vallejo et al., 2002). Otros factores que influyen en la velocidad de propagación de las ondas, según Sharma (1986), son la porosidad, fracturación, contenido en agua y composición mineralógica de la roca.

Metodología

La medida de las velocidades de propagación de las ondas elásticas longitudinales y transversales (P y S) se realizó sobre probetas de roca matriz orientadas con distintas disposiciones de la foliación metamórfica. Estos métodos también han sido utilizados para caracterizar y poner de manifiesto la calidad de los materiales rocosos (ripabilidad de las rocas, Mcann y Fenning, 1995), así como aplicados a la evaluación de los estudios de alteración de la piedra natural y su degradación durante los ensayos de envejecimiento acelerado, dentro del campo de estudio del comportamiento de las rocas ornamentales (Alonso, 1986), de modo semejante a como se ha venido haciendo con el control de calidad de los hormigones en ingeniería (Hassani et al., 1997).

Tabla II. Propiedades físicas de las pizarras. β : Ángulo de la foliación con la base de la probeta.

Muestra	β (°)	Humedad natural (%)	Índice de vacíos (%)			Absorción libre media (%)	Densidad aparente (g/cm ³)
			Max.	Min.	Media		
R1	0	0,000	--	--	--	0,030	--
R2	0	--	--	--	--	--	2,815
R5	0	--	--	--	--	--	2,810
C4	10	0,007	0,149	0,061	0,082	0,066	2,816
	25	--	--	--	--	--	2,863
	45	--	--	--	--	--	2,813
	60	--	--	--	--	--	2,807
C2	90	0,019	0,154	0,055	0,085	0,043	2,779
	35	0,010	--	--	--	0,039	2,821
	25	0,004	--	--	--	0,024	2,859
	45	0,015	--	--	--	0,052	2,814
	0	0,004	--	--	--	0,047	2,787
C3	45	0,033	0,089	0,000	0,028	0,109	2,827
	35	--	--	--	--	--	2,822
	25	--	--	--	--	--	2,867
	60	--	--	--	--	--	2,823
C1a	45	--	--	--	--	0,013	2,728
	35	--	--	--	--	0,023	2,805
	25	0,037	0,078	0,000	0,045	0,041	2,475
	0	0,027	--	--	--	0,051	2,836
C1b	35	--	--	--	--	0,004	2,876
	10	--	--	--	--	--	2,871
	0	--	--	--	--	--	2,851

Para la realización de estas medidas se empleó un equipo de emisión de impulsos ultrasónicos (OYO Cop. mod. 5.217) con transductores para ondas P de 45 kHz y para las S de 33 kHz de frecuencias nominales de resonancia.

El estudio se realizó sobre probetas talladas de forma cilíndrica y rectangular (Fig. 5), a temperatura y presión ambientes y en condiciones de saturación de agua tras un periodo en inmersión de 36h. Se midieron 80 muestras orientadas con distintos ángulos (β) respecto de la anisotropía principal (foliación, plano XY).

Las probetas cilíndricas tenían un diámetro variable entre 53,26 y 54,22 mm y longitudes diversas entre 176 y 36 mm. Así mismo, se tallaron de manera que la foliación formara distintos ángulos (desde 0 a 90°, pasando por posiciones intermedias de 10, 25, 35, 45 y 60°) con respecto a la base de las probetas; por tanto la velocidad de las ondas se midió en la dirección paralela al eje de las probetas, (dirección Z) en el caso de las cilíndricas y en las tres direcciones del espacio en las rectangulares.

Resultados

Los resultados obtenidos para las probetas rectangulares quedan reflejados en la Tabla IV, variando las velocidades registradas para las ondas P entre 2.691 y 6.991 m/s y para las S entre 1.172 y 3.482 m/s.

Tabla III. Resumen de las propiedades físicas de las pizarras estudiadas.

