



UNIVERSIDAD DE OVIEDO

**Escuela de
Ingeniería de Minas, Energía y Materiales de Oviedo**

Máster en Ingeniería de Minas



Trabajo Fin de Máster

**Análisis del comportamiento anisótropo en pizarra
mediante técnicas destructivas y no destructivas**

***Analysis of the anisotropic behavior of roofing slate
using destructive and non-destructive techniques***

Autor: Aroa González Fuentes

Tutor: Celestino González Nicieza

Co-tutor: Francisco Blanco Álvarez

Oviedo, Julio de 2016

ÍNDICE GENERAL

MEMORIA

1. INTRODUCCIÓN
2. ANTECEDENTES
3. ENSAYO DE ULTRASONIDOS
4. ENSAYO DE EXFOLIACIÓN
5. ENSAYO DE FLEXIÓN
6. CONCLUSIONES
7. BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

- ANEXO I: TABLAS DE RESULTADOS
- ANEXO II: REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LAS CURVAS FUERZA Y DESPLAZAMIENTO

MEMORIA

Contenido

<u>1</u>	<u>INTRODUCCIÓN</u>	<u>6</u>
1.1	JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO	7
1.2	OBJETIVOS	7
<u>2</u>	<u>ANTECEDENTES</u>	<u>8</u>
<u>3</u>	<u>ENSAYO DE ULTRASONIDOS</u>	<u>17</u>
3.1	DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO DE ENSAYO	17
3.2	PROCEDIMIENTO DE ENSAYO	18
3.3	MUESTRAS	21
3.4	RESULTADOS.....	22
<u>4</u>	<u>ENSAYO DE EXFOLIACIÓN</u>	<u>26</u>
4.1	DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO DE ENSAYO	26
4.2	PROCEDIMIENTO DE ENSAYO	28
4.3	TIPOS DE ENSAYO	29
4.4	TRATAMIENTO DE DATOS	31
4.5	RESULTADOS.....	32
4.5.1	FUERZA MÁXIMA – ÁREA DE FRICCIÓN	42
4.5.2	DESPLAZAMIENTO A LA FUERZA MÁXIMA – ÁREA DE FRICCIÓN	44
4.5.3	ENERGÍA DE CRUSHING – ÁREA DE FRICCIÓN.....	46
<u>5</u>	<u>ENSAYO DE FLEXIÓN</u>	<u>49</u>
5.1	DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO DE ENSAYO	49
5.2	PROCEDIMIENTO DE ENSAYO	50
5.3	MUESTRAS	52
5.4	TRATAMIENTO DE DATOS	52
5.5	RESULTADOS.....	53

<u>6</u>	<u>CONCLUSIONES</u>	<u>65</u>
<u>7</u>	<u>BIBLIOGRAFÍA</u>	<u>68</u>

Contenido de figuras

Figura 1.1.- Mina A Fraguíña en Valdeorras (Orense, Galicia)	10
Figura 1.2.- Localización de los distritos pizarreros en la Península Ibérica. (Fuente: Cárdenes et al. 2008)	11
Figura 1.3.- Situación estratigráfica y columnas esquemáticas de las formaciones productivas, junto con el número de canteras activas en cada formación (Fuente: Cárdenes et. al 2010).....	12
Figura 3.1.- Equipo de ultrasonidos.....	17
Figura 3.2.- Orientaciones por donde se han acoplado los palpadores.....	19
Figura 3.3.- Ejemplo de la posición de los palpadores en la muestra, transmisión directa (UNE En 12504 – 4 “Velocidad de impulsos ultrasonicos”).....	20
Figura 3.4.- Sistema de referencia	21
Figura 4.1.- Prensa utilizada en el ensayo	26
Figura 4.2.- Tarjeta de adquisición de datos.....	27
Figura 4.3.- Ensayo estático de exfoliación.....	28
Figura 4.4.- Sistema de referencia	29
Figura 4.5.- Ejemplos de cuñas.....	32
Figura 4.6.- Ejemplo curva Fuerza-desplazamiento	35
Figura 4.7.- Ejemplo de Área basal	38
Figura 4.8.- Ejemplo de cómo se obtiene la Energía de crushing	39
Figura 4.9.- Gráfica Fuerza máxima – Área de fricción para Pz 62	43
Figura 4.10.- Gráfica Fuerza máxima – Área de fricción para Pz 57	44
Figura 4.11.- Gráfica Desplazamiento a la fuerza máxima – Área de fricción para Pz 62	45
Figura 4.12.- Gráfica Desplazamiento a la fuerza máxima – Área de fricción para Pz 57	46
Figura 4.13.- Gráfica Energía de crushing – Área de fricción para Pz 62.....	47

Figura 4.14.- Gráfica Energía de crushing – Área de fricción para Pz 57.....	48
Figura 5.1.- Estructura utilizada en el ensayo.....	49
Figura 5.2.- Ensayo de flexión (Fuente: UNE EN 12372).....	50
Figura 5.3.- Ejemplo de curva Fuerza – flecha total del ensayo Pz 62.4 (18)_1	54
Figura 5.4.- Ejemplo gráfica de la pendiente del ensayo Pz 62.4 (18)_1	55
Figura 5.5.- Gráfica Resistencia a flexión – módulo elástico para la Pizarra Buena	58
Figura 5.6.- Gráfica Resistencia a flexión – módulo elástico para la Pizarra Mala	58
Figura 5.7.- Ejemplo de un diagrama de cajas.....	62
Figura 5.8.- Diagramas de cajas: Resistencia a flexión (izquierda) y Módulo elástico (derecha) para Pz 62	63
Figura 5.9.- Diagramas de cajas: Resistencia a flexión (izquierda) y Módulo elástico (derecha) para Pz 57	64

Contenido de tablas

Tabla 3.1.- Dimensiones de las muestras de Pizarra Buena y Pizarra Mala.....	22
Tabla 3.2.- Ficha de los resultados de la muestra de Pizarra Buena.....	23
Tabla 3.3.- Ficha de los resultados de la muestra de Pizarra Mala.....	24
Tabla 3.4.- Resultados del índice de anisotropía	25
Tabla 4.1.- Dimensiones de las muestras de Pizarra Buena	30
Tabla 4.2.- Dimensiones de las muestras de Pizarra Mala	30
Tabla 4.3.- Imágenes de todas las exfoliaciones realizadas a las muestras de Pizarra Buena (Pz 62)	33
Tabla 4.4.- Imágenes de todas las exfoliaciones realizadas a las muestras de Pizarra Mala (Pz 57)	34
Tabla 4.5.- Tabla de valores medios de la muestra Pz 62.1.....	39
Tabla 4.6.- Tabla de valores medios de la muestra Pz 62.4.....	40
Tabla 4.7.- Tabla de valores medios de la muestra Pz 62.8.....	40
Tabla 4.8.- Tabla de valores medios de la muestra Pz 62.6.....	40
Tabla 4.9.- Tabla de valores medios de la muestra Pz 57.1.....	41
Tabla 4.10.- Tabla de valores medios de la muestra Pz 57.4.....	41
Tabla 4.11.- Tabla de valores medios de la muestra Pz 57.5.....	41
Tabla 4.12.- Tabla de valores medios de la muestra Pz 57.6.....	42
Tabla 5.1.- Dimensiones utilizadas a la hora de realizar los ensayos de flexión según UNE EN 12372	51
Tabla 5.2.- Tabla de dimensiones y cálculos de Pz 62	56
Tabla 5.3.-Tabla de dimensiones y cálculo de Pz 57.....	57
Tabla 5.4.- Ejemplo de roturas en las muestras de Pz 62	60
Tabla 5.5.- Ejemplo de roturas en las muestras de Pz 57	61



1 INTRODUCCIÓN

El término comercial de una roca no siempre coincide con la denominación científica, en este caso, bajo el término comercial de pizarra se agrupan todo tipo de rocas capaces de exfoliar en lajas más o menos uniforme. Sin embargo, el término comercial de pizarras para cubiertas corresponde a unas facies metamórficas concretas, con unas características petrológicas, mineralógicas y texturales comunes en gran parte de los yacimientos españoles. La coincidencia en ambas definiciones es debido a los estrictos requisitos comerciales que han de cumplir sólo coinciden con un tipo especial de roca metamórfica de bajo o muy bajo grado (Cárdenes *et. al.*, 2010).

De acuerdo a la norma UNE EN 12326, se define “pizarra de techar” *como roca fácilmente exfoliable en láminas delgadas a lo largo de un plano de exfoliación, resultante de un flujo de esquistosidad originado por un metamorfismo de muy bajo o bajo grado debido a una compresión tectónica. Se distingue de una pizarra (roca) sedimentaria, que invariablemente se exfolia a lo largo de un plano de sedimentación o estratificación. La pizarra se origina a partir de rocas sedimentarias arcillosas y pertenece petrográficamente a un intervalo que empieza en el límite entre las formaciones metamórficas y sedimentarias y termina en las formaciones filíticas epizonal-metamórficas.* Esta definición insiste en la existencia de una esquistosidad y un rango metamórfico correspondiente a las facies de los esquistos verdes, sin hacer referencia a la composición.

Además, dicha norma sólo se encarga de determinar las características de las placas finales de pizarra, es decir, el producto del proceso productivo, sin tener en cuenta la caracterización en las diferentes etapas sucesivas que forman dicho proceso.

En el presente Trabajo Fin de Máster se han planteado tres metodologías de ensayos, dos de las cuales corresponden a ensayos normalizados como es el ensayo de ultrasonidos y el ensayo de flexión, y otro ensayo no normalizado que se ha denominado “ensayo de exfoliación”. El objetivo de estos ensayos es caracterizar el comportamiento de la pizarra.



1.1 JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO

Como se desarrollará posteriormente, existen metodologías de ensayo para determinar las características de las placas finales de pizarra, reunidas todas en la Norma UNE EN 12326, pero realmente se desconoce el comportamiento de las pizarras frente a las operaciones extractivas durante su explotación, ya que no existe ningún ensayo normalizado para dicha función. Así, se aprovecharía mejor cada bloque extraído y se optimizaría el proceso productivo.

En España, dentro del sector minero de roca ornamental, la pizarra tiene gran importancia, ya que es el primer país productor mundial de dicha roca. Por tanto, el objetivo que se persigue con este Trabajo Fin de Máster es caracterizar la pizarra con un método no destructivo, ensayo de ultrasonidos, y con los ensayos de exfoliación y flexión. Además de proponer nuevas técnicas de mejora para la caracterización, obteniendo resultados más óptimos y llegar a un mayor aprovechamiento.

1.2 OBJETIVOS

Como se ha comentado, la finalidad de este Trabajo Fin de Máster, es mejorar el conocimiento de caracterización de la pizarra según las orientaciones y direcciones que se han asociado a las muestras, es decir, teniendo en cuenta su anisotropía (variación de propiedades en función de la dirección de medida) para tener un mayor aprovechamiento de las mismas y poder clasificarlas. Para ello se ha procedido a:

- Reunir toda la información posible sobre dicho método, es decir, examinar los ensayos existentes, las normas UNE y ASTM que están relacionadas con ello y los artículos científicos correspondientes.
- Realizar los tres estudios propuestos, el ensayo por ultrasonidos, el ensayo de exfoliación y el ensayo de flexión de pizarra.
- Tratar datos a partir del registro experimental que se ha llevado a cabo en el laboratorio.
- Mostrar los resultados y conclusiones sacadas una vez tratados todos los datos obtenidos.



2 ANTECEDENTES

En España, dentro del sector minero de roca ornamental, la pizarra tiene un gran interés debido a ser el país más importante en dicho mercado, es decir, es el principal productor mundial de pizarra de techar o para cubiertas. Su situación a nivel mundial se encuentra muy por encima de Francia que ocupa el segundo lugar, entre otros países destacados en este sector como son: Alemania, Reino Unido e Irlanda. Sin embargo, nuevos países productores como China, India y Brasil, pueden hacer peligrar la hegemonía española en el mercado de dicho sector, debido al desarrollo que están experimentando. Aunque este motivo no es el único factor negativo, el mercado de pizarra atraviesa períodos cíclicos de auge económico alternando con períodos en los que las ventas se estancan, ya que la demanda ha crecido de forma lineal y los medios de producción de forma exponencial, provocando un exceso de oferta difícil de controlar. Además de la actual crisis económica que ha afectado a nivel mundial.

La buena situación de España en este mercado se vio favorecida debido a dos factores. Uno de ellos es que se han ido mejorando los procesos de extracción y elaboración que se han ido incorporando al sector en los últimos años, produciendo un gran aumento en el rendimiento de los yacimientos menos productivos, y por otro lado, surge la necesidad de investigar nuevos usos de la pizarra, lo que lleva a aumentar y abrir nuevos mercados.

Los primeros indicios sobre el empleo de pizarra en España, se remontan a la época romana, donde se empleaban para la construcción (viales, puentes,...), mientras que la primera referencia de producción de pizarra con fines comerciales aparece en el reinado de Felipe II, con la apertura de las canteras de Bernardos (Segovia) en el siglo XVI, para abastecer con dicho material la construcción del Monasterio del Escorial (Taboada, 1993). Otras referencias, indican explotaciones mineras de pizarra en Villar del rey (Badajoz) y en Carballeda de Valdeorras (Orense, Galicia) datadas del siglo XVIII, siendo las explotaciones industriales más antiguas (Lombardero, 1988; Benito *et al.*, 1996 y Sólaz, 1996). Las primeras explotaciones eran para consumo propio y se aprovechaban *in situ*, es decir, las pizarras se exfoliaban y se recortaban en la cantera, ya que se encontraban en laderas muy escarpadas con difícil o nulo acceso, impidiendo



la accesibilidad a los animales de carga. La extracción se realizaba mediante el esfuerzo físico y de manera comunal, es decir, se explotaba por la comunidad de vecinos para cubrir sus necesidades. Este método de extracción subsistió hasta principios de la década de los 60 del siglo pasado. Las herramientas utilizadas eran comunes a las del trabajo agrario como pueden ser: barras, picas y palancas de madera y hierro. No fue hasta los años sesenta del siglo pasado, cuando comienza la industria pizarrera en España para poder abastecer la demanda de este producto en Francia, ya que se produjo la caída de las producciones en Reino Unido, Francia y Alemania, principales suministradores de la primera mitad del siglo XX. En este momento se pasó de pequeñas explotaciones familiares que trabajaban de manera artesanal, al comienzo de una gran industria. Respecto al avance tecnológico de esta época, se incorpora el corte con disco de diamante (el carro donde se depositaba la roca era de accionamiento manual) en las naves de elaboración, sustituyendo el sistema de corte con mazas y cuñas. Además se seguía utilizando la pólvora negra, implantada en los 60, para arrancar el rachón (bloque inicial de grandes dimensiones obtenido del macizo). A finales de la década de los setenta se implantó la tijera accionada a pedal. Durante la década de los 80 se introdujeron las primeras cortadoras neumáticas y al comienzo de los 90 se introdujo el corte con hilo diamantado (técnica italiana, procedente de las canteras de mármol), reduciendo el uso de la pólvora ya que provoca desperfectos que merman la calidad de la pizarra. Finalmente la evolución de las explotaciones fue a la minería de interior, ya que cada vez los desmontes son mayores y existe un mayor aprovechamiento en una mina interior, como la que se muestra en la Figura 2.1.

La mina A Fraguíña situada en Valdeorras (Orense, Galicia), es la mina de pizarra más grande del mundo. Su extracción comenzó en el año 1968 y se realizaba a cielo abierto. A principios de 1990 el sistema de extracción pasó a realizarse únicamente bajo tierra, lo que permite un aprovechamiento óptimo del yacimiento.



Figura 2.1.- Mina A Fraguíña en Valdeorras (Orense, Galicia)

Aunque, la Estadística Minera recoge la existencia de 101 explotaciones que han extraído pizarra ornamental en 2013, es una cifra inferior a la del año precedente con 104 (Datos IGME, 2013).

Los yacimientos de pizarra en España, se encuentran en el noroeste y en Extremadura, en el dominio del Macizo Hespérico o Varisco (García-Guinea *et al.*, 1997), encontrándose los afloramientos más importantes en Galicia (Orense y Lugo) con una producción del 55% del total español, y Castilla y León (León), con un 33%. También existen afloramientos en Segovia, Almería y Barcelona, con una producción mucho menor que las anteriores, además de su bajo valor (Datos del IGME 2013).

Los afloramientos de pizarra se dividen en diez distritos mineros, como se puede observar en la Figura 2.2. Los distritos varían ampliamente unos de otros, ya que algunos están contruidos por una sola cantera (Villar del Rey, Arousa, Los Oscos) mientras que otros superan las cincuenta canteras (Valdeorras, La Baña). (Cárdenes *et al.*, 2010).

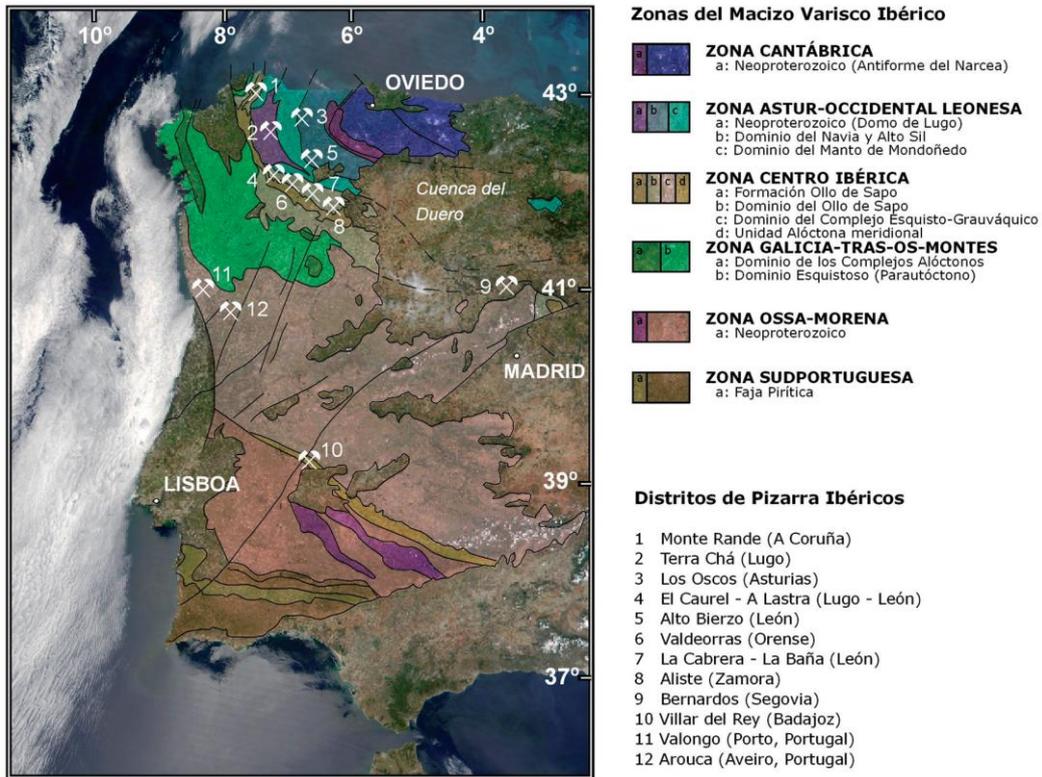


Figura 2.2.- Localización de los distritos pizarreros en la Península Ibérica. (Fuente: Cárdenes et al. 2008)

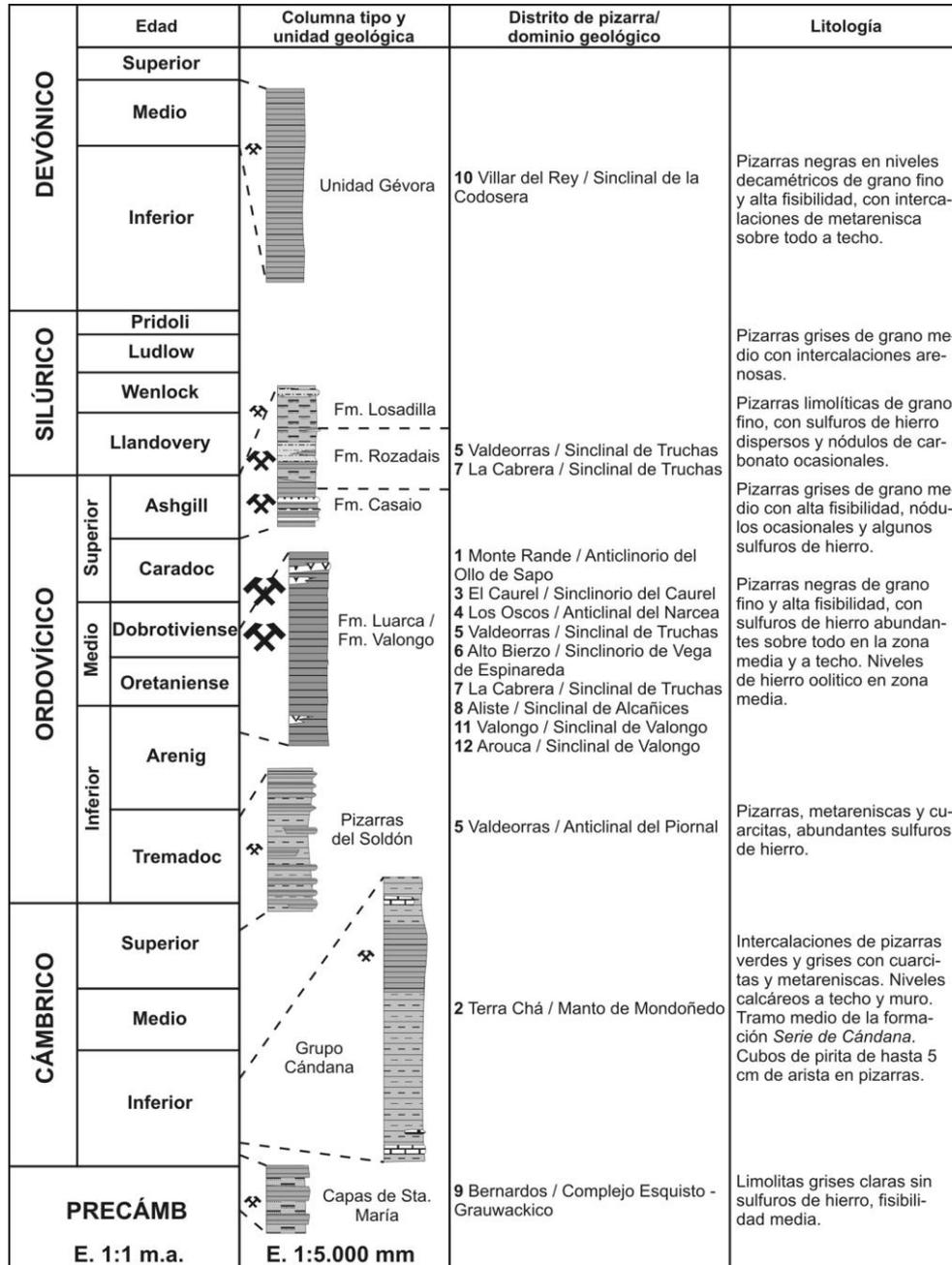
En la siguiente imagen (Figura 2.3), se muestra la situación estratigráfica y columnas esquemáticas de las formaciones productivas, además del número de canteras activas en cada formación de los diez distritos mineros.

Desde un punto de vista estratigráfico, el principal litotecto está constituido por la Formación Luarca (Lombardero *et al.*, 2002), seguido por la Formación Rozadais y la Formación Casaio (Barros, 1989 y Arias *et. al.*, 2002). Las características principales de estas formaciones, que pertenecen al Ordovício Medio y Ordovícico Superior, se exponen a continuación:

- Fm. Luarca: esta formación es conocida como Fm. Pizarras de Luarca, siendo una de las más importantes en cuanto a cantidad de canteras y reservas explotables. Su potencia es muy variable, debido al intenso plegamiento que afecta a la zona, rondando entre los 200 metros en el flanco Sur (Barros, 1989) y entre 135 y 300 metros en el flanco Norte (Fernández, 2001). Es una sucesión monótona de pizarras negras y grises con intercalaciones centimétricas de areniscas y apariciones de niveles



Vulcano – sedimentarios. Estas pizarras presentan un tamaño de grano fino a medio con abundantes sulfuros de hierro y con alta fisibilidad.



Leyenda geológica

- | | | | |
|--|---|--|-----------------------------------|
| | Intercalaciones de pizarra, cuarcita y arenisca | | Pizarra con laminaciones arenosas |
| | Pizarra | | Arenisca |
| | Pizarra limolítica | | Cuarcita |
| | Caliza | | Niveles vulcano - sedimentarios |

Canteras activas

- | | |
|--|-----------------|
| | < 5 Canteras |
| | 5 - 15 Canteras |
| | > 15 Canteras |

Figura 2.3.- Situación estratigráfica y columnas esquemáticas de las formaciones productivas, junto con el número de canteras activas en cada formación (Fuente: Cárdenes et. al 2010)



- Fm. Casaio: es una serie areniscoso – cuarcítica intercalada con niveles pizarrosos. Su potencia varía entre los 100 y 350 metros. Está formada por pizarras grises con grano medio de alta fisibilidad y con la aparición de algunos sulfuros de hierro. Existe algún nivel explotable dentro de esta serie, siendo menos productiva que la anterior y con una importancia económica menor que la Fm. Luarca o la Fm. Rozadais (Barros Lorenzo, 1989).
- Fm. Rozadais: es una formación pelítica con presencia de abundantes niveles de laminaciones centimétricas de areniscas y algún paquete cuarcítico. Su característica es la aparición de niveles formados por pizarras limolíticas grises y azuladas de grano fino con sulfuros de hierro dispersos y nódulos de carbonatos ocasionales. La potencia de esta formación varía en torno a 200 metros en el flanco Sur (Barros, op. Cit.) y hasta 325 metros en el flanco Norte (Fernández, 2001). En esta formación se ubican diferentes canteras importantes que, junto con la Fm. Luarca, constituyen la principal reserva de pizarra para techar de calidad en España.

Las pizarras, debido a la estructura que presentan tanto tectónica como estratigráficamente, además de su importante aplicación en la industria, se han realizado numerosos estudios con el fin de poder establecer la calidad y los factores que influyen en las mismas. Aunque los estudios geológicos, petrológicos y científicos sobre las pizarras son escasos en comparación con otras rocas ornamentales como el mármol y el granito. Esto puede ser debido al secretismo propio de las empresas del sector, al aislamiento geográfico de las principales cuencas pizarreras y a la ausencia de problemas para vender pizarra (Cárdenes *et. al.*, 2010).

Los primeros estudios, realizados en los años 80 y 90 del siglo pasado, eran realizados principalmente por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME), además de ADARO (1981, 1984, 1985), Gómez-Moreno *et al.* (1984), Barros *et al.*, (1992) y Baretino *et al.* (1993, 1995), que se han centrado fundamentalmente en la caracterización tecnológica de las pizarras y en la ordenación minera y medio-ambiental del territorio.



Los trabajos más específicos, centrados en mineralogía y petrología de las pizarras y relacionándolas con la calidad de las mismas, destacan Ruíz *et al.* (1977) que estudió los minerales opacos de las pizarras y su grado de oxidación precisando su relación con la calidad de estas y su aplicación como pizarras de techar, Blanco *et al.* (1989) incide en las características textuales y mineralógicas, definiendo que a mayor homogeneidad textual mejor es la calidad de las pizarras y a menor tamaño de grano, mayor es la fisibilidad, Bastida *et al.* (1990) se basa en las distintas esquistosidades a nivel microestructural presentes en este dominio geológico, obteniendo un modelo de distribución y desarrollo de foliaciones en rocas pelíticas, Lombardero y Quereda (1992), se centraron en la meteorización de los sulfuros y carbonatos presentes de las pizarras.

Dentro de los estudios relacionados en geomecánica, destacan Mutschler y Natau (1991) valorando el comportamiento de masas rocosas foliadas a partir de ensayos triaxiales con registro de la resistencia-deformación, Ramamurphy *et al.* (1993) establecen el comportamiento de rocas anisótropas, así como la clasificación de la anisotropía en función de su origen, además han realizado ensayos y analizado los resultados de la resistencia a compresión uniaxial de la roca en relación con los distintos ángulos que forman los esfuerzos principales con la foliación metamórfica o la penetrativa anisotropía que presenten las rocas y constituyan un plano de debilidad a nivel de matriz rocosa.

Los estudios más relacionados con el objetivo principal en este Trabajo Fin de Máster, es decir, la caracterización de pizarra según su comportamiento anisotrópico, desde un punto de vista comercial y económico con la técnica de ultrasonidos y el ensayo de flexión en diferentes orientaciones, destaca:

- “Caracterización del comportamiento elástico de materiales pizarrosos del Sinclinal de Truchas mediante ultrasonidos” (M. A. Rodríguez Sastre y L. Calleja, 2004), además del análisis petrográfico y las propiedades físicas (contenido en humedad, índice de vacíos, densidad aparente...) para obtener un mejor conocimiento reológico de las pizarras, mediante la técnica de ultrasonidos (método no destructivo) permite obtener las constantes elásticas de estas rocas y pueden llegar a informar sobre el



comportamiento de las mismas frente a las operaciones extractivas durante su explotación. La conclusión obtenida es que la fábrica planar y las distintas inclinaciones en los planos de foliación son los principales parámetros que condicionan a la propagación de la onda ultrasónica, además de las variaciones litológicas.

Los valores registrados en las ondas ultrasónicas como las constantes elásticas del material son más elevadas con una inclinación de la foliación a 90° (las ondas viajan paralelas a la foliación) y mínimos a 0° (las ondas se propagan perpendicularmente a la foliación). Por tanto, existe una relación lineal entre los planos de foliación y las constantes elásticas menos el módulo elástico.

- “Mineralogy and modulus of rupture of roofing slate: Applications in the prospection and quarrying of slate deposits” (Cárdenes *et al.*, 2010): propone un método, no sustitutivo a la prueba de flexión, para minimizar el número de pruebas, tiempo y costes en la evaluación de calidad de la pizarra española y su extracción. Para ello, se relaciona el módulo de rotura (MoR), que se obtiene de los resultados de la prueba de flexión y está relacionado con el comportamiento mecánico y la durabilidad del material (propiedad principal de calidad para la comercialización), con las características mineralógicas (muy similares, formadas por mica, clorita y cuarzo como componentes primarios, cloritoide, feldespatos, sulfuros de hierro y carbonatos como minerales secundarios y algunos minerales accesorios) y petrográficas. Para obtener estas últimas se utiliza la difracción de rayos X, además se obtiene el IAM (Índice de apilamiento de Mica, MSI en inglés) que describe el grosor y abundancia de los niveles de Mica y está directamente relacionado con la resistencia a flexo-tracción de la pieza, y el Índice de Kubler (Índice de cristalinidad de la illita), que se define como la anchura, a mitad de la altura, de la primera reflexión basal de la illita y sirve para determinar el grado metamórfico. Se obtuvo una correlación positiva entre los valores de MoR y IAM y una correlación negativa con el porcentaje en Mica y los valores de MoR, pudiendo estimarse dicho parámetro.