Propiedades físicas	Formación	
	Casaio	Rozadais
Humedad natural (%)	0,004-0,037	0,00
Humedad de saturación (%)	0,070-0,353	0,121-0,146
Índice de vacíos (%)	0,028-0,085	-
Absorción libre (%)	0,004-0,066	0,030
Densidad aparente (g/cm ³)	2,47-2,76	2,73-2,89
Densidad seca (g/cm ³)	2,76-2,86	2,84
Porosidad eficaz (%)	0,002-0,01	0,003-0,004

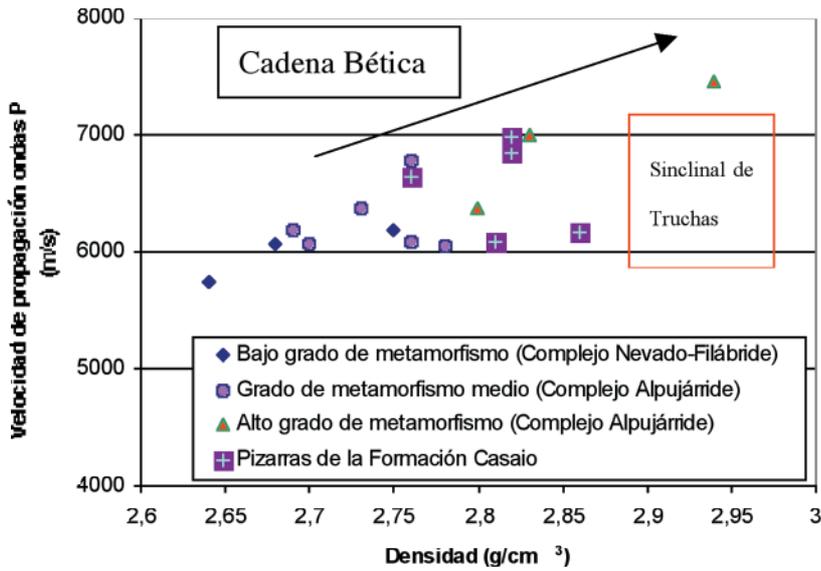


Figura 6. Velocidades de las ondas P en distintas rocas metamórficas según la dirección de mayor velocidad (Zappone *et al.* 2000) frente a la densidad a P = 280 MPa y los valores obtenidos en las probetas rectangulares del Sinclinal de Truchas (densidades de la rocas a P = 0 Mpa).

Tabla IV. Velocidad de las ondas P (V_p) y S (V_s) en probetas rectangulares según tres direcciones ortogonales.

Formación	Muestra	V_p (m/s)			V_s (m/s)		
		(XY)	(XZ)	(YZ)	(XY)	(XZ)	(YZ)
Casaio	C2-M	3186	6437	6848	1172	3061	3482
	C4	2691	5711	6078	1473	2786	3161
	C1b	3936	5816	6162	2019	2908	3040
	C1a	3666	6442	6636	1990	3221	2903
	C2	3327	6504	6991	1683	3136	3263
Rozadais	R5	3788	5813	5699	1317	2927	2763

Los valores según las caras XY, perpendiculares a los planos de foliación son menores que en las otras dos direcciones. Las variaciones entre las velocidades de los planos XZ e YZ, pueden deberse al hecho de que los planos de anisotropía no son perfectamente paralelos sino que presentan una ligera sinuosidad. También pueden existir interferencias de las ondas elásticas con las bandas de areniscas que contienen este tipo de rocas.

Para las medidas efectuadas en la sección XY, tanto las V_p como las V_s , presentan los mayores valores en las pizarras con laminaciones arenosas, en las que presentan la estratificación a modo de bandas composicionales perpendiculares a la foliación, no existiendo esta relación en las otras dos direcciones.

Las medidas de V_p realizadas en la Formación Casaio según la dirección XY ($\beta=0^\circ$) se han considerado como bajas-moderadas y moderadas-altas en la de Rozadais, mientras que para las otras direcciones, XZ e YZ ($\beta=90^\circ$), son muy altas.

Se ha calculado la relación entre las velocidades con distintas orientaciones para conocer el comportamiento de la anisotropía a lo largo del plano de foliación (aniso-

tropía principal de la pizarra) y como podría influir el bandeado de areniscas observado en el microscopio.

El índice de anisotropía, calculado para cada tipo de onda, se estableció a partir de los valores de sus velocidades en las distintas orientaciones mediante la expresión:

$$I_{av} = (V_{xz} + V_{yz}) / 2 \times V_{xy}$$

Pernia *et al.* (1986) determinaron las diferencias para las distintas orientaciones de la anisotropía que presentan este tipo de rocas y proponen un índice de anisotropía definido como:

$$I_a = V_{p_{Max}} / V_{p_{Min}}$$

Este parámetro varía entre 1,36 y 2,25, mientras que el índice aquí propuesto varía entre 1,33 y 2,19, siendo clasificado este rango de anisotropía como bajo-medio (Ramamurphy, 1993).

Zappone *et al.* (2000) midieron la velocidad de propagación de las ondas P en el laboratorio para rocas similares de la Cordillera Bética, poniendo en evidencia la evolución de la velocidad de propagación de ondas con el

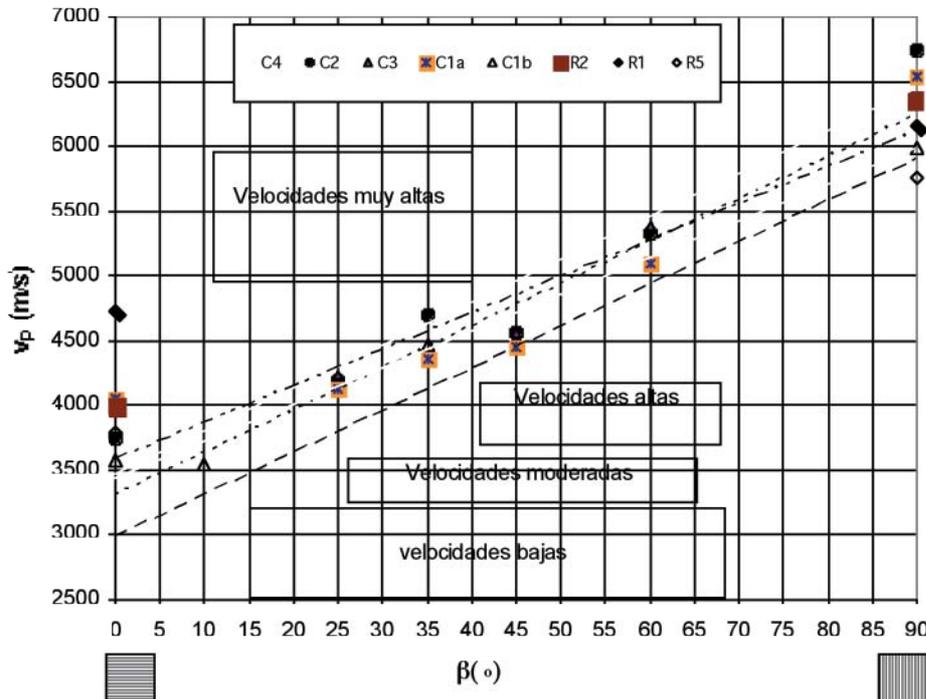


Figura 7. Relación de la velocidad de las ondas elásticas con el ángulo de anisotropía principal (β) en materiales pizarrosos (Rozadais "R" y Casaio "C") del Sinclinal de Truchas (los coeficientes de correlación varían de 0,98 a 0,85).

grado metamórfico; en la Fig. 6 se han representado, junto con los datos de estos autores, los obtenidos en las pizarras del Sinclinal de Truchas.