MoR está relacionado con la disposición orientada de los filosilicatos que compone la matriz de pizarra. Los resultados de la orientación longitudinal fueron mayores que los transversales. Además en estas dos orientaciones, se obtiene valores superiores a 50 en el IAM.

- “Analysis of the methodology of the petrographic examination test (European Standard EN 12326-2) and the relation between petrography and modulus of rupture for Spanish roofing slates” (Gómez-Fernández *et al.*, 2012), se centra en evaluar la metodología del examen petrográfico establecido por la norma y los resultados del trabajo de Cádernes (2010). Demuestra a través de un estudio comparativo que la utilización de la microscopía óptica (recomendada por la norma) para informar de la mineralogía, estructura y algunas características de textura, es inadecuada para la resolución de texturas de grano fino, recomendando utilizar MEB (Microscopio eléctrico de barrido, SEM en inglés), ya que utiliza un haz de electrones en lugar de un haz de luz para formar la imagen. Además, la utilización de POM (Microscopía óptica de polarización) genera una serie de incertidumbres derivada de la falta de especificación de la norma para calcular el IAM.

Respecto a la evaluación del artículo anterior, destaca que hay muchos factores como porosidad, calcita o vetas de cuarzo y fracturas que pueden influir en los resultados del ensayo de flexión, por tanto se debe evitar la simplificación asociada con la evaluación de los valores del MoR basadas únicamente en las observaciones microscópicas. Los resultados de este trabajo mantienen la tendencia que los valores del MoR longitudinal son mayores que el MoR transversal, pero el primero se correlaciona positivamente con el contenido en clorita y el ángulo entre la estratificación y el clivaje o foliación, pero se correlaciona negativamente con elementos pórfidos. Sin embargo, el MoR transversal es independiente de estos factores.



3 ENSAYO DE ULTRASONIDOS

El ensayo por ultrasonidos, es un método de ensayo normalizado y no destructivo, es decir, se puede realizar la prueba sin alterar las propiedades (físicas, químicas, mecánicas y dimensionales) del material ya que no implican ningún daño. Este ensayo se basa en el fenómeno físico de la propagación de ondas ultrasónicas, aquellas que no pueden ser percibidas por el ser humano, en un medio material, además del seguimiento de la señal transmitida.

El objetivo principal en este caso de estudio, es analizar la variación de la propagación de las ondas en las diferentes orientaciones de las muestras a ensayar.

3.1 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO DE ENSAYO

El equipo de ultrasonidos utilizado en los ensayos, de la marca y modelo “Controls E 46”, se puede observar en la Figura 3.1:

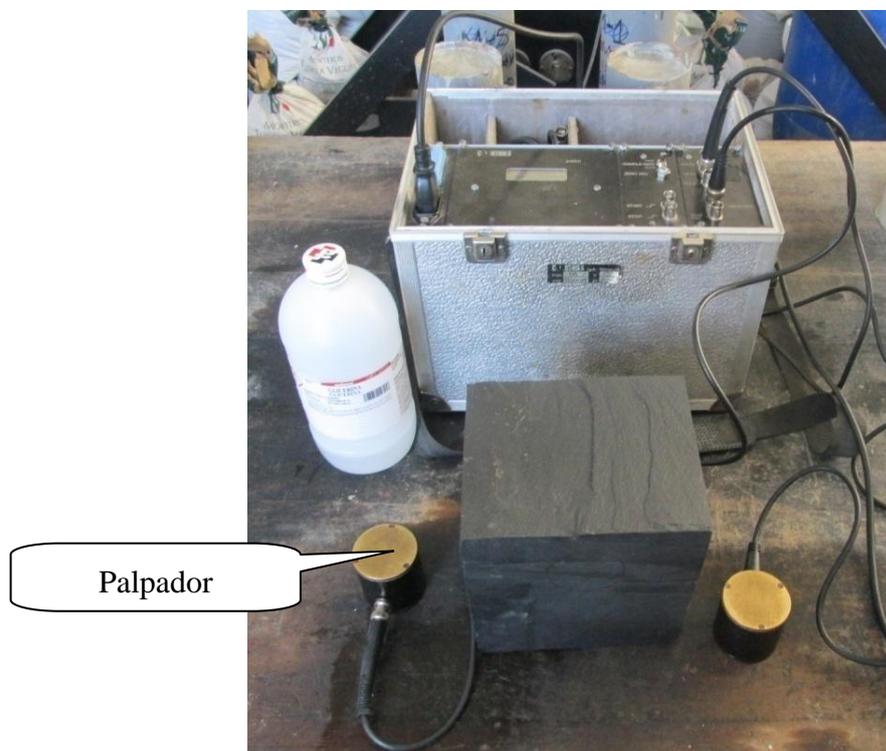


Figura 3.1.- Equipo de ultrasonidos

Este equipo consiste en un generador de impulsos eléctricos, un par de palpadores, un amplificador y un temporizador electrónico para la medida del intervalo



de tiempo transcurrido entre el comienzo de la onda del impulso generado en el palpador transmisor y la transmisión de la onda a su llegada al palpador receptor. (UNE En 12504 – 4 “Velocidad de impulsos ultrasónicos”). Además de una barra patrón para poder calibrar el equipo.

Los dos palpadores pueden cumplir la función tanto de transmisor como de receptor, son intercambiables, dependiendo de cómo se conecten al equipo, ambos son de 54 kHz. Se utilizan frecuencias alrededor de 50 kHz para obtener una medida correcta del tiempo de recorrido necesario para genera un frente de onda lo más vertical posible, es decir, una onda de alta frecuencia, ya que la energía de la onda emitida disminuye con la frecuencia de dicha onda. Esto quiere decir, que a menor frecuencia, menor energía y menor amortiguación de la señal.

El objetivo de un palpador electroacústico es emitir impulsos de vibraciones longitudinales. Una vez atravesada la muestra a ensayar con una trayectoria de longitud conocida, el impulso de vibraciones se convierte en una señal eléctrica por un segundo palpador, mientras que circuitos electrónicos de temporización miden el tiempo de tránsito del impulso (Manual del equipo 58-E0048).

De dicho equipo salen tres cables: uno es el de la corriente eléctrica y otros dos son los cables para los palpadores, transmisora y receptora, ambos con un conector tipo BCN.

3.2 PROCEDIMIENTO DE ENSAYO

Para poder comenzar el ensayo por ultrasonidos, en primer lugar, se debe de comprobar si el equipo está calibrado. Si no lo estuviera, se utilizaría la barra patrón de calibración, que está marcada con el tiempo de tránsito que debe leerse en el aparato cuando se calibra. Para ello, se añade una capa delgada de pasta de contacto en los palpadores, en este caso se utiliza Glicerina. A continuación, se colocan estos palpadores en los extremos de la barra patrón y se procede a la lectura en el display, que debe ser de ± 1 ms.

Una vez realizado la calibración, se procede a comenzar el ensayo por ultrasonidos. Este ensayo consiste en colocar los dos palpadores en la superficie de la



muestra de pizarra y leer en el display del equipo el tiempo transcurrido de la trayectoria de la onda.

El procedimiento de ensayo comienza con la aplicación de una delgada capa de Glicerina en los palpadores, seguidamente se colocarán en la superficie de la muestra, que debe ser lo más lisa y limpia posible, es decir, no debe tener aplicado ningún producto, ni debe estar húmeda, ni con polvo. Además de no tener hendiduras.

El proceso de ensayo se realizará respecto a las dimensiones de la pieza, es decir, se tomarán las medidas respecto a la longitud, al ancho y al espesor de la muestra siempre que sea posible, como se muestra en la Figura 3.2:

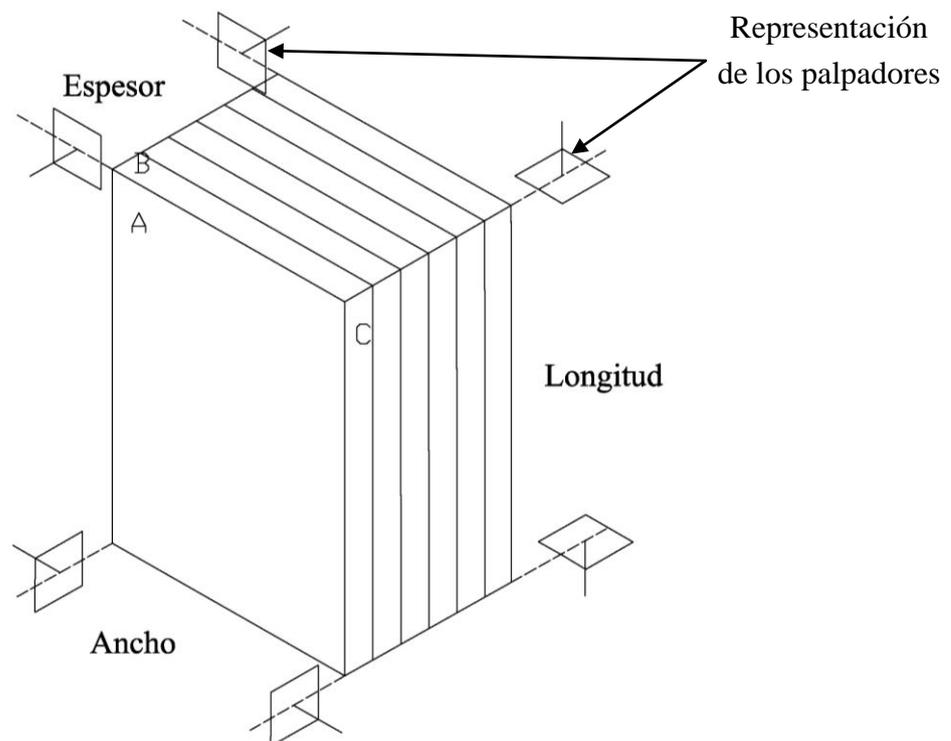


Figura 3.2.- Orientaciones por donde se han acoplado los palpadores

Para obtener estas medidas, se realizará el método de medidas de velocidad con transmisión de las ondas acústicas directas. Esto se consigue posicionando los palpadores en caras opuestas como se muestra la Figura 3.3:

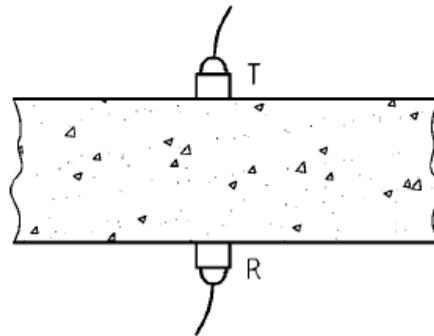


Figura 3.3.- Ejemplo de la posición de los palpadores en la muestra, transmisión directa (UNE En 12504 – 4 “Velocidad de impulsos ultrasonicos”)

Se ha elegido este método ya que en la dirección que se propaga la energía máxima es en ángulo recto respecto a la cara del palpador transmisor, siendo la distancia más corta entre palpadores. Con este método se mide de manera más precisa la longitud de recorrido de la onda y se obtienen resultados más fiables y precisos que en los métodos de transmisión semidirecta o indirecta.

Aunque la dirección en la que se propaga la máxima energía es en la perpendicular a la cara del palpador, se puede detectar impulsos que circulan a través de la pizarra en cualquier otra dirección, por eso existen los otros dos métodos.

El tipo de onda que se considera en este tipo de método es la onda longitudinal, que se propaga perpendicularmente al plano del palpador transmisor. Las oscilaciones de las partículas ocurren en la dirección de propagación de la onda. Se denomina también una onda de presión o de densidad. La energía transportada por esta onda es la más importante con respecto a los otros tipos de ondas.

Una vez colocados los palpadores en las superficies perpendiculares se procederá a leer “in situ” el resultado en el display del equipo. El tiempo de tránsito puede cambiar dependiendo de la presión ejercida en la cabeza de los palpadores y en la planitud de las superficies, por tanto, se debe mover los palpadores, manteniendo la presión constante, de forma ligera para obtener un valor estable y realizar varias medidas para obtener datos más precisos.



3.3 MUESTRAS

El ensayo se ha realizado con muestras obtenidas tras realizar diferentes cortes, utilizando una sierra con disco de hilo diamantado, a dos tochos de pizarra (bloque procedente de la última etapa del proceso de la explotación de la misma). Se ensayarán dos tipos de pizarra en función de su calidad, las cuales se han denominado Pizarra Buena y Pizarra Mala.

Una vez que se tengan las muestras correspondientes se procederá a ponerles un sistema de referencia, como se muestra en la Figura 3.4:

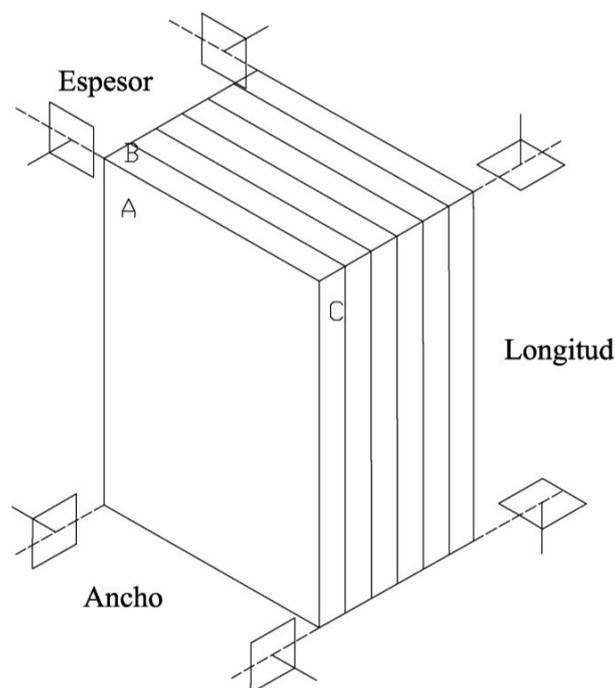


Figura 3.4.- Sistema de referencia

Se asignará un sistema de referencia único tanto en las Pizarras Buenas como en las Pizarras Malas, definido por las letras A, B y C. Utilizándose cada una de ellas para nombrar las principales caras de la muestra.

La letra A estará asociada a la cara paralela a los planos de exfoliación y las letras B y C corresponderán a las superficies perpendiculares a dichos planos.

Por tanto, cuando se acoplen los palpadores en la cara A se medirá respecto al espesor de la muestra, si se realiza la medida por las caras B se mide respecto a la longitud y finalmente se obtendrá el resultado del ancho al realizar el ensayo por las



caras C.

Las dimensiones de los diferentes bloques de dimensiones más reducidas de pizarra se muestran en la Tabla 3.1, donde la Pizarra Buena se muestra con un encabezado de color verde y con un encabezado de color rojo para la Pizarra Mala.

Tabla 3.1.- Dimensiones de las muestras de Pizarra Buena y Pizarra Mala

	Pz 62	Pz 57
	Dimensiones (mm)	Dimensiones (mm)
Longitud	138,00	133,00
Ancho	195,00	153,00
Espesor	136,00	160,00

La nomenclatura utilizada constará de un código por las letras “Pz”, para indicar que es pizarra, seguido de dos números que hacen referencia al bloque inicial y por tanto será “Pz 62” para Pizarra Buena y “Pz 57” para Pizarra Mala.

3.4 RESULTADOS

En este apartado se comentará los resultados obtenidos del ensayo por ultrasonidos.

Las variables de estudio a analizar en dichos ensayos serán la Velocidad del impulso (V) y el Índice de anisotropía (Ia). La velocidad del impulso se puede calcular a partir de la fórmula recomendada en la Norma UNE EN 12504 – 4 “Velocidad de impulsos ultrasónicos”:

$$V = \frac{L}{T}$$

Donde:

- L es la longitud de la trayectoria que debe atravesar la onda desde un palpador hasta otro, es decir, la dimensión correspondiente de la muestra a ensayar (mm).
- T es el tiempo invertido por el impulso ultrasónico para pasar de un palpador transmisor hasta el palpador receptor, es decir, el tiempo que tarda el impulso en su trayectoria (μ s).



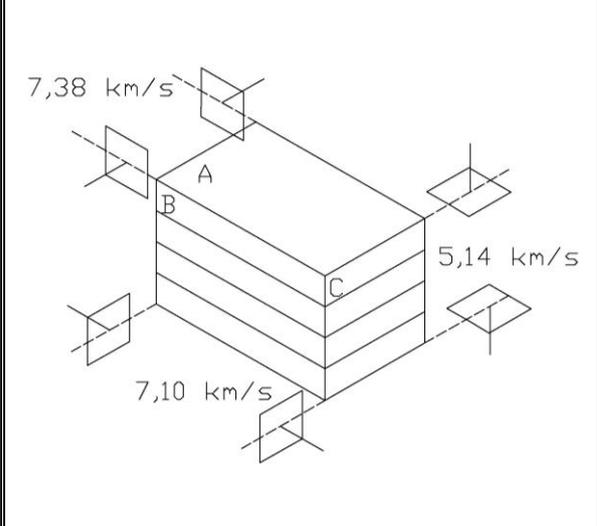
Los resultados obtenidos para los bloques de Pizarra Buena y Pizarra Mala se muestran en la Tabla 3.2 y en la Tabla 3.3. Los datos referidos al tiempo son valores promedio, ya que se han realizado varias medidas, y los esquemas están orientados como las fotografías.

Se puede observar para ambos bloques que la Velocidad de impulso es mayor cuando se realiza el ensayo respecto a la longitud que en las otras dos dimensiones. A pesar de que la longitud y el ancho son paralelos al plano de foliación, en los resultados se observa una pequeña diferencia entre ellos. Esta tendencia se aprecia mejor en la Pizarra Mala que en la Pizarra Buena.

Con la medida respecto al espesor, se obtienen valores muy bajos respecto a los demás, siendo el valor más bajo en la Pizarra Mala.

Tabla 3.2.- Ficha de los resultados de la muestra de Pizarra Buena

Pz 62 (Pizarra Buena)			
	Dimensiones (mm)	Tiempo (μ s)	Velocidad (km/s)
Longitud	138,00	18,70	7,38
Ancho	195,00	27,47	7,10
Espesor	136,00	26,45	5,14

	
---	--

Estos valores pueden estar condicionados por las dimensiones de las muestras, ya que estos ensayos se han realizado en muestras rectangulares y no perfectamente cúbicas. Sin embargo, existen artículos relacionados con los ensayos de ultrasonidos (M. A. Rodríguez Sastre y L. Calleja, 2004) que se han realizado en muestras regulares

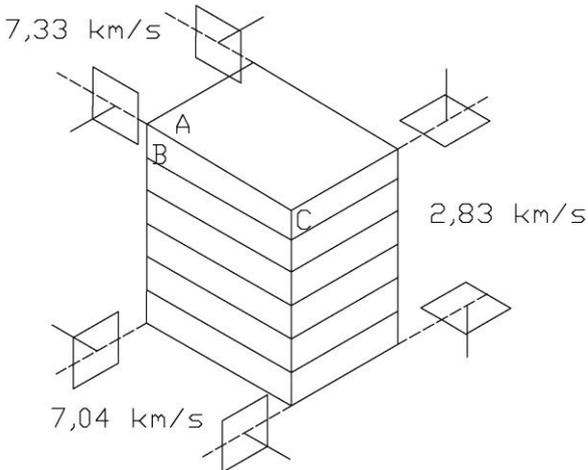


donde se aprecian igualmente variaciones según la orientación por donde se hayan realizado las medidas. Por tanto, esta tendencia ya podría estar indicando una diferencia de comportamiento según la dirección de medida paralelamente a los planos de foliación.

Tabla 3.3.- Ficha de los resultados de la muestra de Pizarra Mala

Pz 57 (Pizarra Mala)			
	Dimensiones (mm)	Tiempo (μ s)	Velocidad (km/s)
Longitud	133,00	18,13	7,33
Ancho	153,00	21,73	7,04
Espesor	160,00	56,55	2,83





A partir de las medidas de velocidades, se ha obtenido la variable conocida como Índice de anisotropía, para lo cual se ha seguido el modelo de Pernia *et al.*, (1986), los cuales han efectuado diferentes medidas de la Velocidad de impulso o propagación de las ondas en pizarras, respecto a las distintas orientaciones para obtener dicho índice. Para calcular el Índice de anisotropía, proponen esta fórmula:

$$Ia = \frac{V_{p_{m\acute{a}x}}}{V_{p_{m\acute{i}n}}}$$

Donde:

- $V_{p_{m\acute{a}x}}$ es el valor máximo de la velocidad de impulso registrado en un ensayo.



- $V_{p_{\min}}$ es el mínimo valor de la velocidad de impulso registrada en un ensayo.

Los resultados obtenidos del Índice de anisotropía se encuentran recogidos en la Tabla 3.4:

Tabla 3.4.- Resultados del índice de anisotropía

	Pz 62 (Pizarra Buena)	Pz 57 (Pizarra Mala)
$V_{p_{\max}}$	7,38	7,33
$V_{p_{\min}}$	5,14	2,83
Ia	1,44	2,59

Se puede observar que el Índice de anisotropía es mayor en la Pizarra Mala que en la Pizarra Buena. Esto es debido ya que la Pizarra Mala presenta una veta a lo largo de la muestra, sus crenulaciones están más marcadas y contiene grandes cantidades de sulfuros de pirita, es decir, *a priori* esta muestra tiene malas cualidades para poder ser aprovechada desde el punto de vista industrial.



4 ENSAYO DE EXFOLIACIÓN

El ensayo estático de exfoliación de pizarra, es un método de ensayo no normalizado que se realiza para alcanzar el máximo conocimiento de los factores que afectan al proceso de labrado. El objetivo principal en el presente Trabajo Fin de Máster es analizar si existe una diferencia de comportamiento según se exfolie en una u otra orientación pero siempre paralela al plano de exfoliación.

4.1 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO DE ENSAYO

El equipo de ensayo constará principalmente de una Prensa de accionamiento manual, como se muestra en la Figura 4.1:

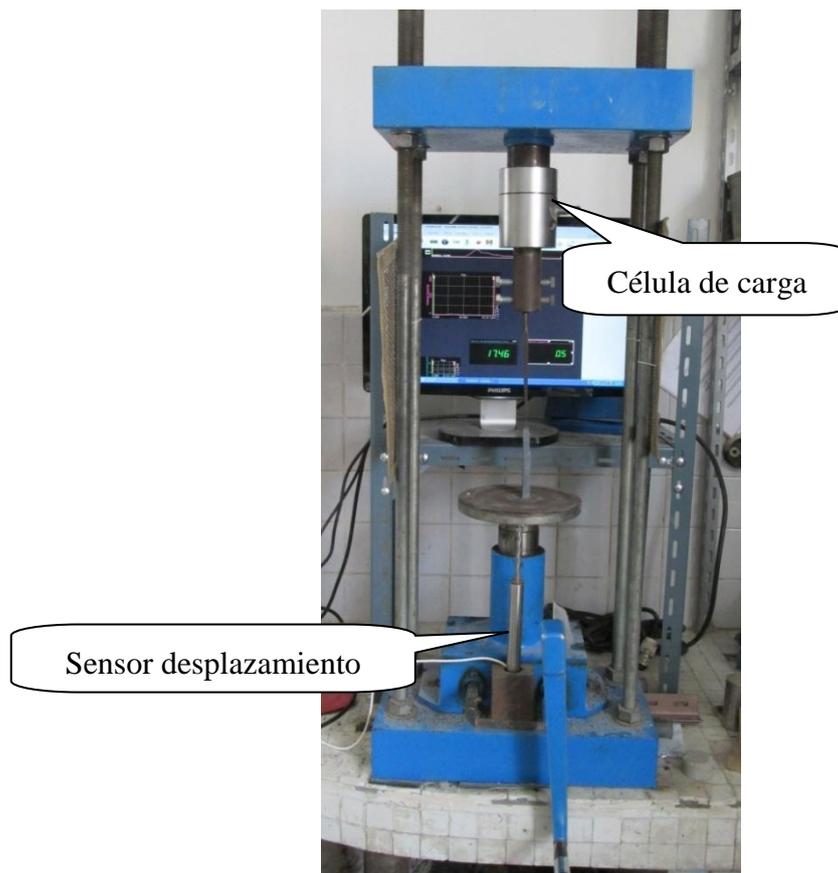


Figura 4.1.- Prensa utilizada en el ensayo

En la parte superior de la prensa se colocará una Célula de Carga de 50 kN de capacidad máxima, mientras que en la parte inferior hay un plato que se desplaza verticalmente mediante un émbolo accionado por una manivela. El plato tiene una doble



función: por una parte sirve para apoyar la muestra durante la realización del ensayo y por otra como superficie de referencia en la medición del desplazamiento vertical. Para dicha medición se empleará un Sensor de Desplazamiento tipo LVDT, de 50 mm de recorrido como máximo. Éste se fijará a la estructura de la prensa con un soporte con el cual esté completamente recto y perpendicular al émbolo.

Para provocar el exfoliado se va a utilizar un cincel similar a los empleados por operarios en una nave de labrado y se colocará en la parte superior de la prensa, mediante una pieza diseñada exclusivamente para dicho fin.

Tanto la Célula de Carga como el Sensor Desplazamiento realizarán un registro continuo de sus respectivas variables (fuerza y desplazamiento) durante el tiempo de ensayo, a través del uso de la tarjeta de adquisición de datos. Dicha tarjeta se encarga de transformar los valores de las variables de unidades eléctricas a unidades métricas (mm) mediante un fichero de configuración. Junto con la tarjeta se emplea para el registro de datos el programa llamado DEWEsoft. Esta tarjeta puede tomar un amplio rango de datos por segundo, comprendido entre 50 y 200000.

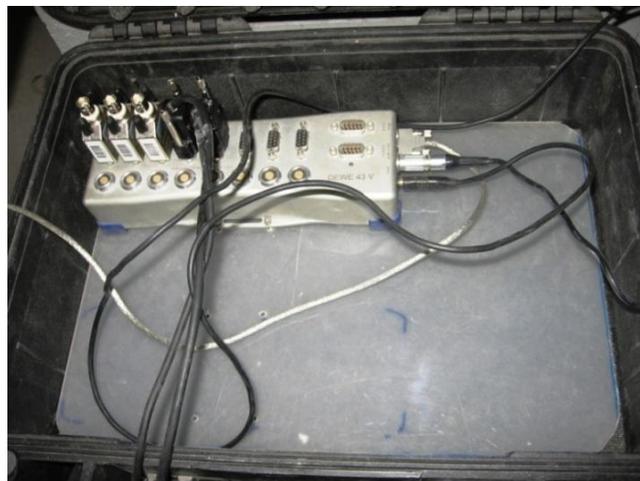


Figura 4.2.- Tarjeta de adquisición de datos

Como se puede observar en la Figura 4.2, de la tarjeta salen tres cables: uno es el de la corriente eléctrica, otro es un cable USB que se acopla al ordenador y el último es un cable de toma de tierra que debe ser ensamblado a un elemento metálico.

El registro de datos será guardado en un ordenador para su posterior tratamiento.



4.2 PROCEDIMIENTO DE ENSAYO

El ensayo estático de exfoliación consiste en hacer incidir el cincel en el centro de la muestra de pizarra, por los que se obtendrán dos bloques de similares dimensiones. El procedimiento se puede observar en la Figura 4.3:

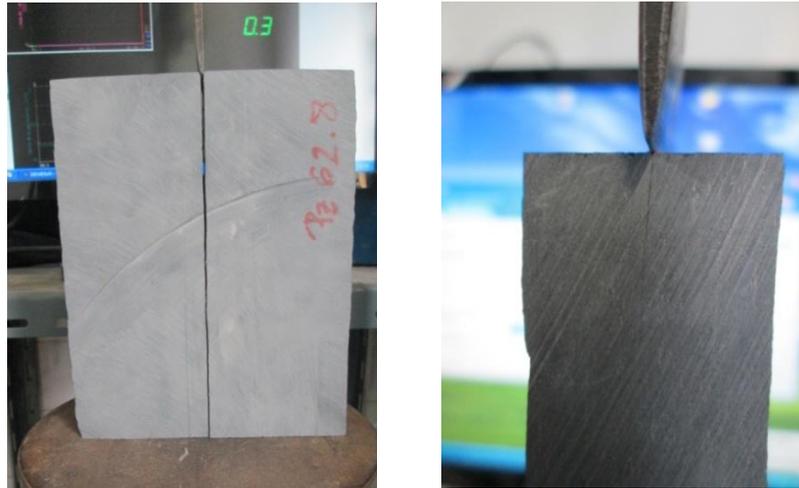


Figura 4.3.- Ensayo estático de exfoliación

Se comienza anclando el cincel en la parte superior de la prensa. A continuación, se fijará el soporte del Sensor de Desplazamiento de 50 mm de recorrido como máximo, y se apoyará en su parte superior en la cara inferior del plato. El sensor debe estar perpendicular al émbolo ya que así se asume que el desplazamiento medio se corresponde con la penetración del cincel en la muestra.

Una vez situados el cincel y el Sensor de Desplazamiento se procederá a emplear la muestra en el plato. La exfoliación se realizará paralela a los planos de exfoliación de la muestra de la pizarra.

Terminado todo esto se procederá a iniciar el registro de datos por parte del Sensor de Desplazamiento y de la Célula de Carga. Para ello se empleará el programa DEWEsoft 7.0, que realizará las medidas de fuerza y desplazamiento, es decir, las variables correspondientes de cada sensor, tomando cien mediciones por segundo a lo largo del ensayo.

Una vez iniciado el programa se empezará a realizar el ensayo propiamente dicho. Por medio del giro de una manivela situada en la parte inferior de la prensa, se desplazará verticalmente el émbolo y por tanto la muestra, en sentido ascendente, hasta



que llegue a entrar en contacto con el cincel provocando la exfoliación.

4.3 TIPOS DE ENSAYO

Las muestras se han obtenido tras realizar diferentes cortes a dos tochos de pizarra (bloque procedente de la última etapa del proceso de la explotación de la misma). Se ensayarán los dos tipos de pizarra vistos en el ensayo de ultrasonidos, es decir, muestras pertenecientes a Pz 62 (Pizarra Buena) y Pz 57 (Pizarra Mala).

Después de obtener las muestras correspondientes se procederá a ponerles un sistema de referencia, como se muestra en la Figura 4.4:

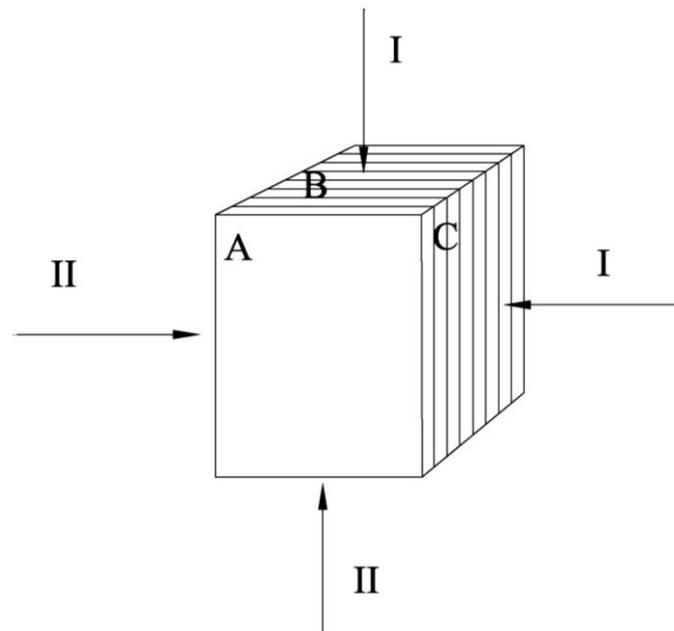


Figura 4.4.- Sistema de referencia

Se asignará un sistema de referencia (explicado ya en el apartado de muestras en el ensayo de ultrasonido) tanto en las Pizarras Buenas como en las Pizarras Malas, definido por las letras A, B y C. Utilizándose cada una de ellas para nombrar las principales caras de la muestra.

Por tanto el cincel incidirá en unos ensayos perpendicular a la cara B y en otros ensayos perpendicular a la cara C pero siempre paralelo a la cara A, es decir, siempre en dirección paralela a los planos de exfoliación. Además de realizar los ensayos por dichas orientaciones también se tiene en cuenta la dirección por la que está penetrando el cincel. Dichas direcciones pueden ser: I y II, dependiendo de qué cara de la muestra



se haya elegido como superficie de apoyo para colocarla en el émbolo, por tanto se tendrían dos direcciones para cada orientación. Estas superficies deben de ser lo más lisas posibles para tener un completo apoyo.

La nomenclatura utilizada contará de un código formado por las letras "Pz" seguido de dos números que hacen referencia al bloque de pizarra inicial y por tanto será "Pz 62" para Pizarras Buenas y "Pz 57" para Pizarras Malas; después de estos dos números les sigue un punto y un número que indica qué tipo de muestra se trata respecto a la orientación y a continuación entre paréntesis un número indicando el número de exfoliación correspondiente.

Las dimensiones de los diferentes tipos de muestras de la Pizarra Buena se recogen en la Tabla 4.1 y los de Pizarra Mala en la Tabla 4.2, así como las orientaciones y direcciones en que se realizará la exfoliación para cada una.

Tabla 4.1.- Dimensiones de las muestras de Pizarra Buena

Pz 62					
Orientación	Dirección	Muestra	Longitud (mm)	Espesor (mm)	Ancho (mm)
Según B	I	Pz 62.1	170,00	131,00	33,00
	II	Pz 62.4	170,00	131,00	33,00
Según C	II	Pz 62.6	170,00	130,00	29,00
	I	Pz 62.8	170,00	131,00	30,00

Tabla 4.2.- Dimensiones de las muestras de Pizarra Mala

Pz 57					
Orientación	Dirección	Muestra	Longitud (mm)	Espesor (mm)	Ancho (mm)
Según B	I	Pz 57.1	170,00	158,00	30,50
	II	Pz 57.4	170,00	159,00	33,00
Según C	I	Pz 57.5	170,00	157,00	33,50
	II	Pz 57.6	170,00	125,00	33,00



4.4 TRATAMIENTO DE DATOS

Se utilizará el programa DEWEsoft 7.0 para el tratamiento de los datos de cada ensayo.

Este programa generará un archivo de Matlab, en el cual serán recogidos los valores de los parámetros del tiempo, la fuerza y el desplazamiento.

El registro inicial, al ser de cien mediciones por segundo, se creará un archivo muy pesado, siendo muy difícil de tratar, por tanto se filtrarán los datos con un programa facilitado por el Grupo Ingeniería del Terreno. Con el programa se creará un archivo .xls, consiguiendo así, que se reduzcan diez veces los datos obtenidos al principio, facilitando así el tratamiento, y sin que ello suponga pérdida de datos.

A continuación se procederá a referenciar dichos datos a un instante concreto del ensayo, denominado "Puesta a cero", es decir, se hace corresponder el inicio del ensayo con el momento en el que el cincel entra en contacto con la pizarra. Esto es lo que se conoce como el inicio del proceso de carga.

Dentro de las medidas registradas tanto por la Célula de Carga como por el Sensor de Desplazamiento, se debe elegir un instante de referencia distinto al inicio del registro, así solo se medirá el desplazamiento del cincel en el interior de la muestra ensayada. Si se aceptase coger el instante de referencia con el inicio del registro, lo que se estaría calculando es el desplazamiento del cincel hasta entrar en contacto con la muestra y el desplazamiento dentro de la muestra. Sin embargo sólo interesa cuando el cincel está en contacto con la muestra.

Por lo tanto, en las medidas registradas se tomará como instante de referencia aquella en la que la Célula de Carga comienza a registrar fuerzas mayores a cero, esto quiere decir, cuando comienza a registrar el propio proceso de carga.

Una vez hecha la "Puesta a cero", tanto en los datos de tiempo, fuerza y desplazamiento se procederá a representar gráficamente los diferentes datos obtenidos.



4.5 RESULTADOS

En este apartado se comentarán las principales conclusiones observadas durante la realización de los ensayos de exfoliación, además de los resultados obtenidos.

En primer lugar es necesario destacar unos aspectos cualitativos apreciados durante los ensayos para los dos tipos de pizarra ensayadas, respecto a cómo se percibe la exfoliación. En las siguientes tablas se muestran diferentes fotografías de las muestras una vez exfoliadas completamente, tanto para la Pizarra Buena (Tabla 4.3) como para la Pizarra Mala (Tabla 4.4).

Se clasifican como exfoliaciones buenas aquellas que han exfoliado sin ningún tipo de problema, es decir, la grieta progresa en toda la longitud de la muestra, y como exfoliación mala aquella en donde se ha dado cuña como resultado, debido a que no hay una propagación de la grieta.

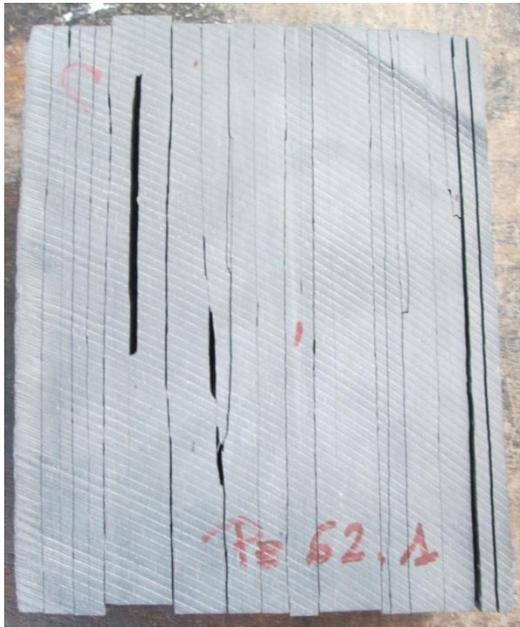
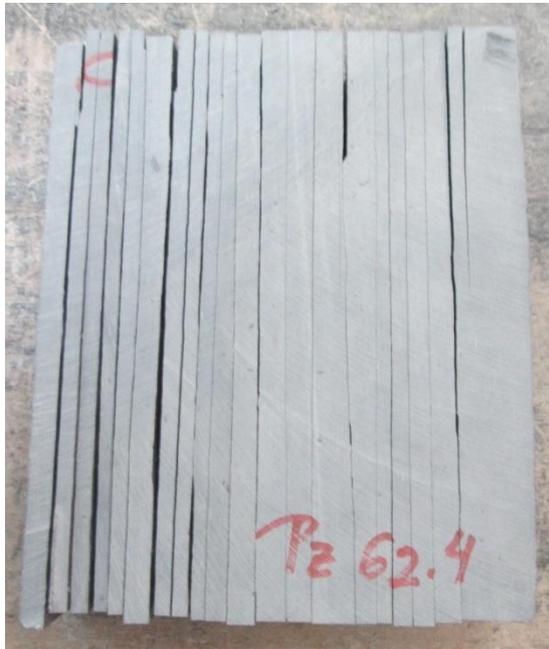
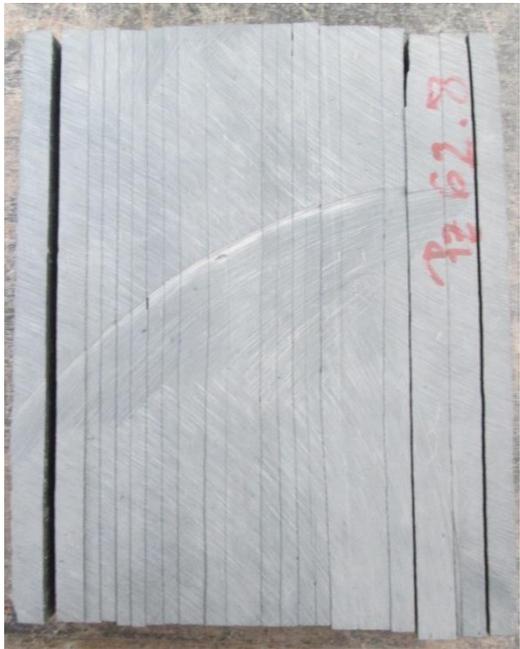
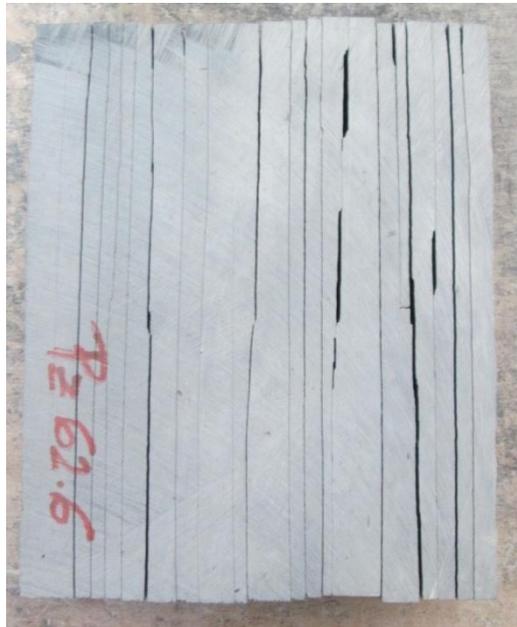
Para la Pizarra Buena se puede observar que las mejores exfoliaciones aparecen en la muestra Pz 62.8 con orientación C y dirección I, seguida de la muestra Pz 62.4 con orientación B y dirección II. Las otras dos muestras presentan una mala exfoliación, ya que han aparecido cuñas. Un ejemplo de éstas se muestra en la Figura 4.5.



Figura 4.5.- Ejemplos de cuñas



Tabla 4.3.- Imágenes de todas las exfoliaciones realizadas a las muestras de Pizarra Buena (Pz 62)

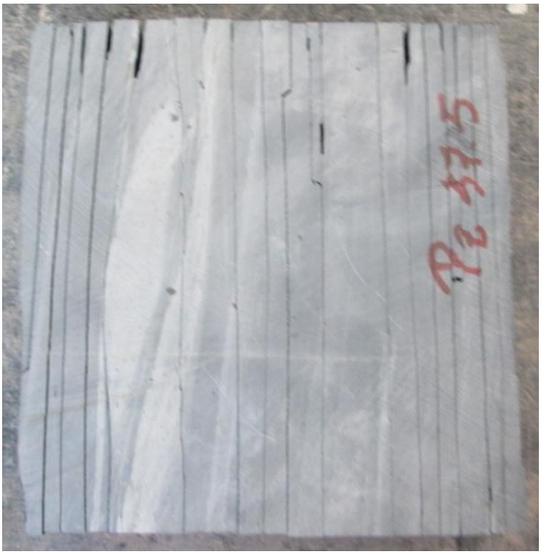
Pizarra Buena (Pz 62)	
Pz 62.1 (B I) 	Pz 62.4 (B II) 
Pz 62.8 (C I) 	Pz 62.6 (C II) 

En la Pizarra Mala se observa que la muestra Pz 57.1 con orientación B y dirección I es la que mejor resultados ha dado en la exfoliación. Sin embargo, la muestra Pz 57.4 con orientación B y dirección II, no se podría clasificar con una buena exfoliación ya que han aparecido cuñas, aunque la mayoría de sus exfoliaciones han



sido buenas. Para las muestras con orientación C, las exfoliaciones han sido malas. Estos resultados pueden ser debidos a los diferentes planos de debilidad (vetas) que presentan las muestras.

Tabla 4.4.- Imágenes de todas las exfoliaciones realizadas a las muestras de Pizarra Mala (Pz 57)

Pizarra Mala (Pz 57)	
Pz 57.1 (B I)	Pz 57.4 (B II)
	
Pz 57.5 (C I)	Pz 57.6 (C II)
	

Por tanto, cualitativamente, ya se puede apreciar que la exfoliación puede verse afectada según la orientación en la que se haya realizado el ensayo.

Finalmente, se explicarán los datos obtenidos en la realización del ensayo



desglosándolo en tres estudios:

- Fuerza máxima – Área de fricción o basal
- Desplazamiento a la fuerza máxima – Área de fricción o basal
- Energía de crushing – Área de fricción o basal

Para poder realizar dichos estudios, se ha hecho la representación gráfica de la curva Fuerza-desplazamiento de cada uno de los ensayos realizados. Dichas curvas mostrarán la fuerza ejercida por el cincel en la muestra para cada profundidad de penetración de la misma. En la Figura 4.6 se muestran a modo de ejemplo una curva Fuerza-desplazamiento de uno de los ensayos realizados.

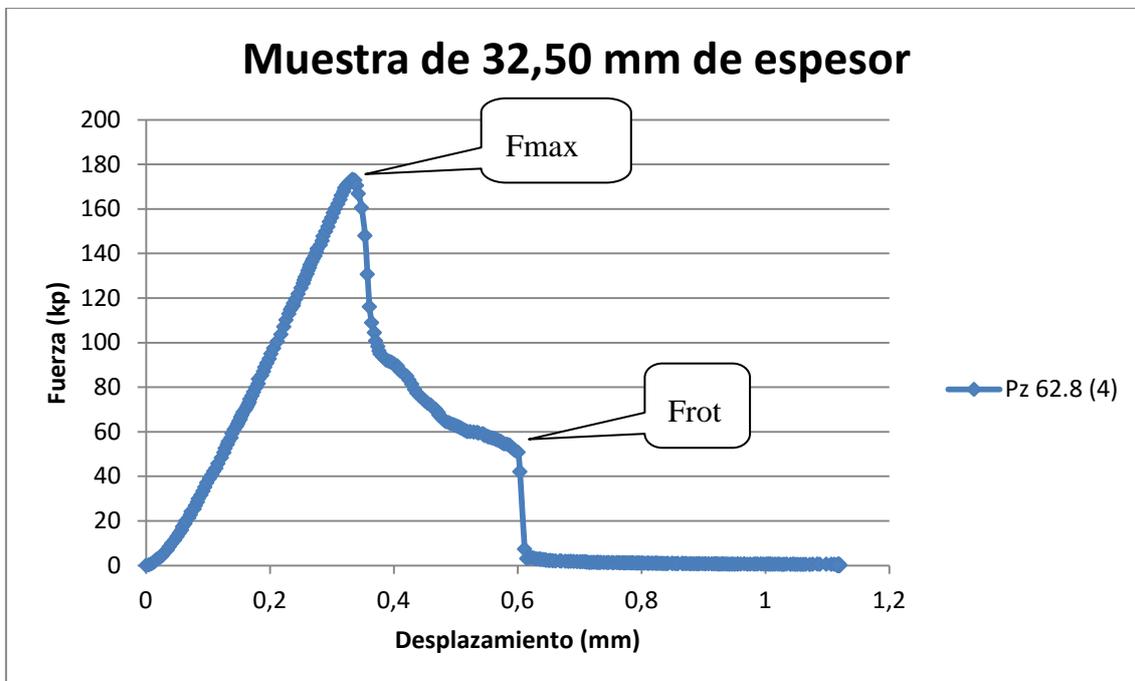


Figura 4.6.- Ejemplo curva Fuerza-desplazamiento

A cada una de las muestras ensayadas se le asociará dos puntos, los cuales definirán el comportamiento de la misma frente al ensayo estudiado. Estos dos puntos que están relacionados con un instante concreto del ensayo son:

- Punto de “Fuerza máxima” (F_{max}) y desplazamiento correspondiente llamado “Desplazamiento a la Fuerza máxima”.
- Punto de “Fuerza de rotura” (F_{rot}) y desplazamiento correspondiente llamado “Desplazamiento a la Fuerza de rotura”.



A continuación, se explicarán los resultados de la representación gráfica de la curva Fuerza-desplazamiento de cada uno de los ensayos realizados.

El instante de Fuerza máxima corresponde con el valor máximo de la fuerza registrada durante el ensayo.

Una vez alcanzada la Fuerza máxima y dependiendo de las dimensiones de la muestra, los valores registrados de la fuerza comenzarán a sufrir un descenso continuo y nunca superarán esa fuerza registrada, hasta que lleguen a una fuerza determinada que se denominará Fuerza de rotura, momento en el cual se produce la rotura completa de la muestra. A partir de dicho valor habrá un descenso brusco en los valores de la fuerza.

Se debe explicar que se denomina “Zona de crushing” a la zona que existe en cuanto el cincel está cargando a la muestra hasta que llega a su Fuerza máxima, es decir, en la curva Fuerza-desplazamiento se refiere a la zona cuando la curva crece. A partir de la Fuerza máxima se considera “Zona de exfoliado” que es cuando la muestra comienza a agrietarse hasta que rompe por completo. En este tipo de gráficas, esta zona es cuando empieza a decaer la curva.

Estas curvas también dan información de cómo exfoliaron los diferentes ensayos.

Se han realizado una serie de fichas distribuidas del siguiente modo:

- Las tablas en las que se recogen los resultados numéricos de dicho ensayo se encuentran en el ANEXO I.
- Las curvas Fuerza-desplazamiento se muestran en el ANEXO II.

Ambas fichas están agrupadas de acuerdo a la similitud entre espesores. En este sentido, existen cuatro espesores distintos para las Pizarras Buenas y cuatro espesores distintos para las Pizarras Malas:

- Pizarras Buenas:
 - 130,00 mm, pertenece a la primera exfoliación de cada muestra.
 - 65,00 mm, pertenece a la segunda y tercera exfoliación.
 - 32,50 mm, pertenece a la cuarta, quinta, sexta y séptima exfoliación.



- 16,25 mm, pertenece a las últimas exfoliaciones.
- Pizarras Malas:
 - 160,00 mm, pertenece a la primera exfoliación de cada muestra.
 - 80,00 mm, pertenece a la segunda y tercera exfoliación.
 - 40,00 mm, pertenece a la cuarta, quinta, sexta y séptima exfoliación.
 - 20,00 mm, pertenece a las últimas exfoliaciones.

Es necesario mencionar que la muestra Pz 57.6 al tener un espesor inicial de 125,00 mm, tendrá unos espesores inferiores a los mencionados anteriormente. Esto ha sido debido a que la muestra inicial contenía un plano de debilidad y no ha sido posible obtener un espesor mayor de muestra.

Para poder distinguir los datos visualmente, siempre se utilizan las tablas con un encabezado de color verde para las muestras de la Pizarra Buena y con un encabezado de color rojo para las muestras de Pizarra Mala. A su vez en las gráficas cada curva tiene un color correspondiente, para las exfoliaciones pertenecientes a la orientación B y con dirección I se representa de color azul, para las exfoliaciones que se realizan por la orientación B y dirección II se utiliza el color rojo, las exfoliaciones ejecutadas por la orientación C y dirección I vienen representadas por color verde y las exfoliaciones realizadas por la orientación C y dirección II se aplica el color morado.

De cara al estudio de los resultados obtenidos para dicho ensayo, se tendrán en cuenta las dimensiones de las muestras y la variación que provoca el cambio de orientación y dirección de la muestra.

Respecto a las dimensiones de las muestras, se estudiará la variación de los valores de Fuerza máxima y desplazamiento para cada espesor considerado, teniendo en cuenta la orientación y dirección de la muestra a la hora de exfoliar.

Tras realizar dicho ensayo y obtener los resultados, se han podido realizar los diferentes estudios citados anteriormente. En primer lugar se definirán las variables correspondientes a cada estudio. Se debe tener en cuenta que dichos estudios están realizados sólo para la zona de crushing. Estas variables de estudio son:



- Fuerza máxima: es la fuerza máxima registrada durante la realización del ensayo, que es utilizada para llegar al instante en que la muestra empieza a romperse respecto a su área basal. Se obtiene a partir del registro continuo de la variable fuerza gracias a la Célula de Carga.
- Área de fricción o área basal: se define como aquella superficie por donde se apoya la muestra a la hora de ser ensayada, siendo el producto del ancho, un parámetro fijo, y del espesor de la muestra a ensayar. En la Figura 4.7 se muestra un ejemplo del Área basal, siendo la zona rayada.

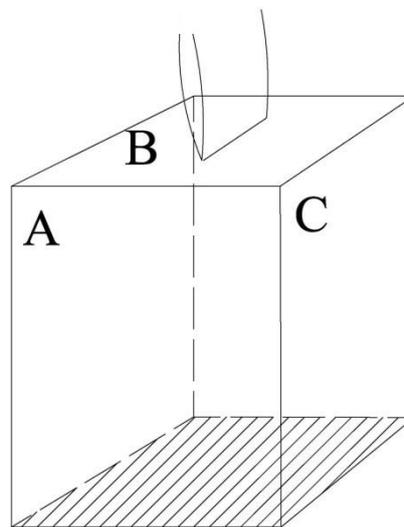


Figura 4.7.- Ejemplo de Área basal

- Desplazamiento a la fuerza máxima: es aquel desplazamiento que corresponde con la Fuerza máxima. Este variable representa el desplazamiento del cincel dentro de la muestra hasta el momento que se obtienen la Fuerza máxima del ensayo realizado respecto a su área basal. Se obtiene a partir del registro continuo de la variable desplazamiento gracias al Sensor de desplazamiento de 50 mm de recorrido como máximo.
- Energía de crushing: se define como el trabajo necesario para empezar a exfoliar la muestra. Esta variable se obtiene a partir del cálculo del área la curva. Un ejemplo de dicho área muestra en la Figura 4.8, corresponde con la zona rayada.

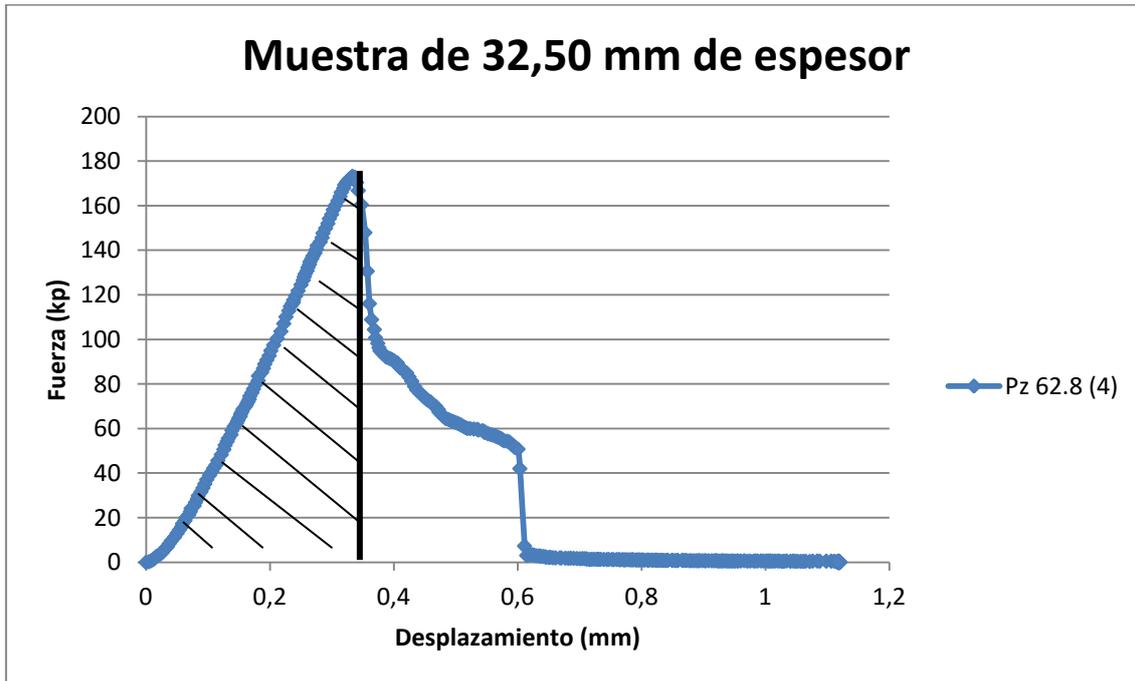


Figura 4.8.- Ejemplo de cómo se obtiene la Energía de crushing

Tras el análisis de estos valores en cada ensayo se han obtenido los siguientes resultados agrupados en tablas tanto para la Pizarra Buena (Tabla 4.5, Tabla 4.6, Tabla 4.7 y Tabla 4.8) como para la Pizarra Mala (Tabla 4.9, Tabla 4.10, Tabla 4.11 y Tabla 4.12). Estas tablas muestran los valores promedio utilizados para cada correspondiente representación gráfica de los tres estudios (Fuerza máxima – Área de fricción, Desplazamiento a la fuerza máxima – Área de fricción y Energía crushing – Área de fricción,), agrupados respecto a los diferentes espesores de muestra utilizados y a las diferentes muestras empleadas. Además de especificar en cada tabla la orientación y dirección por donde han sido ensayadas.

Tabla 4.5.- Tabla de valores medios de la muestra Pz 62.1

	Pz 62.1 (B I)			
	Área de fricción (cm ²)	F _{máx} (kp)	Desplazamiento F _{máx} (mm)	Energía crushing (J)
Espesor ≈ 130,00 mm	43,230	232,967	1,080	0,861
Espesor ≈ 65,000 mm	21,615	198,430	0,678	0,475
Espesor ≈ 32,500 mm	11,096	148,394	0,541	0,344
Espesor ≈ 16,250 mm	5,440	97,415	0,347	0,165
Espesor ≈ 8,125 mm	2,726	55,671	0,438	0,095



Tabla 4.6.- Tabla de valores medios de la muestra Pz 62.4

	Pz 62.4 (B II)			
	Área de fricción (cm ²)	Fmáx (kp)	Desplazamiento Fmáx (mm)	Energía crushing (J)
Espesor ≈ 130,00 mm	43,230	311,334	0,692	0,948
Espesor ≈ 65,000 mm	21,929	250,200	0,580	0,648
Espesor ≈ 32,500 mm	10,981	146,441	0,423	0,243
Espesor ≈ 16,250 mm	5,318	74,300	0,307	0,109
Espesor ≈ 8,125 mm	2,963	67,335	0,417	0,100

Tabla 4.7.- Tabla de valores medios de la muestra Pz 62.8

	Pz 62.8 (C I)			
	Área de fricción (cm ²)	Fmáx (kp)	Desplazamiento Fmáx (mm)	Energía crushing (J)
Espesor ≈ 130,00 mm	39,300	252,156	0,475	0,553
Espesor ≈ 65,000 mm	20,490	187,857	0,467	0,433
Espesor ≈ 32,500 mm	10,080	151,247	0,333	0,215
Espesor ≈ 16,250 mm	5,140	63,098	0,316	0,092
Espesor ≈ 8,125 mm	2,736	82,289	0,289	0,078

Tabla 4.8.- Tabla de valores medios de la muestra Pz 62.6

	Pz 62.6 (C II)			
	Área de fricción (cm ²)	Fmáx (kp)	Desplazamiento Fmáx (mm)	Energía crushing (J)
Espesor ≈ 130,00 mm	37,700	239,309	0,475	0,511
Espesor ≈ 65,000 mm	19,416	187,240	0,428	0,330
Espesor ≈ 32,500 mm	9,686	156,618	0,373	0,268
Espesor ≈ 16,250 mm	4,983	65,065	0,455	0,142
Espesor ≈ 8,125 mm	2,886	66,399	0,428	0,103



Tabla 4.9.- Tabla de valores medios de la muestra Pz 57.1

	Pz 57.1 (B I)			
	Área de fricción (cm ²)	Fmáx (kp)	Desplazamiento Fmáx (mm)	Energía crushing (J)
Espesor ≈ 160,00 mm	48,190	238,366	0,693	0,767
Espesor ≈ 80,000 mm	24,766	216,422	0,561	0,502
Espesor ≈ 40,000 mm	12,292	118,493	0,461	0,257
Espesor ≈ 20,000 mm	6,183	81,592	0,420	0,200
Espesor ≈ 10,000 mm	3,276	72,037	0,363	0,097

Tabla 4.10.- Tabla de valores medios de la muestra Pz 57.4

	Pz 57.4 (B II)			
	Área de fricción (cm ²)	Fmáx (kp)	Desplazamiento Fmáx (mm)	Energía crushing (J)
Espesor ≈ 160,00 mm	52,470	453,306	1,095	1,017
Espesor ≈ 80,000 mm	26,565	264,061	0,523	0,642
Espesor ≈ 40,000 mm	13,365	199,418	0,459	0,401
Espesor ≈ 20,000 mm	7,566	123,105	0,375	0,210
Espesor ≈ 10,000 mm	3,927	65,112	0,491	0,130

Tabla 4.11.- Tabla de valores medios de la muestra Pz 57.5

	Pz 57.5 (C I)			
	Área de fricción (cm ²)	Fmáx (kp)	Desplazamiento Fmáx (mm)	Energía crushing (J)
Espesor ≈ 160,00 mm	52,595	266,562	0,602	0,749
Espesor ≈ 80,000 mm	26,917	156,403	0,606	0,522
Espesor ≈ 40,000 mm	13,300	121,687	0,618	0,377
Espesor ≈ 20,000 mm	6,914	96,257	0,477	0,271
Espesor ≈ 10,000 mm	4,031	72,270	0,463	0,154



Tabla 4.12.- Tabla de valores medios de la muestra Pz 57.6

	Pz 57.6 (C II)			
	Área de fricción (cm ²)	F _{máx} (kp)	Desplazamiento F _{máx} (mm)	Energía crushing (J)
Espesor ≈ 160,00 mm	37,500	244,942	0,548	0,698
Espesor ≈ 80,000 mm	19,050	183,688	0,555	0,438
Espesor ≈ 40,000 mm	10,180	126,626	0,363	0,208
Espesor ≈ 20,000 mm	5,080	88,187	0,377	0,158
Espesor ≈ 10,000 mm	2,790	47,698	0,433	0,079

En los siguientes apartados se analizarán las relaciones entre estas variables con el objetivo de identificar variaciones en función, fundamentalmente, de la orientación ensayada. Para todos los estudios se han realizado gráficas donde se ha utilizado el color azul para las exfoliaciones realizadas por la orientación B y el color rojo para las exfoliaciones realizadas por la orientación C. A su vez, se ha utilizado la línea continua para la dirección I y la línea discontinua para la dirección II.