Los resultados de las medidas efectuadas principalmente sobre probetas cilíndricas y, en menor medida, para muestras rectangulares se recogen en la Tabla V; se especifica, además, el ángulo que presenta la foliación con respecto a la base de la probeta (β) y el número de probetas medido para cada orientación.

Los valores máximos en las velocidades de propagación de las ondas, tanto P como S, para el conjunto de muestras analizadas se alcanzan para las orientaciones del ángulo de foliación con respecto a la base de la probeta (β) de 90° y a 0° la mínima (Fig.7).

Las correlaciones entre velocidades y ángulo de inclinación de la anisotropía son lineales y sus coeficientes, para cada uno de los litotipos diferenciados, son buenos o muy buenos. Es destacable el hecho de que son muy altas para la transmisión de las ondas P y más bajas para la de las ondas S, sobresaliendo las velocidades muy altas para C2 y C4 e inferiores para el resto de los litotipos. Esta elevada correlación de la transmisión de las ondas con el ángulo de anisotropía vuelve a poner de relieve el grado de interferencia de la inclinación del plano de anisotropía en el registro de las velocidades de las ondas a través de materiales pizarrosos en los ensayos de laboratorio.

Constantes elásticas

El comportamiento elástico de las rocas puede establecerse mediante el módulo de Young (E_{din}), el coeficiente de Poisson (ν_{din}) y el de rigidez o cizalla (G), entre otros o mediante las fórmulas establecidas por la ASTM (1978) para la determinación de estas constantes.

En general, los valores de las constantes de elasticidad dinámicas son superiores a las determinadas en ensayos mecánicos (constantes de elasticidad estáticas) (Calleja, 1985; Sharma, 1986; Alonso, 1986; Jonson y Degraff, 1994; Hassani *et al.*, 1997; Dobrin y Savit, 1988; López, 2000; González de Vallejo *et al.*, 2002; Turcotte, 2002).

Resultados

Aplicando las ecuaciones antes citadas, especialmente en las probetas cilíndricas –aunque también se calculó el módulo de Young dinámico y la relación de Poisson para las probetas rectangulares–, se obtuvieron los valores que aparecen en la Tabla VI.

Los cálculos se han realizado a partir de los valores de densidad de $2,82 \text{ g/cm}^3$ para C2 y R2, de $2,81 \text{ g/cm}^3$ para R1, R5, C3 y C4 y de $2,76 \text{ g/cm}^3$ para C1a y C1b.

Representando gráficamente los valores obtenidos frente al ángulo inclinación del plano de anisotropía principal y la base de la probeta (β), se constata que existe una correspondencia directa entre las constantes dinámicas y el ángulo de inclinación para todas las constantes calcu-

Tabla V. Velocidades de las ondas P (V_p) y S (V_s) en probetas de pizarras del sinclinal de truchas. β : ángulo de la foliación con la base de la probeta. El número de probetas medidas se indica entre paréntesis siendo para el resto de los casos la unidad. (*): resultados según informe CEDEX (1998).