4.5.1 FUERZA MÁXIMA – ÁREA DE FRICCIÓN

En este apartado se explicarán los resultados de la representación gráfica de la Fuerza máxima respecto al Área de fricción, tanto para la Pizarra Buena como para la Pizarra Mala. La gráfica representa la fuerza máxima registrada que es necesaria para que la grieta empiece a propagar por la muestra respecto a su área basal.

En la Figura 4.9 se muestra la gráfica correspondiente para las Pizarras Buenas, representada para las dos orientaciones y sus respectivas dos direcciones; además de la correlación de los datos.

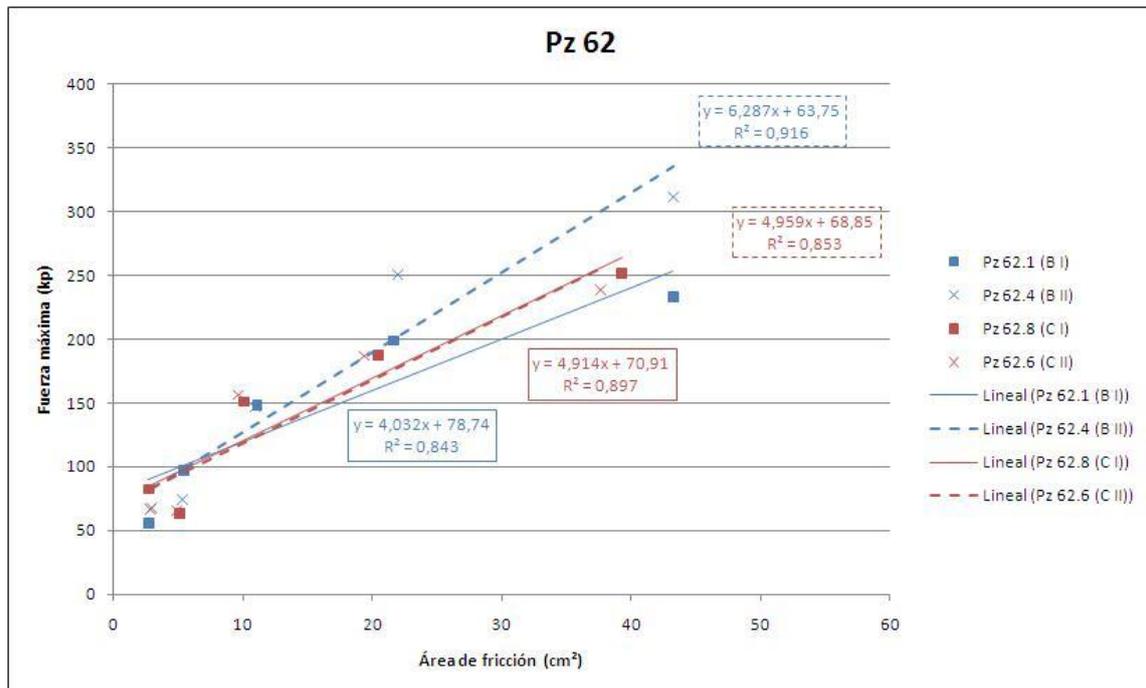


Figura 4.9.- Gráfica Fuerza máxima – Área de fricción para Pz 62

En las Pizarras Buenas, se puede observar que para mayores espesores y por tanto mayor Área de fricción, es necesaria más fuerza en la muestra exfoliada por la orientación B y la dirección II mientras que la muestra exfoliada por la orientación B y dirección I, es aquella donde se necesita menos fuerza para exfoliar. Las muestras exfoliadas según C tienen resultados prácticamente idénticos a lo largo de los diferentes espesores, diferenciándose ligeramente con los espesores más finos.

Según se va disminuyendo los espesores de las muestras hasta llegar a las muestras más finas, van desapareciendo las grandes diferencias entre las muestras ensayadas en las diferentes orientaciones y direcciones. En este caso, la muestra que más fuerza se le aplica durante el ensayo es según la orientación C y dirección I y la muestra que menos fuerza necesita, sigue siendo es la ensayada en la orientación B y dirección I.

En la Figura 4.10 se muestra la gráfica correspondiente para las Pizarras Malas, representada para las dos orientaciones y sus respectivas dos direcciones; además de la correlación de los datos.

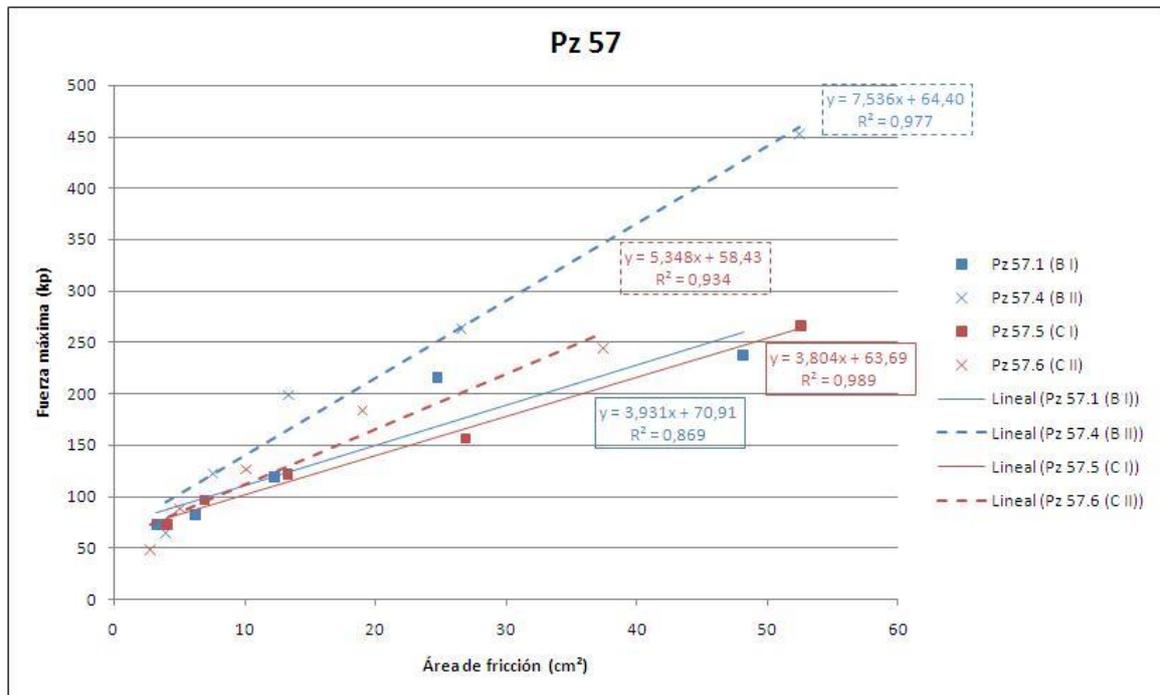


Figura 4.10.- Gráfica Fuerza máxima – Área de fricción para Pz 57

En las Pizarras Malas, se muestra que la probeta ensayada según la orientación B y dirección II es la que más fuerza necesita para llegar al momento en que la muestra empieza a romper, también se cree que es un valor anómalo ya que la curva Fuerza – desplazamiento en la zona de crushing muestra una zona donde cambia la linealidad o pendiente indicando que se ha encontrado una zona de debilidad y no sigue la tendencia que caracteriza dicha zona (Gráfica expuesta en ANEXO II). La muestra exfoliada en la orientación B y dirección I es aquella que menos fuerza necesita para llegar a dicha situación.

Las muestras Pz 57.1 (B I) y Pz 57.5 (C I) muestran una correlación muy parecida en todos los ensayos realizados, teniendo valores muy parecidos hasta en las muestras más finas; siendo, la de la orientación C y dirección I la que más fuerza se aplica y la muestra exfoliada según C y dirección II representa el caso contrario.

4.5.2 DESPLAZAMIENTO A LA FUERZA MÁXIMA – ÁREA DE FRICCIÓN

El estudio de Desplazamiento a la fuerza máxima respecto al Área de fricción, realizado para la Pizarra Buena y la Pizarra Mala, representa la penetración del cincel



dentro de la muestra hasta el momento que se obtiene la fuerza máxima del ensayo realizado respecto a su área basal.

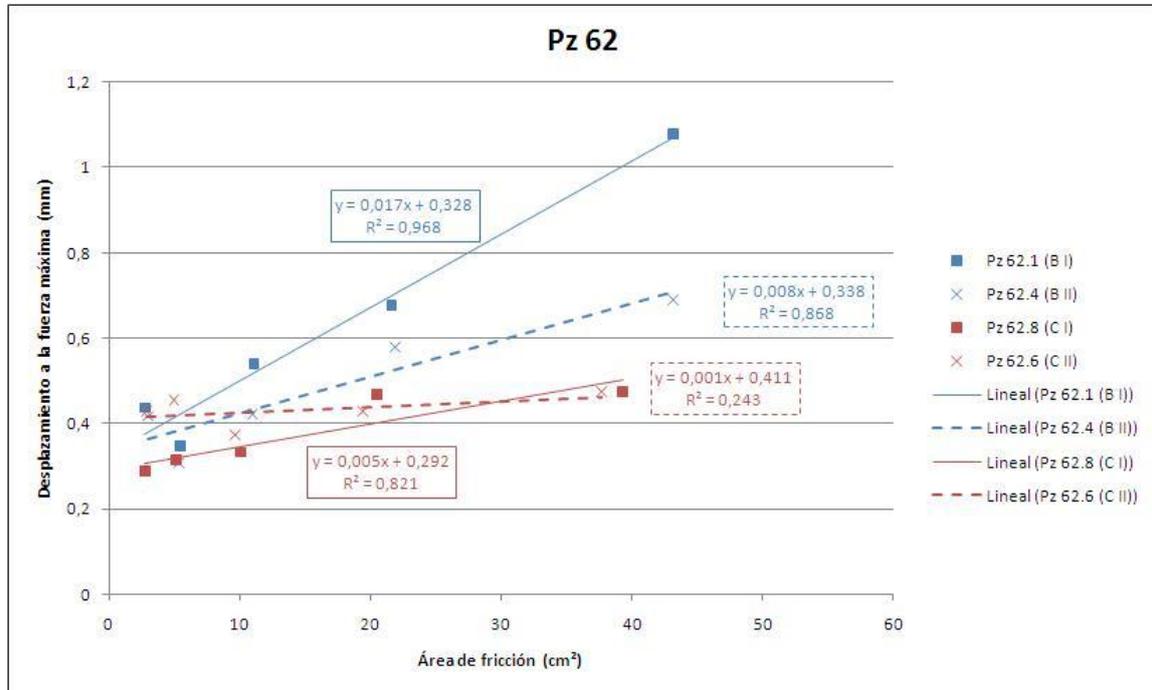


Figura 4.11.- Gráfica Desplazamiento a la fuerza máxima – Área de fricción para Pz 62

Para la Pizarra Buena (Figura 4.11) se observa que en los ensayos de mayores áreas de fricción, es decir, en los mayores espesores, existe una gran diferencia en los resultados, ya que para la orientación B y dirección I, se necesita que el cincel incida más en la muestra con respecto a las demás. Además las muestras exfoliadas por la orientación C, independientemente de su dirección, son las que necesitan que menos incida el cincel, obteniéndose los mismos resultados para ambas.

Los resultados de los ensayos de las muestras de mínimo espesor, se aprecia una gran diferencia, ya que la muestra que menos necesita que incida el cincel es la ensayada según la orientación C y dirección I, respecto a las demás muestras tienen resultados muy parecidos, siendo la muestra ensayada en la orientación B y dirección I la que necesita que incida más el cincel.

En las Pizarras Malas, como se puede observar en la Figura 4.12, existe una gran diferencia en los resultados obtenidos para las muestras de mayor espesor y área de fricción, ya que la muestra ensayada por la orientación B y dirección II necesitó que el cincel penetrase mucho más que en las demás, además ya se comentó en el estudio



anterior, Fuerza máxima – desplazamiento, que este valor es anómalo. A su vez, la muestra que necesitó profundizar menos el cincel fue según la orientación C y dirección II.

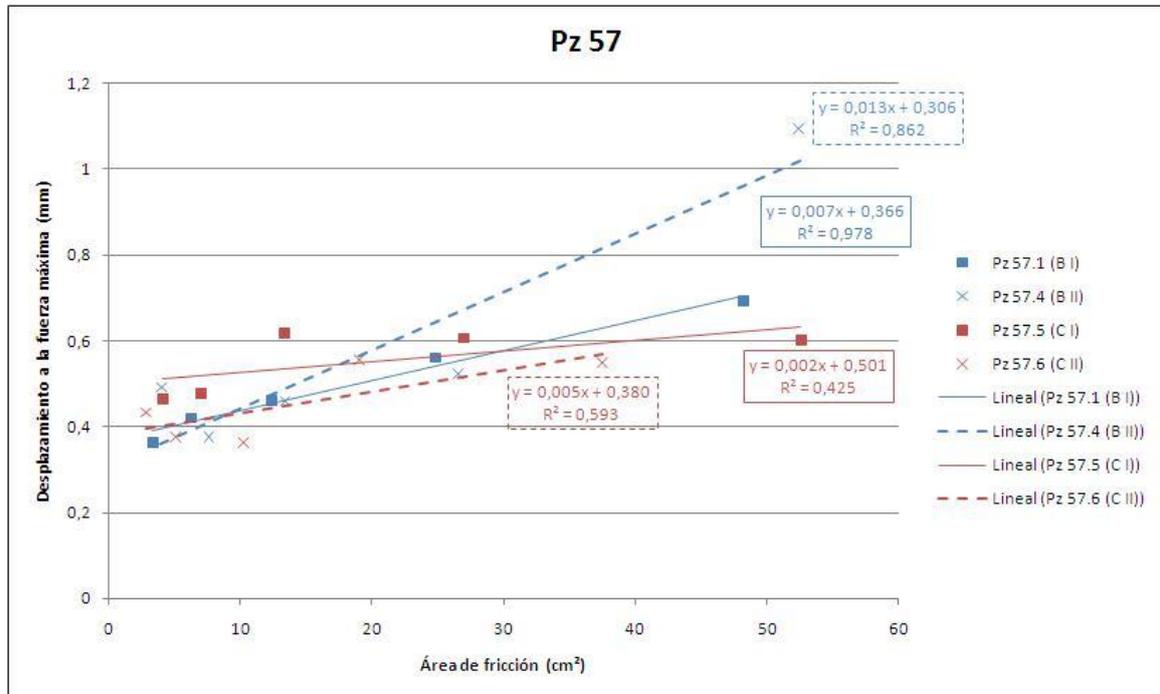


Figura 4.12.- Gráfica Desplazamiento a la fuerza máxima – Área de fricción para Pz 57

Al ir disminuyendo el área de fricción los valores de las diferentes muestras se van aproximando entre sí, siendo la muestra exfoliada en la orientación B y dirección II la que más necesito incidir el cincel y la muestra ensayada según B y dirección I, el canso contrario.

4.5.3 ENERGÍA DE CRUSHING – ÁREA DE FRICCIÓN

A continuación, se explicarán los resultados de la representación gráfica de la Energía de crushing – área de fricción, tanto para la Pizarra Buena como para la Pizarra Mala. La gráfica representa el trabajo utilizado para llegar al instante en que la grieta empieza a propagarse por la muestra respecto a su área basal.

En la Figura 4.13, correspondiente para la Pizarra Buena, se puede observar que para mayores espesores y por tanto, mayores áreas de fricción, se necesita más energía para llegar al instante en que empieza a propagarse la grieta por la muestra, existiendo una notable diferencia entre ensayar las muestras según en la orientación B o en la



orientación C, siendo la primera la que más energía necesita. Además se aprecia un mayor contraste entre las muestras ensayadas por la orientación B que las ensayadas por la orientación C, respecto a sus direcciones. La muestra ensayada por la orientación B y dirección II es la que mayor energía necesita y la muestra ensayada en la orientación C y la dirección II es la que menos energía utiliza.

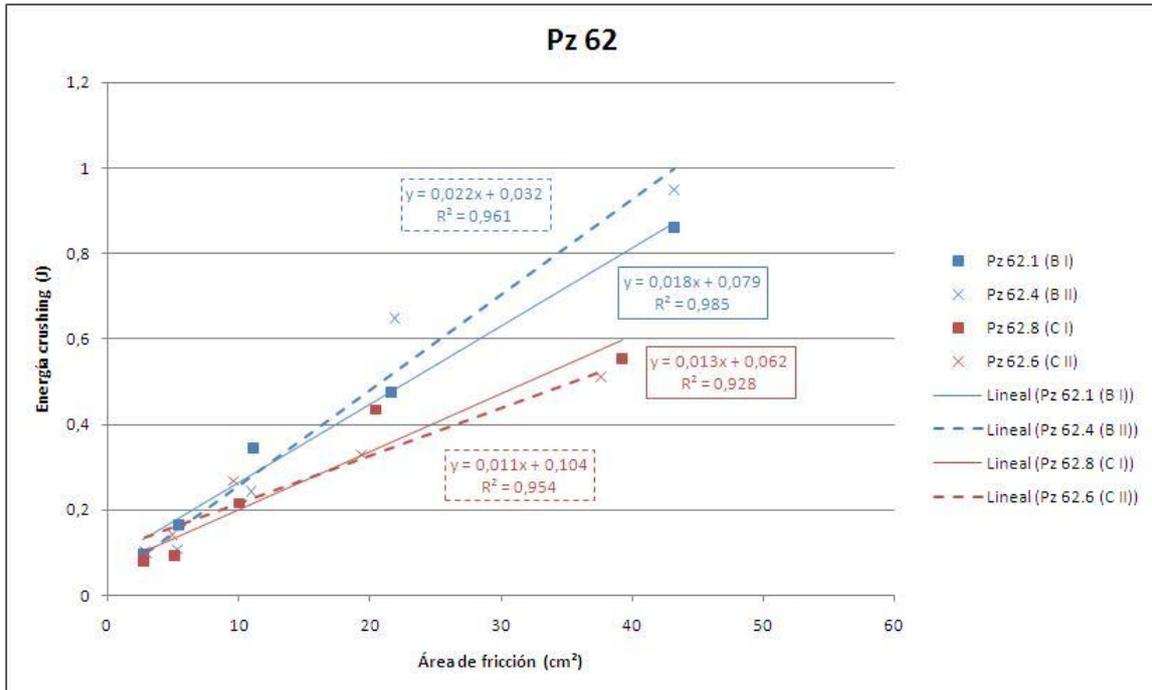


Figura 4.13.- Gráfica Energía de crushing – Área de fricción para Pz 62

Una vez que se va disminuyendo el espesor de la muestra esta tendencia se va modificando. En este caso la muestra que más energía necesita para llegar al comienzo de la exfoliación es según la orientación C con dirección II, teniendo un resultado muy parecido a la muestra exfoliada por la orientación B y dirección II. La muestra que utiliza menos energía es según la orientación C y dirección I.

En los espesores más finos, no se aprecia gran diferencia a la hora de ensayar en una u otra orientación y en las diferentes direcciones.

En las Pizarras Malas (Figura 4.14) para los espesores mayores y por tanto, para áreas de fricción mayores, la muestra exfoliada por la orientación B y la dirección II es la que más energía necesita para comenzar a romper la muestra y la probeta ensayada por la orientación C y dirección I es la que menos energía se necesita para alcanzar dicho momento.

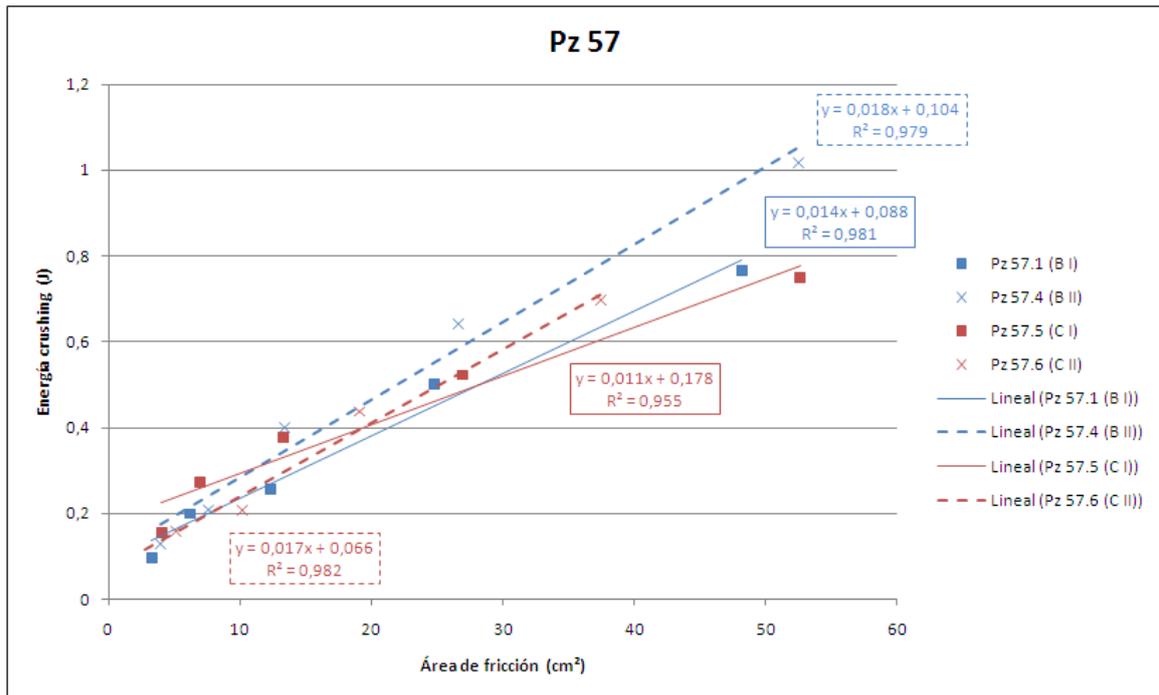


Figura 4.14.- Gráfica Energía de crushing – Área de fricción para Pz 57

La muestra Pz 57.6, como ya se ha comentado anteriormente, no tiene los mismos espesores que las demás debido a un plano de debilidad en dicha pizarra, pero se ha correlacionado con las otras muestras ya que no afecta a los resultados.

Para las muestras de espesores más finos, no se aprecia tanta diferencia entre las diferentes orientaciones y direcciones. En este caso, la muestra ensayada por la orientación C y dirección I es la que mayor energía necesita y la muestra según la orientación C y dirección II es la que menos energía utiliza.

Por tanto, en el análisis de la Energía de crushing es donde mejor se aprecian las variaciones de comportamiento entre las orientaciones B y C. La tendencia en general es que en B es necesario una mayor Energía de crushing para empezar a exfoliar la muestra. Esta orientación B equivale a las medidas de ultrasonidos realizadas en la longitud de la muestra, donde se vio que la velocidad obtenida era mayor a cualquier otra orientación.



5 ENSAYO DE FLEXIÓN

El ensayo de flexión bajo carga concentrada, es un método de ensayo normalizado que consiste en colocar una muestra sobre dos rodillos y cargar progresivamente dicha probeta en el centro. Permite calcular la resistencia a flexión y el módulo de elasticidad. El objetivo principal en este caso es estudiar ambos parámetros según las dos orientaciones paralelas a la foliación (nombradas anteriormente B y C) tanto en la Pizarra Buena como en la Pizarra Mala.

5.1 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO DE ENSAYO

Para la realización de este ensayo se empleará la Prensa de accionamiento manual utilizada en el ensayo de exfoliación, además de una adecuada estructura para poder realizar dichos ensayos, como se muestra en la Figura 5.1:

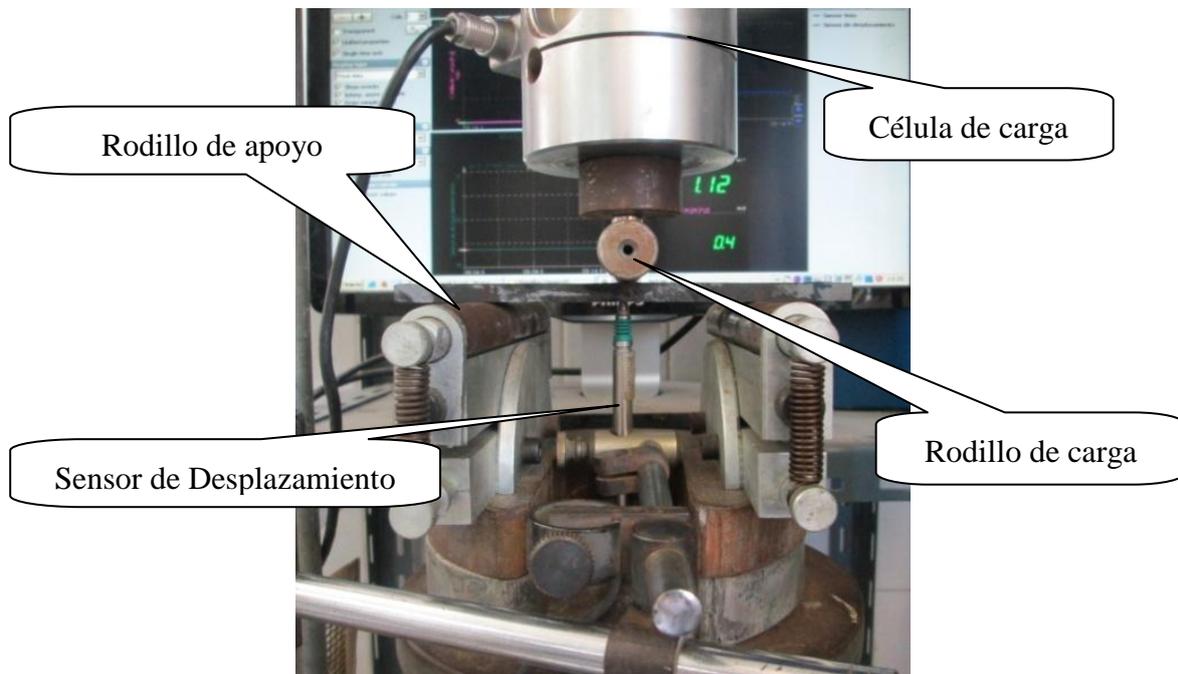


Figura 5.1.- Estructura utilizada en el ensayo

Esta estructura está formada por dos rodillos inferiores que sirven de puntos de apoyo para la probeta y un rodillo superior encargado de aplicar la carga sobre la muestra de manera centrada. Por tanto, este rodillo es importante que esté colocado exactamente en la mitad, entre los dos rodillos de apoyo, y centrado respecto a la



longitud de la probeta. Además de la Célula de Carga y el Sensor de Desplazamiento de 50 mm de recorrido como máximo (descrito en el apartado “Descripción del equipo” del ensayo de exfoliación) se empleará un Sensor de Desplazamiento de 4 mm y precisión de 0,01 mm para el registro de la flecha durante el proceso de carga. Ambos sensores se fijarán a las estructuras correspondientes completamente rectos y perpendiculares al émbolo y a la probeta.

Tanto la Célula de Carga como los Sensores de Desplazamiento realizarán un registro continuo de sus respectivas variables (fuerza y desplazamiento) durante el tiempo de ensayo a través del uso de la tarjeta de adquisición de datos DEWEsoft, ya expuesta en el ensayo de exfoliación. Estos registros serán guardados en un ordenador para su posterior tratamiento.

5.2 PROCEDIMIENTO DE ENSAYO

El ensayo a flexión bajo carga concentrada consiste en aplicar una fuerza en la mitad de la muestra, respecto a su longitud, mediante un rodillo superior y apoyada ésta perfectamente en dos rodillos inferiores o rodillos de apoyo, llevándose a la rotura dicha muestra. Este procedimiento de ensayo se realizará con los planos de foliación dispuestos de la forma mostrada en la Figura 5.2 tanto en la Pizarra Buena como en la Pizarra Mala.

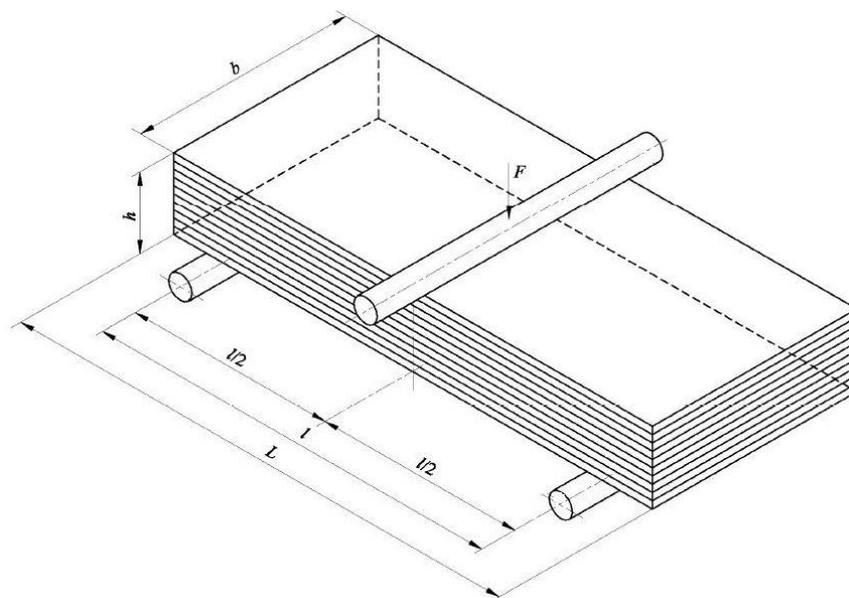


Figura 5.2.- Ensayo de flexión (Fuente: UNE EN 12372)



El procedimiento del ensayo comienza fijando el rodillo que aplica la carga en la parte superior de la prensa mediante una pieza diseñada para tal fin. Seguido se fijará el soporte del Sensor de Desplazamiento de 50 mm, y se apoyará en su parte superior en la cara inferior del plato. El sensor debe estar perpendicular al émbolo ya que así se asumen que los desplazamientos medios se corresponden con los desplazamientos verticales del rodillo superior respecto a la muestra.

Una vez situados, el rodillo y el Sensor de Desplazamiento, de 50 mm de máximo recorrido, se procederá a colocar la estructura que permite realizar el ensayo de flexión. Dicha estructura se colocará encima del émbolo, los dos rodillos de apoyo se situarán a la misma distancia del rodillo superior. A continuación se colocará la muestra pero antes de comenzar el ensayo se debe de revisar la posición del Sensor de Desplazamiento, de 4 mm de recorrido máximo, tiene que estar posicionado justamente debajo del punto donde el rodillo ejerce la carga, además de estar recto y perpendicular.

El ensayo de flexión siempre se realizará perpendicular a los planos de exfoliación de la muestra de la pizarra, en este caso con el rodillo de carga apoyado en la cara A.

Las dimensiones utilizadas en los ensayos de flexión, siguiendo la nomenclatura recomendada de la Norma UNE EN 12372 “Determinación de la resistencia a la flexión bajo carga concentrada”, son las expresadas en la siguiente Tabla 5.1:

Tabla 5.1.- Dimensiones utilizadas a la hora de realizar los ensayos de flexión según UNE EN 12372

	L (mm)	l (mm)	l/2 (mm)
Pizarra Buena	170,00	100,00	50,00
Pizarra Mala	170,00	100,00	50,00

Terminado todo este proceso, se procederá a iniciar el registro de datos por parte del Sensor de Desplazamiento de 50 mm, el Sensor de Desplazamiento de 4 mm y de la Célula de Carga. Para ello se empleará el programa DEWEsoft 7.0, que realizará las medidas de fuerza y desplazamiento, es decir, las variables correspondientes de cada sensor, tomando cien mediciones por segundo a lo largo del ensayo.

Una vez iniciado el programa se empezará a realizar el ensayo propiamente dicho. Por medio del giro de la manivela situada en la parte inferior de la prensa, se



desplazará verticalmente el émbolo y por tanto la muestra, en sentido ascendente, hasta que llegue a entrar en contacto con el rodillo superior o rodillo de aplicación de la carga, provocando la rotura de la muestra.

5.3 MUESTRAS

Las muestras de ensayo que se emplearán se han obtenido del ensayo de exfoliación con cincel, concretamente de las muestras resultantes de los últimos ensayos realizados, es decir, aquellas que presentan los espesores más finos.

Las probetas seleccionadas han sido las más homogéneas, es decir, aquellas que tienen espesores similares y su superficie es lo más lisa posible. Por tanto, sólo se han tenido en cuenta aquellas muestras que han dado los mejores resultados en los ensayos de exfoliación, con el objetivo de no introducir más incertidumbres debidas a la irregularidad de las piezas.

Por ello se han ensayado dieciséis muestras para la Pizarra Buena, ocho de la orientación B y ocho de la orientación C, y ocho para las Pizarras Malas, siendo cuatro de la orientación B y cuatro de la orientación C.

La nomenclatura utilizada contará de un código formado por las letras “Flx”, indicando que es un ensayo de flexión, seguido de guión bajo, un nuevo código de letras “Pz” acompañado de dos números que hacen referencia al bloque inicial y por tanto será “Pz 62” para la Pizarra Buena y “Pz 57” para la Pizarra Mala, después de estos dos números les sigue un punto y un número que indica qué tipo de muestra se trata respecto a la orientación y a continuación entre paréntesis un número indicando el número de exfoliación al que corresponden. Finalmente le sigue un guión bajo y un número que indica qué tipo de muestra es dentro de dicha exfoliación.

5.4 TRATAMIENTO DE DATOS

El tratamiento de datos se llevará a cabo mediante el mismo procedimiento ya explicado en los ensayos de exfoliación, con la novedad que se empleará un nuevo sensor de desplazamiento.

Una vez filtrados y tratados los datos, se procederá a referenciar dichos datos a



un instante concreto del ensayo, denominado “Puesta a cero”, es decir, se hace corresponder el inicio del ensayo con el momento en el que el rodillo de carga entra en contacto con la muestra. Esto es lo que se conoce como el inicio del proceso de carga.

Dentro de las medidas registradas tanto por la Célula de Carga como por ambos sensores de desplazamiento, se debe elegir un instante de referencia distinto al inicio de registro, así solo se medirá por un lado el desplazamiento que se produce cuando el rodillo de carga ya está aplicando la fuerza sobre la muestra, y por otro lado se mide la flecha.

Por lo tanto, en las medidas registradas se tomará como instante de referencia aquella en la que la Célula de Carga comienza a registrar fuerzas mayores a cero, esto quiere decir, cuando comienza a registrar el propio proceso de carga.

Una vez hecha la “Puesta a cero”, tanto en los datos de tiempo, fuerza y desplazamiento se procederá a representar gráficamente los diferentes datos obtenidos.

5.5 RESULTADOS

En este apartado se comentarán los resultados obtenidos en la realización de los ensayos de flexión así como las principales conclusiones observadas durante dichos ensayos.

Las variables de estudio a analizar en el ensayo de flexión serán la Resistencia a flexión y el Módulo elástico. La Resistencia a flexión (σ_f) se puede calcular a partir de la fórmula recomendada en la Norma UNE EN 12372 “Determinación de la resistencia a la flexión bajo carga concentrada”:

$$\sigma_f = \frac{3 \cdot F_{m\acute{a}x} \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2}$$

Donde:

- $F_{m\acute{a}x}$ es la fuerza máxima aplicada en el ensayo o también denominada carga de rotura (N).
- L es la distancia que existe entre los dos rodillos inferiores o rodillos de apoyo, siendo de 100 mm para todas las muestras ensayadas.
- b es el ancho de la muestra a ensayar (mm).



- h es el espesor de la muestra a ensayar (mm).

Por otra parte, el Módulo elástico (E) correspondiente a cada ensayo, para una muestra rectangular, se obtiene a partir de la ecuación:

$$E = \frac{12}{48} \cdot \frac{F}{f} \cdot \frac{L^3}{b \cdot h^3}$$

Donde:

- F es la fuerza aplicada en el ensayo (N).
- f es la flecha total del ensayo, es decir, la suma del desplazamiento del émbolo desde que el rodillo superior entra en contacto con la muestra hasta que provoca la rotura y la flecha producida en la flexión de la muestra durante el ensayo (mm).

El cociente entre la fuerza aplicada y la flecha, corresponde a la pendiente obtenida en las curvas de Fuerza – Desplazamiento o flecha total. En la Figura 5.3 se muestra un ejemplo de dichas gráficas.

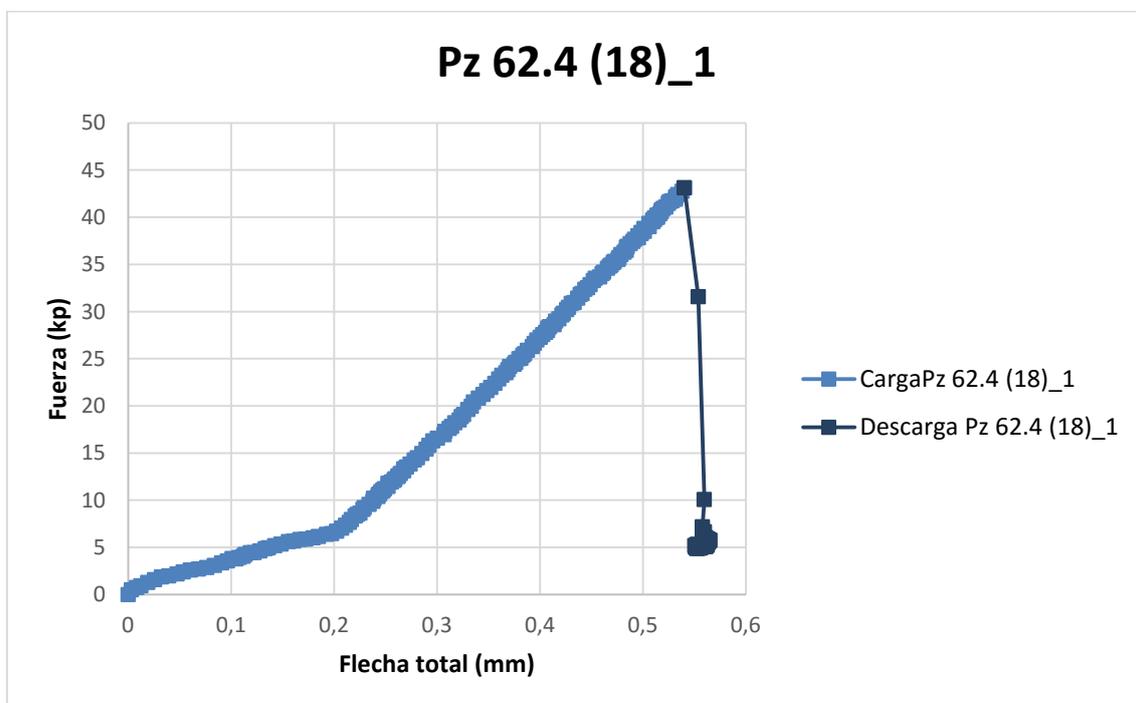


Figura 5.3.- Ejemplo de curva Fuerza – flecha total del ensayo Pz 62.4 (18)_1



El cálculo de la pendiente se realiza sobre un tramo lineal logrando así un ajuste como se puede observar en la Figura 5.4.

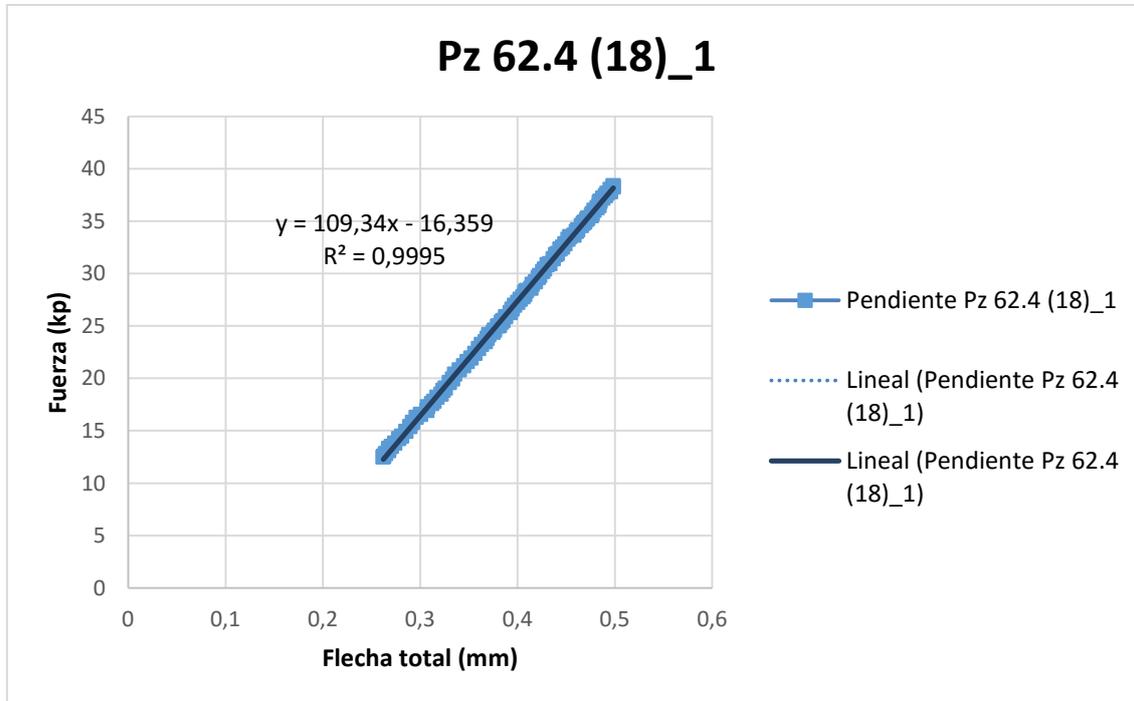


Figura 5.4.- Ejemplo gráfica de la pendiente del ensayo Pz 62.4 (18)_1

El cálculo de las pendientes permite obtener el Módulo elástico (E). A su vez, estas se calculan con todos los valores medios correspondientes a la fuerza y flecha total del ensayo, para poder conseguir un buen ajuste. Si se utilizasen todos los valores de la primera gráfica, se asume que el primer tramo pertenece al instante inicial del ensayo. Pero dicho tramo corresponde al momento entre el acople de los rodillos inferiores hasta que el rodillo superior empieza a aplicar la fuerza en la muestra.

Las dimensiones y los resultados obtenidos para los diferentes tipos de muestras de la Pizarra Buena y de la Pizarra Mala se recogen en la Tabla 5.2 y Tabla 5.3 respectivamente, así como las orientaciones y direcciones en que se realizará el ensayo de flexión para cada una.



Tabla 5.2.- Tabla de dimensiones y cálculos de Pz 62

Pz 62								
Orientación	Muestra	Ancho (mm)	Longitud (mm)	Espesor (mm)	Fuerza máxima (kp)	Pendiente	Resistencia a flexión (MPa)	Módulo elástico (GPa)
B	Flx_Pz 62.4 (16)_1	33,000	170,000	4,200	32,554	56,329	83,884	57,598
	Flx_Pz 62.4 (16)_2	33,000	170,000	5,000	33,467	65,528	60,848	39,714
	Flx_Pz 62.4 (17)_1	33,000	170,000	4,400	17,094	18,925	40,134	16,831
	Flx_Pz 62.4 (17)_2	33,000	170,000	5,100	37,906	80,483	66,243	45,964
	Flx_Pz 62.4 (18)_1	33,000	170,000	5,000	43,134	109,340	78,425	66,267
	Flx_Pz 62.4 (18)_2	33,000	170,000	4,000	25,795	45,257	73,282	53,571
	Flx_Pz 62.4 (19)_1	33,000	170,000	4,000	29,313	50,776	83,275	60,104
	Flx_Pz 62.4 (19)_2	33,000	170,000	4,600	34,346	52,219	73,781	40,643
C	Flx_Pz 62.8 (14)_1	30,000	170,000	4,400	26,942	73,913	69,582	72,307
	Flx_Pz 62.8 (14)_2	30,000	170,000	4,300	24,851	61,157	67,200	64,100
	Flx_Pz 62.8 (15)_1	30,000	170,000	4,200	24,520	38,225	69,501	42,995
	Flx_Pz 62.8 (15)_2	30,000	170,000	4,500	27,519	70,984	67,947	64,914
	Flx_Pz 62.8 (16)_1	30,000	170,000	4,400	28,455	35,657	73,490	34,882
	Flx_Pz 62.8 (16)_2	30,000	170,000	4,600	23,131	34,207	54,658	29,286
	Flx_Pz 62.8 (17)_1	30,000	170,000	4,700	27,940	46,063	63,242	36,972
	Flx_Pz 62.8 (17)_2	30,000	170,000	4,400	30,962	58,913	79,963	57,633



Tabla 5.3.-Tabla de dimensiones y cálculo de Pz 57

Pz 57								
Orientación	Muestra	Ancho (mm)	Longitud (mm)	Espesor (mm)	Fuerza máxima (kp)	Pendiente	Resistencia a flexión (MPa)	Módulo elástico (GPa)
B	Flx_Pz 57.1 (16)_1	30,500	170,000	5,800	52,985	136,780	77,462	57,462
	Flx_Pz 57.1 (16)_2	30,500	170,000	4,300	30,125	74,999	80,127	77,320
	Flx_Pz 57.1 (19)_1	30,500	170,000	6,000	69,898	152,740	95,490	57,961
	Flx_Pz 57.1 (19)_2	30,500	170,000	5,000	47,997	124,780	94,420	81,823
C	Flx_Pz 57.5 (17)_1	33,500	170,000	7,200	84,496	199,730	72,982	39,934
	Flx_Pz 57.5 (17)_2	33,500	170,000	5,900	51,758	85,360	66,576	31,017
	Flx_Pz 57.5 (19)_1	33,500	170,000	5,500	44,008	85,833	65,141	38,500
	Flx_Pz 57.5 (19)_2	33,500	170,000	5,100	50,095	85,308	86,239	47,993



Se ha realizado una primera comparación entre la Resistencia a flexión y el Módulo elástico, tanto para la Pizarra Buena (Figura 5.5) como la Pizarra Mala (Figura 5.6), estando representadas las orientaciones B en azul y las C en rojo para ambos casos.

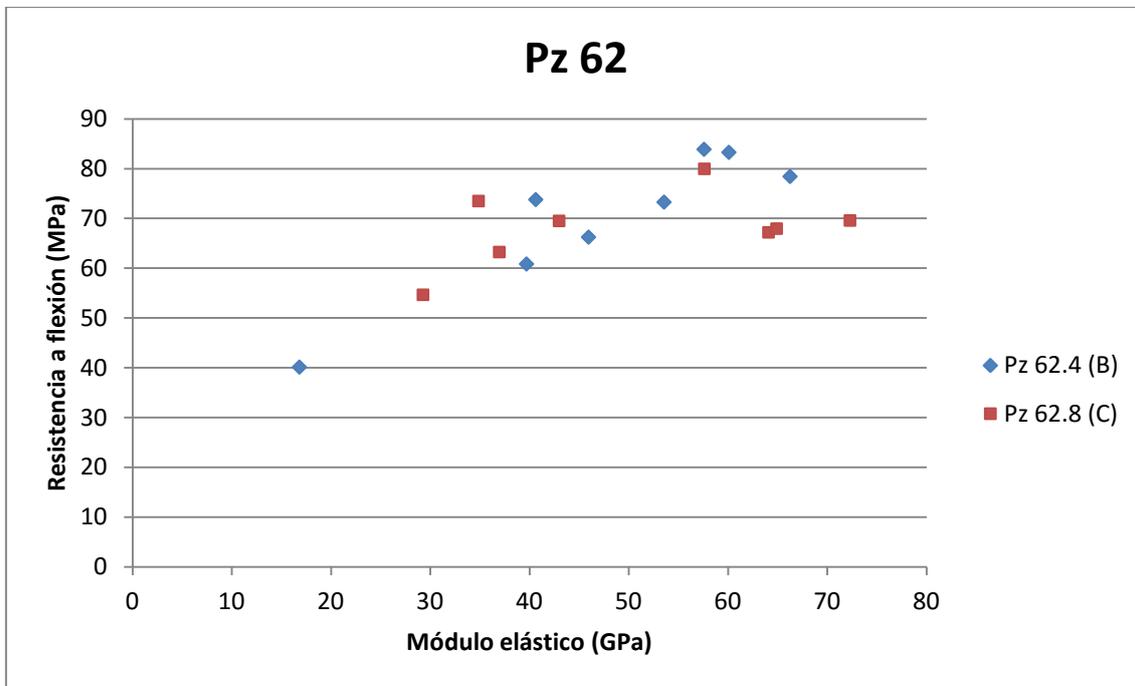


Figura 5.5.- Gráfica Resistencia a flexión – módulo elástico para la Pizarra Buena

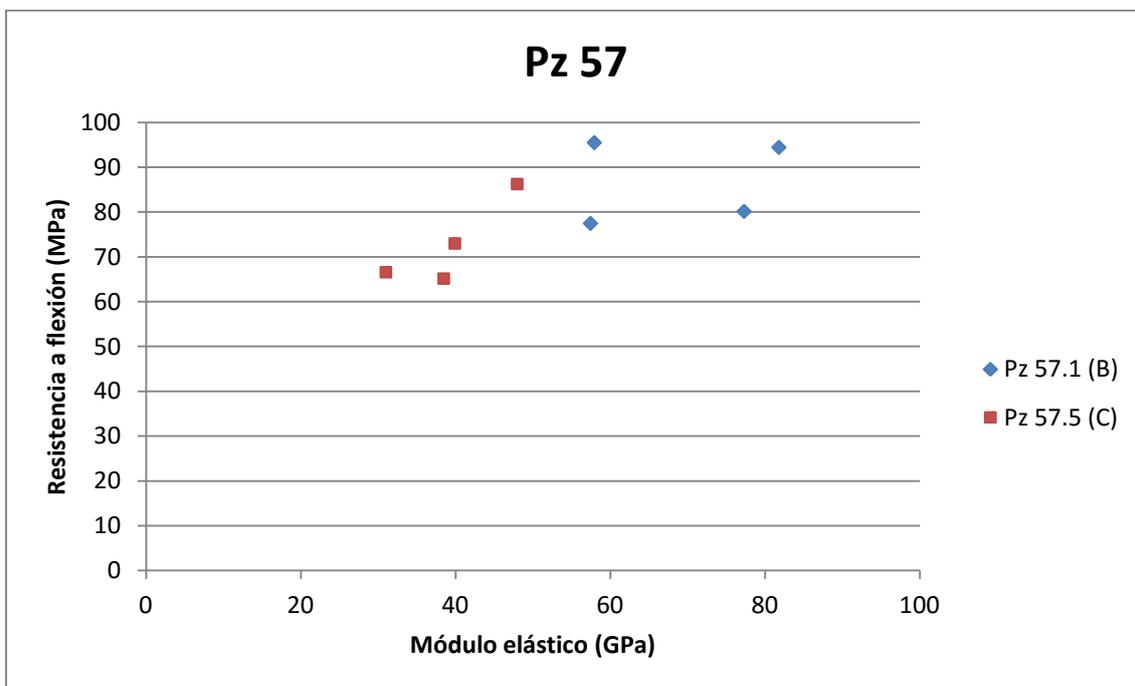


Figura 5.6.- Gráfica Resistencia a flexión – módulo elástico para la Pizarra Mala



En ambas gráficas se puede observar una tendencia aproximadamente lineal, donde se aprecia que a mayor resistencia a flexión, el módulo elástico se incrementa. A su vez, en la Pizarra Mala existe una clara diferencia según la orientación de las muestras, ya que según B se puede observar que, tanto la resistencia a flexión como el módulo elástico son más elevados que en las muestras según la orientación C. Sin embargo, en la Pizarra Buena no se aprecia una diferencia tan evidente entre ambas orientaciones pero sí se mantiene la tendencia lineal comentada entre la Resistencia a flexión y el Módulo elástico.

Es necesario destacar unos aspectos cualitativos observados durante los ensayos, tanto en la Pizarra Buena como en la Pizarra Mala, respecto a cómo se percibe la rotura.

En ambos casos, la intensidad de la rotura o “chasquido” es mucho más fuerte en la orientación B que en la C, siendo ésta un “chasquido” más sutil, llegando incluso a veces a no poder apreciarse.

Se puede relacionar esta característica auditiva con el estado final de la muestra, es decir, como se ha llegado a percibir visualmente. Para ello, se han fotografiado las muestras a través de una lupa.

En la Tabla 5.4 se muestran dos ejemplos de la rotura de la Pizarra Buena. La primera columna corresponde al ensayo Flx_Pz 62.4 (16)_2, muestra perteneciente a la orientación B y la segunda columna muestra la rotura del ensayo Flx_Pz 62.8 (15)_1, correspondiente a la orientación C. En ambos ensayos se ha redondeado el lugar donde aparece la rotura; pudiendo apreciarse que la muestra correspondiente a la orientación B, presenta una grieta más marcada y de mayor dimensión.

En la primera y segunda fila de la tabla, se han colocado las fotografías pertenecientes al espesor de la muestra, correspondiendo con las posiciones seguidas en el ensayo. La última fila corresponde a la superficie por donde estaban apoyadas las muestras en los rodillos de apoyo, es decir, la zona de rotura vista en planta.

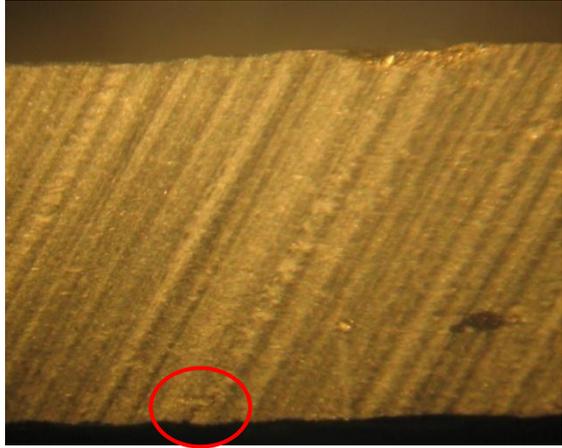
Para la muestra perteneciente a la orientación B, se puede observar que la grieta ha propagado por toda la superficie de apoyo y en los dos espesores, pero en la muestra perteneciente a la orientación C, la rotura apenas es evidente.

Aunque esta característica se ha observado en la mayor parte de las muestras,



aquí se muestran dos ejemplos de ensayo.

Tabla 5.4.- Ejemplo de roturas en las muestras de Pz 62

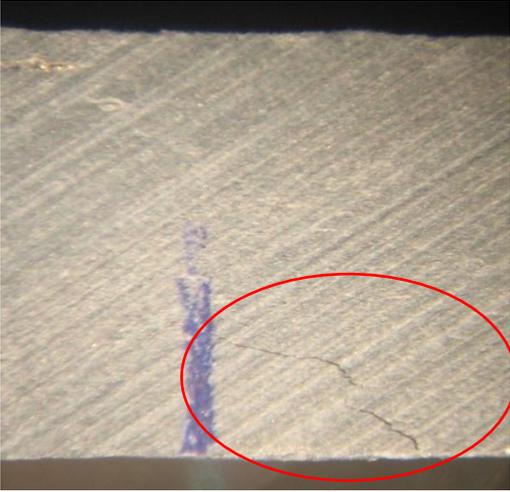
Pz 62	
Flx_Pz 62.4 (16)_2 (B)	Flx_Pz 62.8 (15)_1 (C)
	
	
	

Para la Pizarra Mala, se puede observar un ejemplo de resultados en la Tabla 5.5, siendo la primera columna el ensayo Flx_Pz 57.1 (16)_1, según la orientación B y la



segunda columna Flx_Pz 57.5 (17)_2, que pertenece a la orientación C.

Tabla 5.5.- Ejemplo de roturas en las muestras de Pz 57

Pz 57	
Flx_Pz 57.1 (16)_1 (B)	Flx_Pz 57.5 (17)_2 (C)
	
	
	

La disposición de las fotografías ha sido la misma que la explicada para la Pizarra Buena. Se vuelve a observar que para la muestra de la orientación B su grieta es



más pronunciada respecto a la muestra perteneciente a la orientación C, con la diferencia que en estas últimas sí se suele apreciar la grieta de modo ligeramente evidente a lo largo de la superficie de apoyo, no solo en ambos espesores.

Finalmente se ha realizado un estudio con diagramas múltiple de cajas para las dos variables estudiadas, resistencia a flexión y módulo elástico, tanto para la Pizarra Buena como para la Pizarra Mala. Estos gráficos son muy útiles para analizar y comparar simultáneamente varios conjuntos de datos, pues permiten ver cómo están distribuidos los datos de una variable. El significado de cada una de las cajas se puede visualizar en la Figura 5.7:

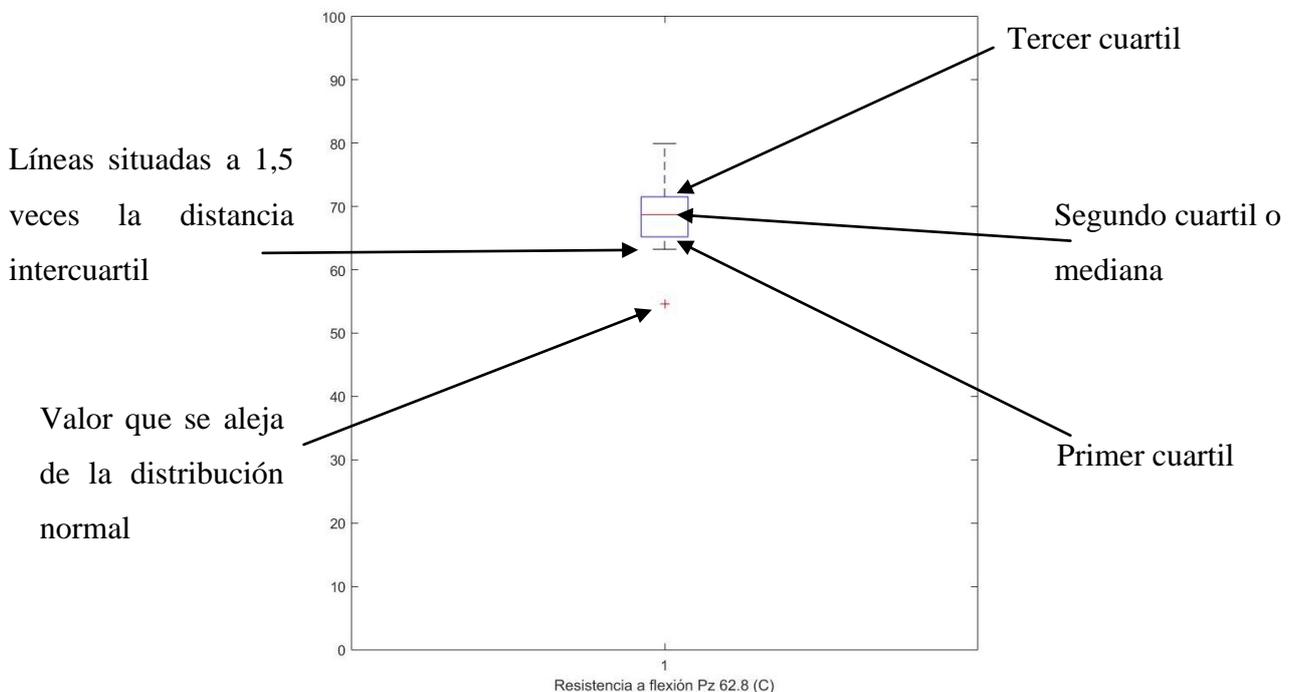


Figura 5.7.- Ejemplo de un diagrama de cajas

Cada rectángulo está orientado con el sistema de coordenadas tal que el eje vertical tiene la misma escala del conjunto de datos. Esta caja representa el 50% de los datos que están ubicados en la parte central de la distribución. La parte superior y la inferior del rectángulo coinciden con el tercer y primer cuartil de los datos. La caja queda dividida por una línea horizontal a nivel de la media. Se define un “paso” como 1,5 veces el rango intercuartil, y una línea vertical (llamado bigote) se extiende desde la mitad de la parte superior de la caja hasta la mayor observación de los datos si se encuentran dentro de un paso. Las observaciones que se encuentren más allá de dichas



líneas se dibujan individualmente, siendo valores alejados de la distribución. En el ejemplo propuesto de la muestra Flx_ Pz 62.8 presenta un valor atípico. Por tanto, de un modo rápido se puede ver cómo de dispersos están los datos así como los valores medios.