Formación	Muestra	Probeta	β	V_p media (m/s)	V_s media (m/s)	V_p/V_s
Rozadais	R2 (4)	Cilíndrica	0	3989	1899	2,10
	R2 (4) (*)	Cilíndrica	30	4601	2228	2,06
	R1 (3)	Cilíndrica	0	4729	2489	1,90
	R1	Cilíndrica	90	6154	3385	1,82
	R2 (2)	Cilíndrica	90	6362	4769	1,33
	R5(5)	Rectangular	0	3788	1317	2,88
	R5(2) (*)	Cilíndrica	30	4922	2455	2,00
	R5 (10)	Rectangular	90	5756	2845	2,02
Casaio	C4(4)	Cilíndrica	10	3250	1774	1,83
	C4	Cilíndrica	45	4361	2181	2,00
	C4	Cilíndrica	60	4759	2826	1,68
	C4(2)	Rectangular	90	5894	2973	1,98
	C4	Rectangular	0	2691	1473	1,83
	C4	Cilíndrica	25	4352	2210	1,97
	C2	Cilíndrica+ Rectangular	90	6743	3126	2,16
	C2	Cilíndrica	60	5333	2783	1,92
	C2 (3)	Cilíndrica	35	4692	2499	1,88
	C2 (2)	Cilíndrica	25	4190	2414	1,74
	C2 (7)	Cilíndrica	45	4551	2423	1,88
	C2	Cilíndrica+ Rectangular	0	3743	1860	2,01
	C3 (2)	Cilíndrica	60	5386	2695	2,00
	C3	Cilíndrica	25	4241	2121	2,00
	C3	Cilíndrica	35	4377	2278	1,92
	C3 (4)	Cilíndrica	45	4557	2131	2,14
	C1a	Cilíndrica	90	6539	3062	2,14
	C1a (2)	Cilíndrica	60	5100	2336	2,18
	C1a	Cilíndrica	45	4453	2284	1,95
	C1a (3)	Cilíndrica	35	4354	2310	1,88
	C1a (4)	Cilíndrica	25	4125	2301	1,79
	C1a (6)	Cilíndrica+ Rectangular	0	4057	2284	1,78
	C1b	Cilíndrica+ Rectangular	0	3577	1873	1,91
	C1b	Cilíndrica	10	3546	1196	2,96
	C1b (3)	Cilíndrica	35	4465	2408	1,85
	C1b	Cilíndrica	90	5989	2974	2,01

ladas, excepto para el coeficiente de Poisson (Fig. 8). El módulo de Young frente a la inclinación del ángulo de anisotropía presenta una buena correlación lineal, del orden de 0,9 para las muestras C3, C4 y de 0,8 para C1b. También se dan correlaciones buenas (de 0,6) para C1a en las muestras de la Formación Casaio.

En general los máximos valores se obtienen para las orientaciones del ángulo de la foliación a 90° y los mínimos para 0°, independientemente del litotipo de la

muestra analizada. La excepción la representa el módulo de Poisson, donde se observa una independencia del ángulo de la anisotropía con dicha constante de las rocas y para la que los valores mínimos se corresponden con distintos ángulos en cada una de las muestras analizadas.

En las probetas rectangulares las medidas fueron realizadas en las tres direcciones, en la normal y las paralelas al plano de foliación. Esto permite obtener los módu-

Tabla VI. Valores de las constantes dinámicas. β : ángulo de la foliación con la base la probeta. E_{din} : módulo de Young dinámico. ν_{din} : relación de Poisson. G_{din} : módulo de rigidez o cizalla. K_{din} : módulo de compresibilidad. λ_{din} : constante de Lamé.