Para la Pizarra Buena se muestra en la Figura 5.8 (izquierda) el diagrama de cajas correspondiente a la resistencia de flexión, pudiendo observarse que las muestras Pz 62.4 pertenecientes a la orientación B tienen mayor dispersión frente a las muestras de Pz 62.8 con orientación C, ya que la distancia entre las líneas que están situadas a 1,5 veces la distancia intercuartil, es la máxima, aunque en éstas últimas existe un valor anómalo.

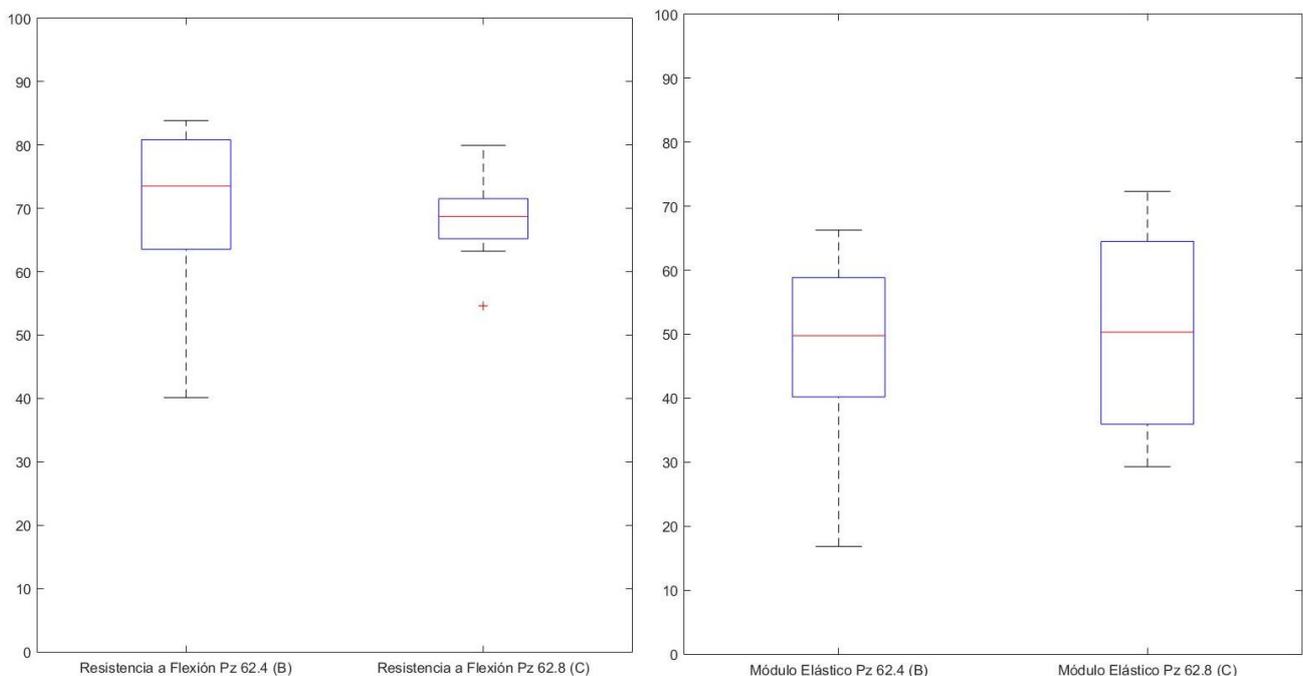


Figura 5.8.- Diagramas de cajas: Resistencia a flexión (izquierda) y Módulo elástico (derecha) para Pz 62

Respecto al módulo elástico, representado en la Figura 5.8 (derecha), se puede observar que las muestras Pz 62.4 pertenecientes a la orientación B, vuelven a tener mayor distancia entre ellas comparadas con las muestras Pz 62.8 con orientación C.

Destaca que el valor de la mediana tanto en la Resistencia a flexión como en el Módulo elástico es ligeramente mayor para la orientación B que para la C.



El diagrama de cajas para la Pizarra Mala, referido a la Resistencia a flexión y al Módulo elástico, se muestra en la Figura 5.9:

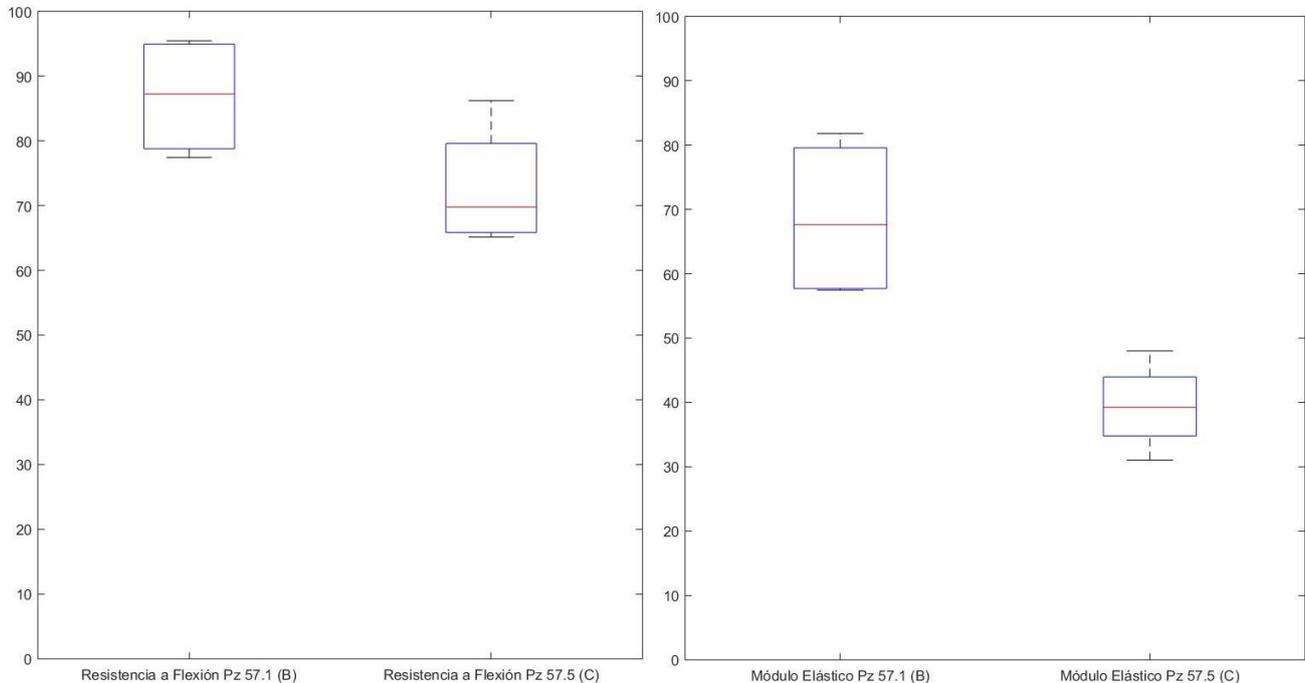


Figura 5.9.- Diagramas de cajas: Resistencia a flexión (izquierda) y Módulo elástico (derecha) para Pz 57

En el caso de la Pizarra Mala (Pz 57) se observa que la dispersión de datos en cuanto a la resistencia a flexión y el Módulo elástico fueron menores que para la Pizarra Buena (Pz 62). Pero fundamentalmente destaca la gran variación que existe entre ambas orientaciones, siendo los valores dentro de la Resistencia a flexión y del Módulo elástico mayores según B que según C, algo que se intuía en las Pizarras Buenas pero que en las Pizarras Malas es más evidente.

Por tanto, el hecho de que la orientación B en una y otra pizarra presente mayor valor de Resistencia a flexión y sobre todo de Módulo elástico, está directamente relacionado con el comportamiento del material en una y otra orientación. Un mayor valor de Módulo elástico indica un comportamiento más rígido del material en dicha orientación, y que podría ser la justificación del modo de rotura visto experimentalmente.



6 CONCLUSIONES

El presente Trabajo Fin de Máster ha consistido en la realización de ensayos mediante técnicas destructivas y no destructivas para la caracterización en pizarra en función de la anisotropía. Se han realizado tres modalidades de ensayo, siendo el ensayo de ultrasonidos, un ensayo normalizado y no destructivo, el ensayo de exfoliación, un ensayo no normalizado y destructivo, y finalmente el ensayo de flexión, un ensayo normalizado y destructivo.

Los ensayos se han realizado con dos bloques de distinto tipo de pizarra en función de su calidad, las cuales se han denominad como Pizarra Buena y Pizarra Mala, entendiendo por calidad el aprovechamiento posterior que se puede hacer de las mismas desde el punto de vista de su comercialización.

En los ensayos de ultrasonidos se han realizado varias medidas respecto a sus dimensiones, es decir, referidas a su longitud, ancho y espesor. Se obtuvo que la Velocidad de impulso es mayor cuando se realiza el ensayo respecto a la longitud que en las otras dos dimensiones, apreciándose una ligera diferencia entre las medidas de la longitud y el ancho a pesar de ser ambas paralelas al plano de foliación. Las medidas respecto al espesor se obtienen valores muy bajos respecto a los demás. Estas tendencias se aprecian mejor en la Pizarra Mala que en la Pizarra Buena.

En dicho ensayo se ha estudiado el Índice de anisotropía de la pizarra a través de las Velocidades de impulso, siguiendo el modelo de Pernia *et. al* (1986), donde se pudo observar que la Pizarra Mala es más anisótropa que la Pizarra Buena. Esto puede ser debido a que la Pizarra Mala presenta una veta a lo largo de la muestra, sus crenulaciones están más marcadas y contiene mayores cantidades de sulfuros de pirita.

En los ensayos de exfoliación de pizarras se ha utilizado un cincel, con características similares a los utilizados en la industria, colocado en una Prensa de accionamiento manual provocando dicha exfoliación de la pizarra ensayada. Este método reproduce el procedimiento empleado en el labrado industrial de pizarra, diferenciándose en que en este tipo de exfoliados el operario golpea al cincel con una maza de manera totalmente manual.



En este ensayo se hace incidir el cincel en la mitad de la muestra, obteniendo un registro continuo del tiempo, fuerza y desplazamiento. Los ensayos se han realizado según las dos posibles orientaciones paralelas a los planos de foliación (denominadas B y C), y considerando además la direccionalidad para cada orientación (nombradas como I o II). Es decir, se tendrán dos direcciones (I y II) para cada orientación B y C).

Cualitativamente, se puede apreciar que la exfoliación puede verse afectada según la orientación, obteniendo buenos resultados tanto en la orientación B como C para Pizarra Buena y en la orientación B para la Pizarra Mala.

Dentro de este ensayo se han realizado tres estudios: Fuerza máxima – área de fricción (fuerza máxima empleada para que la grieta propague en la muestra respecto a su área basal), Desplazamiento a la fuerza máxima – área de fricción (representa la penetración del cincel dentro de la muestra hasta el momento que se obtiene la fuerza máxima del ensayo respecto a su área basal) y Energía de crushing – área de fricción (representa el trabajo utilizado para llegar al instante en que la grieta empieza a propagarse en la muestra respecto a su área basal). En todos los estudios se ha podido apreciar que para las muestras de mayores dimensiones los máximos valores estudiados corresponden a la orientación B, aunque la diferencia de resultados entre ambas direcciones disminuye con las muestras de menores dimensiones. Esta orientación B, a su vez, equivale a las medidas de ultrasonidos realizadas en la longitud de la muestra, donde la velocidad obtenida era mayor a cualquier otra orientación. Estos resultados en el ensayo de exfoliación se han apreciado mejor en el estudio de Energía de crushing – área de fricción.

Por último, en el ensayo de flexión bajo carga concentrada, se ha realizado con la Prensa de accionamiento manual, que consiste en aplicar una fuerza en la mitad de la muestra, respecto a su longitud, mediante un rodillo superior y ésta apoyada en dos rodillos inferiores. Se observa que hay una correlación positiva entre el Módulo elástico y la Resistencia a flexión para ambas pizarras. Cualitativamente se ha podido observar que según la orientación B, la grieta es más significativa, además de producir un sonido más fuerte a la hora de ensayar la muestra que según la orientación C. Los datos de Resistencia a flexión y Módulo elástico se han representado mediante el diagrama de cajas, donde se ha observado que aunque la orientación B tiene mayor dispersión en sus



valores, de nuevo el valor de la mediana de ambos parámetros es mayor en la orientación B que en la orientación C, siendo una ligera diferencia en la Pizarra Buena y más marcada en la Pizarra Mala.

En conclusión, se ha apreciado la variación del comportamiento de la pizarra según sus dos orientaciones perpendiculares a los planos de foliación, pudiendo apreciarse esta diferencia más marcada en la Pizarra Mala que en la Pizarra Buena. Las diferencias se han comprobado tanto cualitativamente como cuantitativamente. Finalmente, se ha llegado a la conclusión que la orientación B, opone más resistencia que la orientación C, por lo que a falta de más ensayos que caractericen el comportamiento de la pizarra en ambas orientaciones (y que forman parte de futuras líneas de investigación), estos resultados preliminares podrían ayudar a optimizar el proceso.



7 BIBLIOGRAFÍA

Fernando García Bastante. La industria de la pizarra en España. [En línea] [Citado el: 25 de Mayo de 2016.] <http://bastante.webs.uvigo.es/PDF/INDUSTRIA.pdf>.

Luis I. González de Vallejo. 2002. *Ingeniería Geológica.* Madrid : Prentice Hall, 2002.

UNE - EN 12326 - 1. 2015. *Productos de pizarra y piedra natural para tejados inclinados y revestimiento. Parte 1: Especificaciones para pizarras y pizarras carbonatadas.* Madrid : AENOR, 2015.

Analysis of the methodology of the petrographic examination test (European Santandard EN 12326-2) and the relation between petrography and modulus of rupture for Spanish roofing slates. **F. Gómez-Fernández, A. M. Castañón, C. R. Ward. 2012.** León and Sydney : Elsevier, 2012.

ASTM D 2845 - 00. 2000. *Standard Test Method for Laboratory Determination of Pulse Velocities and Ultrasonic Elastic Constants of Rock.* West Conshohocken : ASTM International, 2000.

CAFERSA. Cafersa. [En línea] [Citado el: 3 de Junio de 2016.] <http://www.cafersa.com/>.

Caracterización del comportamiento elástico de materiales pizarrosos del Sinclinal de Truchas mediante ultrasonidos. **M. A. Rodríguez Sastre y L.Calleja. 2004.** Oviedo : s.n., 2004.

Cluster da pizarra de Galicia. [En línea] [Citado el: 16 de Mayo de 2016.] <http://clusterdapizarra.com/index.php/proceso-productivo-de-la-pizarra>.

Controls. *Equipo de ultrasonidos 58-E0048.* s.l. : Manual de Controls instrucciones.

Ensayos destructivos y no destructivos (ultrasonidos) en la determinación de calidad de rocas ornamentales: aplicación a dolomías brechoides. **J. Martínez - Martínez, D. Benavente, M. A. Rodríguez y M. A. García del Cura. 2004.** Alicante y Madrid : GEOGACETA, 2004.



Evaluación de la fisibilidad y durabilidad de pizarras de techar mediante microscopía óptica y SEM. F. Gómez-Fernández, M. A. Castaño, B. Bauluz y C. R. Ward. 2009. 296, s.l. : Materiales de Construcción, 2009, Vol. 59.

K. Goshtasbi, M. Ahmadi and J. Seyedi. 2006. Anisotropic strength behaviour of slates in the Sirjan-Sanandaj zone. *The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy.* 2006, Vol. 106.

Mineralogía y microestructura de la pizarra de techar: comportamiento termoóptico y fisibilidad. J. García-Guineam ; M. Lombardero, B. Roberts, J. Taboada y A. Peto. 1998. 251, Madrid, Londres, Oviedo y Budapest : Materiales de construcción, 1998, Vol. 48.

Mineralogy and modulus of rupture of roofing slate: Applications in the prospection and quarrying of slate deposits. V. Cárdenes, A. Rubio-Ordóñez, A. López-Munguira, R. De la Horra, C. Monterroso, R. Paradelo, L. Calleja. 2010. Oviedo, Badajoz, Madrid and Santiago de Compostela : Elsevier, 2010.

Petrografía y mineralogía de las pizarras para cubiertas de la Península Ibética en relación con su calidad. V. Cárdenes, A. Rubio Ordóñez, A. López Munguira y C. Monterroso. 2010. Oviedo, Badajoz y Santiago de Compostela : s.n., 2010.

PIZARRA, INTEC. Proceso de elaboración - INTEC PIZARRA. [En línea] [Citado el: 14 de Mayo de 2016.] <http://www.fgulem.es/pizarra/proceso.htm>.

Pizarras de techar. Cárdenes Van den Eynde, V., Pais Diz, V. García Guinea, K. y Gómez Fernández, F. Orense, Madrid y León : s.n.

Pizarras del Carmen. [En línea] [Citado el: Mayo de 26 de 2016.] <http://www.pizarrasdelcarmen.com/extraccion.asp>.

Slate flexural and anchorage strength considerations in cladding design. Vera Pires, P. M. Amral, L. G. Rosa, R. S. Camposinhos. 2011. Lisboa and Porto : ELSEEVIER, 2011.

UNE - EN 12326 - 2. 2012. *Productos de pizarra y piedra natural para tejados inclinados y revestimiento. Parte 2: Métodos de ensayo para pizarras y pizarras carbonatadas.* Madrid : AENOR, 2012.



UNE - EN 12372. 2007. *Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la resistencia a la flexión bajo carga concentrada.* Madrid : AENOR, 2007.

UNE - EN 12504 - 4. 2006. *Ensayos de hormigón en estructuras. Parte 4: Determinación de la velocidad de los impulsos ultrasónicos.* Madrid : AENOR, 2006.

UNE EN - ISO 16810. 2014. *Ensayos no destructivos. Ensayos por ultrasonidos. Principios generales.* Madrid : AENOR, 2014.

ANEXOS



ÍNDICE

ANEXOS

ANEXO I: TABLAS DE RESULTADOS

MUESTRAS PIZARRA BUENA

MUESTRAS PIZARRA MALA

ANEXO II: REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LAS CURVAS FUERZA Y DESPLAZAMIENTO

MUESTRAS PIZARRA BUENA

MUESTRAS PIZARRA MALA



ANEXO I: TABLAS DE RESULTADOS



MUESTRAS PIZARRA BUENA



Pz 62.1													
Según B (I)	MUESTRA	ANCHO (mm)	LONGITUD (mm)	ESPESOR (mm)	A. FRICCIÓN (cm ²)	F _{MÁX} (kp)	DESPL. F _{MÁX} (mm)	F _{ROT} (kp)	DESPL. Frot (mm)	E _{CRUSHING} (J)	E _{EXFOLIACIÓN} (J)	E _{TOTAL} (J)	EXFOLIACIÓN
	Pz 62.1 (1)	33,000	170,000	131,000	43,230	232,967	1,080	190,377	1,136	0,861	0,121	0,982	Bien
	Pz 62.1 (2)	33,000	170,000	65,000	21,450	180,888	0,624	9,435	1,777	0,434	0,427	0,862	Regular
	Pz 62.1 (3)	33,000	170,000	66,000	21,780	215,971	0,732	111,392	0,878	0,516	0,220	0,736	Bien
	Pz 62.1 (4)	33,000	170,000	31,800	10,494	162,867	0,664	48,251	0,957	0,389	0,258	0,647	Bien
	Pz 62.1 (5)	33,000	170,000	35,100	11,583	140,684	0,587	69,247	0,988	0,399	0,342	0,741	Regular
	Pz 62.1 (6)	33,000	170,000	33,300	10,989	73,045	0,458	4,169	3,210	0,156	0,592	0,748	Bien
	Pz 62.1 (7)	33,000	170,000	34,300	11,319	216,980	0,456	54,646	0,679	0,431	0,209	0,640	Bien
	Pz 62.1 (8)	33,000	170,000	17,700	5,841	101,537	0,354	11,837	1,713	0,151	0,378	0,530	Bien
	Pz 62.1 (9)	33,000	170,000	15,400	5,082	106,407	0,407	9,745	2,194	0,190	0,432	0,621	Bien
	Pz 62.1 (10)	33,000	170,000	15,600	5,148	94,186	0,335	29,426	1,592	0,152	0,533	0,685	Bien
	Pz 62.1 (11)	33,000	170,000	9,500	3,135	92,826	0,391						Mal-Cuña
	Pz 62.1 (12)	33,000	170,000	15,900	5,247	107,939	0,303	12,999	1,817	0,164	0,434	0,597	Bien
	Pz 62.1 (13)	33,000	170,000	17,000	5,610	96,487	0,369	19,079	1,788	0,202	0,593	0,795	Regular
	Pz 62.1 (14)	33,000	170,000	17,300	5,709	77,933	0,314	13,068	1,627	0,130	0,398	0,528	Bien
	Pz 62.1 (15)	33,000	170,000	8,400	2,772	46,734	0,444	1,661	15,865	0,090	0,689	0,778	Bien
	Pz 62.1 (16)	33,000	170,000	8,200	2,706	50,699	0,555			0,103	0,397	0,500	Bien
	Pz 62.1 (17)	33,000	170,000	8,100	2,673	43,850	0,417	1,685	22,031	0,082	0,310	0,392	Bien
	Pz 62.1 (18)	33,000	170,000	8,700	2,871	69,281	0,332						Mal-Cuña
	Pz 62.1 (19)	33,000	170,000	8,600	2,838	80,096	0,489	1,723	15,566	0,104	0,564	0,668	Bien
Pz 62.1 (20)	33,000	170,000	8,000	2,640	52,005	0,400	2,005	5,805	0,095	0,333	0,428	Bien-Regular	



Pz 62.4													
Según B (II)	MUESTRA	ANCHO (mm)	LONGITUD (mm)	ESPESOR (mm)	A. FRICCIÓN (cm ²)	F _{MÁX} (kp)	DESPL. F _{MÁX} (mm)	F _{ROT} (kp)	DESPL. Frot (mm)	E _{CRUSHING} (J)	E _{EXFOLIACIÓN} (J)	E _{TOTAL} (J)	EXFOLIACIÓN
	Pz 62.4 (1)	33,000	171,000	131,000	43,230	311,334	0,692	284,527	0,757	0,948	0,195	1,143	Bien
	Pz 62.4 (2)	33,000	171,000	65,900	21,747	272,468	0,650	165,590	0,738	0,736	0,194	0,929	Bien
	Pz 62.4 (3)	33,000	171,000	67,000	22,110	227,932	0,510	115,376	0,637	0,561	0,238	0,799	Bien
	Pz 62.4 (4)	33,000	171,000	32,200	10,626	195,891	0,528	51,986	0,766	0,378	0,217	0,595	Bien
	Pz 62.4 (5)	33,000	171,000	33,700	11,121	128,157	0,386	13,540	0,762	0,187	0,284	0,471	Bien
	Pz 62.4 (6)	33,000	171,000	33,100	10,923	99,315	0,318	9,761	1,493	0,142	0,440	0,582	Bien
	Pz 62.4 (7)	33,000	171,000	34,100	11,253	162,399	0,461	5,454	2,209	0,265	0,384	0,649	Regular
	Pz 62.4 (8)	33,000	171,000	17,000	5,610	83,262	0,343	12,670	1,922	0,125	0,550	0,675	Bien
	Pz 62.4 (9)	33,000	171,000	15,700	5,181	71,319	0,307	11,250	1,714	0,113	0,443	0,555	Bien
	Pz 62.4 (10)	33,000	171,000	16,300	5,379	78,471	0,309	11,580	2,296	0,117	0,545	0,661	Bien
	Pz 62.4 (11)	33,000	171,000	17,300	5,709	78,160	0,349	13,817	1,790	0,116	0,481	0,597	Bien
	Pz 62.4 (12)	33,000	171,000	18,200	6,006	81,630	0,297	13,453	2,007	0,120	0,502	0,622	Bien
	Pz 62.4 (13)	33,000	171,000	15,000	4,950	75,148	0,280	9,308	1,699	0,103	0,457	0,560	Bien
	Pz 62.4 (14)	33,000	171,000	13,300	4,389	52,110	0,262	5,791	3,376	0,069	0,485	0,555	Bien
	Pz 62.4 (15)	33,000	170,000	9,600	3,168	63,567	0,454	2,710	8,276	0,111	0,482	0,593	Bien
	Pz 62.4 (16)	33,000	170,000	8,100	2,673	45,859	0,454	1,439	13,448	0,082	0,500	0,582	Bien
	Pz 62.4 (17)	33,000	170,000	9,200	3,036	78,534	0,427	2,344	11,010	0,109	0,583	0,692	Bien
	Pz 62.4 (18)	33,000	170,000	8,800	2,904	65,847	0,385	1,445	18,997	0,094	0,641	0,735	Bien
Pz 62.4 (19)	33,000	170,000	9,200	3,036	82,866	0,367	2,142	12,827	0,104	0,559	0,664	Bien	



Pz 62.8													
Según C (I)	MUESTRA	ANCHO (mm)	LONGITUD (mm)	ESPESOR (mm)	A. FRICCIÓN (cm ²)	F _{MÁX} (kp)	DESPL. F _{MÁX} (mm)	F _{ROT} (kp)	DESPL. Frot (mm)	E _{CRUSHING} (J)	E _{EXFOLIACIÓN} (J)	E _{TOTAL} (J)	EXFOLIACIÓN
	Pz 62.8 (1)	30,000	170,000	131,000	39,300	252,156	0,475	41,895	0,812	0,553	0,286	0,839	Regular
	Pz 62.8 (2)	30,000	170,000	65,800	19,740	242,604	0,485	16,816	0,533	0,492	0,076	0,568	Bien
	Pz 62.8 (3)	30,000	170,000	68,300	20,490	187,857	0,467	40,647	0,748	0,433	0,409	0,842	Bien
	Pz 62.8 (4)	30,000	170,000	34,400	10,320	173,243	0,333	50,805	0,601	0,260	0,214	0,474	Bien
	Pz 62.8 (5)	30,000	170,000	31,600	9,480	148,416	0,312	9,748	1,711	0,191	0,363	0,554	Regular
	Pz 62.8 (6)	30,000	170,000	35,000	10,500	122,266	0,284	5,396	2,153	0,169	0,382	0,550	Regular
	Pz 62.8 (7)	30,000	170,000	33,400	10,020	161,064	0,404	32,334	0,826	0,239	0,368	0,607	Bien
	Pz 62.8 (8)	30,000	170,000	17,500	5,250	68,212	0,348	11,873	1,953	0,104	0,414	0,518	Bien
	Pz 62.8 (9)	30,000	170,000	17,200	5,160	68,299	0,284	11,290	1,629	0,089	0,321	0,410	Bien
	Pz 62.8 (10)	30,000	170,000	15,700	4,710	68,042	0,298	9,518	1,993	0,094	0,405	0,498	Bien
	Pz 62.8 (11)	30,000	170,000	19,000	5,700	62,662	0,326	9,229	1,713	0,104	0,407	0,511	Bien
	Pz 62.8 (12)	30,000	170,000	17,200	5,160	47,614	0,336	3,316	2,494	0,071	0,390	0,462	Bien - Regular
	Pz 62.8 (13)	30,000	170,000	16,200	4,860	63,761	0,303	9,259	1,826	0,092	0,378	0,470	Bien
	Pz 62.8 (14)	30,000	170,000	8,900	2,670	84,578	0,317	1,791	12,546	0,084	0,453	0,537	Bien
	Pz 62.8 (15)	30,000	170,000	8,600	2,580	80,794	0,245	1,143	13,982	0,072	0,456	0,528	Bien
	Pz 62.8 (16)	30,000	170,000	8,800	2,640	80,640	0,364	2,063	10,566	0,098	0,436	0,534	Bien
	Pz 62.8 (17)	30,000	170,000	10,200	3,060	86,953	0,281	2,449	5,759	0,070	0,363	0,433	Bien
Pz 62.8 (18)	30,000	170,000	9,100	2,730	78,482	0,240	1,764	9,539	0,067	0,394	0,461	Bien-Regular	