Formación	Muestra	β (°)	$E_{din} \times 10^4$ (MPa)			ν_{din}			$G_{din} \times 10^4$ (MPa)	$K_{din} \times 10^4$ (MPa)	$\lambda_{din} \times 10^7$ (MPa)
			Máx.	Min.	Media	Máx.	Min.	Media	Media	Media	Media
Rozadais	R2 (4)	0	3,10	2,30	2,76	0,39	0,32	0,35	1,02	3,14	3,48
	R1 (3)	0	5,54	3,79	4,58	0,33	0,29	0,31	1,64	3,66	4,21
	R5(5)	0	1,95	0,97	1,40	0,46	0,34	0,42	0,49	3,48	3,65
	R1	90	-	-	8,25	-	-	0,31	2,43	4,79	5,60
	R2 (2)	90	12,28	8,87	10,58	-0,02	-0,33	-0,17	6,42	2,88	5,02
	R5 (10)	90	7,04	4,57	6,11	0,36	0,32	0,34	2,36	6,39	7,18
Casaio	C4(4)	10	2,80	1,54	2,23	0,38	0,14	0,26	0,91	1,76	2,06
	C4	45	-	-	3,56	-	-	0,33	1,34	3,56	4,01
	C4	60	-	-	5,51	-	-	0,23	2,24	3,37	4,12
	C4	0	-	-	1,57	-	-	0,28	0,61	1,22	1,42
	C4(2)	90	7,38	5,86	6,62	0,34	0,31	0,33	1,86	5,07	5,69
	C4	25	-	-	3,66	-	-	0,32	1,38	3,48	3,94
	C2	90	-	-	7,49	-	-	0,36	2,76	9,15	10,07
	C2	60	-	-	5,71	-	-	0,31	2,18	5,11	5,84
	C2 (4)	35	4,38	2,83	3,65	0,36	0,21	0,28	1,77	3,86	4,44
	C2 (2)	25	4,42	3,82	4,12	0,26	0,24	0,25	1,65	2,76	3,31
	C2 (7)	45	5,54	3,20	4,31	0,37	0,20	0,29	1,68	3,60	4,16
	C2	0	-	-	2,61	-	-	0,34	0,98	2,65	2,98
	C3 (2)	60	5,58	5,29	5,43	0,35	0,31	0,33	2,04	5,45	6,13
	C3	25	-	-	3,37	-	-	0,33	1,26	3,37	3,79
	C3	35	-	-	3,83	-	-	0,31	1,46	3,44	3,93
	C3 (4)	45	4,36	3,00	3,44	0,40	0,34	0,29	1,29	3,88	4,31
	C1a (2)	90	7,64	6,43	7,03	0,38	0,33	0,36	2,54	7,04	8,24
	C1a (2)	60	4,20	4,03	4,12	0,37	0,36	0,37	1,51	5,17	5,68
	C1a	45	-	-	3,80	-	-	0,32	1,44	3,55	4,03
	C1a (3)	35	4,24	3,51	3,76	0,35	0,16	0,28	1,48	3,27	3,76
	C1a (4)	25	4,45	3,16	3,70	0,34	0,18	0,27	1,47	2,74	3,23
	C1a (6)	0	4,16	2,71	3,66	0,31	0,21	0,27	1,45	2,64	3,12
	C1b	0	-	-	2,54	-	-	0,31	0,97	2,24	2,56
	C1b	10	-	-	1,13	-	-	0,44	0,39	2,94	3,08
C1b (3)	35	4,57	4,00	4,19	0,33	0,26	0,29	1,60	3,37	3,91	
C1b	90	6,70	6,29	6,50	0,38	0,31	0,33	2,42	7,96	7,96	

los elásticos y observar su variación con respecto a la orientación, correspondiendo los valores máximos a las paralelas a los planos de foliación y los mínimos a las normales a dichos planos.

Cuando las determinaciones se efectúan perpendicularmente a la foliación existe cierta variabilidad en los resultados, según se disponga la orientación de la lineación principal (intersección de la estratificación con el

plano de foliación principal). Las mayores variaciones se aprecian para el módulo de Young elástico siendo independiente de la dirección de medida de ese parámetro.

Conclusiones

La fábrica planar y la distinta inclinación de los planos de foliación son los principales parámetros que condi-

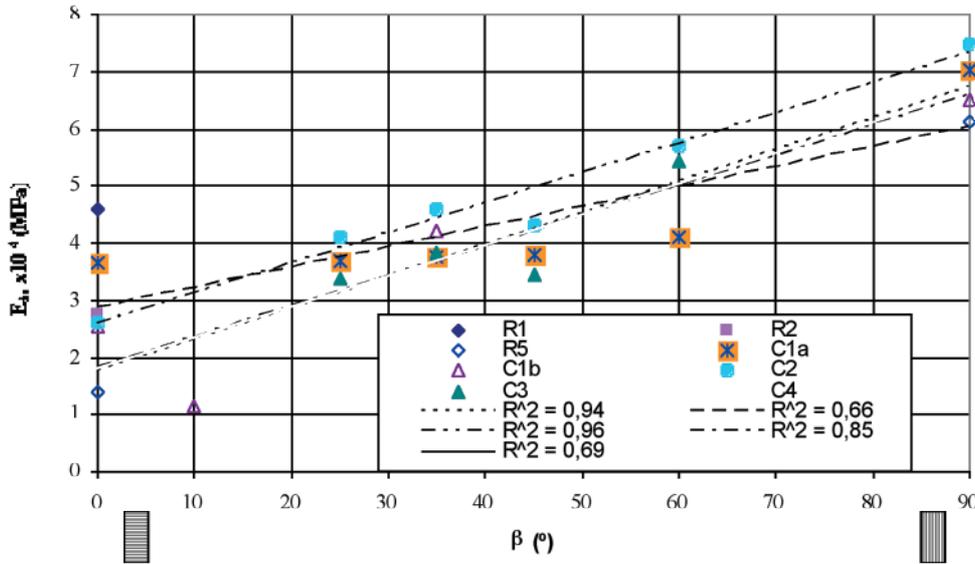


Figura 8. Relación entre el módulo dinámico de Young y la orientación de la anisotropía principal en pizarras del Sinclinal de Truchas.

cionan la propagación de ondas ultrasónicas, sumado a las variaciones litológicas de las distintas muestras.

Los valores máximos registrados para estos parámetros se corresponden con una inclinación de la foliación a 90°, es el caso en el que las ondas viajan paralelamente a estos planos, y mínimos a 0°, cuando las ondas se propagan perpendicularmente a los mismos.

Los datos obtenidos, en relación con la distinta inclinación del plano de foliación, presentan una relación lineal

con las constantes elásticas de los materiales pizarrosos estudiados (E , K , G y λ) a excepción del módulo de Poisson (ν).

Agradecimientos

Los autores agradecen a las empresas Pizarras SAMACA y EXPIZ por la financiación, facilidades de acceso y disponibilidad de sus explotaciones para la obtención de las muestras. Este trabajo se enmarca dentro del proyecto FEDER ID97-0959-C03.

Bibliografía

AENOR (1999): *Geotecnia. Ensayos de campo y de laboratorio*. Ed. AENOR, 385 pp.

ALONSO, F. J. (1986): *Caracterización petrofísica y alterabilidad de calizas y dolomías*. Univ. de Oviedo, Tesis doctoral, 309 pp.

ASTM (1978): "Standard method for laboratory determination of pulse velocities and ultrasonics elastic constants of rocks". *Annual Book of A.S.T.M. Standards*, Parte 19, norma D. 2845-69, PP.356-363.

ARIAS, D., BELLIDO, F., DÍAZ GARCÍA, F., DÍEZ MONTES, A., FARIAS, P., FERNÁNDEZ, F. J., HEREDIA, N., LOMBARDERO, M., MARCOS, A., MARTÍNEZ CATALÁN, J. R. y RODRÍGUEZ FERNÁNDEZ, L. R. (2002): *Mapa 1:200.000, Estudio geológico aplicado a la investigación de recursos mineros y de materias primas en El Bierzo, La Cabrera, Sana-bria y Valdeorras*. Informe inédito.

CALLEJA, L. (1985): *Variación de propiedades físicas en rocas cristalinas sometidas a gradientes térmicos*. Tesis Doctoral, Univ. de Oviedo, 252 pp.

CEDEX (1998): *Resultados de los ensayos realizados con muestras de pizarras procedentes de Puente Domingo Flórez (León)*. Informe técnico inédito para pizarras Expiz, S.A., 18 pp.

DOBRIN, B. M. and SAVIT, C. H. (1988); *Introduction to geophysical prospecting*. 4th Edition, Ed. McGraw-Hill, 867 pp.

FARIAS, P., GALLASTEGUI, G., GONZÁLEZ, F., MARQUÍNEZ, J., MARTÍN L. M., MARTÍNEZ, J. R., PABLO, J. G. y RODRÍGUEZ L. R. (1987): Aportaciones al conocimiento de la litoestratigrafía y estructura de

Galicia Central. *Memórias Faculdade de Ciências Universidade Porto*, 1:411-431.