Pz 62.6													
Según C (II)	MUESTRA	ANCHO (mm)	LONGITUD (mm)	ESPESOR (mm)	A. FRICCIÓN (cm ²)	F _{MÁX} (kp)	DESPL. F _{MÁX} (mm)	F _{ROT} (kp)	DESPL. Frot (mm)	E _{CRUSHING} (J)	E _{EXFOLIACIÓN} (J)	E _{TOTAL} (J)	EXFOLIACIÓN
	Pz 62.6 (1)	29,000	170,000	130,000	37,700	239,309	0,475	3,789	2,718	0,511	0,666	1,178	Regular
	Pz 62.6 (2)	29,000	170,000	63,900	18,531	168,164	0,387	13,743	0,711	0,240	0,260	0,500	Bien
	Pz 62.6 (3)	29,000	170,000	70,000	20,300	206,316	0,469	10,223	0,882	0,420	0,310	0,729	Bien
	Pz 62.6 (4)	29,000	170,000	36,100	10,469	163,907	0,420	12,842	1,666	0,360	0,591	0,951	Regular
	Pz 62.6 (5)	29,000	170,000	28,000	8,120	157,573	0,372	23,526	0,931	0,241	0,269	0,510	Bien
	Pz 62.6 (6)	29,000	170,000	37,700	10,933	195,101	0,382	24,299	0,696	0,325	0,221	0,546	Bien
	Pz 62.6 (7)	29,000	170,000	31,800	9,222	109,892	0,316	5,562	1,007	0,147	0,373	0,520	Regular
	Pz 62.6 (8)	29,000	170,000	20,300	5,887	99,960	0,508	18,677	1,603	0,226	0,492	0,718	Bien
	Pz 62.6 (9)	29,000	170,000	14,700	4,263	74,960	0,501	6,957	2,717	0,166	0,607	0,773	Bien
	Pz 62.6 (10)	29,000	170,000	21,300	6,177	87,982	0,507	17,969	1,713	0,206	0,413	0,619	Bien
	Pz 62.6 (11)	29,000	170,000	16,600	4,814	37,770	0,350	0,659	7,911	0,062	0,407	0,469	Regular
	Pz 62.6 (12)	29,000	170,000	13,300	3,857	58,805	0,388	0,708	3,111	0,107	0,351	0,459	Regular
	Pz 62.6 (13)	29,000	170,000	16,900	4,901	30,915	0,477	9,014	1,932	0,085	0,216	0,301	Bien
	Pz 62.6 (14)	29,000	170,000	8,700	2,523	70,118	0,350	2,071	17,607	0,095	0,725	0,821	Bien
	Pz 62.6 (15)	29,000	170,000	11,600	3,364	48,325	0,559	3,628	8,770	0,110	0,514	0,624	Bien
	Pz 62.6 (16)	29,000	170,000	9,500	2,755	108,294	0,318	2,629	13,217	0,129	0,618	0,748	Bien
	Pz 62.6 (17)	29,000	170,000	10,900	3,161	40,995	0,505						Mal-Cuña
Pz 62.6 (18)	29,000	170,000	10,000	2,900	38,858	0,487	2,134	7,923	0,077	0,396	0,474	Bien	



MUESTRAS PIZARRA MALA



Pz 57.1

Según B (I)	MUESTRA	ANCHO (mm)	LONGITUD (mm)	ESPESOR (mm)	A. FRICCIÓN (cm ²)	F _{MÁX} (kp)	DESPL. F _{MÁX} (mm)	F _{ROT} (kp)	DESPL. Frot(mm)	E _{CRUSHING} (J)	E _{EXFOLIACIÓN} (J)	E-TOTAL (J)	EXFOLIACIÓN
	Pz 57.1 (1)	30,500	170,000	158,000	48,190	238,366	0,693	243,101	0,691	0,767	0,089	0,856	Bien
	Pz 57.1 (2)	30,500	170,000	85,400	26,047	209,744	0,589	184,245	0,667	0,506	0,310	0,817	Bien
	Pz 57.1 (3)	30,500	170,000	77,000	23,485	223,100	0,533	57,378	1,111	0,498	0,477	0,975	Bien
	Pz 57.1 (4)	30,500	170,000	45,800	13,969	139,271	0,546	69,484	0,823	0,351	0,289	0,640	Bien
	Pz 57.1 (5)	30,500	170,000	38,700	11,804	126,990	0,384	63,129	0,708	0,219	0,277	0,496	Bien
	Pz 57.1 (6)	30,500	170,000	36,500	11,133	149,627	0,516	69,734	0,948	0,353	0,403	0,757	Bien
	Pz 57.1 (7)	30,500	170,000	40,200	12,261	58,085	0,399	17,757	1,210	0,104	0,335	0,439	Regular
	Pz 57.1 (8)	30,500	170,000	23,500	7,168	93,728	0,917	23,114	1,937	0,610	0,471	1,081	Bien
	Pz 57.1 (9)	30,500	170,000	22,400	6,832	76,784	0,333	11,557	1,856	0,130	0,560	0,690	Bien
	Pz 57.1 (10)	30,500	170,000	18,800	5,734	83,742	0,344	16,799	1,671	0,141	0,499	0,639	Bien
	Pz 57.1 (11)	30,500	170,000	19,900	6,070	73,989	0,347	17,243	1,434	0,126	0,416	0,542	Bien
	Pz 57.1 (12)	30,500	170,000	19,100	5,826	78,686	0,328	15,038	1,491	0,119	0,389	0,508	Bien
	Pz 57.1 (13)	30,500	170,000	16,800	5,124	82,149	0,350	7,579	2,116	0,141	0,452	0,592	Bien
Pz 57.1 (14)	30,500	170,000	21,400	6,527	82,062	0,322	21,186	1,117	0,134	0,317	0,451	Bien	
Pz 57.1 (15)	30,500	170,000	10,600	3,233	86,757	0,380	3,504	4,321	0,104	0,341	0,445	Bien	
Pz 57.1 (16)	30,500	170,000	10,100	3,081	71,339	0,397	2,068	10,684	0,102	0,522	0,624	Bien	
Pz 57.1 (17)	30,500	170,000	10,200	3,111	70,419	0,358	3,025	7,468	0,102	0,518	0,620	Bien	
Pz57.1 (18)	30,500	170,000	11,300	3,447	67,201	0,335	3,157	6,801	0,096	0,514	0,610	Bien	
Pz 57.1 (19)	30,500	170,000	11,500	3,508	64,469	0,343	3,699	2,857	0,079	0,286	0,365	Bien	



Pz 57.4

MUESTRA	ANCHO (mm)	LONGITUD (mm)	ESPESO R (mm)	A. FRICCIÓN (cm ²)	F _{MÁX} (kp)	DESPL. F _{MÁX} (mm)	F _{ROT} (kp)	DESPL. Frot(mm)	E _{CRUSHING} (J)	E _{EXFOLIACIÓN} (J)	E _{TOTAL} (J)	EXFOLIACIÓN
Pz 57.4 (1)	33,000	170,000	159,000	52,470	453,306	1,095	453,179	1,108	2,800	0,058	2,858	Bien
Pz 57.4 (2)	33,000	170,000	82,800	27,324	125,942	0,383	48,769	1,182	0,221	0,590	0,811	Regular-Mal
Pz 57.4 (3)	33,000	170,000	78,200	25,806	264,061	0,523	42,347	1,106	0,642	0,554	1,196	Bien
Pz 57.4 (4)	33,000	170,000	30,000	9,900	133,260	0,361	54,018	0,828	0,212	0,447	0,659	Bien
Pz 57.4 (5)	33,000	170,000	53,600	17,688	252,467	0,540	138,253	0,716	0,554	0,302	0,856	Bien
Pz 57.4 (6)	33,000	170,000	40,200	13,266	244,653	0,506	107,905	0,657	0,530	0,234	0,764	Bien
Pz 57.4 (7)	33,000	170,000	38,200	12,606	167,292	0,428	42,436	0,951	0,310	0,506	0,816	Bien
Pz 57.4 (8)	33,000	170,000	14,400	4,752	83,003	0,293						Mal - Cuña
Pz 57.4 (9)	33,000	170,000	15,600	5,148	80,734	0,310	13,062	1,745	0,129	0,427	0,557	Bien
Pz 57.4 (10)	33,000	170,000	36,500	12,045	199,238	0,418	61,419	1,101	0,360	0,698	1,058	Bien
Pz 57.4 (11)	33,000	170,000	28,000	9,240	97,126	0,322	15,288	1,657	0,135	0,437	0,572	Bien
Pz 57.4 (12)	33,000	170,000	19,600	6,468	144,158	0,386	22,113	1,289	0,254	0,385	0,638	Bien
Pz 57.4 (13)	33,000	170,000	21,600	7,128	145,853	0,358	22,424	1,072	0,240	0,327	0,567	Bien
Pz 57.4 (14)	33,000	170,000	19,400	6,402	60,300	0,315	1,708	1,445	0,104	0,130	0,234	Bien
Pz 57.4 (15)	33,000	170,000	19,800	6,534	134,324	0,517	24,250	1,449	0,247	0,527	0,774	Bien
Pz 57.4 (16)	33,000	170,000	10,500	3,465	59,308	0,502	2,164	12,093	0,121	0,699	0,820	Bien
Pz 57.4 (17)	33,000	170,000	11,900	3,927	61,570	0,497	4,516	6,598	0,143	0,616	0,759	Bien
Pz 57.4 (18)	33,000	170,000	10,000	3,300	46,729	0,424	2,588	10,545	0,091	0,650	0,741	Bien
Pz57.4 (19)	33,000	170,000	10,800	3,564	61,796	0,537	3,473	8,274	0,130	0,614	0,745	Bien
Pz 57.4 (20)	33,000	170,000	11,500	3,795	96,157	0,496	3,410	3,644	0,163	0,347	0,510	Bien

Según B (II)



Pz 57.5

Según C (I)	MUESTRA	ANCHO (mm)	LONGITUD (mm)	ESPESOR (mm)	A. FRICCIÓN (cm ²)	F _{MÁX} (kp)	DESPL. F _{MÁX} (mm)	F _{ROT} (kp)	DESPL. Frot(mm)	E _{CRUSHING} (J)	E _{EXFOLIACIÓN} (J)	E _{TOTAL} (J)	EXFOLIACIÓN
	Pz 57.5 (1)	33,500	170,000	157,000	52,595	266,562	0,602	28,351	1,273	0,749	0,877	1,625	Bien
	Pz 57.5 (2)	33,500	170,000	78,300	26,231	80,068	0,563	11,475	1,277	0,296	0,229	0,525	Regular
	Pz 57.5 (3)	33,500	170,000	82,400	27,604	232,738	0,650	11,407	1,690	0,748	0,802	1,550	Bien
	Pz 57.5 (4)	33,500	170,000	27,200	9,112	117,010	0,538	47,431	1,019	0,330	0,333	0,663	Bien
	Pz 57.5 (5)	33,500	170,000	48,600	16,281	100,914	1,025	76,269	1,278	0,557	0,226	0,782	Regular
	Pz 57.5 (6)	33,500	170,000	39,900	13,367	108,090	0,459	39,224	1,414	0,259	0,631	0,890	Bien
	Pz 57.5 (7)	33,500	170,000	43,100	14,439	160,732	0,449	78,974	0,794	0,361	0,377	0,739	Bien
	Pz 57.5 (8)	33,500	170,000	11,700	3,920	101,408	0,531						Mal-Cuña
	Pz 57.5 (9)	33,500	170,000	15,500	5,193	80,930	0,445	9,444	2,771	0,222	0,498	0,720	Bien
	Pz 57.5 (10)	33,500	170,000	23,900	8,007	114,575	0,369						Mal-Cuña
	Pz 57.5 (11)	33,500	170,000	25,700	8,610	74,419	0,640	3,729	2,580	0,327	0,353	0,680	Bien
	Pz 57.5 (12)	33,500	170,000	18,600	6,231	117,037	0,523	12,386	1,512	0,325	0,357	0,682	Bien
	Pz 57.5 (13)	33,500	170,000	21,300	7,136	116,324	0,501	21,221	1,577	0,356	0,595	0,951	Bien
	Pz 57.5 (14)	33,500	170,000	22,100	7,404	92,573	0,274	18,879	1,435	0,126	0,475	0,601	Bien
	Pz 57.5 (15)	33,500	170,000	11,300	3,786	63,501	0,528	6,037	6,975	0,160	0,658	0,818	Bien
	Pz 57.5 (16)	33,500	170,000	11,600	3,886	90,323	0,501						Mal-Cuña
	Pz 57.5 (17)	33,500	170,000	12,100	4,054	78,566	0,442	5,829	3,683	0,156	0,469	0,625	Bien
	Pz57.5 (18)	33,500	170,000	9,500	3,183	57,717	0,447						Mal-Cuña
Pz 57.5 (19)	33,500	170,000	12,700	4,255	74,744	0,417	3,316	5,271	0,145	0,497	0,643	Bien	



Pz 57.6													
MUESTRA	ANCHO (mm)	LONGITUD (mm)	ESPESOR (mm)	A. FRICCIÓN (cm ²)	F _{MÁX} (kp)	DESPL. F _{MÁX} (mm)	F _{ROT} (kp)	DESPL. Frot(mm)	E _{CRUSHING} (J)	E _{EXFOLIACIÓN} (J)	E _{TOTAL} (J)	EXFOLIACIÓN	
Pz 57.6 (1)	30,000	170,000	125,000	37,500	244,942	0,548	177,991	0,684	0,698	0,289	0,988	Bien	
Pz 57.6 (2)	30,000	170,000	62,600	18,780	187,249	0,670	29,414	1,114	0,493	0,500	0,992	Regular	
Pz 57.6 (3)	30,000	170,000	64,400	19,320	180,127	0,441	11,972	2,161	0,383	0,670	1,053	Regular	
Pz 57.6 (4)	30,000	170,000	39,900	11,970	123,971	0,384	57,302	0,813	0,207	0,399	0,606	Bien	
Pz 57.6 (5)	30,000	170,000	22,900	6,870	133,106	0,324	22,672	1,167	0,205	0,453	0,658	Bien	
Pz 57.6 (6)	30,000	170,000	39,000	11,700	122,802	0,380	33,715	2,148	0,213	1,257	1,470	Regular	
Pz 57.6 (7)	30,000	170,000	26,300	7,890	164,550	0,497						Mal-Cuña	
Pz 57.6 (8)	30,000	170,000	17,600	5,280	89,622	0,374	13,530	1,888	0,161	0,440	0,601	Bien	
Pz 57.6 (9)	30,000	170,000	22,300	6,690	89,137	0,378	6,574	2,509	0,183	0,501	0,684	Bien-Regular	
Pz 57.6 (10)	30,000	170,000	12,400	3,720	85,501	0,322						Mal-Cuña	
Pz 57.6 (11)	30,000	170,000	10,900	3,270	85,802	0,381	3,312	10,467	0,129	0,722	0,851	Bien	
Pz 57.6 (12)	30,000	170,000	13,300	3,990	90,601	0,330						Mal-Cuña	
Pz 57.6 (13)	30,000	170,000	26,200	7,860	58,592	0,323						Mal-Cuña	
Pz 57.6 (14)	30,000	170,000	26,400	7,920	139,032	0,470						Mal-Cuña	
Pz 57.6 (15)	30,000	170,000	9,300	2,790	40,836	0,460						Mal-Cuña	
Pz 57.6 (16)	30,000	170,000	9,300	2,790	47,698	0,433	1,631	19,033	0,079	0,674	0,753	Bien	

Según C (II)



**ANEXO II:
REPRESENTACIÓN GRÁFICA
DE LAS CURVAS FUERZA Y
DESPLAZAMIENTO**

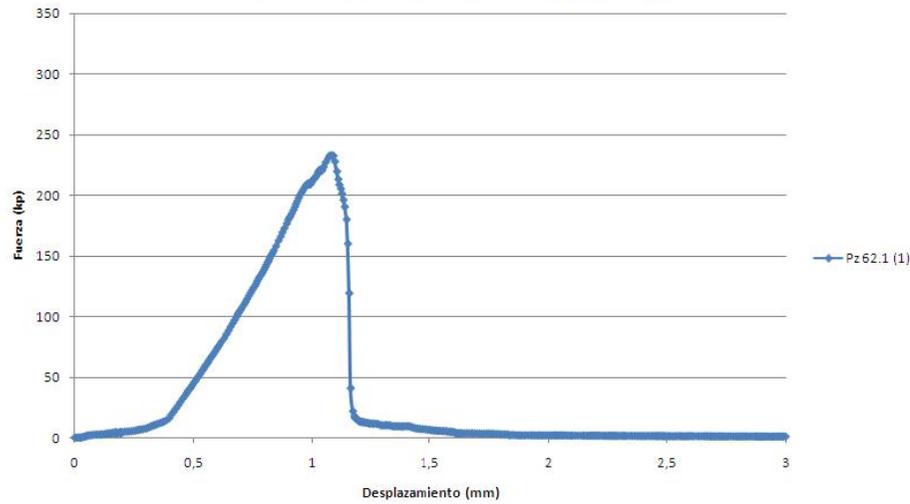


MUESTRAS PIZARRA BUENA

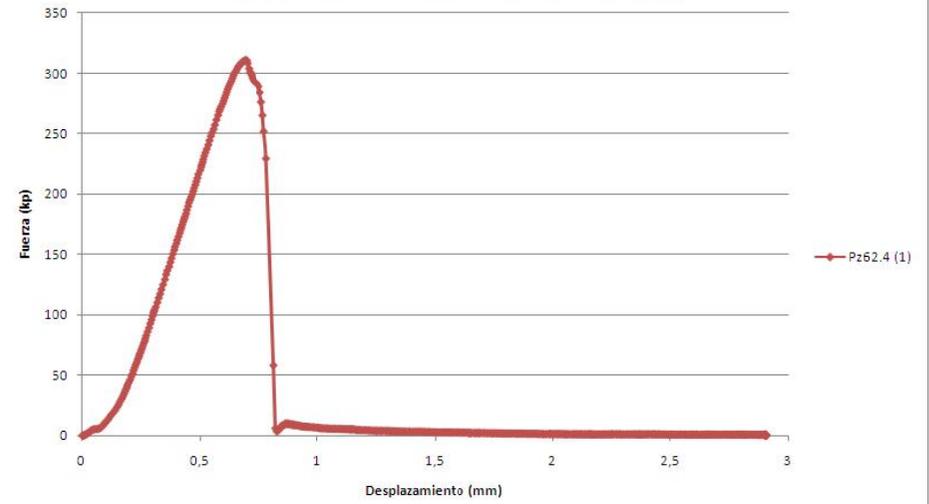


PIZARRAS BUENAS (Pz 62) – ESPESOR 130 mm

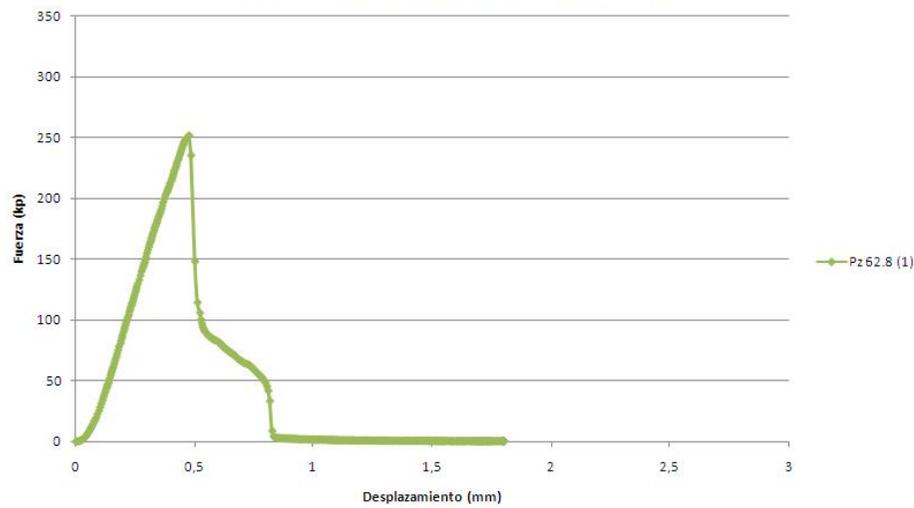
Muestras de 130 mm de espesor - B (I)



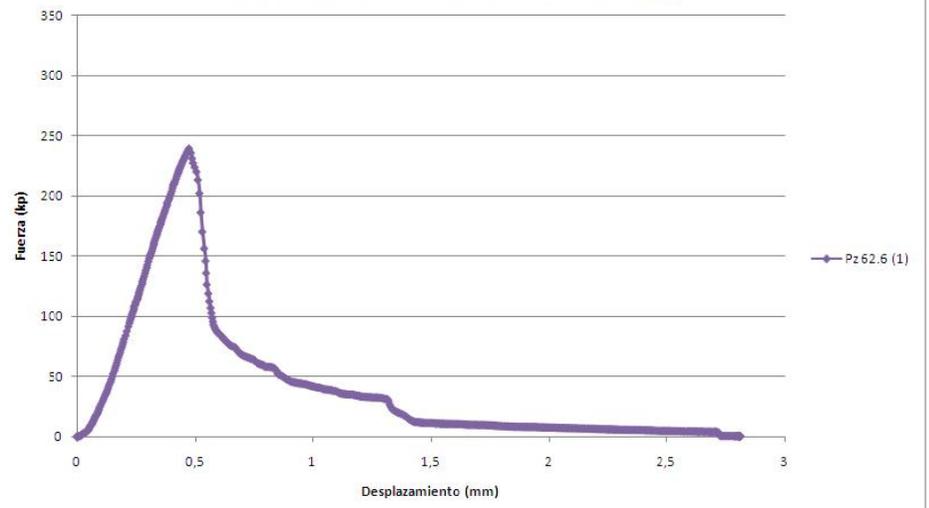
Muestras de 130 mm de espesor - B (II)



Muestras de 130 mm de espesor - C (I)



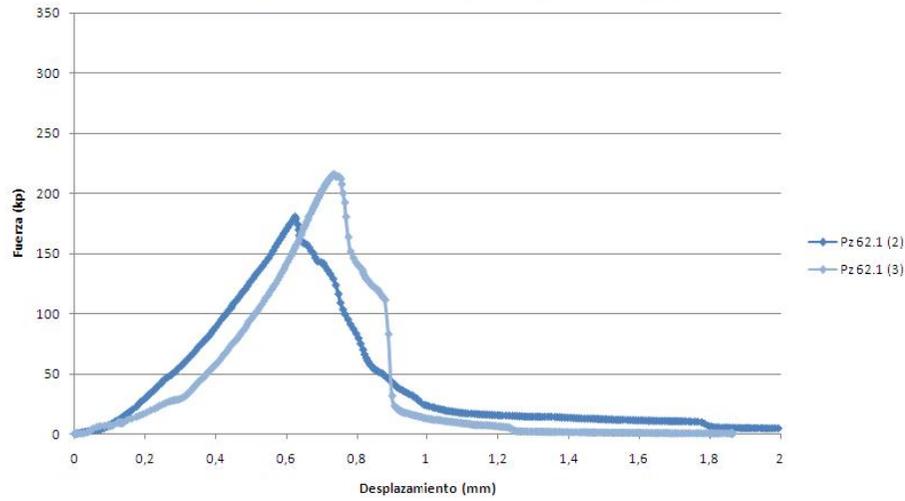
Muestras de 130 mm de espesor - C (II)



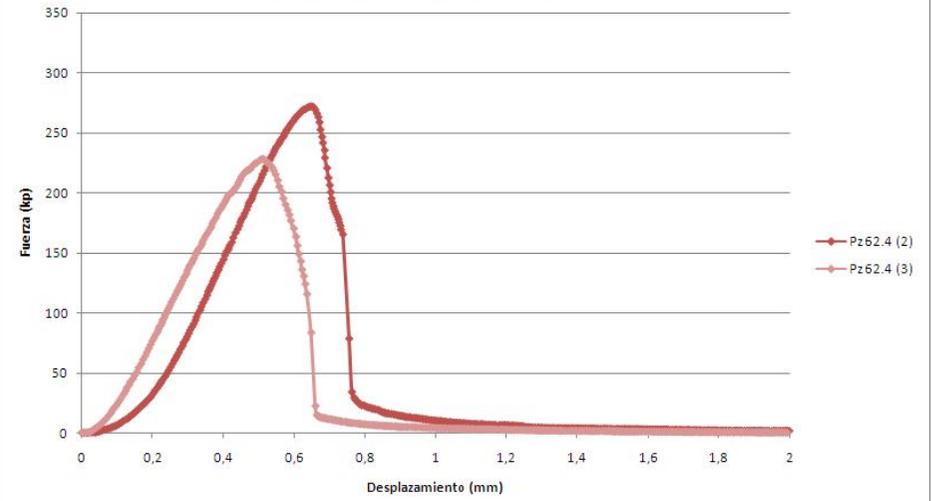


PIZARRAS BUENAS (Pz 62) – ESPESOR 65 mm

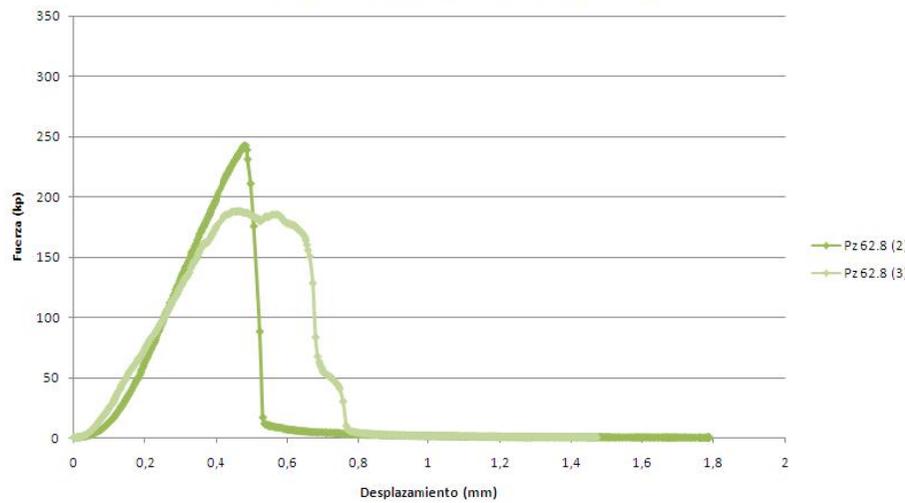
Muestras de 65 mm de espesor - B (I)



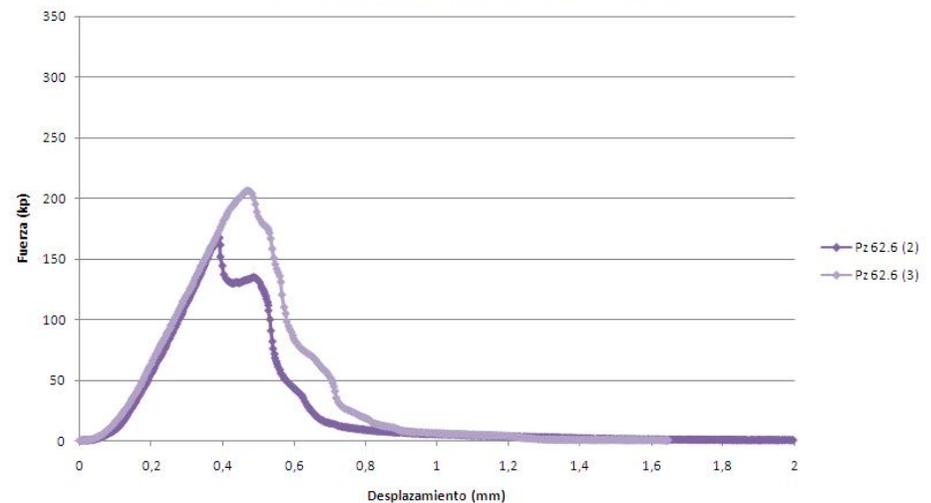
Muestras de 65 mm de espesor - B (II)



Muestras de 65 mm de espesor - C (I)



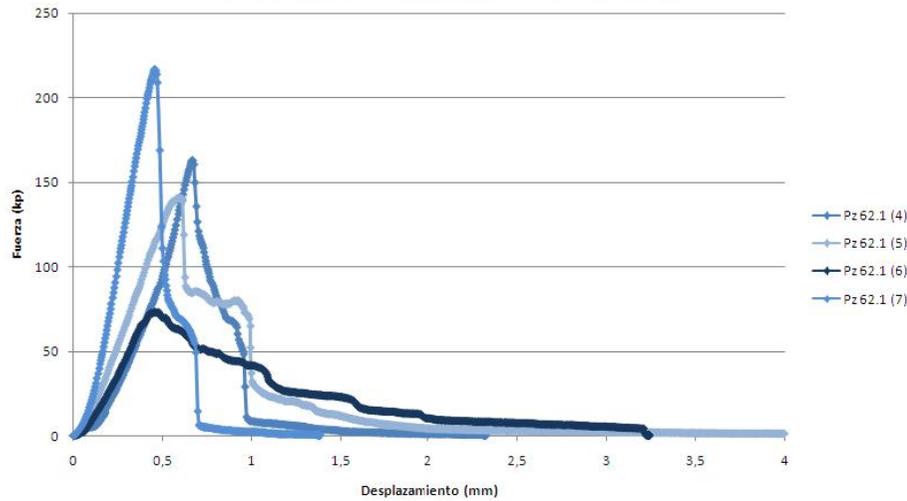
Muestras de 65 mm de espesor - C (II)



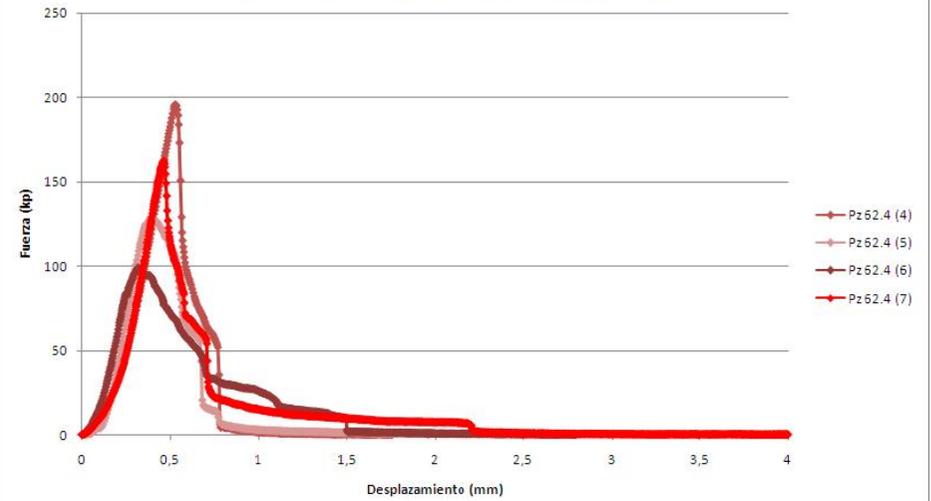


PIZARRAS BUENAS (Pz 62) – ESPESOR 32,5 mm

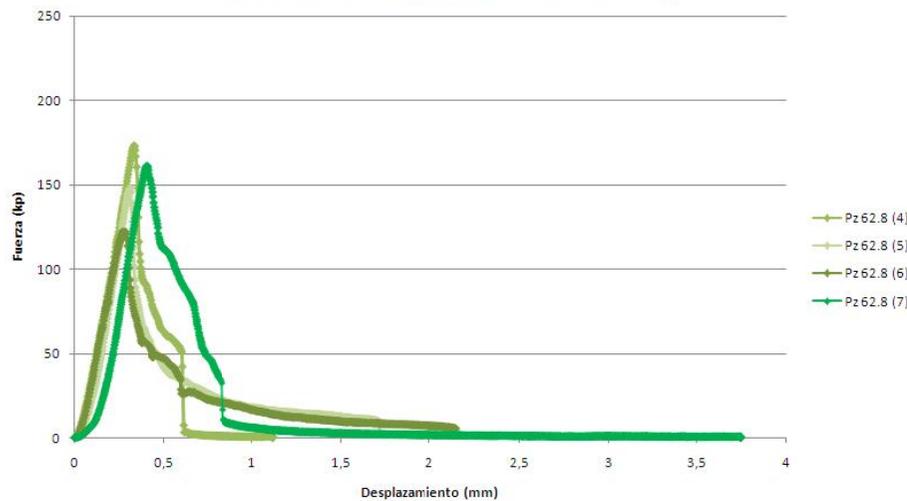
Muestras de 32,5 mm de espesor - B (I)



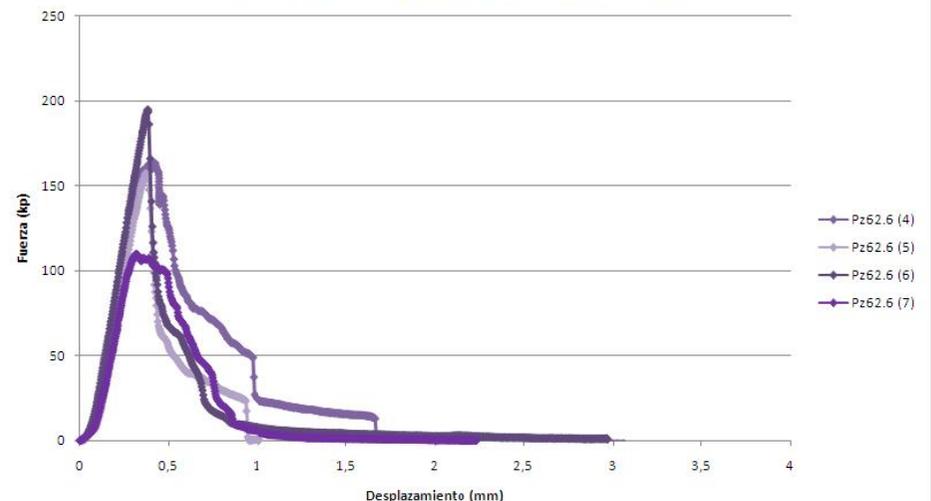
Muestras de 32,5 mm de espesor - B (II)



Muestras de 32,5 mm de espesor - C (I)



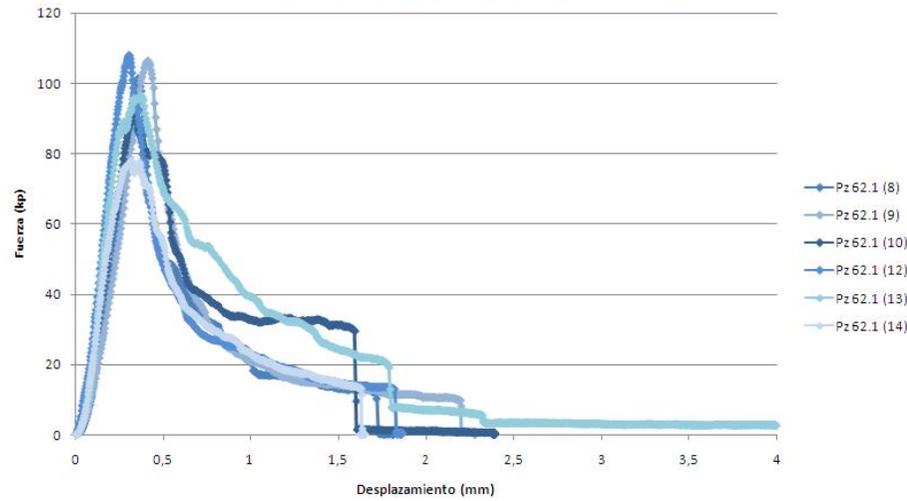
Muestras de 32,5 mm de espesor - C (II)



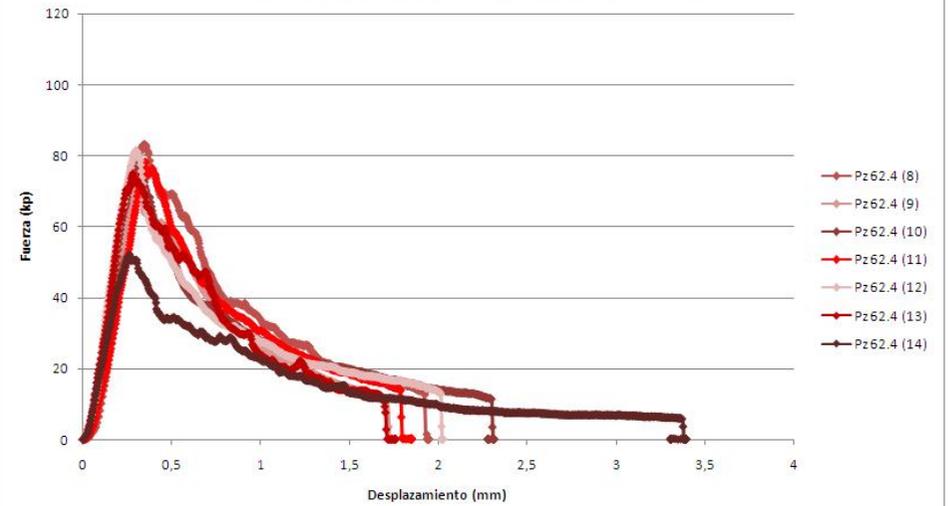


PIZARRAS BUENAS (Pz 62) – ESPESOR 16,25 mm

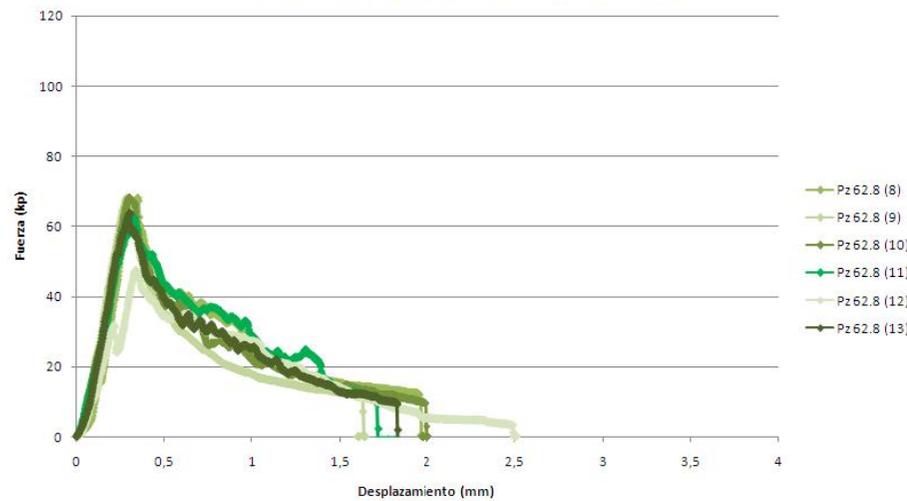
Muestras de 16,25 mm de espesor - B (I)



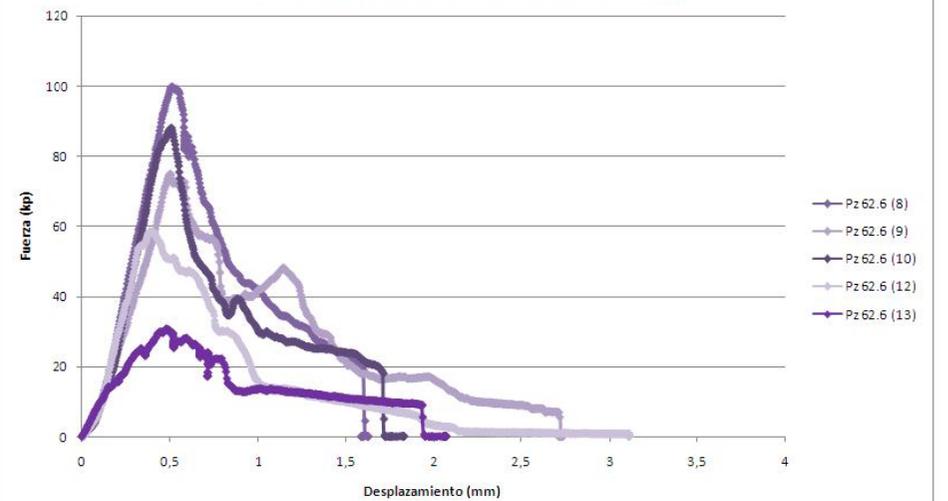
Muestras de 16,25 mm de espesor - B (II)



Muestras de 16,25 mm de espesor - C (I)



Muestras de 16,25 mm de espesor - C (II)



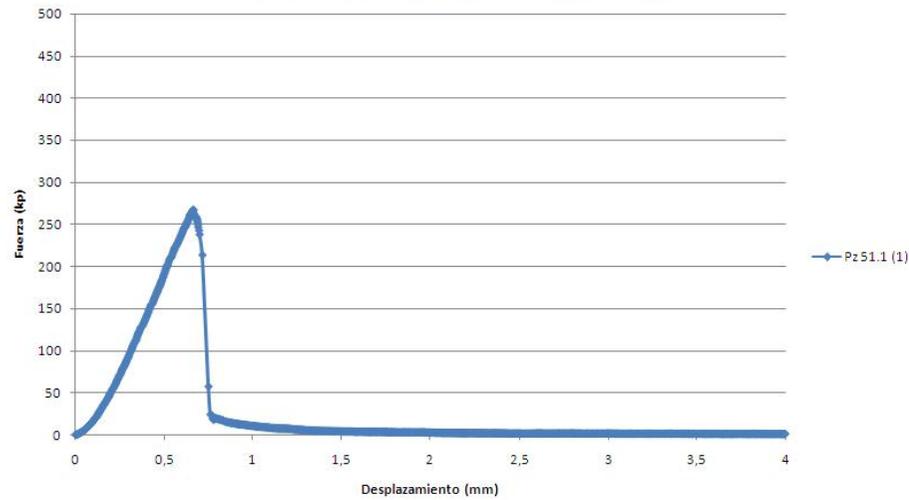


MUESTRAS PIZARRA MALA



PIZARRAS MALAS (Pz 57) – ESPESOR 160 mm

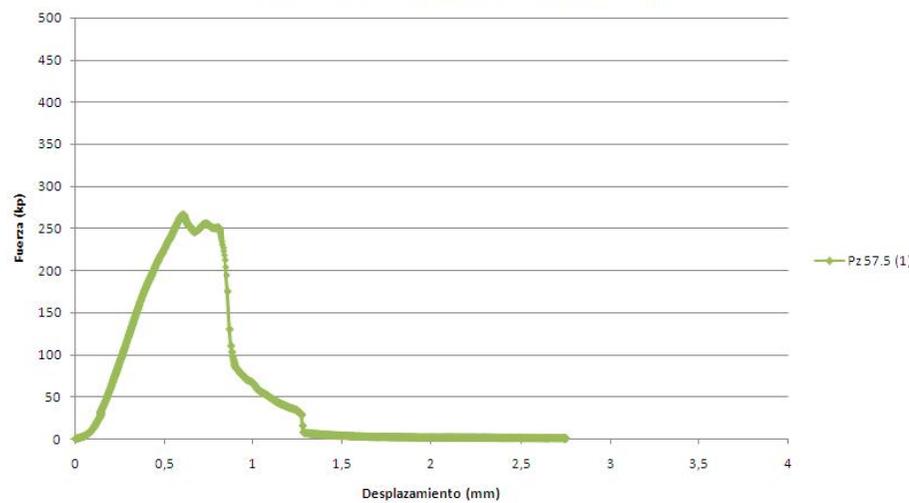
Muestras de 160 mm de espesor - B (I)



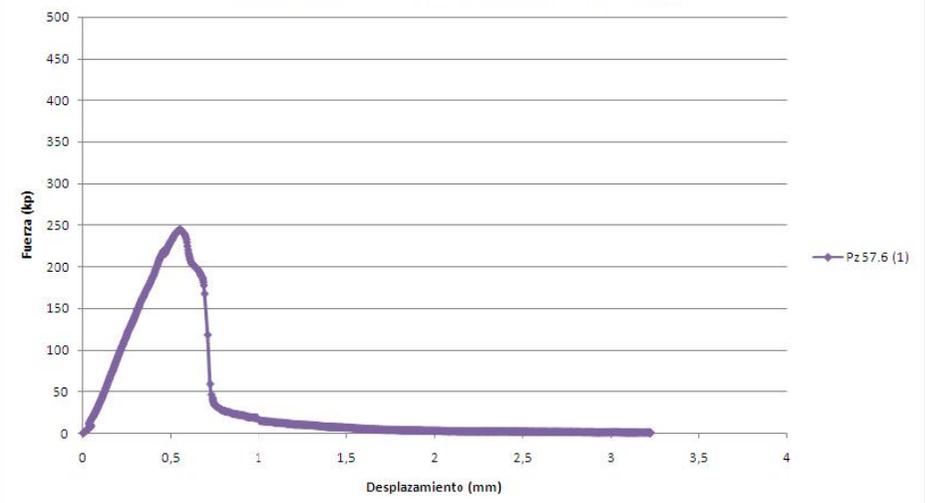
Muestras de 160 mm de espesor - B (II)



Muestras de 160 mm de espesor - C (I)



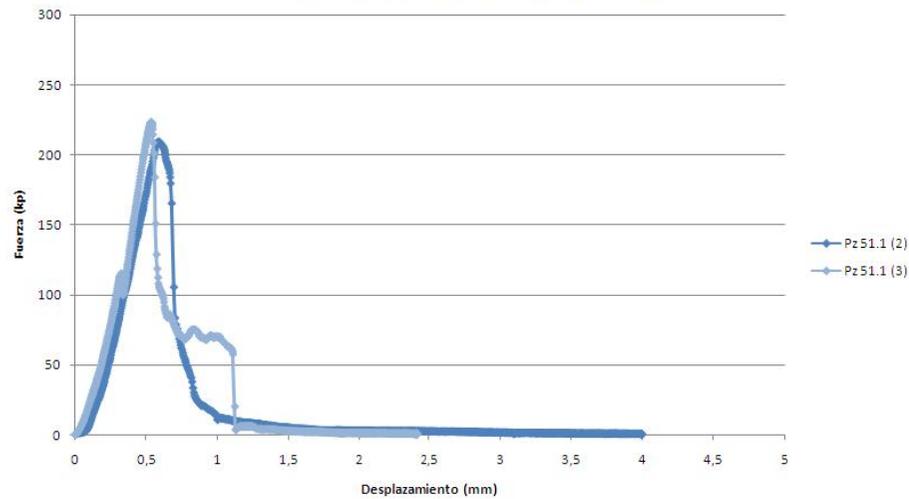
Muestras de 125 mm de espesor - C (II)



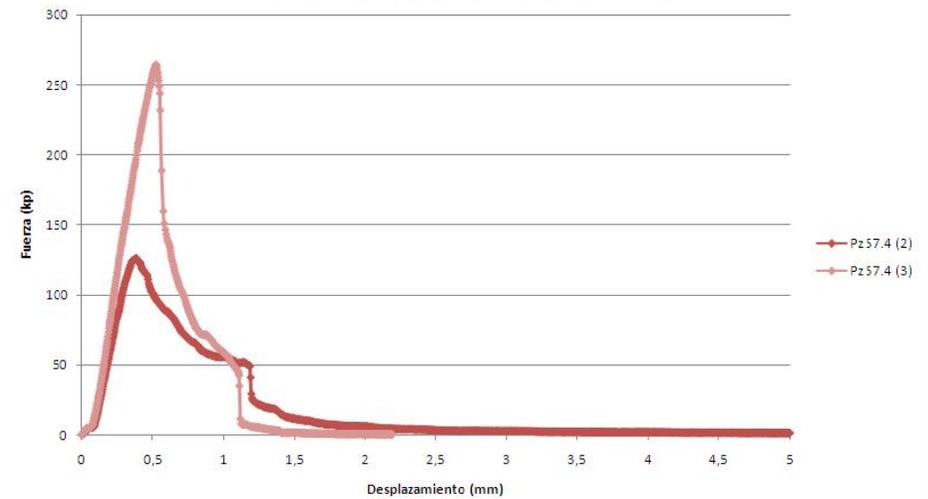


PIZARRAS MALAS (Pz 57) – ESPESOR 80 mm

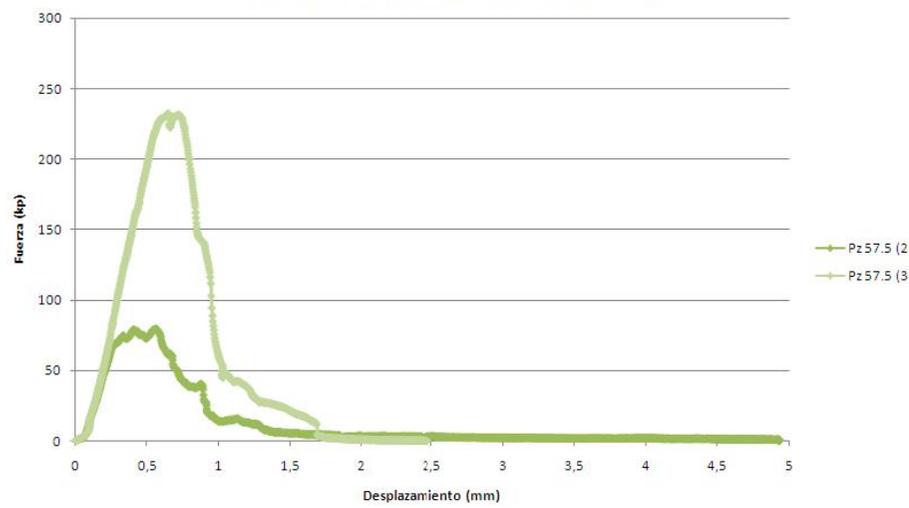
Muestras de 80 mm de espesor - B (I)



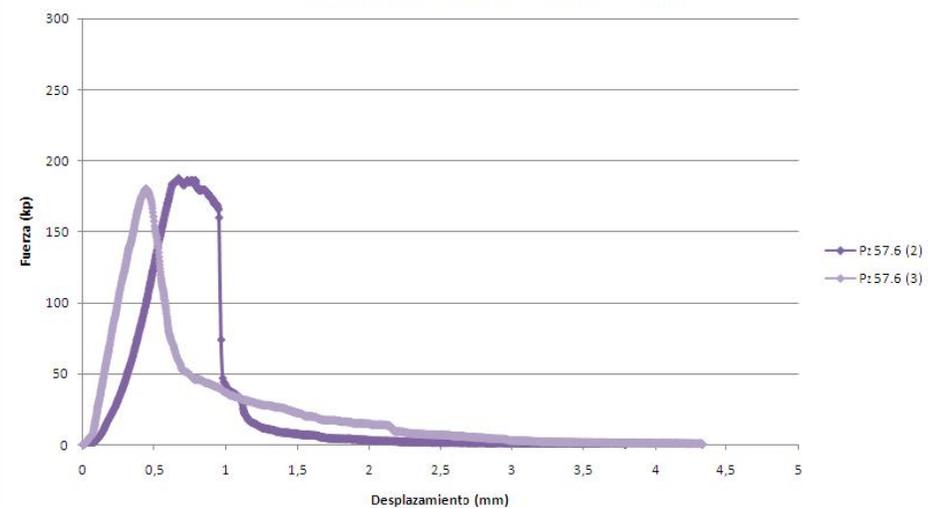
Muestras de 80 mm de espesor - B (II)



Muestras de 80 mm de espesor - C (I)



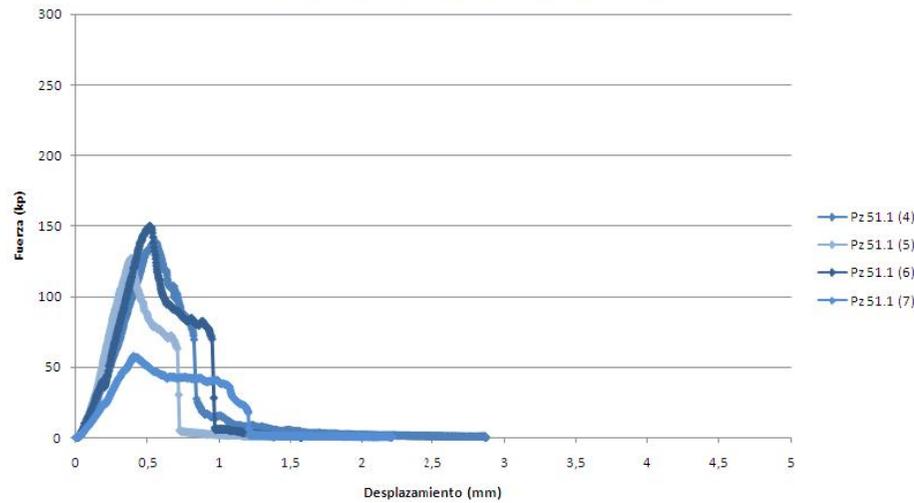
Muestras de 62,5 mm de espesor - C (II)



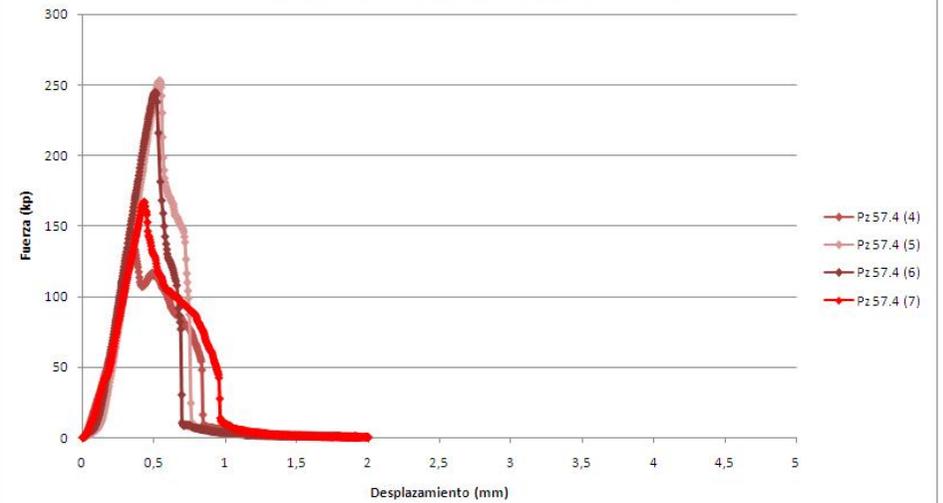


PIZARRAS MALAS (Pz 57) – ESPESOR 40 mm

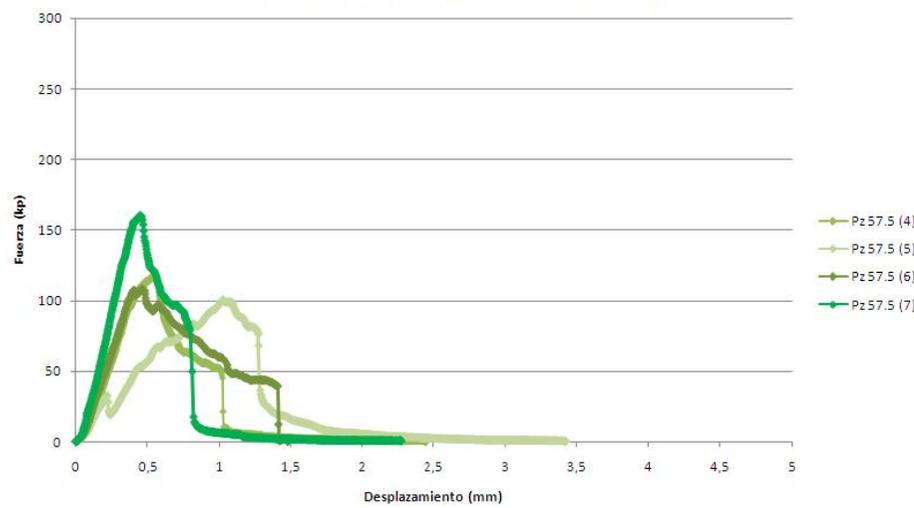
Muestras de 40 mm de espesor - B (I)



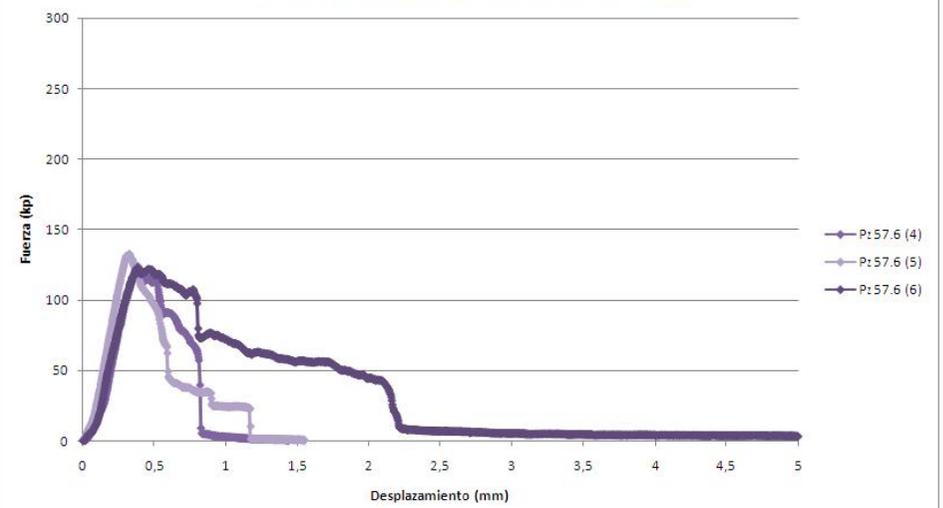
Muestras de 40 mm de espesor - B (II)



Muestras de 40 mm de espesor - C (I)



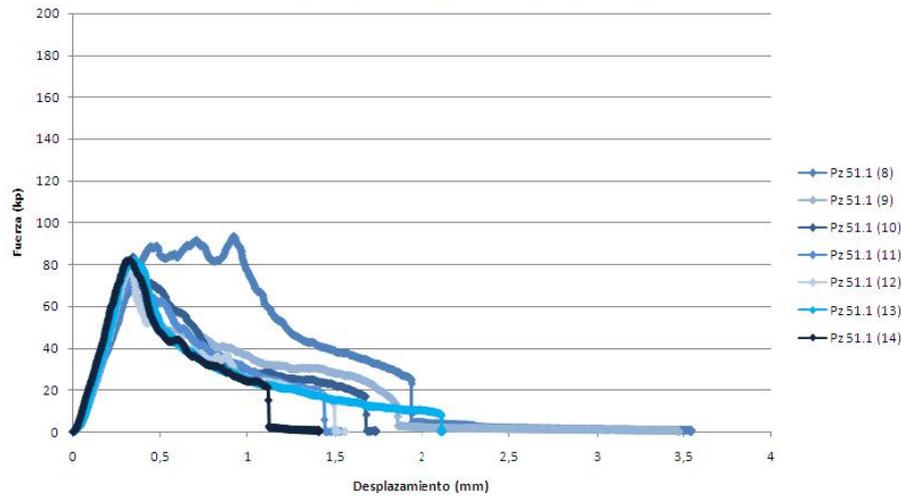
Muestras de 31,25 mm de espesor - C (II)



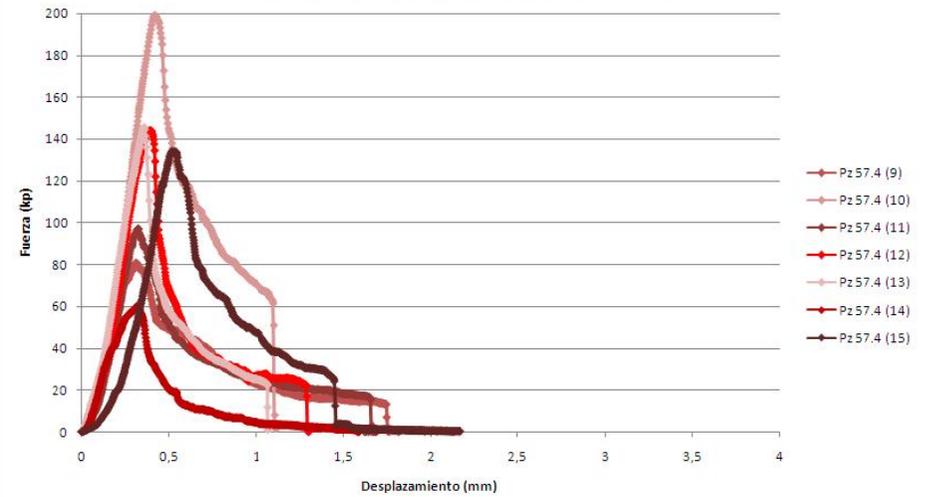


PIZARRAS MALAS (Pz 57) – ESPESOR 20 mm

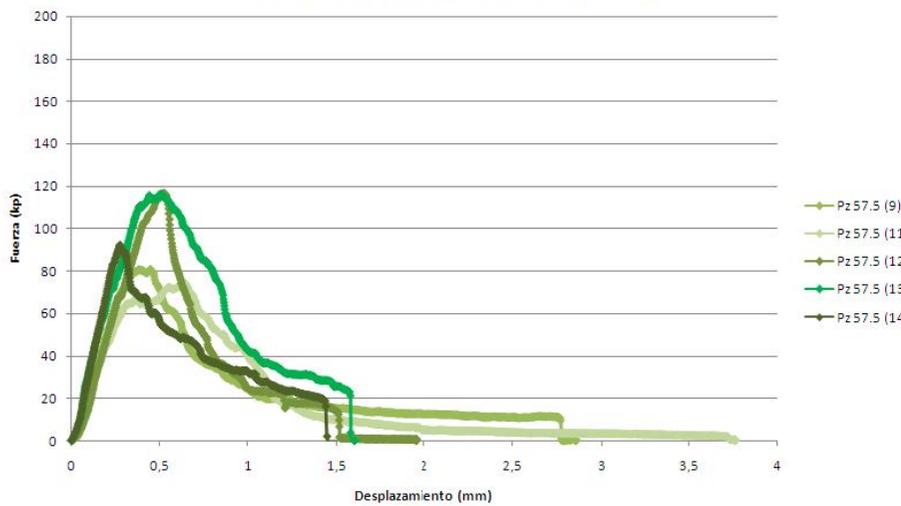
Muestras de 20 mm de espesor - B (I)



Muestras de 20 mm de espesor - B (II)



Muestras de 20 mm de espesor - C (I)



Muestras de 15,625 mm de espesor - C (II)