GONZÁLEZ DE VALLEJO, L. I., FERRER, M., ORTUÑO, L. y OTEO, C. (2002): *Ingeniería Geológica*. Ed. Pearson Education, 744 pp.

HASSANI, P. P., SADRI, A. and MOMAYEZ, M. (1997): A miniature seismic reflection system for evaluation of concrete Linings. *Pure and Applied geophysics*, 10:677-691.

JONSON, R. B., DEGRAFF, J. V. (1994): *Engineering Geology*. Ed. Macmillan, 190 pp.

JULIVERT, M., FONTBOTE, J. M., RIBEIRO, A. y NABAIS, L. E. (1972): *Mapa tectónico de la Península Ibérica y Baleares. E: 1:1.000.000*. IGME, Madrid.

LÓPEZ, J. M. (2000): *Geología aplicada a la Ingeniería Civil*. Ed. Cie Dossat, 556 pp.

LOTZE, F. (1945): Zur gliederung der Varisziden der Iberischen Meseta. *Geotekt. Forsch.*, 6:78-92. Trad. Por J. M. Ríos: Observaciones respecto a la división de las Variscides de la Meseta Ibérica. *Publ. Extr. Geol. España*, 5:149-166.

MARTÍNEZ CATALÁN, J. R., RODRÍGUEZ, M. P. H., ALONSO, P. V., PÉREZ-ESTAÚN, A. and LODEIRO F. G. (1992): Lower Paleozoic extensional tectonics in the limit between the West Asturian-Leonese and Central Iberian Zones of the Variscan Fold-Belt in NW Spain. *Geologische Rundschau* 8:545-560.

MCANN, D. M. and FENNING, P. J. (1995): Estimation of rippability and excavation conditions from seismic velocity measurements. In *Enginee-*

- ring Geology of Construction, Geological Society Engineering Geology*, Special Publication, The Geological Society, 10:335-343.
- MESA LÓPEZ-COLMENAR, J. M. (2003): Las rocas ornamentales en España: explotaciones y usos. En: *Mineralogía Aplicada*, Emilio Galán Huertas (Editor), Ed. Síntesis, 71-81.
- PERNIA, J. M., FRESNO, F., MENA J. M., LUCENA, A. y LECHOSA, R. (1986): *Registro de datos en sondeos de reconocimiento*. Ed. IGME, 144 pp.
- RAMAMURPHY, T. (1993): Strength and Modulus Responses of Anisotropic Rocks". En *Comprehensive Rock Engineering, Principles, Practice and Projects*. 3: Ed. Pergamon Press, 313-329.
- RODRÍGUEZ SASTRE, M. A. (2003): *Caracterización geomecánica de materiales pizarrosos del Sinclinal de Truchas (León-Orense)*. Tesis Doctoral, Universidad de Oviedo, 388 pp.
- SARMIENTO, G. N., GUTIÉRREZ-MARCO, J. C. y RODABERT, M. (1999): Conodonts ordovícicos del noroeste de España. Aplicación al modelo de sedimentación de la región limítrofe entre las zonas Asturoccidental- Leonesa y Centroibérica durante el Ordovícico superior. *Rev. Soc. Geol. España*, 12 (3-4): 477-500.
- SHARMA, P. V. (1986): *Geophysical Methods in geology*. 2nd Edition Ed. Elsevier, 442 pp.
- TURCOTTE, D. L. and SCHUBERT, G. (2002): *Geodynamics*. 2nd Edition, Ed. Cambridge, 456 pp.
- ZAPPONE, A., FERNÁNDEZ, M., GARCÍA-DUEÑAS, V., and BURLINI, L. (2000): Laboratory measurements of seismic P-wave velocities on rocks from the Betic Chain (Southern Iberian Peninsula. *Tectonophysics*, 317: 259-272.